



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“CONSIDERACIONES EN EL ANÁLISIS Y
DISEÑO DE TRIDILOSAS”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
I N G E N I E R O C I V I L
P R E S E N T A :
SERGIO ADRIÁN PONCE PACHECO



ASESOR: M. I. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ

MÉXICO, D. F.

2005



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/124/03

Señor
SERGIO ADRIAN PONCE PACHECO
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. OCTAVIO GARCÍA DOMINGUEZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.


"CONSIDERACIONES EN EL ANALISIS Y DISEÑO DE TRIDILOSAS"

- INTRODUCCION
- I ESTRUCTURAS ESPACIALES
- II SISTEMA DE TRIDILOSA
- III ANALISIS DE TRIDILOSAS
- IV DISEÑO DE TRIDILOSAS
- V PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS
- VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 14 Noviembre 2003.
EL DIRECTOR.


M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/AJP/crc.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/124/03

M.I. OCTAVIO GARCIA DOMINGUEZ
Presente

El señor SERGIO ADRIAN PONCE PACHECO de la carrera de INGENIERO CIVIL, me ha solicitado designar al profesor que le señale Tema de Tesis para su Examen Profesional.

En atención a esa solicitud ruego a usted se sirva formular el Tema solicitado y enviarlo a esta Dirección para comunicarlo oficialmente al interesado.

Doy a usted de antemano las más cumplidas gracias por su atención y le reitero las seguridades de mi consideración más distinguida.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 14 Noviembre 2003.
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB/AJP*cr.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA CIVIL,
TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA

OFICIO FING/DCTG/SEAC/UTIT/124/03

ASUNTO: Solicitud de Jurado para
Examen Profesional.

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
DIRECTOR
FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
Presente.

El señor **SERGIO ADRIÁN PONCE PACHECO**, registrado en esta facultad con el número de cuenta 09561470-2, en la carrera de **INGENIERO CIVIL**, quien ha cubierto los requisitos académicos necesarios para realizar sus trámites de Examen Profesional, le solicita atentamente autorice el siguiente jurado:

ASIGNACIÓN	NOMBRE	R.F.C
PRESIDENTE:	ING. JOSÉ PIÑA GARZA	PIGJ-380319-A6A
VOCAL:	M.I. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ	GADO-660629
SECRETARIO:	M.I. JOSÉ FRANCISCO TÉLLEZ GRANADOS	TEGF-440422
1er. SUPLENTE:	M.I. ALBA BEATRIZ VÁZQUEZ GONZÁLEZ	VAGA-630702
2do SUPLENTE:	M.I. REGINALDO ROMERO HERNÁNDEZ	HERR-660217

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, a 2 de julio de 2004.
EL JEFE DE LA DIVISIÓN

ENTERADO

DR. ALBERTO JAIME P.

AJP/MTH/crc

SR. SERGIO ADRIÁN PONCE PACHECO

EP-4

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por todas las cosas que me ha dado y el haberme permitido llegar hasta el día de hoy.

A mis padres, porque sin ustedes no hubiera hecho nada.

A mi madre, por su amor, apoyo, confianza y ejemplo que siempre bajo cualquier situación me ha brindado, y me ha enseñado a seguir adelante aún en momentos difíciles, esto es gracias a tí.

A mis hermanos, por su amistad y cariño que siempre me han brindado.

A mis abuelos, tíos, primos, que con sus ejemplos y consejos que me han brindado durante mi vida, me han ayudado a llegar al día de hoy.

A mis amigos, quienes desinteresadamente me han brindado su apoyo y amistad en momentos buenos y malos durante la vida, sabiendo que las verdaderas amistades no se basan en palabras sino en hechos.

Al M. I. Octavio García Domínguez, quien me brindo su apoyo cuando en verdad lo necesitaba y por todos sus consejos, confianza y paciencia para el desarrollo de la presente tesis.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, de los que estaré eternamente agradecido por la formación profesional recibida.

A todos mis profesores que han contribuido con sus conocimientos en mi desarrollo escolar, desde primaria.

A todas las personas que me han dado la mano y brindado su amistad, que de manera directa o indirecta me ayudaron en este largo y sinuoso camino.

INDICE

INTRODUCCIÓN.	3
1 ESTRUCTURAS ESPACIALES.	5
1.1 ANTECEDENTES.	6
1.2 PRINCIPALES TIPOS DE ESTRUCTURAS ESPACIALES.	9
1.2.1 ENTRAMADOS.	10
1.2.1.1. CUPULAS DE ENTRAMADO.	11
1.2.1.2. BÓVEDAS DE CAÑÓN.	14
1.2.1.3. RETICULADOS DE DOS CAPAS.	17
1.2.1.3.1 TIPOS Y FORMAS DE RETICULADO.	19
1.2.2 ESTRUCTURAS LAMINARES.	23
1.2.3 CUBIERTAS COLGANTES.	25
2 SISTEMA DE TRIDILOSA.	27
2.1 MATERIALES UTILIZADOS.	31
2.2 GEOMETRIA.	32
2.3 COMPONENTES.	34
2.4 TIPOS DE CONEXIONES.	36
2.4.1 CONEXIONES POR NUDOS.	36
2.4.1.1 NUDO TRIODETIC.	37
2.4.1.2 NUDO SEGMO.	38
2.4.1.3 NUDO TUBACCORD.	38
2.4.1.4 NUDO BEGUE.	39
2.4.1.5 NUDO BEGUE-KIEFFER.	39
2.4.1.6 NUDO DELACROIX-GLOTIN-MONIER-SEJOURNET. ...	40
2.4.1.7 NUDO SARTON.	40
2.4.1.8 NUDO KIEFFER.	41
2.4.1.9 NUDO ESFERICO.	41
2.4.1.10 NUDO BITUBULAR.	41
2.4.1.11 NUDO TESEP.	42
2.4.1.12 NUDO UNISTRUT.	42
2.4.1.13 NUDO MERO.	43
2.4.1.14 NUDO TRIDIMATEC.	43

2.4.1.15 NUDO PIRAMITEC.	44
2.4.1.16 NUDO OKTOPLATTE.	44
2.4.1.17 NUDO CASTELAO.	44
2.4.2 CONEXIONES DE SOLDADURA.	45
2.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS.	48
3 ANÁLISIS DE TRIDILOSAS.	51
3.1 PREDISEÑO.	51
3.2 MÉTODOS DE ANÁLISIS.	53
3.2.1 MÉTODO DE ELEMENTO FINITO.	54
3.2.2 MÉTODO MATRICIAL.	56
3.2.2.1 PROGRAMA DE ANALISIS "TRIDI".	61
3.2.3 TEORIA DE LOSA SÁNDWICH.	70
3.2.4 TEORIA DE LOSA ORTOTROPICA EQUIVALENTE.	70
4 DISEÑO DE TRIDILOSAS.	71
5 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.	81
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	87
7 BIBLIOGRAFÍA.	91

INTRODUCCIÓN

El sistema de piso es parte esencial en cualquier edificación, utilizado para crear una superficie en la que se pueda aprovechar el espacio que hay sobre y debajo de él, como en el caso de entresijos de edificios, cubiertas de naves industriales, puentes, etc. Las cargas pueden actuar de forma perpendicular a su plano como en el caso de losas horizontales, y en ocasiones actuando de forma inclinadas para el caso de losas con pendiente pronunciada.

Considerando que hay múltiples y variados sistemas de piso en la actualidad, es importante diseñar estructuras que permitan un ahorro de recursos materiales, humanos, y económicos, permitiendo una distribución más eficiente de los sistemas de piso y en conjunto de toda una estructura para el buen comportamiento ante las solicitaciones más importantes a considerar en el diseño.

Dependiendo del espacio a cubrir, existen varias formas de lograr un diseño económico y racional. En este trabajo, se pretende dar atención al sistema de piso espacial denominado "Tridilosa", considerándolo como una alternativa aceptable en la construcción de sistemas de piso de claros grandes y poco peso relativo a otros sistemas convencionales, por lo que se dan algunas consideraciones para el análisis y diseño de este sistema de piso; además puede ser usado en superestructuras de puentes y en cubiertas, aunque en este trabajo su estudio está enfocado mas como sistema de piso.

Formada básicamente por una triodésica (estructura espacial) y una cubierta (concreto), la Tridilosa trabaja de manera conjunta; en esta tesis se presentan aspectos de antecedentes sobre estructuras espaciales, las formas del sistema Tridilosa, su análisis, diseño, construcción, ventajas y desventajas en su utilización. Aunque no es de uso generalizado puede ser una opción aceptable para un sistema de piso que demanda claros considerables.

La Tridilosa está constituida por 2 lechos de mallas o retículas, una superior y otra inferior, unidas por diagonales. Comúnmente el lecho superior está embebido en concreto y en algunas ocasiones también lo está el lecho inferior. El lecho superior y el concreto tienen la función de resistir los esfuerzos de compresión, mientras que el lecho inferior, los esfuerzos de tensión; las diagonales transmiten las fuerzas cortantes.

Basado en la concepción de una estructura espacial, este tipo de sistema puede representar grandes ventajas en su aplicación, sin olvidar, que como toda estructura, requiere de una buena calidad en la construcción y el mantenimiento preventivo, para así lograr una estructuración aceptable como sistema de piso.

El sistema requiere cierta capacidad de prefabricación en taller, donde demanda supervisión especializada; la construcción en sitio, se requiere un control de calidad en el armado e izado de la estructura misma, así como de la revisión de los nudos, y el buen funcionamiento de estos en las partes donde estarán

embebidos en concreto, para así garantizar un trabajo en conjunto que haga posible mantener el estado idóneo del sistema.

En este trabajo se presentan aspectos teóricos para la conceptualización del diseño estructural del sistema, de tal manera que puedan ayudar en la elección del sistema de piso que se pretenda dar en una estructura.

En el Capítulo 1, se da una breve introducción a las estructuras espaciales, reseña histórica sobre su tratado y avances a través del tiempo, tomando como referencia la historia del análisis estructural, parte importante para el estudio de todo tipo de estructuras.

Como una introducción al sistema estructural Tridilosa, en el Capítulo 2 se tratan aspectos de los materiales, geometría, componentes, así como tipos de nudos patentados utilizados en las mallas espaciales y que pueden servir en la idealización del sistema de piso Tridilosa.

Con algunas relaciones geométricas promedio para el prediseño, el Capítulo 3 hace referencia al análisis estructural de este sistema, destacando el avance de los sistemas computacionales basados en el método matricial, como el método de rigideces, de tal forma que se presenta un ejemplo comparativo entre un programa comercial y un programa elaborado en Fortran, además de que se presentan algunas opciones de métodos de análisis diferentes.

Siendo el diseño parte importante de toda construcción, ya que da forma definitiva a los elementos componentes, el Capítulo 4 trata el dimensionamiento del sistema Tridilosa, tomando en cuenta los materiales que componen, la forma en que trabajan los elementos y la relación con el análisis estructural.

El Capítulo 5 trata algunas consideraciones en el procedimiento constructivo, descrito en etapas, desde el diseño, fabricación de los componentes metálicos, armado de la parrilla, montaje, nivelación y colado de losa.

Por último, el Capítulo 6 se dedica a conclusiones y recomendaciones obtenidas de la elaboración del presente trabajo.

1. ESTRUCTURAS ESPACIALES

En la concepción de nuevas obras de infraestructura, es necesaria la utilización de estructuras, estas pueden concebirse como un sistema o un conjunto de partes que trabajan para cumplir con una función, como el salvar claros, comunicar, contener, encerrar, etc. El desempeño de la estructura debe cumplir con ciertos requisitos de seguridad, confiabilidad, economía además de satisfacer exigencias estéticas. Al diseñar una estructura para satisfacer determinada función se deben satisfacer determinados factores, la forma estructural, tipo de materiales, dimensiones, de aquí el problema de que el dimensionamiento requiere de mayor información para tomar la decisión del tipo de estructura que será la más adecuada, así como las características para tener un grado de seguridad razonable y un comportamiento adecuado. Es de vital importancia conocer bajo que solicitaciones estará sujeto el elemento estructural, o sistema estructural, dentro de que pueden ser, peso propio, cargas vivas, cambios de temperatura, hundimientos diferenciales, y así, las respuestas ante este tipo de acciones se reflejara en su comportamiento, que puede expresarse como deformación, agrietamiento, durabilidad, vibración etc.

$$[\text{Acción}] \Rightarrow \left[\begin{array}{l} \text{Elemento de ciertas} \\ \text{Características} \end{array} \right] \Rightarrow [\text{Respuesta}]$$

El estudio de los diferentes tipos de estructuras nos da el conocimiento del comportamiento ante las acciones, de esta manera las estructuras utilizadas deben de tener una preferencia razonable y consecuentemente un análisis sobre el comportamiento de los efectos producidos y las consideraciones tomadas para una buena estructuración de la obra afín.

Hablando sobre las estructuras para salvar claros, los ingenieros y arquitectos han utilizado soluciones a base de estructura ligera, dentro de las cuales están las armaduras; estas transmiten las fuerzas externas axialmente por sus elementos (**Barras**) a sus puntos de unión (**Nudos**); la disposición correcta de estos elementos logra reducir el peso de la obra, lo cual no ocurriría, si está se construyera con elementos de alma maciza, por lo cual su diseño crítico generalmente es contra viento y no contra sismo, al reducir su propio peso.

A diferencia de las cubiertas en las que solo se pretende cubrir la parte inferior de estas, los sistemas de piso tienen la funcionalidad de cubrir un espacio y además aprovechar la techumbre como piso, es por eso que para la elección de un sistema de piso se tienen que analizar los siguientes aspectos:

- **Funcionalidad:** Satisfacer demandas de funcionalidad, condiciones de servicio (intemperismo, vibración, deflexiones) y mantenimiento (anticipar detalles adaptables, reparaciones eventuales, pendiente adecuada canaletas, flexibilidad en la planeación, muros de carga, columnas).

- **Estructural:** Resistencia (cargas muertas, cargas vivas, usos futuros, claro y peralte del piso) capacidad de servicio (deflexiones, durabilidad, resistencia al fuego).
- **Constructivo:** Construcción del piso, in situ, precolado, compuesto, disponibilidad de materiales de construcción, restricciones de acceso, cimbra, obra falsa y equipo necesario, juntas en losas de concreto, juntas de control, juntas de aislamiento, juntas de construcción.
- **Económico:** El tiempo ocioso resulta más caro que los materiales, por lo que se necesitan contar con la tabulación actualizada de los precios de los elementos de construcción que intervienen en un sistema de piso para evitar demoras.
- **Arquitectónico:** Aspecto visual, iluminación Aislamiento fónico, Orientación.

1.1. ANTECEDENTES

Tomando arbitrariamente una clasificación, las estructuras pueden dividirse en dos grupos principales en función de la forma de transmitir cargas:

- a) **Estructuras de cascaron**, hechas principalmente de placas o laminas tanques de almacenamiento, silos, aeroplanos, cubiertas (Fig. 1.1).
- b) **Estructuras reticulares**, Las cuales se caracterizan por estar constituidas de conjuntos de miembros alargados, tales como armaduras, marcos rígidos, traveses, tetraedros o estructuras reticuladas tridimensionales (Fig. 1.2).



Fig. 1.1. Ejemplo de Estructura de Cascarón



Fig. 1. 2. Ejemplo de Estructura Reticular

En las estructuras de cascaron, las placas o laminas desempeñan simultáneamente dos papeles, como parte esencial de funcionalidad y de transmisión de carga, en cambio, en estructuras reticulares los elementos principales se usan para la transmisión de carga solamente, obligando a colocar elementos adicionales. Las estructuras de cascarón, no han sido empleadas en estructuras metálicas, debido a varios factores como: la economía en el peso de la estructura es efectiva solo para ciertas condiciones, los ahorros en peso pueden ser correspondientes a aumentos en los costos de construcción, el empleo de este tipo de estructuras repercutiría en una reorganización y renovación del equipo. Estos factores se resuelven con estructuras reticulares metálicas. Dentro de estas últimas se encuentran las estructuras espaciales, que se refieren a aquellas clases de estructuras que resisten la aplicación de las cargas mediante la acción estructural simultánea en diversas direcciones, que son estables bajo cualquier sistema de carga. Estas a su vez pueden ser articuladas o rígidas en sus conexiones, o también una combinación de estas. La mayoría de las estructuras espaciales se analizan suponiendo juntas articuladas, siendo la flexión un efecto secundario.

Una definición de armadura espacial seria la siguiente:

“La armadura espacial es un armazón estructural tridimensional, hecho con barras rectas conectadas entre si por medio de articulaciones sin fricción, en forma tal que es estable y capaz de resistir fuerzas aplicadas en cualquier dirección”, por lo que la transmisión de esfuerzos es tridimensional.

En las estructuras espaciales se tiene un alto grado de hiperestaticidad, por lo que en el análisis es necesario hacer varias suposiciones iniciales en relación al tamaño de los miembros, para después ajustar a los tamaños verdaderos que resistan las condiciones de carga a la que se va a exponer. Dependiendo de lo acertado de las suposiciones, serán necesarios uno o más análisis.

En 1837 Möbius inició la teoría general de los sistemas tridimensionales y determinó el número requerido de barras para que una armadura tridimensional sea estable, discutiendo las formas críticas de estas. Pero permaneció virtualmente desconocido para los ingenieros, por lo que la teoría de las armaduras espaciales se desarrollo independientemente.

Uno de los individuos más sobresalientes en el desarrollo de la teoría de las armaduras espaciales fue Augusto Föppl (1892), el cual considero tópicos importantes relacionados a las armaduras espaciales, que han servido de base para trabajos posteriores. En su artículo “armaduras en el espacio” enuncia la “ley de estabilidad de las armaduras espaciales”, de la siguiente forma: Una armadura espacial es estáticamente determinada y estable, cuando entre el número N de nodos y el número B de barras se llena la condición: $B = 3N - 6$. Las armaduras espaciales se forman más completamente con triángulos rectángulos o equiláteros de tal forma que se produzcan poliedros regulares en forma de tetraedros cubos, octaedros y cuboctaedros o parte de ellos; el largo de las barras de los poliedros, forma una progresión geométrica de crecimiento natural con el factor $\sqrt{2}$.

Schwyzer (1920) originó el método de la analogía con la placa para el análisis de este tipo de estructuras, ampliado y publicado por Stüssi investigando además las armaduras curvas y las trabes-armaduras espaciales esviajadas. Holloway y Gillespie desarrollaron aun más el método de la analogía de la placa plana y lo aplicaron a estructuras prácticas. Southwell introdujo los coeficientes de tensión en el análisis de estructuras espaciales. Mayor presento una solución de análisis mediante la sustitución de las fuerzas de la estructura tridimensional, por un sistema de fuerzas coplanares correspondientes, publicado por Constant en EU. La aplicación del Teorema de Castigliano y del principio de Saint Venant a las estructuras espaciales fue ilustrada por Soutwell. Makowski ha recopilado y presentado discusiones generales de los tipos de estructuras espaciales.

En la actualidad existen dos filosofías básicas para el análisis estructural general: El método de las rigideces (o de los desplazamientos) y el de las flexibilidades (o de las fuerzas), cuyas formulaciones básicas de los modelos matemáticos son reciprocas entre si.

La tendencia a tener ambientes controlados en áreas suficientemente grandes demanda cubrir estos espacios, libres de columnas; siendo las posibilidades de estructuración variadas, ya sea por marcos y/o armaduras planas o espaciales, siendo estas últimas una buena posibilidad. Para una mayor rigidez de la estructura espacial se disponen dos capas o retículas de elementos unidas entre sí a través del conjunto de barras diagonales, las dos capas pueden ser de configuración diferente entre ellas o iguales, siendo iguales en la mayor parte de los casos, por lo que las más comunes son las tetraédricas formadas por tetraedros ensamblados que dan lugar a dos capas de triángulos equiláteros, o las formadas por pirámides de base cuadrada ensambladas que originan dos capas de cuadrados, donde a veces pueden estar triangulados. Las dos capas pueden ser diferentes entre sí, por ejemplo una capa puede estar formada por triángulos y la otra por hexágonos etc.

Las mallas espaciales proporcionan una excepcional libertad de diseño, una facilidad constructiva basada en la posibilidad de yuxtaposición de unidades prefabricadas cuyo tamaño puede ir desde el simple módulo hasta conjuntos más importantes de módulos y una economía notable de material que redundan en una facilidad de transporte y un costo reducido.

La decisión de usar armaduras espaciales es tomada usualmente por los arquitectos, en colaboración con el ingeniero estructurista, siendo de importancia que los apoyos estén ampliamente espaciados por razones funcionales, lo que da una solución aceptable en el empleo de este tipo de sistema.

Las estructuras espaciales han suscitado un interés en el mundo de la construcción, así, han evolucionado pasando de la construcción tradicional de concepción de sistema en dos dimensiones (**Plana**) a sistemas de tres dimensiones (**Espacial**), presentando ventajas desde el punto de vista técnico y artístico; este tipo de estructuras exigen menos material cuando son bien concebidas y calculadas, por lo que dependiendo de la situación a resolver pueden resultar muy económicas, teniendo así una construcción ligera, donde la cantidad de material utilizado por unidad de potencial funcional se ve disminuido.

1.2. PRINCIPALES TIPOS DE ESTRUCTURAS ESPACIALES

Los diferentes tipos de estructuras en el espacio pueden agruparse en tres categorías principales:

- i) Los entramados
- ii) Las estructuras de láminas metálicas (Construcciones plisadas)
- iii) Construcciones de cubiertas colgantes. (Cubiertas de cables)

En conjunto, el tipo de estructuras espaciales abren el camino a una arquitectura lógica y funcional. El acero se presenta como un material muy económico para la realización de estructuras espaciales, explotando racionalmente sus propiedades.

No es de extrañarse que muchas estructuras concebidas por el hombre sean parecidas a las concebidas por la naturaleza, esto es en parte a la asombrosa ligereza y resistencia de las estructuras naturales posibles a la disposición espacial de sus elementos.

Dentro de los obstáculos que frenaban el desarrollo de estructuras espaciales eran:

- 1.- Dificultades para el cálculo.
- 2.- Dificultades de ensamble en el espacio de elementos a ángulos diferentes.
- 3.- Carencia de materiales adecuados.
- 4.- Dificultades constructivas.

Como toda armadura, la eficacia de las estructuras espaciales reside en la distribución tan amplia como sea factible de las cargas concentradas.

1.2.1. ENTRAMADOS

Un entramado se compone de pilares y vigas principales, formando estructuras portantes, que asumen la carga para el sostenimiento de cubiertas o losas. Sus uniones se denominan nudos, siendo articulados o rígidos. La estabilidad requiere rigidización especial, mediante losas o riostras en los planos de paredes.

Las construcciones de entramado nos liberan en gran parte de proyectar la planta y dimensionamiento de locales, ideales para edificios en que las necesidades de utilización varían. Un armazón o esqueleto portante con rigidez suficiente permite la delimitación de locales que abarcan la superficie total de la obra y cuyo aprovechamiento es ligeramente estorbado por esbeltas columnas.

El sistema de clasificación de las construcciones de entramado resulta muy apropiado para emplear elementos prefabricados en la obra y en el acabado, significando un importante adelanto de la construcción

La unión de 2 reticulados por medio de diagonales produce la formación de entramados espaciales. En estos se dispone de un gran número de elementos unidos por nudos, por lo que las cargas aisladas que actúan no son sostenidas únicamente por el elemento cargado directamente, si no también por otros situados a considerable distancia, lo que genera una distribución mas homogénea de las solicitaciones en el conjunto de la estructura. En el caso de entramados espaciales, son la base de distribución o representación de las estructuras espaciales o mallas espaciales.

Las ventajas constructivas de las estructuras espaciales son conocidas por muchos arquitectos. Consecuencia de ello, ha sido el rápido desarrollo de nuevos tipos de reticulados planos y espaciales ofreciendo numerosas posibilidades de realización.

Dentro de los entramados espaciales ejemplos típicos son:

- Cúpulas de entramado
- Bóvedas de Cañón de entramado
- Reticulados de dos capas

1.2.1.1. CÚPULAS DE ENTRAMADO

Las cúpulas, en lo que se refiere a estructuras de cascarones, son recomendables por su estética y variedad visual, por los costos de construcción que son relativamente bajos, pero exigen una exactitud para proporcionar la superficie alabeada y, consecuentemente, hay dificultad de colocar el concreto. Estas son superficies de revolución respecto a un eje vertical entre las que podemos encontrar: las esféricas, las de un arco de círculo, cónica o esferoide (Fig. 1.3).

Las cúpulas son una de las formas más antiguas de construcción, permite encerrar el máximo espacio con el mínimo de superficie, teniendo forma de doble curvatura. Realizadas en un principio con materiales de mampostería, madera, así como de concreto armado, necesitaban la utilización de cimbra con andamios complicados, aumentando la mano de obra, sin embargo hoy en día se tiene la posibilidad de hacerlas de materiales como el acero.

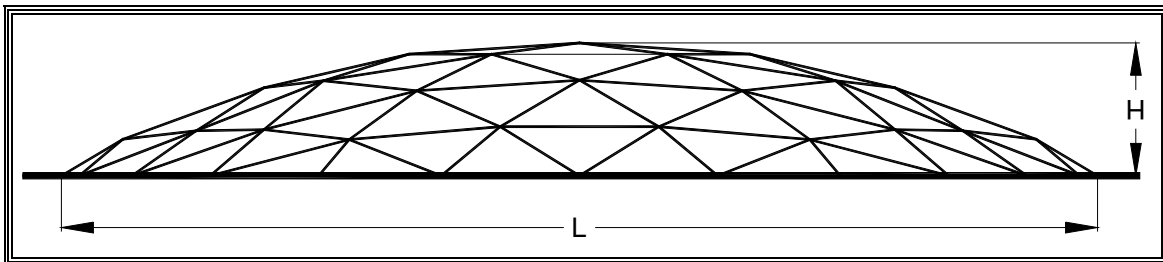


Fig. 1. 3. Cúpula de entramado

Las cúpulas de celosía de acero han sido aceptadas y han sido usadas para grandes dimensiones, están formadas por elementos colocados sobre una superficie de revolución o con piezas rectas cuya intersección está sobre esta superficie, de modo que el espacio interior queda libre. Estas obras son típicas de estructuras tridimensionales y se pueden dividir en las siguientes categorías:

- 1.- Cúpulas de entramado de una capa sustentadas en una superficie de revolución.
- 2.- Cúpulas de entramado de dos capas, están sustentadas en dos capas sobre dos superficies de revolución concéntricas.
- 3.- Cúpulas de entramado con superficie sustentable, el recubrimiento ayuda a la resistencia.

La mayor parte de ellas están formadas por un conjunto de semiarmaduras de celosía, siendo el cordón inferior rectilíneo, y el superior curvo siguiendo la

curvatura a adoptar, aunque en estructuras con claros muy grandes ambos cordones van curvos siguiendo la estructura adoptada, descansando en su parte inferior sobre muros circulares por medio de una articulación y, en el superior, apoyada en un anillo circular de entramado.

En un principio, se utilizaban las cúpulas en forma de semiesfera y los empujes que se transmitían eran mínimos, pero al disminuir la relación flecha-diámetro se presentan fuerzas importantes por lo que los procedimientos de cálculo tienen que ser más precisos.

No solo existen las cúpulas antes mencionadas, si no que además se tienen varias formas de cúpulas de entramado, por lo que se pueden mencionar algunas formas siguientes:

- Nervadas, compuestas por nervios radiales unidos en la parte superior de la cúpula (central) que descansan sobre los apoyos con refuerzo o sin él (Articuladas o empotradas) contrarrestando los esfuerzos con un anillo de base.
- Schwedler (Fig. 1.5).
- De red, utilizadas para cubrir zonas rectangulares.
- De tipo plano, permite cubrir cualquier tipo de superficie, economizando material, estando estáticamente determinada, conduciendo a una repartición más clara de tensiones.
- Zimmermann, caracterizada por que cada anillo tiene dos veces más vértices que el anillo inmediato superior.
- De nudos rígidos, formada por nervios meridianos y anillos poligonales horizontales unidos rígidamente por soldadura, muy pesada, por lo que resulta de alto costo.
- Laminares, formadas por láminas unidas de forma que constituyan mallas en forma de rombo.
- Kiewitt.
- De reticulado de dos y tres direcciones, compuesta por una serie de nervios en arcos ensamblados entre sí para formar un reticulado espacial.
- Geodésicas, forma particular del entramado triangular, red triangular de barras.

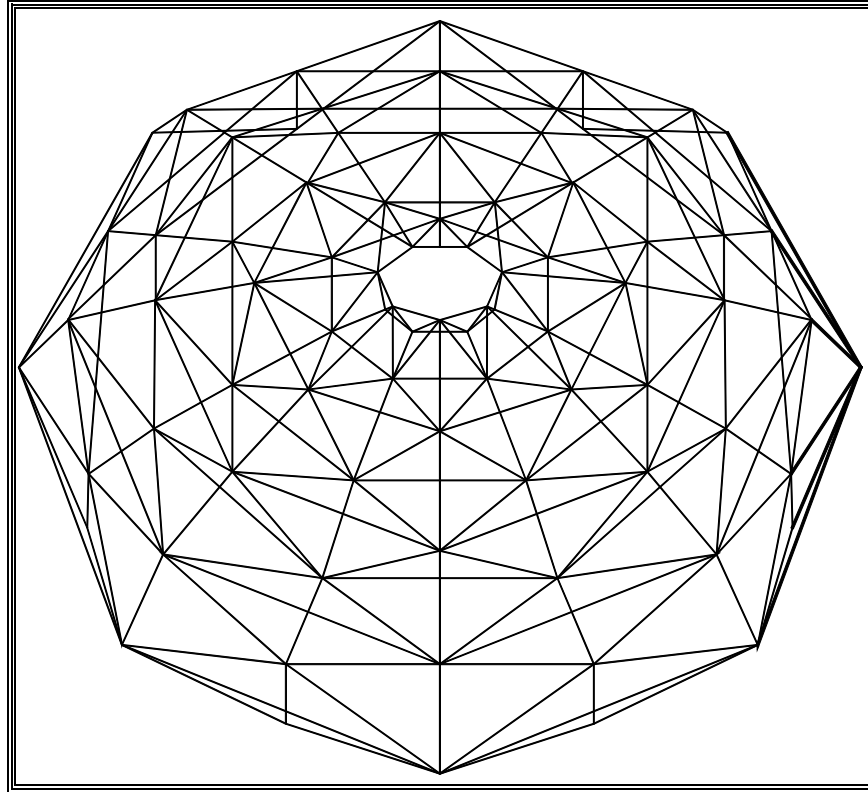


Fig. 1. 4. Cúpula de 2 capas

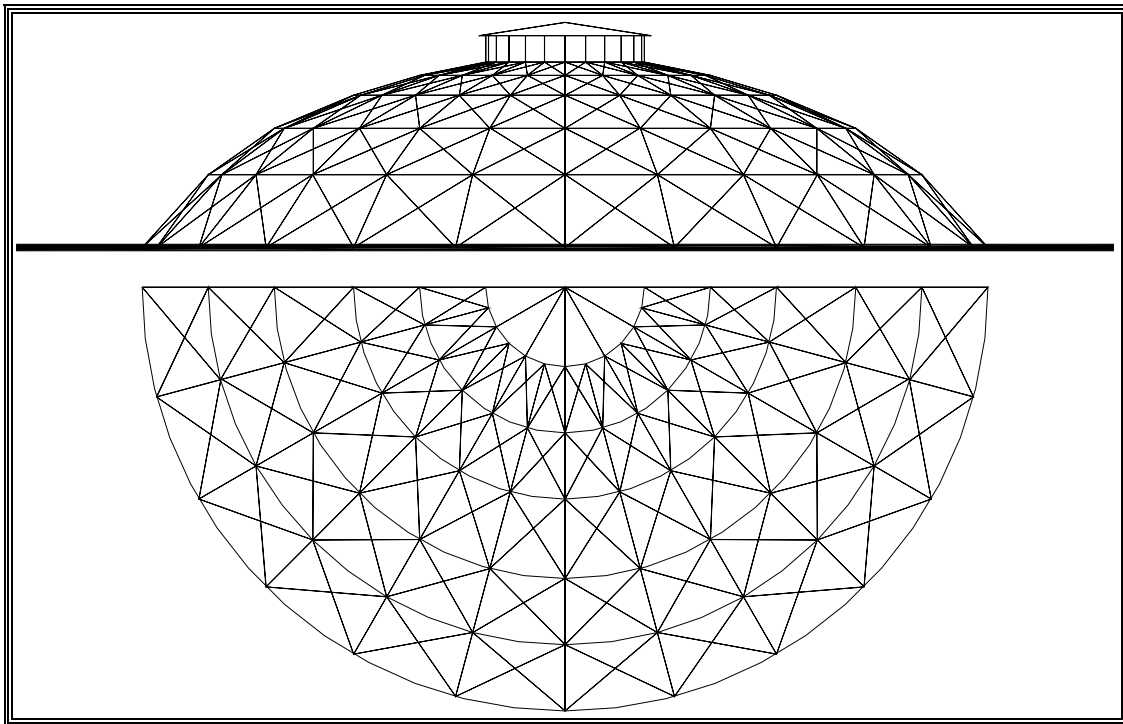


Fig. 1. 5. Cúpula Schwedler

1.2.1.2. BÓVEDAS DE CAÑÓN

Las bóvedas de cañón de concreto son muy utilizadas por sus variables posibilidades, aunque también tienen desventajas como la lentitud de ejecución, complicación de la cimbra entre otras, por esta razón se han propuesto soluciones de este tipo con estructura metálica, bóvedas de cañón de entramado.

Dentro de este tipo de estructuras, las bóvedas de cañón de entramado de acero son las que mejor costo tienen, su estructura es análoga a una delgada vela, formada por red de barras (Fig. 1.6), para lo cual se han ideado dispositivos muy diversos.

Augusto Föppl puso en evidencia las ventajas de este tipo de estructura, contribuyendo a su desarrollo, exponiendo la teoría de las bóvedas de cañón entramado en su libro.

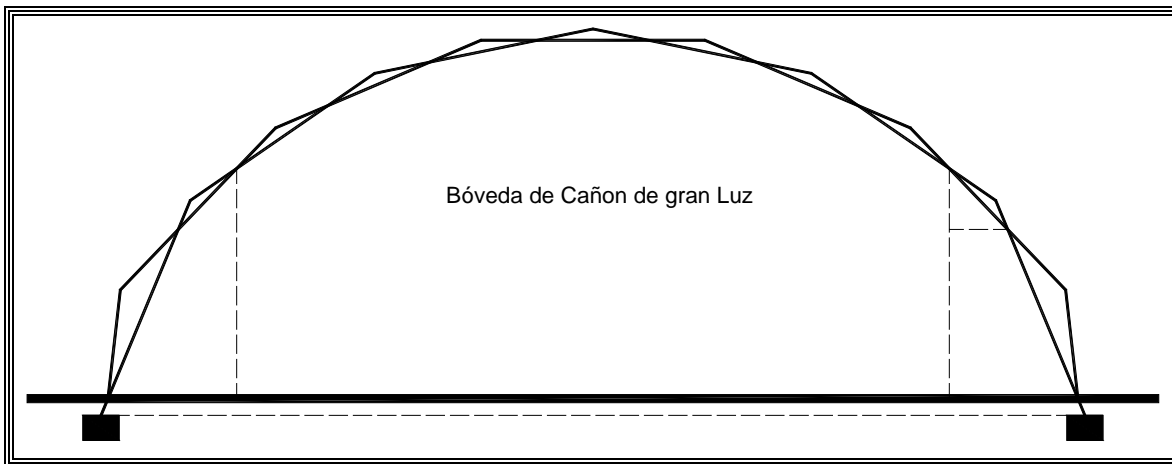


Fig. 1. 6. Corte transversal de Bóveda de cañón

La bóveda cañón, consiste en un cierto número de vigas de celosía dispuestas siguiendo la longitud de la bóveda y sostenidas por armaduras transversales o muros. Estas vigas de entramado están unidas entre sí por cordones comunes, variando en número de 6 a 10, siendo la forma en planta más económica el cuadrado. La relación longitud-anchura es superior a 2, la relación altura-anchura superior a 0.2, pudiéndose emplear un sistema de bóvedas continuas, o también la cubierta de diente de sierra. Al igual que se pueden emplear bóvedas de doble curvatura.

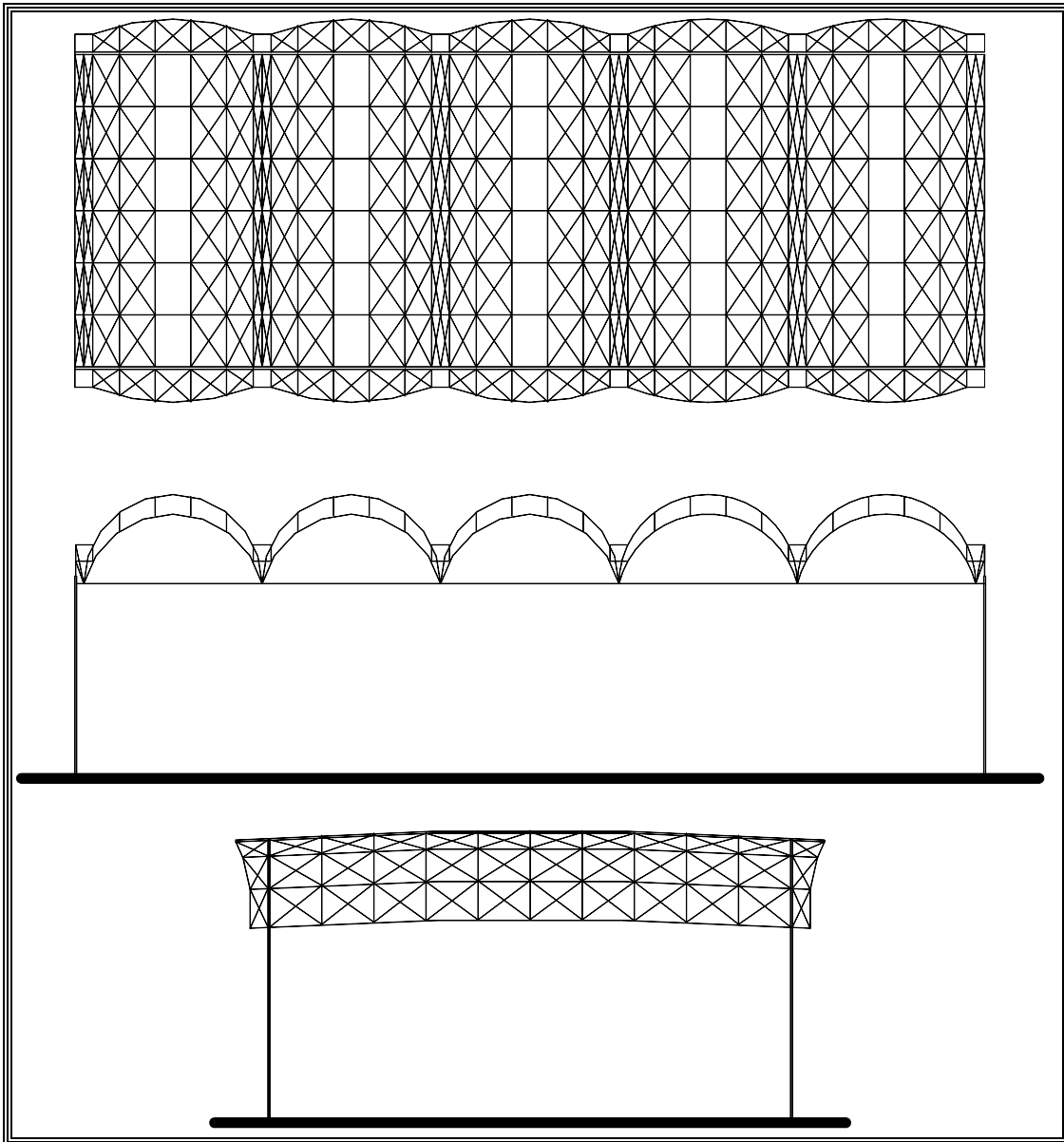


Fig. 1. 7. Bóveda con más de dos curvaturas

Las bóvedas de entramado se emplearan con provecho para cubrir claros grandes, siendo indeseable las columnas interiores, teniendo el interior despejado sin la presencia de tirantes.

Las bóvedas tipo Föppl pueden ser estáticamente determinadas si está formada por articulaciones y son respetadas las condiciones de apoyo. Las bóvedas de pequeñas dimensiones pueden ser consideradas trabajando axialmente, aunque para dimensiones considerables el cálculo sería mas profundo. Los claros en este tipo de estructuras están comprendidos entre 10 y 80 m. También en este tipo de estructuras se puede emplear dos capas.

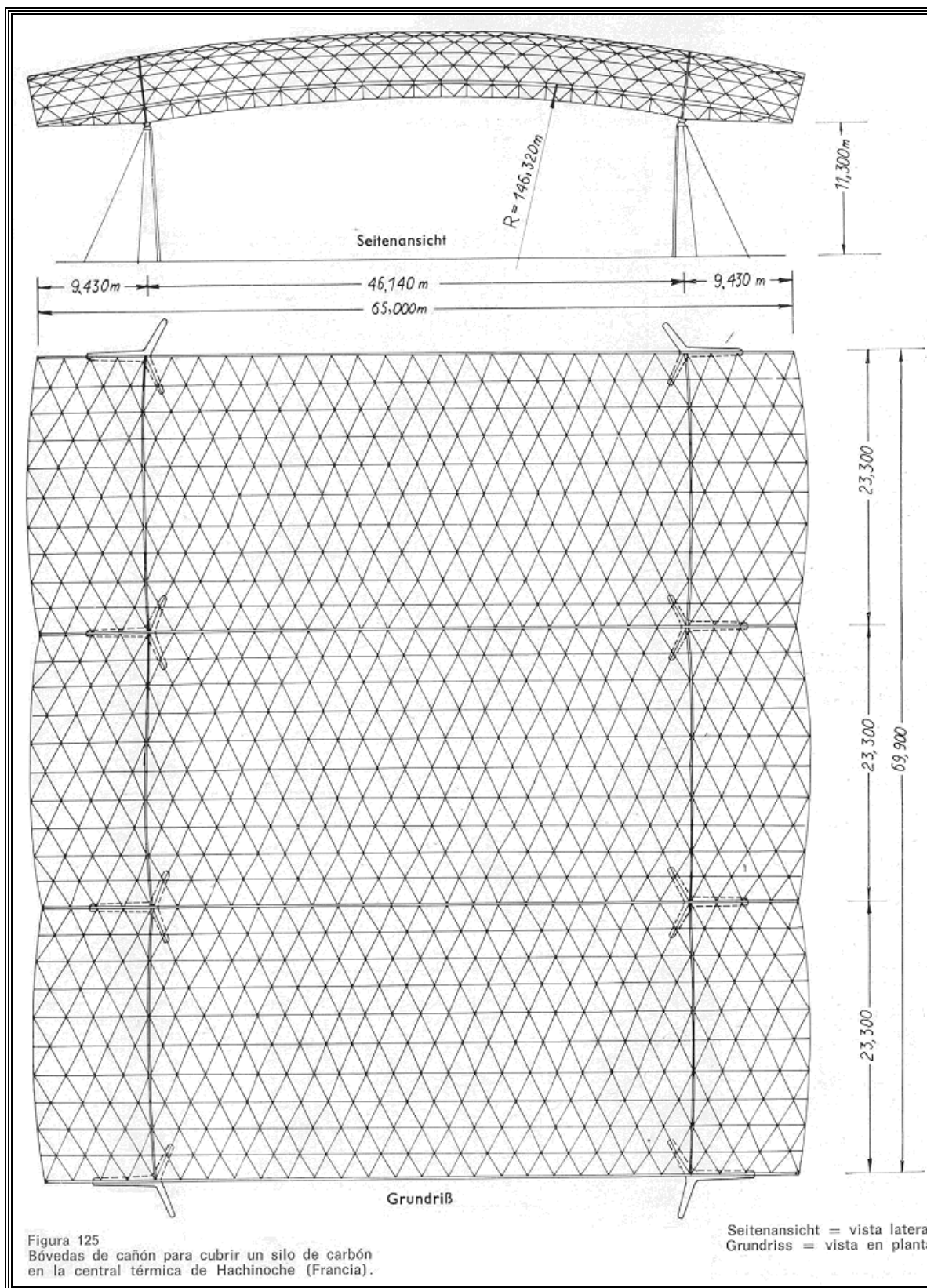


Fig. 1. 8. Bóveda cañón

1.2.1.3. RETICULADO DE DOS CAPAS

Las estructuras de reticulado de vigas son ideales para obtener una distribución más homogénea de las solicitaciones en el conjunto de la estructura, siendo el reticulado de una capa la forma más simple, constituido por 2 redes de vigas situadas en el mismo plano cruzándose en ángulo recto u oblicuo, estando, en la mayoría de los casos, apoyado sobre sus cuatro lados, utilizados para cubrir grandes espacios sin apoyos intermedios, y utilizando en cubiertas curvas o plisadas. Estos reticulados tienen las siguientes formas y tipos:

- Reticulado rectangular u ortogonal (vigas en ángulo recto y paralelas a los muros)
- Reticulado diagonal u oblicuo (vigas en diagonal respecto a los muros)
- Reticulado circular (redes de vigas en círculo o siguiendo un hexágono)

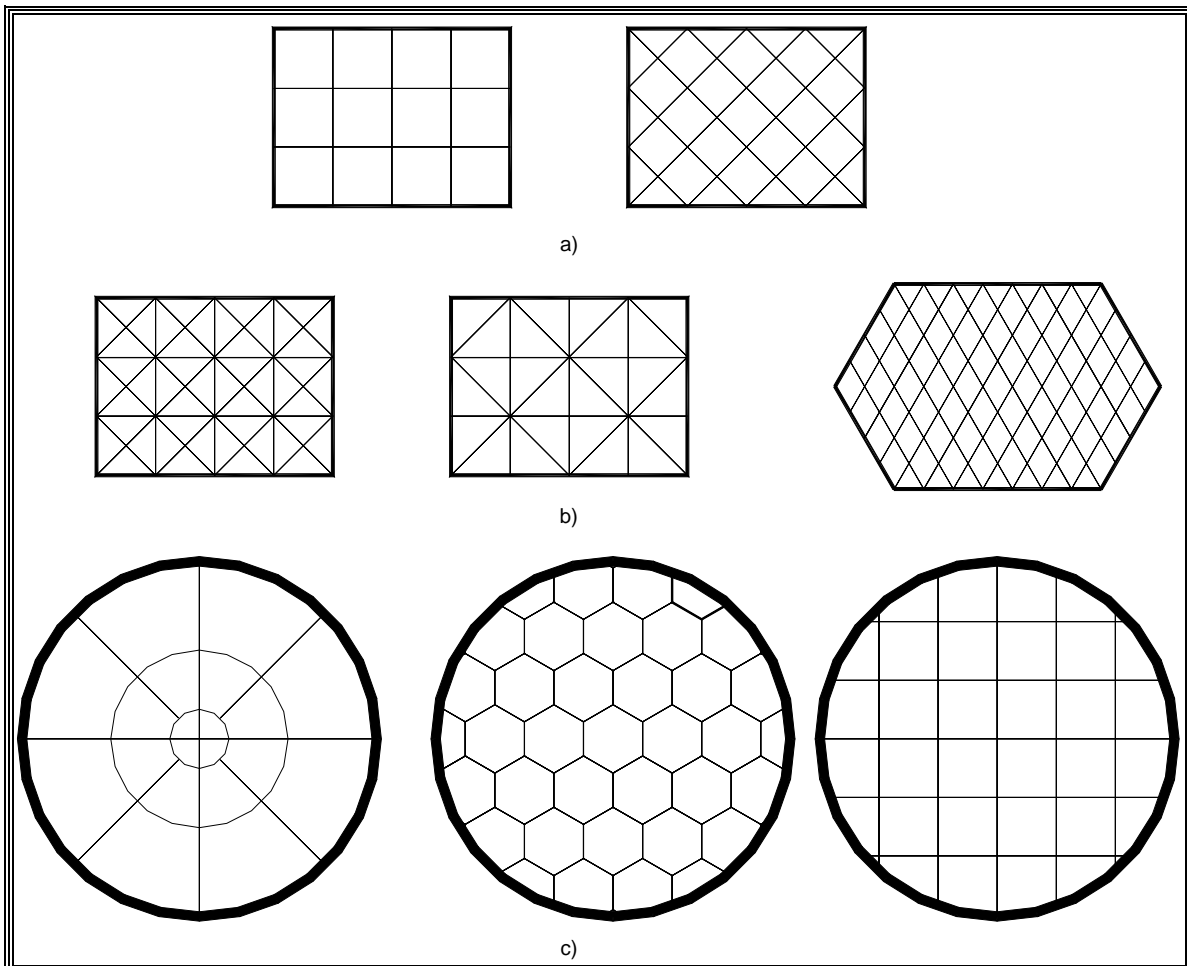


Fig. 1. 9. Tipos de reticulado a) reticulado recto o rectangular b) Oblicuo o triangular c) Circular

La forma y disposición varía según la imaginación de los arquitectos.

Debido a su rigidez, estos reticulados presentan una relación peralte/claro inferior a los sistemas habituales, cuyos valores son generalmente entre 1/30 para retículas rectangulares, y 1/40 para retículas oblicuas; los nudos presentan una considerable rigidez, trabajando a flexión y a torsión aunque en general la torsión puede ser despreciable. Este tipo de reticulados son económicos para claros de hasta de 30 m.

El reticulado presenta efecto decorativo por lo que en ciertas ocasiones se escoge para cubrir detalles arquitectónicos, además de que mejora la acústica de los locales. Para claros grandes mayores a 30 m se recomienda reticulado de dos capas. Estos reticulados de dos capas están solicitados por esfuerzos axiales y son de gran interés para pisos y cubiertas; están compuestos de dos redes de vigas dispuestas en planos paralelos, no teniendo necesariamente la misma trama, uniendo un gran número de barras en los nudos; los nudos de los planos superiores e inferiores están unidos por barras ortogonales u oblicuas, formando una construcción tridimensional, estando solicitados sus elementos por fuerzas axiales. En la práctica es recomendable una separación entre los planos de las dos capas de 1 a 1.2 m. dependiendo del claro a cubrir y del material, teniendo reticulados cubriendo claros de hasta 100 metros, ya que en este tipo de estructuras el trabajo de deformación, el 70 % se debe a momentos flectores, y 30 % a los esfuerzos axiales de las barras.

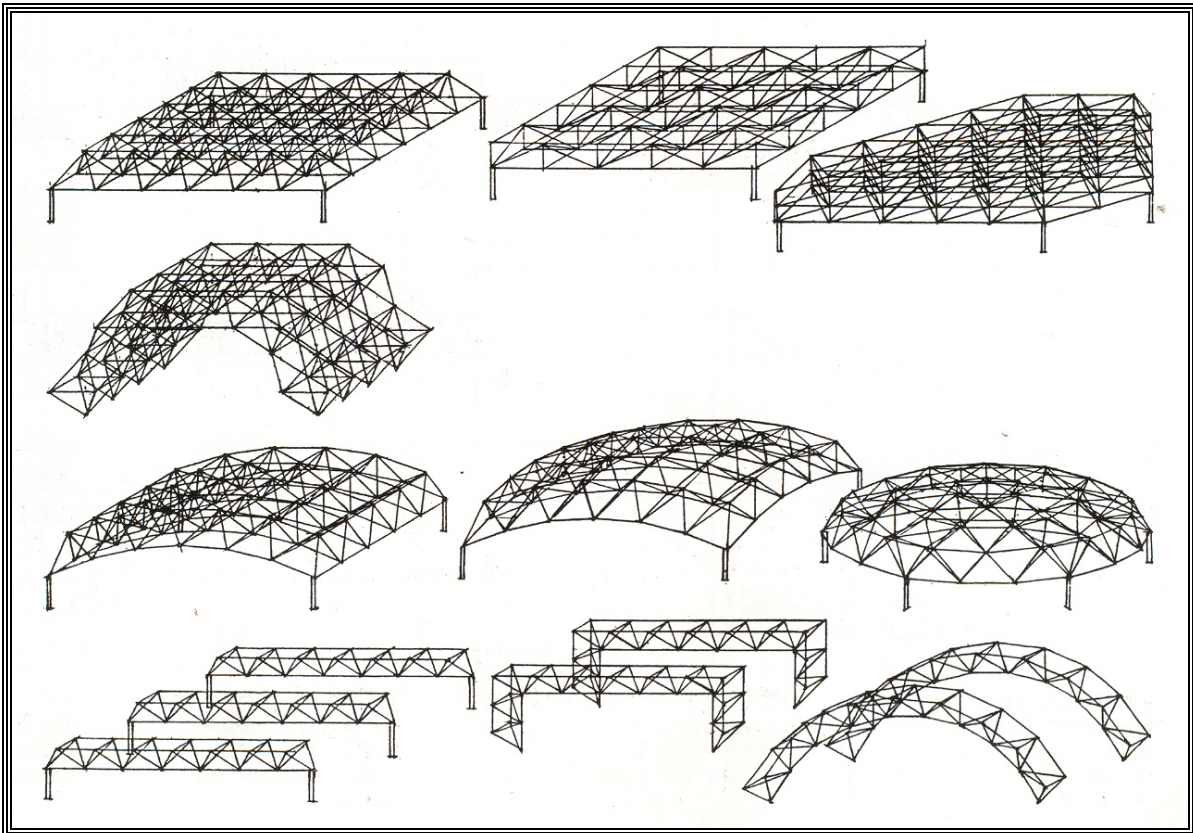


Fig. 1. 10. Tipos de reticulado en dos capas

Las ventajas constructivas llevan a la realización de variadas construcciones con este tipo de sistema, resultando un sistema modular con ligereza facilitando ampliaciones y modificaciones.

La malla formada por barras y conectores, producto de la unión de varios cuerpos geométricos o la repetición de uno de ellos, se denomina reticulado de 2 capas, los cuerpos geométricos se denominan poliedros o “piñas”.

1.2.1.3.1. TIPOS Y FORMAS DE RETICULADO

Dentro de la forma del sistema de reticulado, la geometría es parte importante, ya que contribuye a una estética y proceso constructivo adecuado, además de que ayuda en la distribución de esfuerzos; la longitud de las barras y el número determinan la economía del sistema. La geometría es similar a la estructura molecular de la cristalografía. El reticulado de dos capas toma el mismo nombre de los poliedros regulares que lo forman, la unión de dos o más poliedros forman paquetes.

La forma elemental de los reticulados de dos capas, se divide en 2 grupos principales:

- Ortogonal (dos direcciones en el plano XY).
- Oblicuo (tres o más direcciones en el plano XY).

La altura del reticulado en 2 capas promedio es de 1/20 o 1/25 del claro.

Independientemente del número de las capas, hay reticulados en varias direcciones.

Los reticulados hexagonales con dos capas son ideales para las bóvedas cañón y las cúpulas. Siendo el mas conocido, el reticulado ortogonal o rectangular, debido a su simplicidad constructiva.

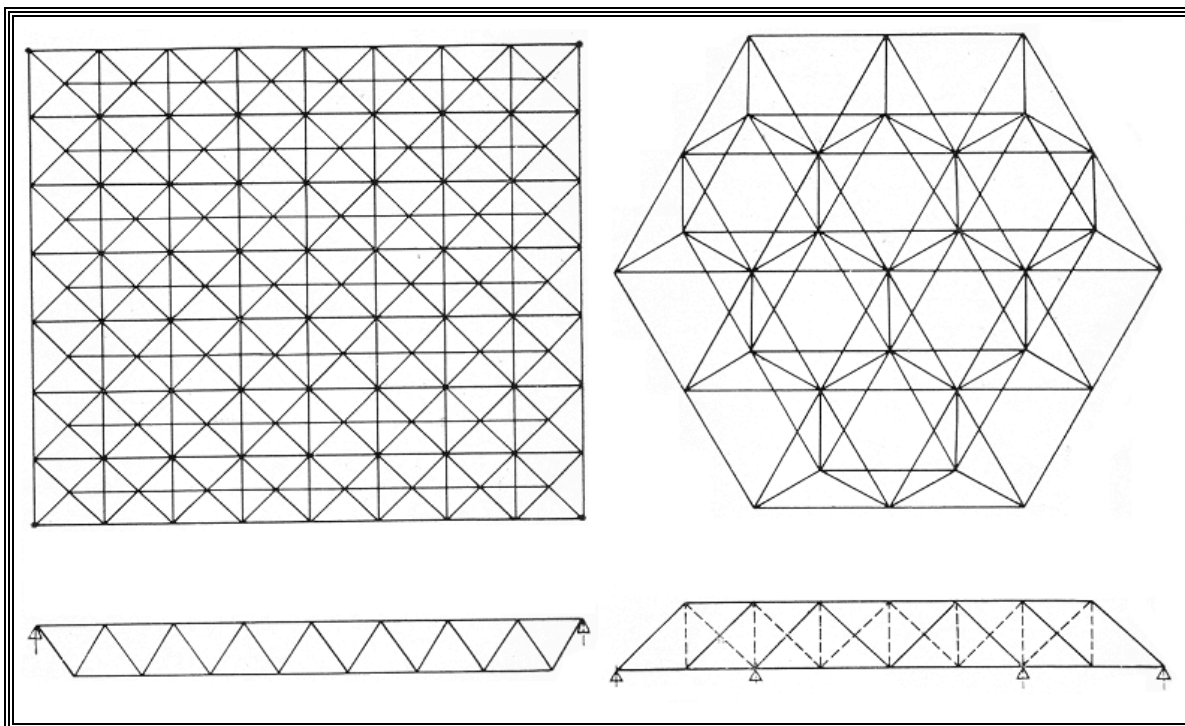


Fig. 1. 11. Tipos de Reticulado en dos capas

A continuación se describen algunos tipos de reticulado en dos y tres direcciones:

- Paquete puro de cubos. Siendo uno de los sistemas constructivos más antiguos, siguen el ejemplo de la naturaleza mineral, donde el cubo no estable se tiene que estabilizar con una diagonal en sus lados, para así poder usarlo en estructuras. Teniendo un claro de $1/30$.

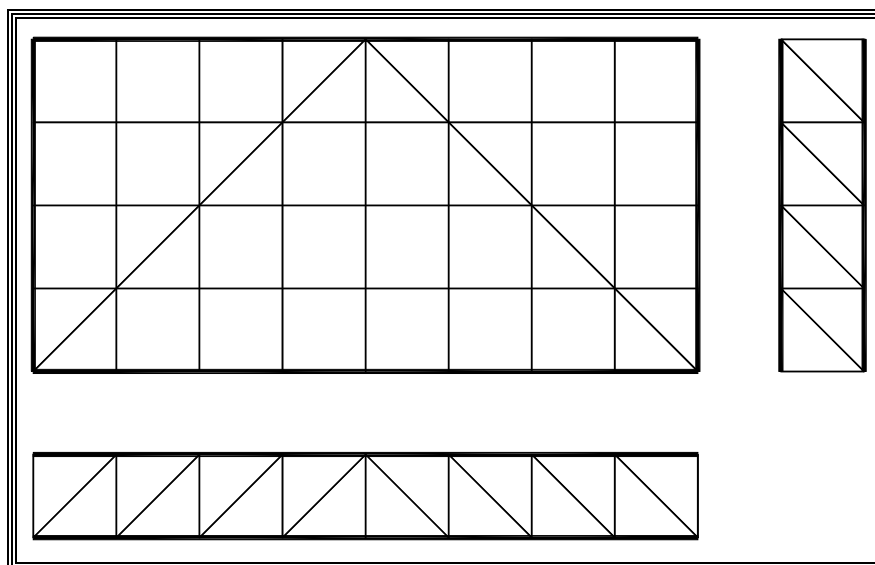


Fig. 1. 12. Reticulado puros cubos

- Reticulado diagonal, obteniendo mejor reparto de tensiones, por estar compuesta de elementos que llegan diagonalmente a los muros, dando mayor rigidez; se recomienda generalmente un peralte de $1/40$ del claro.

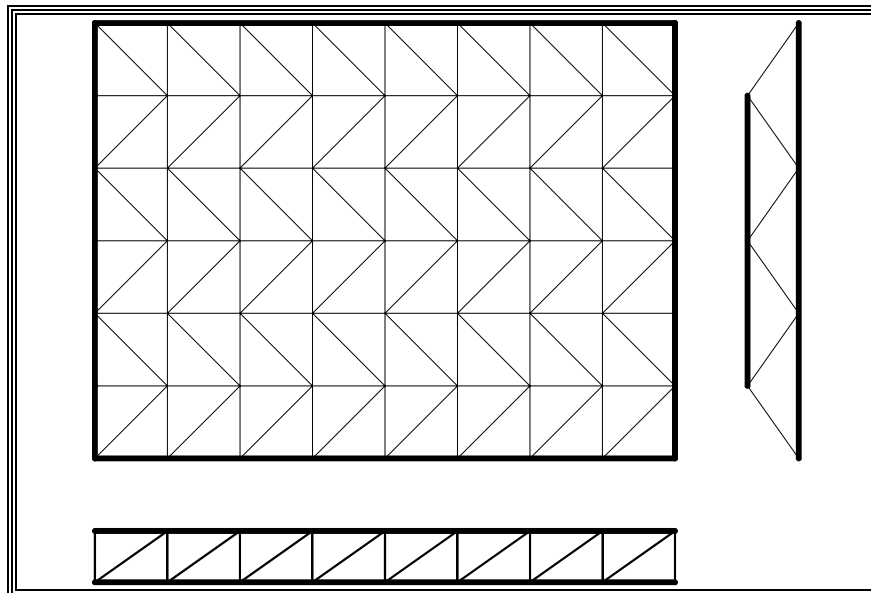


Fig. 1. 13. Reticulado diagonal

- Paquete medio octa – tetra, formada con paquetes medios octaedros y tetraedros, se complementa de manera ventajosa, formando una retícula de cuadrados de lado “s”, pirámides de peralte $\frac{1}{2}s\sqrt{2}$, con respecto al claro tiene una relación $1/30$, con la desventaja de tener elevado numero de barras y conectores.

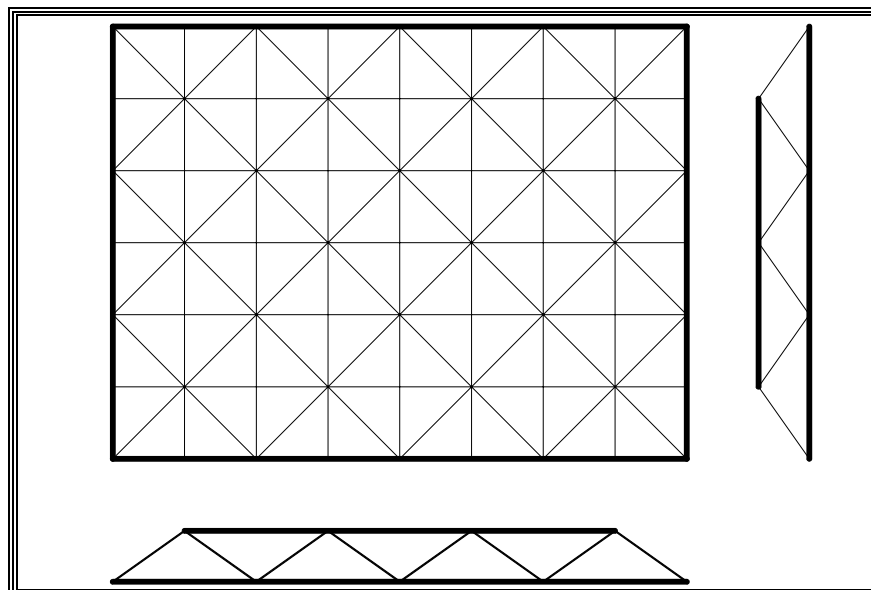


Fig. 1. 14. Reticulado medio Octa - Tetra

- Reticulado en tres direcciones, formado con paquete de octa – tetra, con sistema de vigas en 3 direcciones, obteniéndose un reticulado triangular, más rígido, siendo adecuado para plantas triangulares y hexagonales, e incluso desiguales.

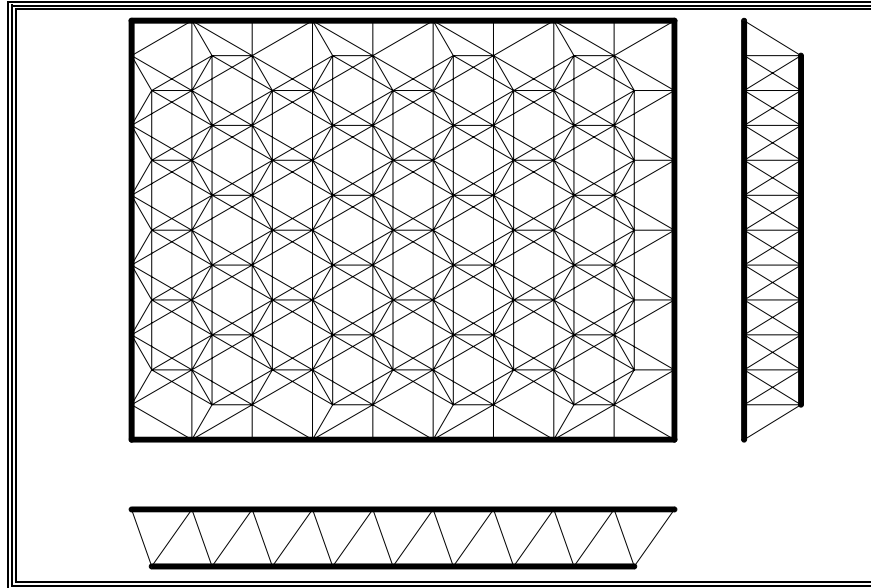


Fig. 1. 15. Reticulado en tres direcciones

- Reticulado ortogonal – diagonal, combinación de medios octaedros, con medios cuboedros, cuya capa de barras horizontales superior esta situada diagonalmente a la capa inferior; se debe triangular el reticulado en los bordes para estabilizarlo.

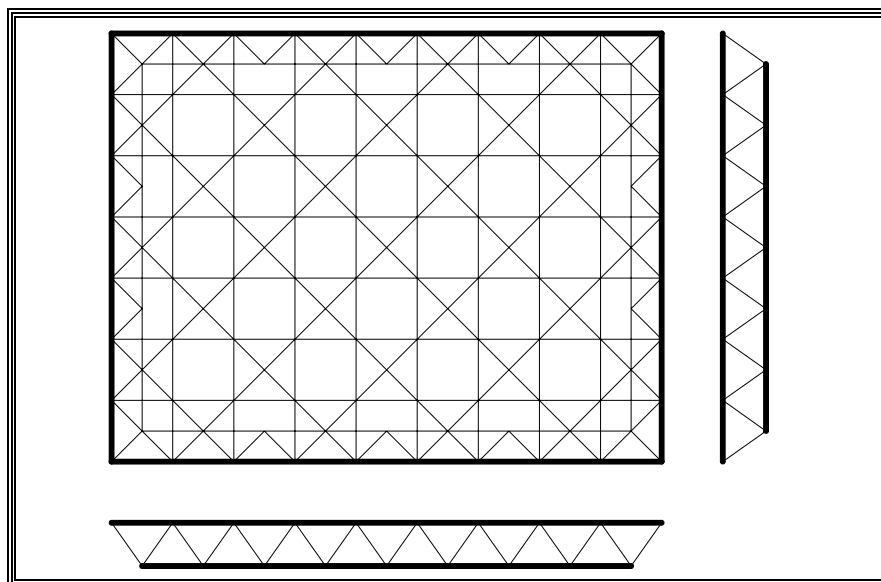


Fig. 1. 16. Reticulado Ortogonal Diagonal

1.2.2. ESTRUCTURAS LAMINARES

Las estructuras plisadas o laminares, formadas por varias superficies planas o curvas, puede ser considerada como una variante de la superficie continua, por lo que al utilizar el acero hace la posible elaboración de estructuras audaces y sorprendentes.

Las estructuras plisadas de entramado, están generalmente compuestas por armaduras prefabricadas unidas entre si por pernos a lo largo de los cordones. La resistencia depende esencialmente de su configuración geometría (Fig. 1.17). Las características por las que son económicas son:

- La distribución de tensiones es análoga a las membranas, las tensiones de flexión son despreciables.
- Las cargas exteriores no actúan únicamente a lo largo de las aristas de los elementos, si no que también son soportadas por las caras de las chapas.
- La excepcional simplicidad del montaje a la construcción modulada
- Las caras de los elementos prefabricados tienen doble función.
- Poseen propiedades acústicas notables
- Las pirámides frenan el movimiento del aire, mejorando el aislamiento térmico.

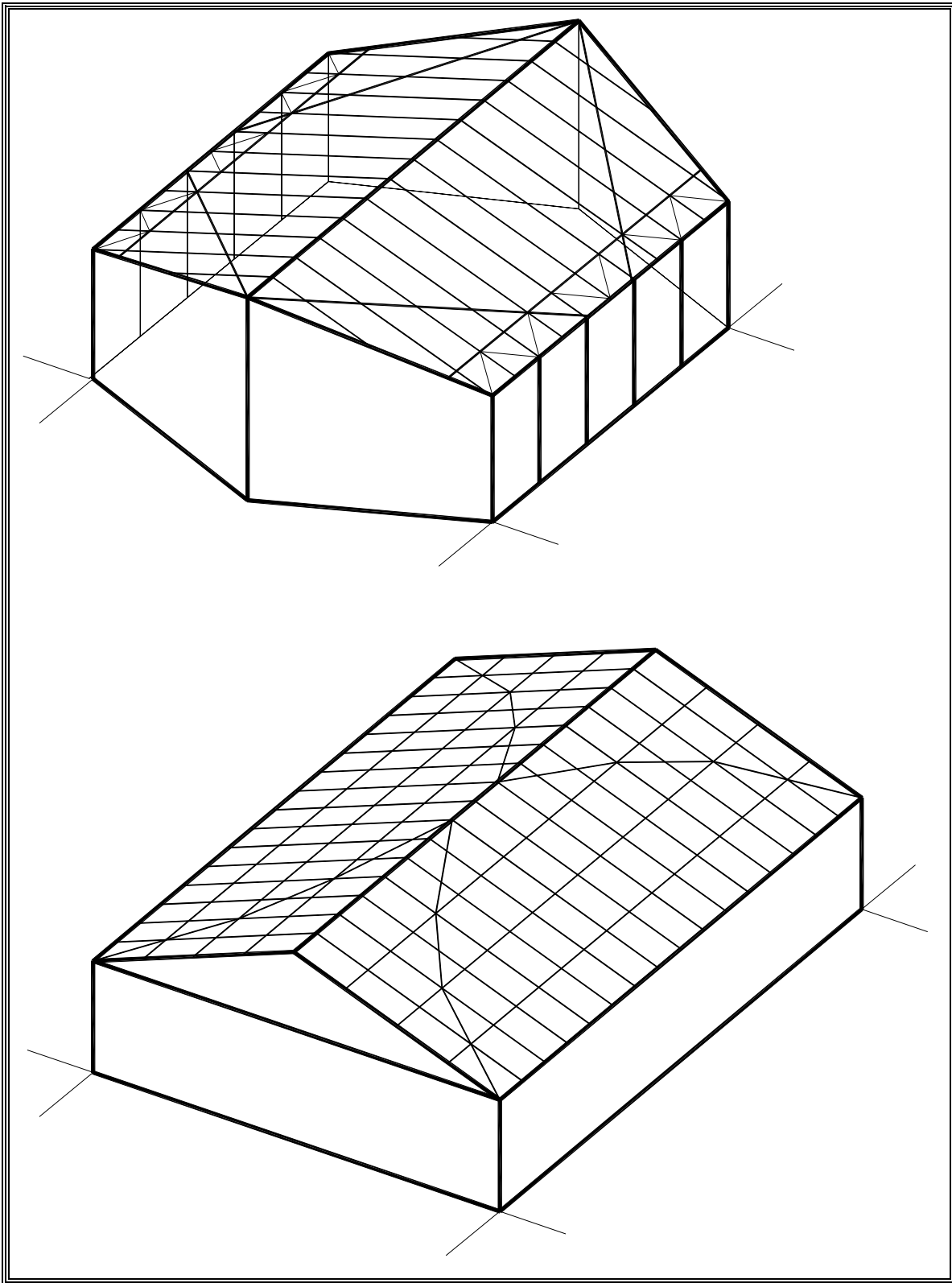


Fig. 1. 17. Tipos de Estructuras Laminares

1.2.3. CUBIERTAS COLGANTES

Las estructuras formadas por redes de cables, resultan atractivas y prácticas adoptando geometrías curvas que a la vez, pueden cubrir grandes claros con peso mínimo. Las cargas se transmiten a los cimientos por medio de elementos sometidos a tensión, compresión, flexión, o a una combinación; siendo la transmisión por tensión y compresión la más eficiente, domina el interés por las estructuras del tipo membranas, como cascarones sin rigidez de flexión, transmitiendo solicitaciones externas a los apoyos con un trabajo de deformación mínima. La construcción de membranas de acero y las construcciones con cables, forman estructuras que trabajan solo a tensión. Tales estructuras muestran efecto no lineal debido a grandes desplazamientos, presentando 3 distintos comportamientos:

- Rigidización estructural causada por un aumento en las cargas.
- Flexibilización estructural provocada por incrementos de carga y
- Comportamiento dual, es decir algunos elementos se rigidizan, al mismo tiempo que se flexibilizan al aumentar la carga.

El cable es el elemento constructivo más económico para cubrir grandes superficies, su ligereza reduce notablemente el peso propio de la construcción, lo que permite el desarrollo de cubiertas colgantes. Este provee la forma estructural más simple, ya que solo presenta rigidez en la dirección axial del elemento. Sin embargo un sistema más complejo, que contiene varios elementos cable muestra un comportamiento no lineal debido a grandes cambios en geometría, produciendo una alteración en la rigidez del sistema. Las cubiertas son estructuras de mucha elegancia y teniendo como ventaja la ligereza pero como desventaja demasiada flexibilidad y la necesidad de crear anclajes pesados, así como tirantes embarazosos, donde cada vez es más la utilización de cables de alta resistencia. En este tipo de estructuras las solicitaciones peligrosas son las vibraciones, ya que los efectos de resonancia pueden ocasionar la destrucción de la obra. Las condiciones de apoyo se pueden lograr mediante restricciones rígidas o parcialmente rígidas, en este último caso habrá que considerar las constantes elásticas de los apoyos.

Este tipo de estructuración es ligera y puede lograrse rigidez importante para soportar adecuadamente los efectos del viento. La rigidez se logra mediante un presfuerzo en los cables.

Se pueden dividir en dos categorías:

- Sistemas de membranas flexibles (temporales)
- Sistemas de redes de cables (definitivos)

Este sistema estructural puede usarse como superestructuras, tal es el caso de las cubiertas colgantes y puentes atirantados, o bien pueden servir de apoyo a otros sistemas principales.

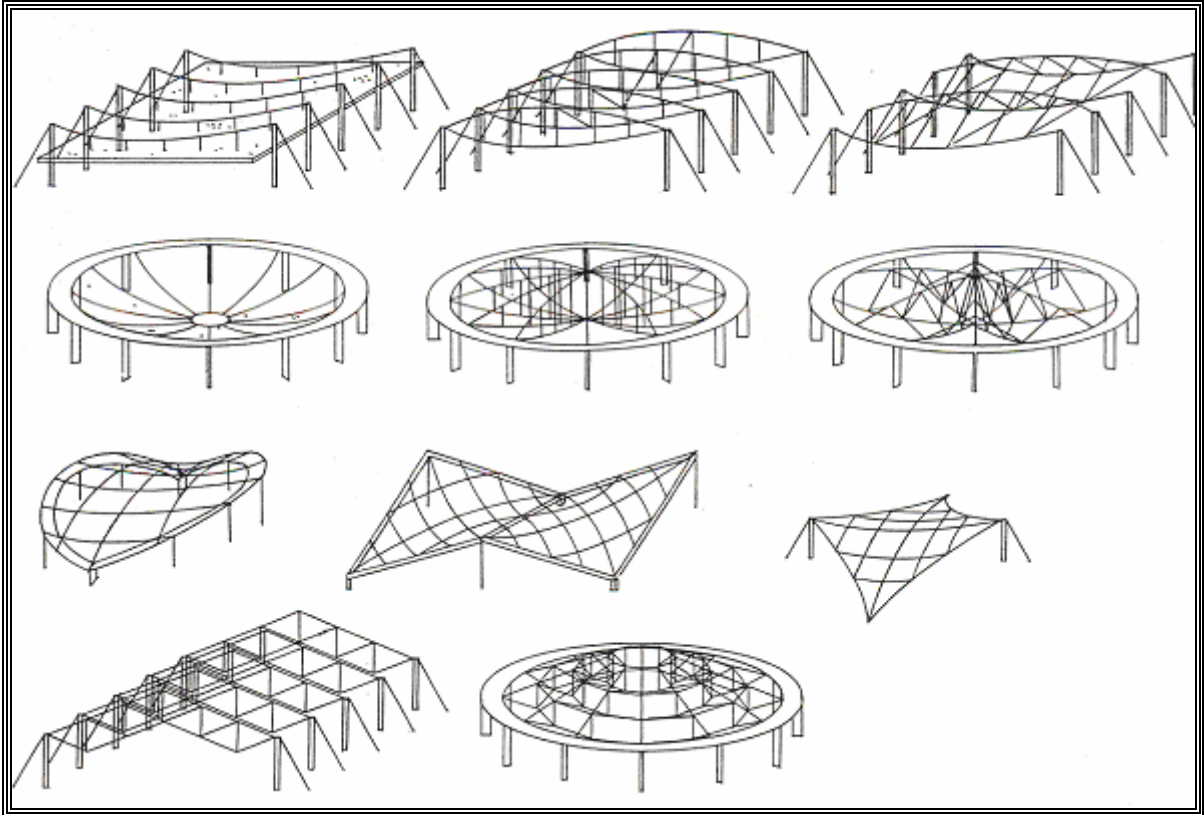


Fig. 1. 18. Tipos de Cubiertas colgantes

2. SISTEMA DE TRIDILOSA

Siendo un desarrollo de las estructuras espaciales, la Tridilosa surgió en México en los años 60's; está formada por una armadura espacial de acero con la contribución del concreto en la parte superior y a veces en la inferior, únicamente en las zonas en las cuales los cambios de momento ocasionan esfuerzos de compresión. La capa de concreto de pocos centímetros de espesor además se utiliza como sistema de piso. Tiene un armado (malla o reticulado) superior y otro inferior de acero que absorben los esfuerzos de tensión y/o compresión que originan las cargas actuantes. Estos armados van unidos por elementos diagonales que trabajan a tensión y a compresión de acuerdo con los esfuerzos que le sean transmitidos por las cargas. Las parrillas superiores e inferiores están separadas una distancia "d" y horizontalmente se desplazan una con respecto a la otra la mitad de la abertura de cada parrilla (Fig. 2.1).

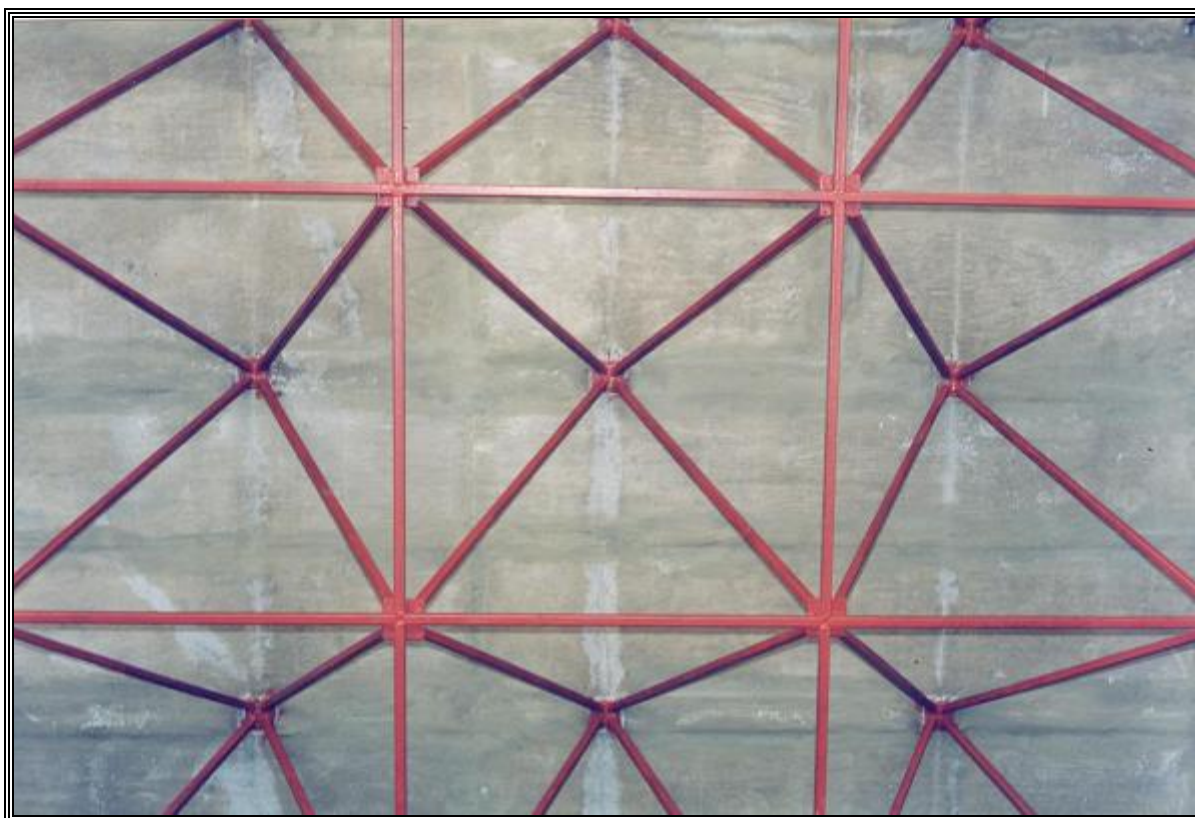


Fig. 2. 1. Vista inferior Tridilosa



Fig. 2. 2. Tridilosa

El Ingeniero Civil Heberto Castillo Martínez es el que ideó el sistema estructural Tridilosa, tomando en cuenta la concepción tridimensional e incorporando el concreto, haciendo una estructura de acero y de concreto sin ser concreto reforzado. Teniendo en cuenta que en estructuras de concreto reforzado, la zona de agrietamiento no trabaja y que se utiliza solo como recubrimiento del acero, en la Tridilosa este peso se elimina por lo cual representa un ahorro en peso. El sistema estructural fue ideado con una losa de concreto relativamente delgada, en la parte superior y en ocasiones en la parte inferior, combinada con una estructura espacial de acero, definida con una malla espacial de doble capa; es una losa cuyo armado se encuentra en el espacio tridimensional y, por lo tanto, los esfuerzos a que esta sujeta son tomados de la misma manera (Tridimensionalmente). Básicamente la Tridilosa es una estructura espacial en la cual los elementos en compresión de la parte superior son de concreto y los elementos en tensión son de acero, logrando la unión mediante elementos de acero distribuidos espacialmente (diagonales) que remplazan a los estribos. Todos los elementos participantes en el conjunto toman fundamentalmente esfuerzos simples (tensiones y compresiones). Estas a su vez se pueden construir en formas diversas como paraboloides hiperbólicos y elipsoides presentando ventajas sobre las mismas formas construidas en concreto reforzados. Formada casi siempre por barras de acero en la parte de tensión, es su rigidez a carga axial mayor que la de flexión, la cual puede ser despreciada dando la posibilidad de analizarla suponiendo que sus elementos son barras articuladas en los nudos.

Existen diferentes tipos de Tridilosa, desde las que constan de un solo armado sencillo hasta aquellas formadas por varios lechos colocados en el sentido vertical cuya altura depende de la longitud del claro y de las cargas a soportar.

Las generalidades sobre el sistema Tridilosa, están basados principalmente en la teoría de las estructuras espaciales.

La concepción inicial de todos los elementos de acero, es unirlos mediante cordones de soldadura, en cada nudo; en un principio constaba de un armado inferior y otro superior, cada uno de los cuales estaba formado por varillas que se cruzan perpendicularmente. La malla resultante tiene una longitud de los cuadrados variable, que depende del tipo de la carga para la cual se este diseñando, siendo por lo general del orden de los 50 cm; dichos armados estarán absorbiendo esfuerzo de tensión o de compresión en el sentido que corren las varillas. Las dos mallas van colocadas en forma tal, que el nudo de la malla superior coincide con el centro del cuadrado que forman la malla inferior, conservando una separación previamente fijada por el proyectista, finalmente van unidos los nudos superiores con los del armado inferior por medio de diagonales, que en su concepción inicial era por varillas, estas van formando pirámides cuadrangulares con el vértice hacia arriba y otras hacia abajo en forma alternada. El lecho o armado superior está embebido en una capa de concreto de generalmente 4 a 6 cm. de espesor, pudiendo a llegar hasta 20 cm. en el caso de puentes, teniendo doble función, aliviar los esfuerzos de compresión y funcionalidad de piso. En algunas ocasiones hay necesidad de usar unos atiesadotes, con el objeto de reducir la longitud libre de pandeo de las diagonales, dichos atiesadotes están formados por varillas longitudinales y transversales formando una malla la cual va colocada a la mitad del peralte de la losa, teniendo una separación entre varillas de la mitad de la de los cuadrados que forman el armado superior e inferior.

Ahora se tienen múltiples tecnologías en cuanto a nudos se refieren como sistemas patentados, los cuales se pueden utilizar para unir los diferentes tipos de barras.

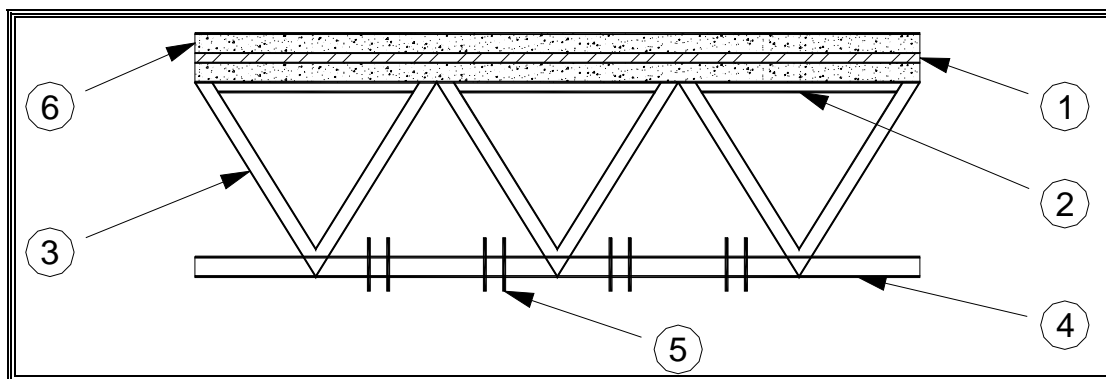


Fig. 2. 3. Partes de la Tridilosa

La estructura metálica se puede fabricar en taller o en la obra reduciéndose el procedimiento constructivo, haciendo después las operaciones de encofrado y colado de las losas de concreto en la obra, una vez que ha sido armada y montada la estructura.

En la figura se pueden identificar los siguientes elementos de la Tridilosa:

- 1.- Acero alta resistencia en la zona de compresión, sumergido en concreto.
- 2.- Paneles o cimbra para el colado de la placa superior.
- 3.- Elementos diagonales de acero que absorben el cortante y que en un principio eran barras, cambiando después a elementos estructurales.
- 4.- Acero alta resistencia en la zona de tensión.
- 5.- Amarres sujetos a las barras de acero.
- 6.- Concreto superior.

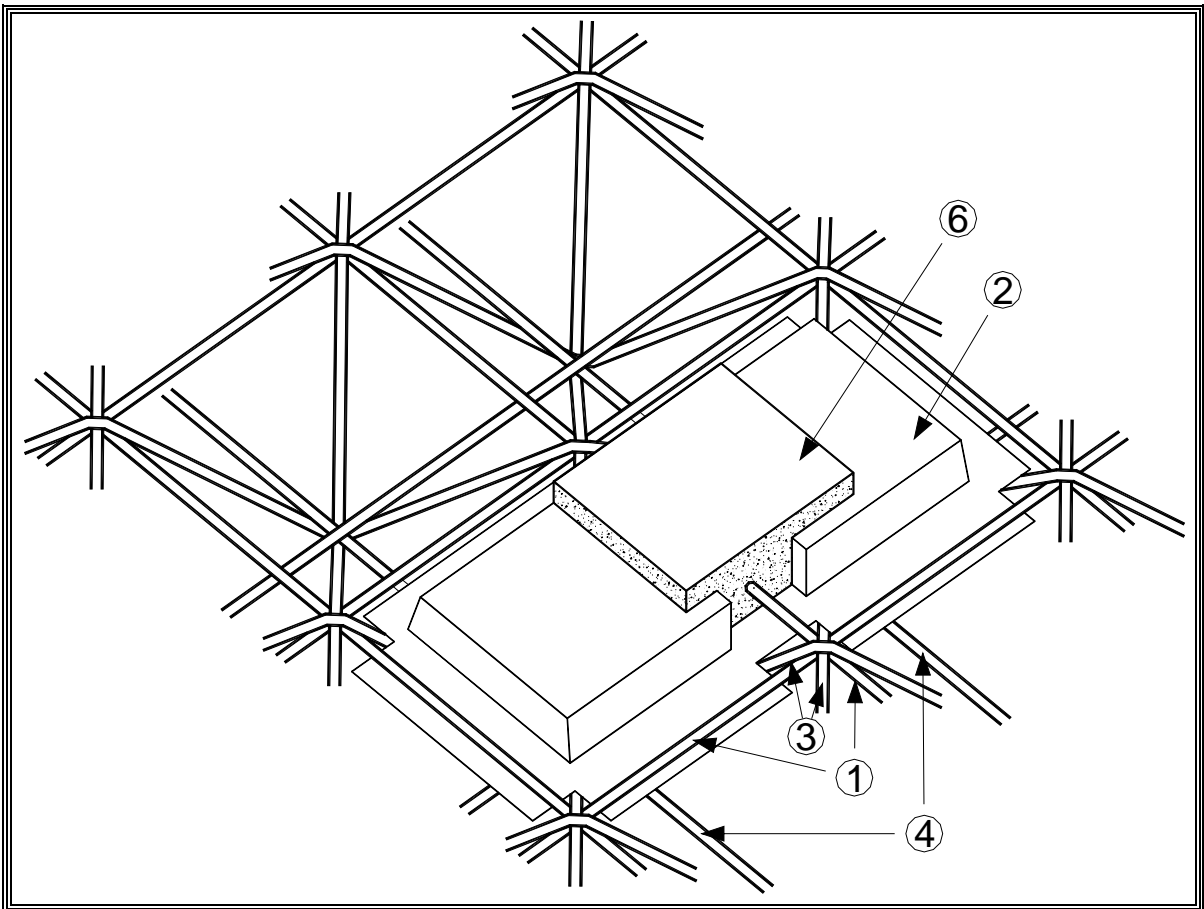


Fig. 2. 4. Tridilosa Perspectiva

Por la alta hiperestaticidad que poseen estas estructuras, resulta necesario analizarlas mediante uso de programas de cómputo y, dependiendo de la unión entre los nudos de toda la estructura, este sistema puede conformar una

estructura espacial que transmita las cargas en dos direcciones o en una sola dirección en función de la relación largo/ancho.

En este sistema, los esfuerzos pueden buscar muchos caminos hacia los soportes, así sí un elemento en particular alcanza su capacidad última, los elementos cercanos lo auxiliarán soportando cargas adicionales.

Con fines de prediseño, se puede suponer el trabajo del conjunto como una losa, viga, marco u otro elemento, para obtener en forma aproximada las fuerzas sobre las barras críticas.

En diseño se revisa cuidando el pandeo general, utilizando no más de 3 secciones de barras distintas.

La parte más especializada es el elemento de unión en el nudo, por lo que es parte fundamental de la estructura.

2.1. MATERIALES UTILIZADOS

Para la construcción de Tridilosas, los materiales generalmente utilizados son:

- Concreto con $f'_C \geq 250 \text{ Kg/cm}^2$ no se requieren concretos con resistencias fuera de lo común.
- Acero de refuerzo con límite elástico de 4000 Kg/cm^2 y límite de ruptura de 6000 Kg/cm^2 por su capacidad para resistir cargas sin deformaciones excesivas, el cual requiere tener en cuenta un constante mantenimiento para evitar la corrosión, aunque se puede solucionar galvanizando previamente.
- Perfiles estructurales que varían sus propiedades geométricas según las necesidades propias del proyecto.
- Los extremos de las barras se diseñan con tornillos incluidos, por lo general de acero A-325 A-490, grado 5, 8, con mayor capacidad que las barras debido a la concentración de esfuerzos a los que están sujetos.
- Placas de acero, utilizadas en las conexiones ya sea por medio de soldadura o tornillos.
- Cables o torones de alta resistencia.
- Juntas de neopreno en los apoyos.
- Soldaduras.
- Pinturas anticorrosivas.

2.2. GEOMETRÍA

La geometría se ha basado en la triangulación, por ser el triángulo la célula más rígida que se puede obtener en el plano. Dentro de la geometría, el triángulo es una superficie indeformable, formada por tres barras y tres nudos, de aquí que, como figura estable, no se deforma siempre y cuando:

- a) No se rompa alguna de las barras que la forman.
- b) No se separen los nudos que las contienen.

Para formar una forma o cuerpo geométrico simple, se tienen los siguientes requisitos:

- a) Uniformar las dimensiones de las barras
- b) Uniformar todas las caras.
- c) Uniformar las aristas.

Con base en lo anterior, es posible crear 5 de los 9 cuerpos de los sólidos Platónicos o cuerpos regulares, conocidos como: Tetraedro, Octaedro, Icosaedro, Cubo o Hexaedro y el Dodecaedro, siendo solo los primeros 3 estables o rígidos, y los restantes inestables, que podrían ser rígidos, cuando se triangulen.

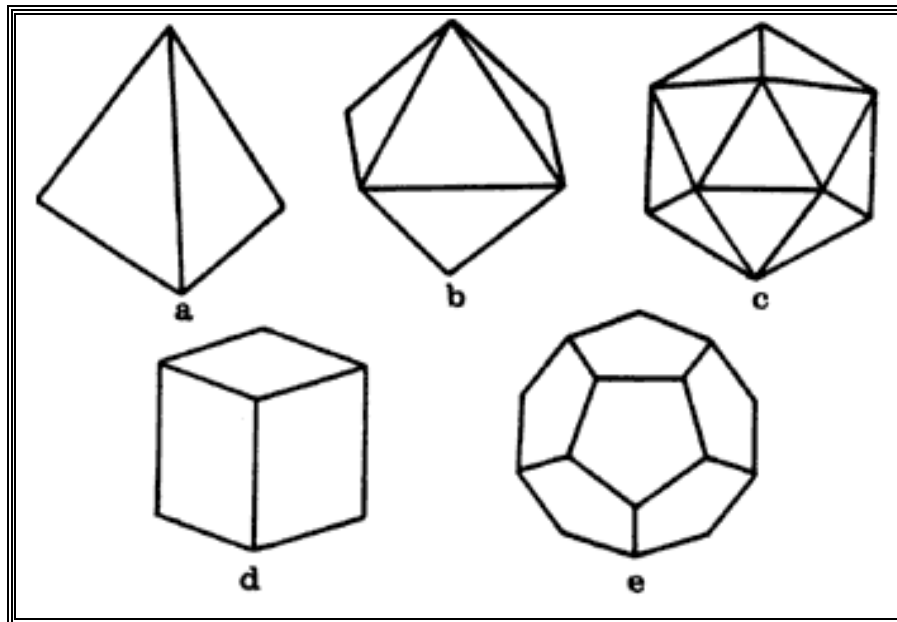


Fig. 2. 5. Sólidos platónicos

De cuatro triángulos equiláteros, formados cada uno por tres barras iguales y tres nudos, se forma el poliedro llamado tetraedro. Con la unión de tetraedros u octaedros regulares se consigue una estructura mucho más rígida.

Siendo el tetraedro la concepción del sistema de estructura tridimensional, es importante tener en cuenta la profundidad y dimensiones horizontales de los módulos que componen esta.

De la observación de estructuras encontradas en la naturaleza, Le Ricolais observó que hay sistemas muy resistentes, uno de las cuales esta formada por pirámides de base cuadrada que, colocada una al lado de la otra, forman un reticulado rígido de dos direcciones y dos capas; esta estructuración ha sido utilizada en varios diseños y construcciones de estructuras tridimensionales de dos capas y constituye la base de la estructura espacial de la Tridilosa.

Profundidad del modulo o peralte: Es común, por razones de peso utilizar como profundidad del modulo (h) aproximadamente $1/30$ del claro, para el caso donde los soportes están distribuidos alrededor de los extremos de la retícula, y de $1/15$ del claro donde los apoyos se encuentran únicamente en las esquinas o demasiado espaciados. Estos valores deben usarse como primera aproximación.

Ancho y largo del modulo: Básicamente depende de la profundidad de la armadura, aunque influyen factores como la separación entre apoyos y el sistema de cubierta. El ángulo entre el centro de línea de las diagonales y el plano de la cuerda inferior o superior no deberá de ser menor de 30° , para evitar que la longitud de las diagonales y la carga sobre ellas sea excesiva; y no deberá de sobrepasar los 60° debido a que la densidad de las diagonales comenzaría a ser demasiado alta (Fig. 2.6).

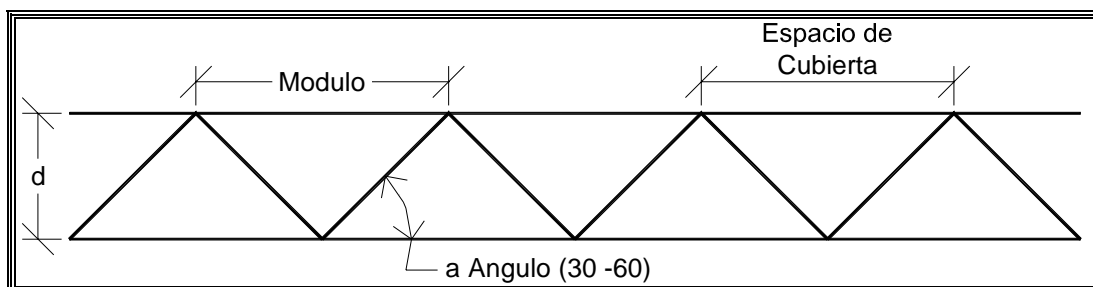


Fig. 2. 6. Limites Prácticos para ángulos

La triangulación es el aspecto clave de una armadura, conviene evitar ángulos muy agudos para lograr alta rigidez (son apropiados entre 30° y 60°) y la longitud de los elementos de compresión deben limitarse de manera que la resistencia no se vea reducida por pandeo.

Las dos capas son iguales en la mayor parte de los casos, siendo las más comunes las tetraédricas, que dan lugar a dos capas de triángulos equiláteros. La malla multi-triangulada y las pirámides formadas por pirámides de base cuadrada ensambladas originan dos capas de cuadrados a veces triangulados. Las capas pueden ser distintas entre sí, una capa puede estar formada por triángulos y la otra por hexágonos.

2.3. COMPONENTES

Se presenta a continuación una descripción de los principales elementos que forman el sistema Tridilosa:

- Barras.
- Losa o firme de compresión
- Apoyos.
- Capas de mallas planas.
- Diagonales.
- Conectores o Nudos.

Barras.

Existen una variedad de secciones transversales que pueden ser utilizadas, sin embargo, se busca que tengan un radio de giro similar en cualquier dirección, lo cual trae como consecuencia una distribución uniforme de la resistencia a carga axial. Las secciones mas utilizadas son:

- Tubular.
- Perfil tubular Rectangular (PTR).
- Angulo simple.
- Angulo doble en cajón.
- Sección cajón abierta.
- Etc.

Losa o de concreto o firme de compresión.

Proporciona el fin principal de la Tridilosa, es decir, tener un sistema de piso o techo, siendo los claros libres entre módulos no mayores a 1.2 m o 1.5 m, para una estructuración adecuada del armazón, con un espesor entre 4 y 6 cm. Aunque en usos de puentes este espesor puede llegar hasta 20 cm. con un armado considerable de acero.

Se debe garantizar la continuidad del armazón de acero con la losa, lo cual se puede resolver usando conectores de cortante sobre la cuerda superior, o ahogando la cuerda superior en el espesor de concreto; es recomendable utilizar además una malla de acero electrosoldado que proporcione un refuerzo por cambios volumétricos.

Apoyos.

La distribución de esfuerzos en la retícula es grandemente afectada por la relación entre la longitud de la estructura con respecto a su ancho, por lo que, la distribución de esfuerzos mas uniforme será en estructuras de forma cuadrada. Estas estructuras, pueden ser apoyadas sobre columnas de acero o de concreto, o en vigas perimetrales, esto dependerá de los requerimientos funcionales y/o arquitectónicos.

Es deseable que el apoyo este colocado bajo una conexión, para evitar el pandeo local de los miembros. Se distinguen básicamente los siguientes tipos de apoyos:

- Apoyo en esquina de nodo superior o inferior.
- Apoyo en extremo con vertical adicional.
- En muros paralelos.
- En muros perimetrales.

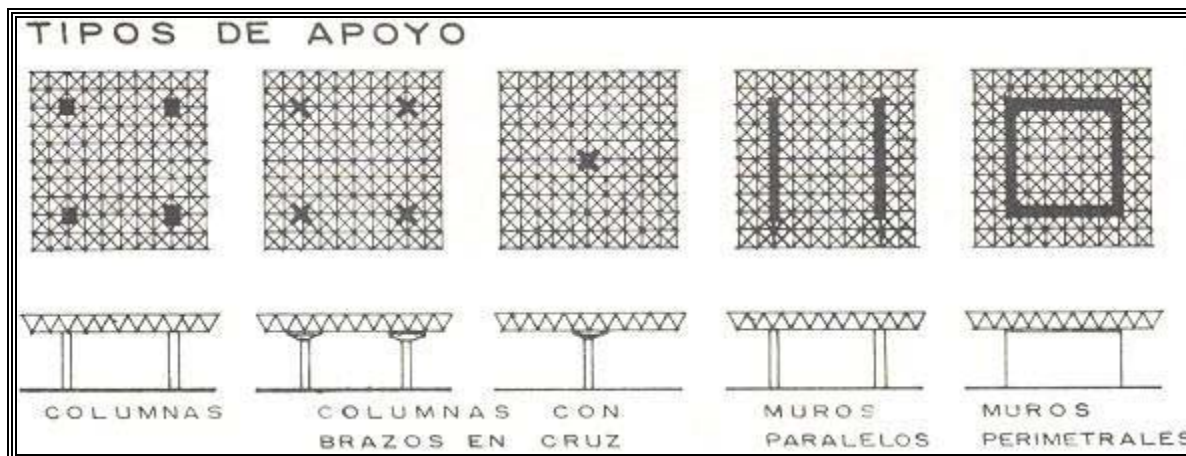


Fig. 2. 7. Tipos de Apoyos

Ya que los apoyos en esquina pueden producir grandes fuerzas sobre los elementos cargados directamente, existen dos posibles opciones de solución:

- Colocar apoyos remetidos en los extremos
- No descargar toda la reacción de la estructura sobre un solo modulo(4 diagonales), si no distribuir dicha reacción sobre varios módulos, mediante elementos de transición(arreglos piramidales adicionales)

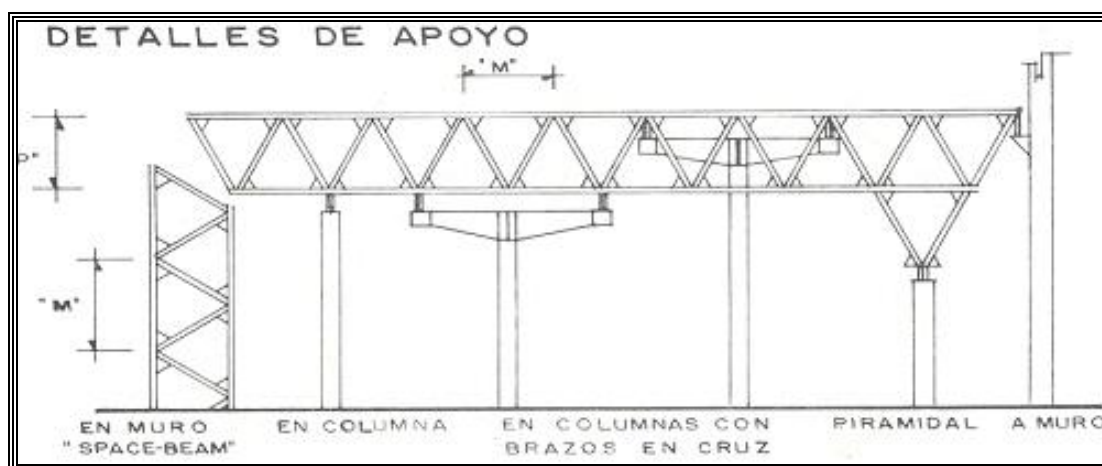


Fig. 2. 8. Tipos de Solución a esquinas en apoyos

Capas de mallas planas. Compuestas de los reticulados de vigas formadas por las barras.

Barras verticales o diagonales, elementos que unen las dos capas de mallas y ayudan a soportar el cortante en el elemento Tridilosa.

Conector o nudo. Pieza esencial en la construcción, entendiéndose como el elemento que permite la unión de varias barras en un mismo punto, en el caso rustico se utilizan placas con arreglos inclinados que permitan una conexión directa, ya sea soldada o atornillada. Considerados como un factor importante en el funcionamiento de la Tridilosa, estos deberán llenar los siguientes requisitos:

- a) Transmisión de esfuerzos: los esfuerzos deberán ser tomados y transmitidos en su totalidad, haciéndolo por medio de cordones de soldadura.
- b) Accesibilidad: deberá estar concebida en forma tal que el trabajador pueda ejecutar la unión.
- c) Geometría: siendo lo más simple posible y simétrico.
- d) Estandarización: tendiendo al diseño lo mas semejante e intercambiable posible.
- e) Prefabricación.

2.4. TIPOS DE CONEXIONES

Los tipos de conexiones dependen principalmente de la técnica de conexión, ya sea que esta se haga atornillada, por soldadura, o por conexiones mecánicas especiales. También depende de la forma de las secciones de los miembros, siendo, tubulares, tee, ángulo, etc.

El costo y producción de juntas es uno de los factores que influyen fuertemente en el costo de la estructura; un sistema aceptable de conexiones, requiere cumplir con ser repetitivas, producción en masa, fáciles de fabricar, y capaces de transmitir los esfuerzos en los miembros interconectados.

La solución ideal para conexiones es difícil de lograr, si se tiene en cuenta que son consideradas como articulaciones, donde solo actúan los esfuerzos de tensión y compresión, por lo que, existen en el mercado varios tipos de conexiones, clasificándolas en: conexiones por nudos, y conexiones soldadas.

2.4.1. CONEXIONES POR NUDOS

Existen dentro de las conexiones, la utilización de pernos y/o tornillos, de diversos tipos y diferente uso:

- A-307: son de acero con bajo contenido de carbono, siendo los más populares; se ubican en conexiones no críticas y tienen forma hexagonal en su cabeza.
- A-325: Son pernos de alta resistencia para conexiones estructurales, siendo más confiables que los anteriores.
- A-490: Son pernos de muy alta resistencia en aleación para conexiones estructurales sometidas a grandes esfuerzos.

Los pernos de alta resistencia se utilizan mucho en conexiones presforzadas que trabajan con fricción, su ajuste se lleva por medio de torcómetros que calibran la carga que se les impone. Una conexión de fricción es aquella en que la fuerza es resistida por la fricción generada por las fuerzas de ajuste de los pernos y no por el cortante sobre el vástago del tornillo. Una conexión por contacto es aquella en la que la fuerza es resistida por el cortante que actúa en el perno.

El tamaño de los elementos a menudo determina el tipo de conexión y, la elección final, está ligada a los ángulos en que se intersecan los elementos.

Los nudos tienen doble función; en primer lugar deben garantizar la transmisión de esfuerzos a lo largo de la estructura, sometidos a esfuerzos de tensión y compresión, en segundo lugar facilitar el proceso constructivo de la armadura, por consiguiente, absorber la inevitable dispersión en las longitudes de las barras, respecto de los valores teóricos, al igual que las posibles fijaciones defectuosas en el espacio.

Se menciona a continuación algunos de los tipos de nudos existentes, referentes a las necesidades por satisfacer.

2.4.1.1. NUDO TRIODETIC

Las barras son planas en sus extremos introduciendo a presión en las ranuras dentadas del nudo. La unión se realiza sin soldadura ni pasadores, estos pueden ser de distinta forma según la distribución de las barras concurrentes.



Fig. 2. 9. Nudo Triodetic

2.4.1.2. NUDO SEGMO

SEGMO 1. Nudo en acero soldado, compuesto de una parte esférica y una parte prismática, cada tubo se fija por soldado o por un medio mecánico cualquiera.

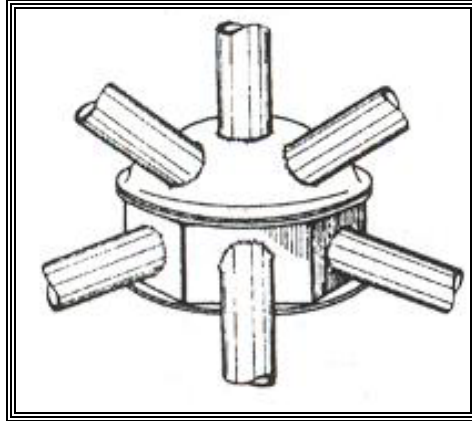


Fig. 2. 10. Nudo Segmo 1

SEGMO 2. Variante del anterior, los tubos tienen en sus extremos un vástago soldado que se introduce en los orificios existentes en el nudo y permite la unión mediante roblonado. El disco anular, intermedio entre la parte esférica y la prismática permite un reglaje de las posiciones relativas de ambas partes.

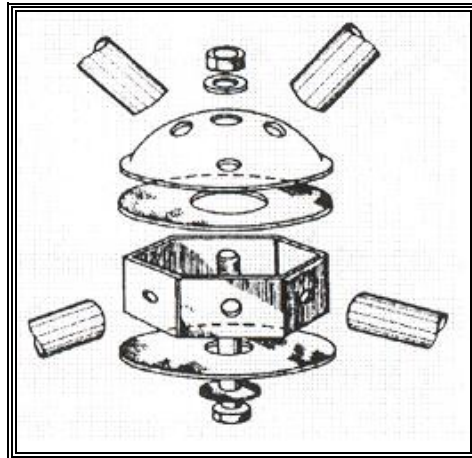


Fig. 2. 11. Nudo Segmo 2

2.4.1.3. NUDO TUBACCORD

Las barras pueden soldarse directamente o bien fijarse mediante un pasador que encaja con unas ranuras situadas en el extremo de las barras y en un manguito soldado previamente a la barra tubular de mayor diámetro concurrente en el nudo.

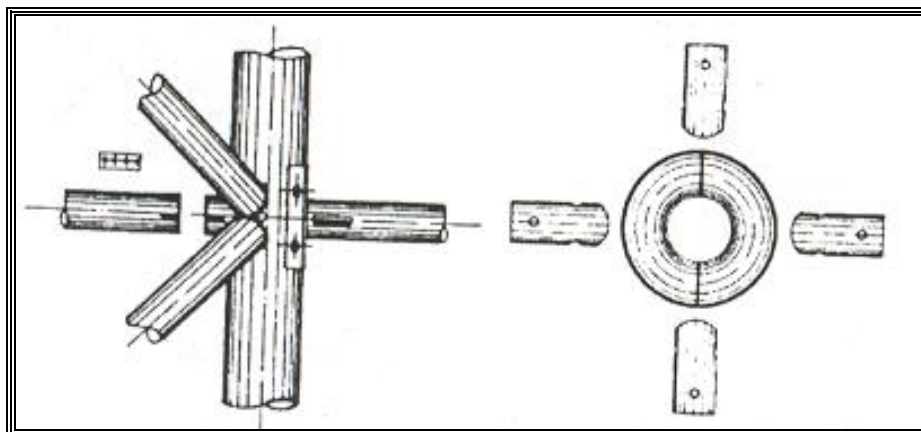


Fig. 2. 12. Nudo Tubaccord

2.4.1.4. NUDO BEGUE

Constituido por un núcleo y barras con extremidades troncocónicas, que se atornilla a aquel.

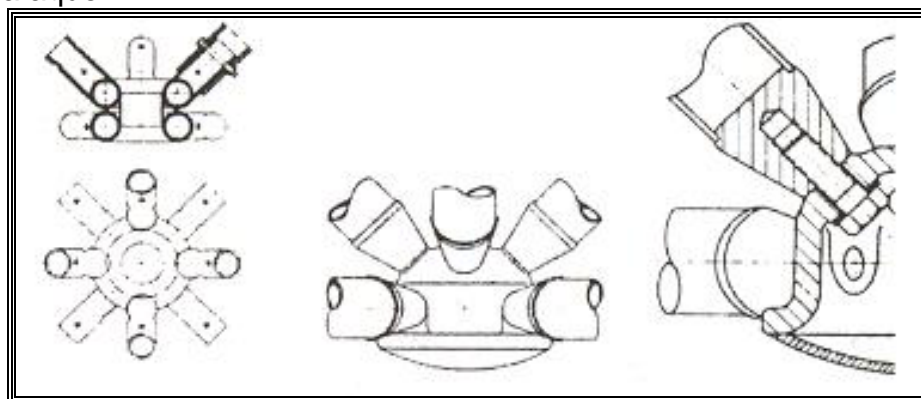


Fig. 2. 13. Nudo Begue

2.4.1.5. NUDO BEGUE-KIEFFER

Formado por una esfera con arranques en los cuales hay dos ranuras destinadas a fijar los tubos, realizándola mediante un mecanismo hidráulico, que presiona un collar dispuesto alrededor del tubo y sobre las ranuras del arranque, previamente introducidas en él.

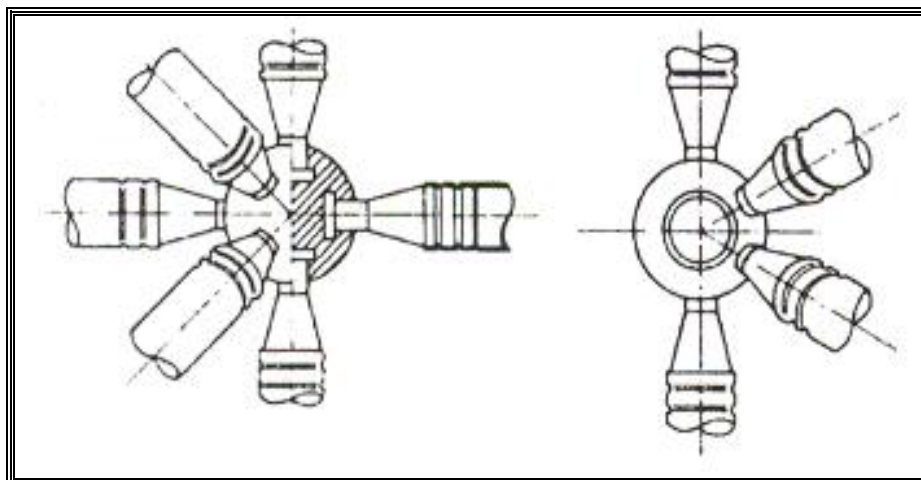


Fig. 2. 14. Nudo Begue Kieffer

2.4.1.6. NUDO DELACROIX-GLOTIN-MONIER-SEJOURNET

Formado por uno o dos semitubos con aletas soldadas que indican las direcciones de las barras concurrentes. Los semitubos se unen mediante roblonado o soldadura a la barra de mayor diámetro concurrente en dicho nudo. La fijación de las restantes barras se realiza aplastando sus extremos y uniéndolos, mediante soldaduras o pasadores a las aletas.

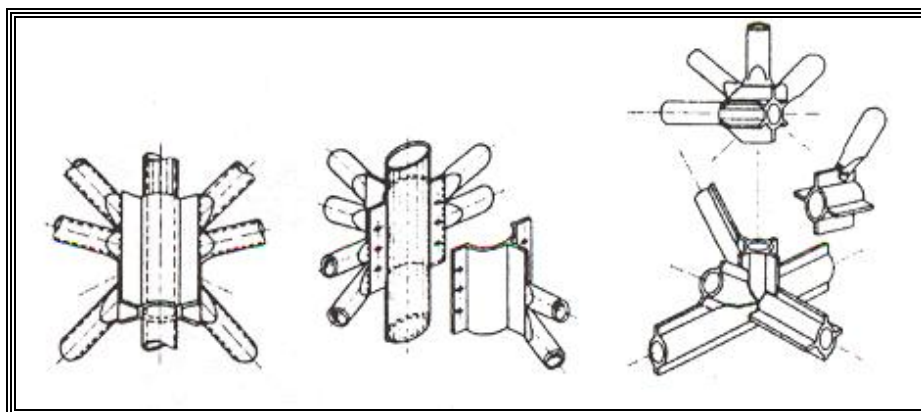


Fig. 2. 15. Nudo Delacroix – Glotin - Sejournet

2.4.1.7. NUDO SARTON

El procedimiento para obtenerlo es aplanar los tubos en los puntos correspondientes a un nudo, con el fin de poderlos cruzar cómodamente y colocar un pasador, con rosca de fijación.

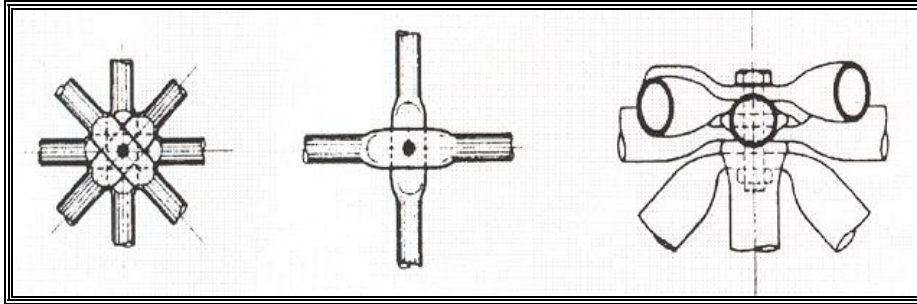


Fig. 2. 16. Nudo Sarton

2.4.1.8. NUDO KIEFFER

Cilindro central macizo que hace de pasador de todo el nudo, el cual consiste en dos cilindros concéntricos, el exterior con ranuras que se sujetan las nervaduras soldadas en el extremo de las barras concurrentes.

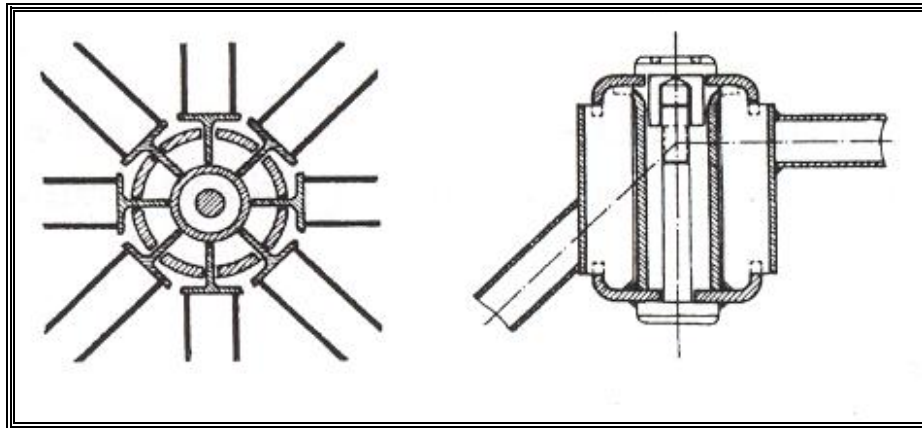


Fig. 2. 17. Nudo Kieffer

2.4.1.9. NUDO ESFERICO

Constituido por una esfera a la que se unen por soldadura barras en cualquier dirección, para absorber diferencias en las longitudes de los tubos se sueldan en el nudo manguitos de diámetro superior al de aquellos. La esfera suele rellenarse de mortero como seguridad a posibles pandeos de la misma.

2.4.1.10. NUDO BITUBULAR

Constituido por dos tubos unidos paralelamente, a los cuales van soldadas las barras concurrentes.

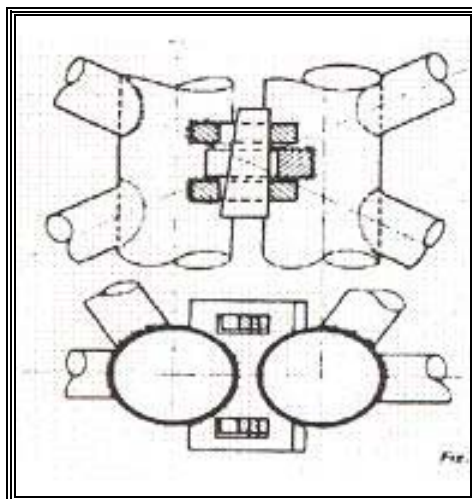


Fig. 2. 18. Nudo Bitubular

2.4.1.11. NUDO TESEP

Las barras concurrentes en el nudo se unen directamente por soldadura a la de mayor diámetro o mediante el atornillado de nervaduras, soldadas en sus extremos a una pletina asimismo soldada y perpendicular al tubo central.

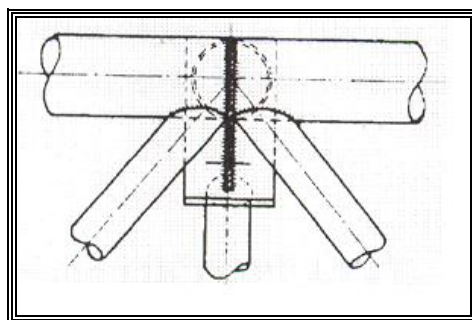


Fig. 2. 19. Nudo Tesepe

2.4.1.12. NUDO UNISTRUT

Formado por una chapa delgada a la que se unen las barras mediante pasadores.

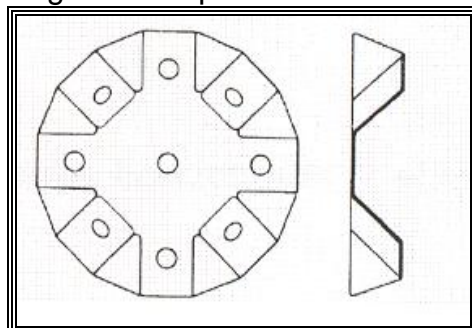


Fig. 2. 20. Nudo Unistrut

2.4.1.13. NUDO MERO

Formado por octágonos inscritos en una esfera, en cada uno de los cuales puede roscarse una barra previamente preparada.

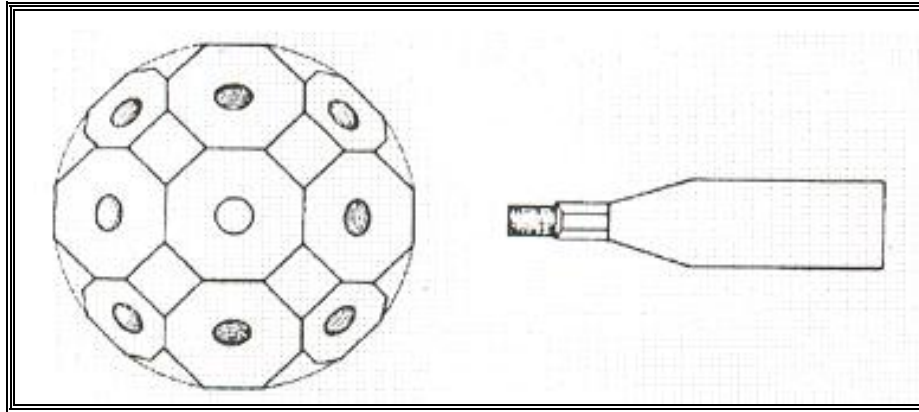


Fig. 2. 21. Mero

2.4.1.14. NUDO TRIDIMATEC

Compuesto por un sistema en cruz de donde parten cuatro mangos a los que se sueldan otras tantas barras, con un accesorio formado por dos placas cruzadas se aumentan el número posible de barras concurrentes en este nudo.

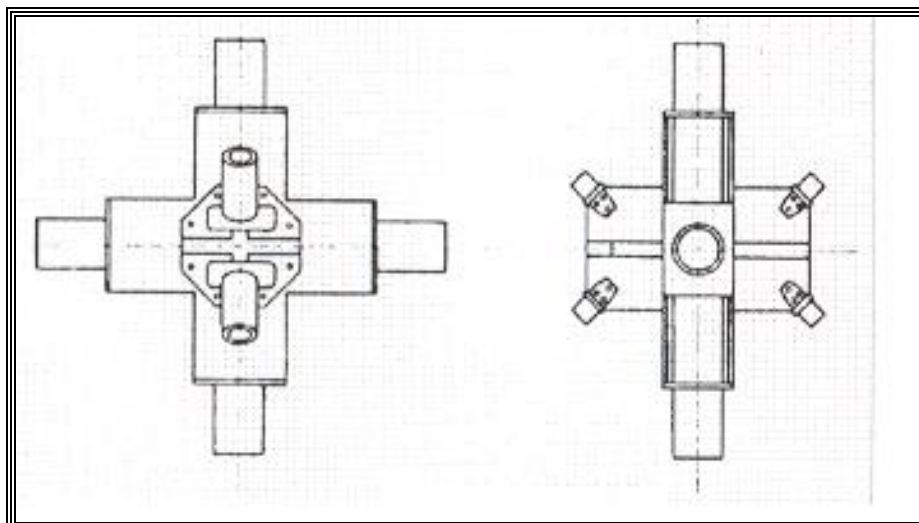


Fig. 2. 22. Nudo Tridimatec

2.4.1.15. NUDO PIRAMITEC

Formado por un cuerpo cilíndrico central, que puede recibir las barras de una capa de la malla y por un tronco de cono, donde se sueldan las barras diagonales.

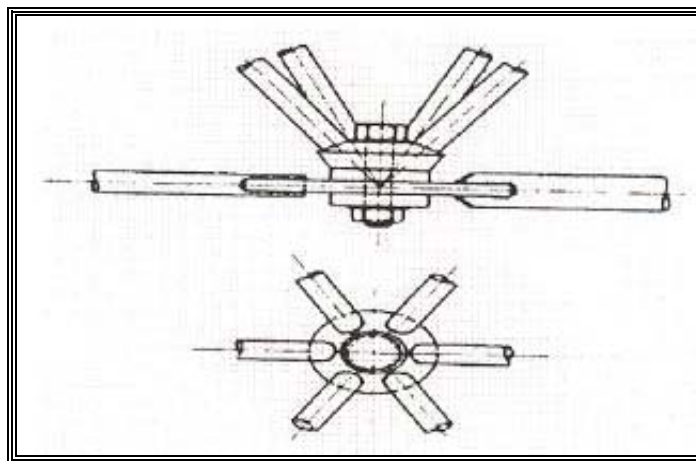


Fig. 2. 23. Nudo Piramitec

2.4.1.16. NUDO OKTOPLATTE.

Nudo esférico formado por dos casquetes y un disco meridiano. El montaje y fijación de estos elementos y de las barras concurrentes se realiza mediante soldadura.

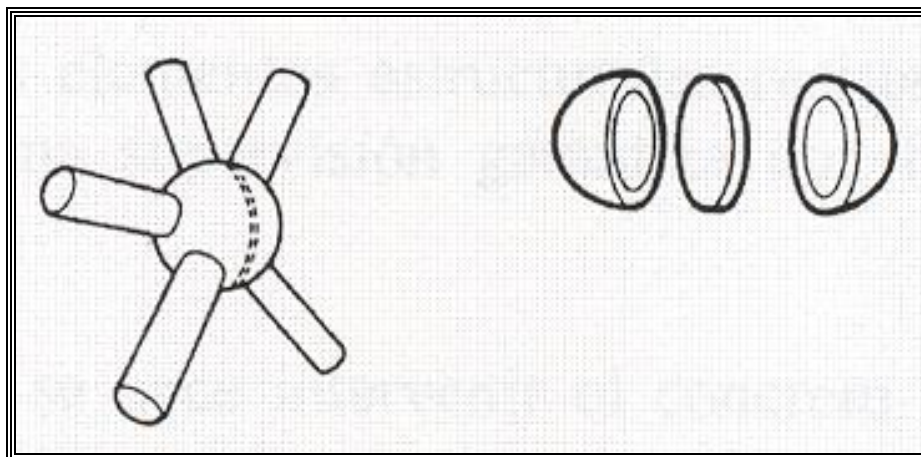


Fig. 2. 24. Nudo Oktoplatte

2.4.1.17. NUDO CASTELAO.

Nudo atornillado formado por un disco plano al que concurren las barras horizontales y al cual se une el elemento que permite la fijación de las barras inclinadas.

2.4.2. CONEXIONES DE SOLDADURA

Para claros grandes mayores a 70 m, las conexiones soldadas son mas usuales, debido a que puede eliminar material en la conexión.

La soldadura de arco es el método más moderno utilizado para unir, basado en la utilización del calor generado por el arco eléctrico, los electrodos son varillas de metal que se funden con calor. El electrodo mas utilizado, es el electrodo de arco protegido, en el cual la varilla tiene una cobertura que al quemarse produce gases de hidrogeno y monóxido de carbono creando, al quemarse, una atmósfera que impide que la atmósfera se oxide cuando esta en estado liquido.

Básicamente existen 5 tipos de soldadura:

- Soldadura de cordón.- se hacen en una sola pasada con el metal de aporte.
- Soldadura ondeada.- Se logran haciendo un cordón con algo de movimiento hacia uno y otro lado habiendo varios tipos, como zigzag, circular, oscilante etc.
- Soldadura de filete Similares a las de ranura pero con mayor rigidez.
- Soldadura de tapón.- Sirven para hacer las veces de remaches. Se emplean para unir por fusión dos piezas de metal cuyos bordes por alguna razón no pueden fundirse.
- Soldadura de ranura o de penetración.- Se hacen en la ranura que queda entre 2 piezas de metal, la ranura comprende: ángulo de la ranura, cara de la ranura, radio de la ranura.

Posiciones usuales de soldar:

- Plana (F).
- Horizontal (H).
- Vertical (V).
- Hacia arriba (O).

Tipos de Juntas; existiendo 5 estilos básicos de uniones o juntas (empalmes):

- Junta a traslape.
- Junta a Tope.
- Junta de esquina.
- Junta de brida.
- Junta en T.

Clasificación de los electrodos según ASTM.

$$E \underbrace{XX}_1 \underbrace{XX}_2 \underbrace{X}_3$$

- 1.- Resistencia la a tensión en miles de libras.
- 2.- Posición, 1 cualquier posición, 2 plana u horizontal.
- 3.- Corriente o polaridad

En la figura 2.25 se presentan algunos detalles de nudos soldados.

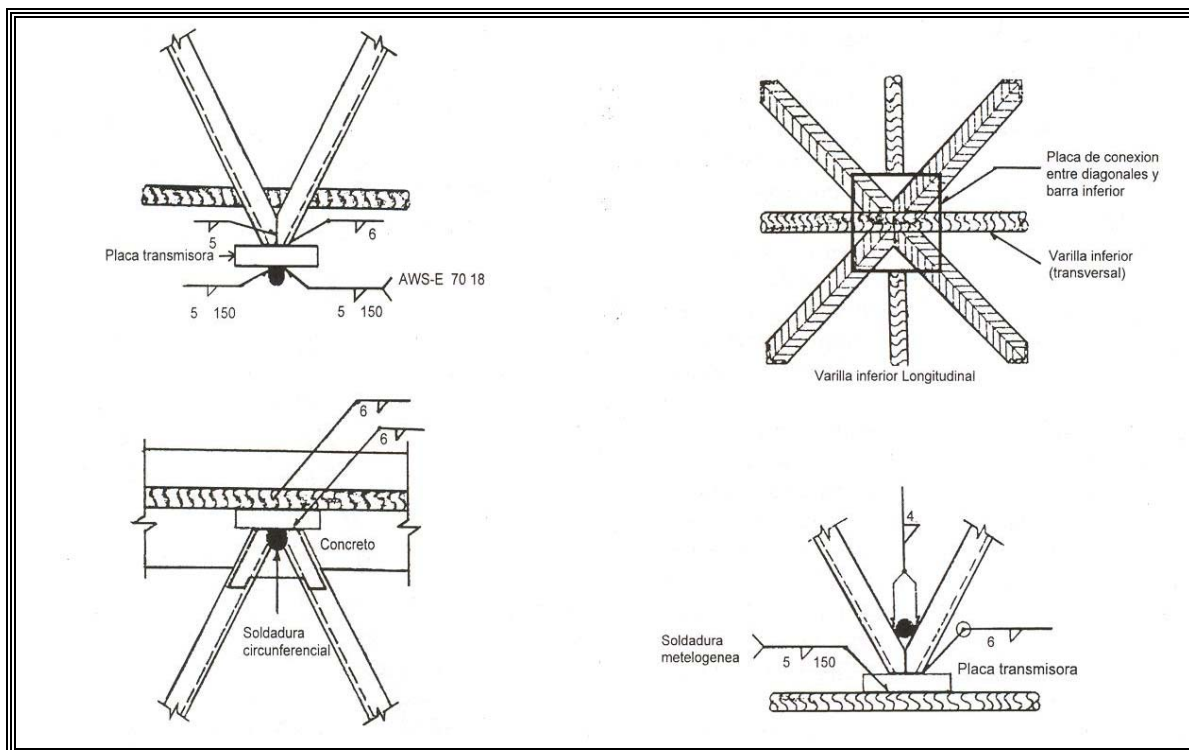


Fig. 2. 25. Planta Nodo Inferior

La diversidad de aceros que se emplean en la construcción del sistema requiere de una técnica para soldarlos que abarque adecuadamente las uniones entre aceros semejantes y aceros diferentes (juntas híbridas), por lo que a continuación se da la tabla con los aceros comúnmente empleados en la construcción de Tridilosas:

GRUPO	Tipo		DESCRIPCION
	Norma México (DGN)	Norma EUA (ASTM)	
A	s/c	s/c	Alambrón de 5mm a 6 mm para arriostrar varilla
B	B-38-1969	A-7	Angulo y varilla grado estructural para elementos
C	B-254-1969	A-36	Acero laminado para elementos y conexiones
D	B-305-1969	A-306-64	Acero de refuerzo laminado en caliente alta resistencia
E	TOR 40 B-294-1969		Acero torcido en frío
F	TOR 60 B-294-1969		Acero torcido en frío
G		A-53 AL 334	Tubo mecánico bajo carbono

Tabla 2.1. Tabla práctica de unión soldada

Para unir aceros de los grupos A y B son suficientes electrodos tipo E6010 y E6011, sin embargo para los del grupo C se requieren electrodos del tipo E 70XX. Para los aceros del grupo D y E son suficientes los electrodos tipo E90XX. Así para los del grupo F únicamente son recomendables electrodos tipo E110XX.

La tabla siguiente muestra los aceros empleados y tipo de electrodo recomendado para el correcto soldaje entre aceros.

Acero (ASTM)			Electrodo Clasificación AWS	Tratamiento Calórico
Sin clasificación o desconocido Grupo A	Vs	A-7 A-36 A-306-64 TOR 40 TOR 60	E-7018	*
A-7	Vs	A-7 A-36 A-306-64 TOR 40 TOR 60	E-6010, E6011 E-7018 E-7018 E-7018 E-7018	SI
A-36	Vs	A-36 A-306-64 TOR 40 TOR 60	E-7018	SI
A-306-64	Vs	A-306-64 TOR 40 TOR 60	E-9018 E-9018 E-11018	SI
TOR 40	Vs	TOR 40 TOR 60	E-9018 E-9018	SI
TOR 60	Vs	TOR 60	E-11018	NO
Tubo mecánico. A-55 al 334	Vs	TUBO	E-70XX	NO

* Conocer el equivalente calórico para determinar si procede el tratamiento calórico y temperatura crítica, la que hay que elevar el metal base y a la que hay que mantenerlo durante el proceso de soldaje.

Tabla 2.2. Tabla de Aceros empleados y tipo de electrodos requerido para correcto soldaje

Siendo el acero un sólido cristalino, los tratamientos térmicos o calóricos controlados son precisos, evitan cambios en la estructura del material cuando el contenido de carbono y aleantes son sometidos a altas temperaturas, y por efecto de la soldadura pueden llegar a formar martensita en las zonas aledañas a la junta soldada.

Para evaluar la temperatura necesaria para reducir la velocidad de enfriamiento es necesario conocer el contenido de carbono así como de los aleantes que favorecen la formación de Martensita, por lo que se ha establecido el Equivalente de Carbono, que indica el porcentaje de carbono necesario en un acero para causar los efectos de endurecimiento; conforme al resultado del cálculo, se necesitan diferentes temperaturas de calentamiento que se muestran a continuación:

Equivalente De Carbono	Temperatura de Pre calentamiento
Hasta 0.4	Ninguna
0.4 – 0.5	100° – 200°
0.5 – 0.6	200° - 325°
0.6 – o mas	350° - 500°

Tabla 2.3. Tabla de tratamiento térmico

2.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Dentro de las **ventajas** que justifican el uso de las Tridilosas se muestran algunas de ellas:

1. Reducción de carga muerta, siendo directamente proporcional a la altura de la construcción, y evitando la colocación de trabes.
2. Son altamente hiperestáticos y el pandeo de cualquier miembro en compresión, no lleva al colapso total de la estructura.
3. Su alta rigidez provoca deflexiones pequeñas.
4. Alta resistencia al fuego, a diferencia de los sistemas convencionales cuando el lecho de concreto esta contenido en ambas caras.
5. Estandarización productiva, al ser hechas de componentes modulares, pueden producirse masivamente en dimensiones y formas coordinadas, facilitando el almacenaje, empaque y transportación.
6. Pueden ser ensamblados unas cuantas partes prefabricadas asegurando precisión y rapidez en la erección. El pequeño tamaño de sus componentes simplifica grandemente el manejo, transportación y montaje.
7. Se caracterizan por ser de fácil desmontaje o expandible en cuanto a agregar más módulos.
8. La localización de los apoyos puede ser en casi cualquier parte de la estructura, lo que permite al diseñador gran flexibilidad en la elección de la modulación y el posicionamiento de columnas, además de que es posible en algunos casos remover o modificar la posición de algunas columnas sin daño a la integridad estructural del sistema.
9. El espacio entre las retículas inferiores y superiores, puede usarse para instalaciones.
10. Los patrones de regularidad en la estructura proveen una atractiva apariencia que empieza a ser apreciada en muchas aplicaciones arquitectónicas.
11. La transferencia de fuerzas a compresión en el concreto minimiza el fenómeno de inestabilidad elástica.
12. Cimentaciones más sencillas.
13. Disminución de la fuerza sísmica, al ser pequeña su masa; disminuye en un 40 % los elementos mecánicos por sismo.
14. No necesita trabes.
15. Se evitan materiales inactivos (concreto en tensión).
16. Propiedades térmicas y acústicas.

17. Se evitan puntales.
18. Al aumentar su peralte no aumenta su peso, pero si su resistencia, por lo que su relación Peso muerto/ carga útil es baja.

Por las **desventajas** se puede mencionar.

1. Falta de especificaciones detalladas.
2. Incremento del costo debido a poca demanda en cuanto a la prefabricación.
3. Falta de información técnica sobre su comportamiento.
4. Necesidad de asesoría estructural.
5. Instalación con grúa o montacargas.
6. Requerimiento de mano de obra especializada en la colocación de los elementos y en el caso de concreto.
7. Solo la colocación del concreto se ve impedida por mal tiempo.
8. La necesidad de hacer estudios financieros costo-utilidad, costo- tiempo, para ver las ventajas económicas que se pueden lograr, con este sistema estructural.
9. Cimbrar cuadro por cuadro (cada modulo).
10. Efectos de fatiga en sus elementos estructurales y conexiones en sistemas muy flexibles.
11. Escasa rigidez a torsión.
12. Mantenimiento grande y en climas costeros la brisa provoca oxido en la estructura.
13. En zonas de terreno blando, debe ser mayor la supervisión de construcción para evitar problemas ante carga lateral.

Comparación de las propiedades y características entre sistema tradicional y Tridilosa.

Descripción	Sistema	
	tradicional	Tridilosa
1.- Carga muerta	100 %	40%
2.- Tipo de cimentación	complicado	Sencillo
3.- Fuerza sísmica	Grande 100%	Pequeña 70%
4.- Trabes de apoyo	Necesarias	No se usan
5.- Altura del edificio	Excesiva	Mínima
6.- Costo de Construcción	Mayor 100%	Menor de 80%
7.- Materiales Inactivos	Existen	No hay
8.- Velocidad de construcción	Lenta	20% mas rápida
9.- Instalaciones eléctricas y sanitarias	Fijas	Sencillas y movibles
10.- Propiedades Térmicas y acústicas	Bajas	Elevadas
11.- Uso de puntales	Necesarias	No se ocupan

Tabla 2. 4. Comparativa entre Tridilosa y sistema tradicional

3. ANÁLISIS DE TRIDILOSAS

El análisis de la Tridilosa, se puede plantear desde diferentes puntos de vista, el cual se puede simplificar o complicar, según los factores a considerar.

Para entender el concepto de Tridilosas, primero se tendría que comprender algunos aspectos básicos en la modelación y análisis de armaduras tridimensionales, tales como:

- a) El claro y condiciones de apoyo.
- b) Las fuerzas externas.
- c) Propiedades del material que se desea utilizar.

El claro, las condiciones de apoyo y las fuerzas externas afecta directamente al momento flexionante en una losa. Las condiciones de apoyo nos determinarán la distribución de momentos, el claro permitido y la magnitud de las cargas en las barras.

Un criterio en el análisis de una Tridilosa es que se puede estudiar como una losa plana aligerada que se apoya directamente sobre las columnas, por lo que se considera la estructura formada por un conjunto de marcos, cuyo ancho equivalente de la losa se determina como se establece en el RCDF en el capítulo de losas planas; de esta manera, se procede al cálculo de los elementos mecánicos, considerando, para su análisis, las franjas central y de columnas que permiten distribuir los momentos causados por las cargas y la continuidad entre tableros. En función del peralte de la losa se estiman los esfuerzos de tensión o compresión que sufrirán los elementos de las parrillas superior e inferior. El análisis de las diagonales puede hacerse estimando líneas de falla, ya que estos elementos son los que se encargan de la transmisión del cortante.

Se le puede tratar también como un conjunto formado por dos placas planas ligadas por diagonales y analizar en forma independiente las placas y las diagonales.

Otro criterio tomado para el análisis de Tridilosas es el considerar el conjunto como una armadura espacial, donde los elementos están sujetos a esfuerzos simples de tensión y compresión. Se puede considerar que el concreto de las parrillas ayuda a eliminar el pandeo de los miembros horizontales sujetos a compresión además de proporcionar un sistema de piso utilizable. Este último criterio es el que mas se utiliza para el análisis de Tridilosas.

3.1. PREDISEÑO

Para fines de prediseño se puede suponer el trabajo del conjunto como una losa, viga, marco u otro elemento; para obtener en forma rápida y aproximada las fuerzas sobre las barras críticas.

El predimensionamiento está regido por la relación entre el peralte estructural y el claro a salvar para estructuras espaciales, esta relación oscila entre 1/15 y 1/40. El claro máximo para el cual este sistema estructural es económico es de 30 m, utilizando una sola formación de piñas. Claros mayores se pueden alcanzar con formaciones de más de una piña como se han empleado en algunos puentes.

Las relaciones más usuales para el predimensionamiento de este tipo de estructuras son:

Tipo	La (m)	h/L
1	10 - 75	1/15 - 1/40
2	75 - 120	1/15 - 1/20

Tabla 3.1 Relaciones Peralte/Claro

Donde:

- La = Distancias entre apoyos
- h = Altura o peralte de la estructura
- L = Claro Máximo de la estructura

Es común usar el límite inferior para sistemas de piso, y el límite superior cuando se trata de cubiertas, aunque también esta en función del tipo de material y de los niveles de carga.

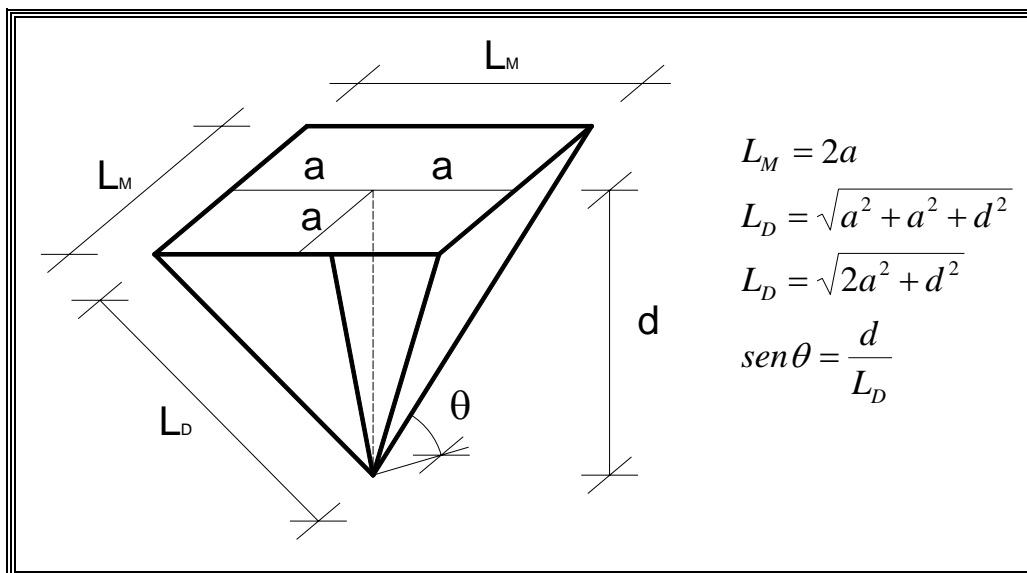


Fig. 3. 1. Perspectiva del módulo y relaciones geométricas.

Como prediseño además, se recomienda que la longitud de las barras diagonales sea mayor que 0.8164 veces la longitud del módulo y menor de 1.4142 veces la longitud el módulo para formar un ángulo entre 30° y 60° respectivamente. O en

función del peralte que la longitud de la diagonal este comprendida entre 2 y 0.8660 el peralte.

θ	d	L_M	L_D
30	1	2.4494	2
	0.4082	1	0.8164
	0.5	1.2247	1
45	1	1.4142	1.4142
	0.7071	1	1
	0.7071	1	1
60	1	0.8164	1.1547
	1.2247	1	1.4142
	0.8660	0.7071	1

Tabla 3.2. Relación peralte, longitud de modulo y longitud de diagonal en función del ángulo

3.2. MÉTODOS DE ANÁLISIS

Una losa maciza cargada perpendicularmente a su superficie y apoyada perimetralmente, esta sujeta principalmente a fuerzas cortantes y momentos flexionantes, condición que se podría plantear de manera simplificada en una Tridilosa, la cual se resolvería planteando el par de momento con los elementos horizontales; además los elementos verticales e inclinados deben resistir la fuerza externa tributaria, es decir el cortante de la losa.

Las condiciones del sistema nos permitirán dimensionar las secciones, y establecer el número de niveles o formaciones para definir el peralte de la Tridilosa. Sin embargo, su cálculo manual es prácticamente imposible, por supuesto su complejidad aumenta con la existencia de un mayor número de elementos componentes de la Tridilosa.

Para el diseño y análisis de las Tridilosas se han desarrollado en el mundo una serie de software que analiza este y otro tipo de sistema estructural desde el punto de vista matricial. Entre ellos tenemos:

- SAP 90
- SAP2000
- FRAME3D
- STAD3
- MULTIFRAME 3D
- CADRE Pro

En el diseño y cálculo de estructuras de este tipo se hace importante valuar:

- Las tensiones axiales
- La fatiga
- Momento de inercia y modulo de elasticidad

Como se mencionó el análisis de una estructura como la Tridilosa se puede plantear de diferentes puntos de vista, simplificándose o complicándose dependiendo de los factores a considerar.

Para su análisis se supone implícitamente que la relación carga-desplazamiento es lineal y que los desplazamientos son pequeños. Para desplazamientos grandes se puede esperar que este conjunto se llegue a comportar como membranas cuyos elementos comienzan a trabajar después de alcanzar una gran deformación.

La reciente facilidad del ingeniero para tener acceso a computadoras, ha dado lugar a una reorientación en la teoría estructural. En el análisis de estructuras ha surgido una gran tendencia al estudio de nuevas técnicas de programación y el empleo de formulas matriciales

A continuación se presentan las diferentes formas como se puede abordar el análisis, para este tipo de estructuras, como son:

- Elemento finito.
- Forma Matricial.
- Teoría de losas Sándwich.

3.2.1. MÉTODO DE ELEMENTO FINITO

Existen formas analíticas y numéricas para resolver problemas en ingeniería, siendo analítica cuando se cuenta con una formula explicita que considera las variables significativas del problema, y numérica cuando se discretiza el medio en estudio y se aplican los principios de la mecánica de medios continuos, a cada elemento de la división; integrando soluciones particulares se conoce la solución general; dentro de estos métodos esta el método de elementos finitos.

El método del elemento finito es un procedimiento numérico empleado para analizar estructuras y medios continuos, estos problemas se refieren a análisis de esfuerzos, conducción de calor, campos eléctricos, campos magnéticos, fluidos, etc. Fue desarrollado paralelamente con las computadoras digitales, ya que depende de esta herramienta para aplicarlo. La base de este método son las ecuaciones matriciales, en las que se realizan gran cantidad de operaciones numéricas, por lo cual es importante la aplicación de las computadoras para el desarrollo numérico a realizar.

A partir de un comportamiento elástico lineal de los materiales, se considera que la energía interna de deformación es igual al trabajo externo, lo que conduce al establecimiento de las ecuaciones del método de elementos finitos. La idea básica consiste en dividir un dominio, sistema o región en un conjunto de partes o elementos más simples o discretos a los que se denominan elemento finito. A los

vértices de cada elemento se les conoce como puntos nodales o nodos, aunque también se pueden definir nodos sobre los lados dentro de cada elemento.

Una vez realizada la subdivisión/discretización se recurre a las relaciones esfuerzo deformación y a las relaciones constitutivas del material para derivar las matrices características de cada uno de los elementos de la malla. La matriz característica de todo el sistema o dominio se forma mediante un proceso de ensamble o suma ordenada, la que se modifica para tener en cuenta las restricciones del problema. Por otra parte se define un vector con las condiciones de carga. Este proceso conduce a un sistema de ecuaciones simultáneas.

La solución del sistema de ecuaciones permite conocer los desplazamientos en los nodos del sistema. Con base en esta información se obtienen las deformaciones y posteriormente los esfuerzos y la distribución de los elementos mecánicos en el modelo. Esto permite revisar su diseño estructural.

Un análisis estático de esfuerzos en medios continuos elásticos mediante el método de elemento finito generalmente involucra los siguientes pasos:

1. Dividir la estructura o medio continuo en elementos finitos (malla).
2. Definir las propiedades de cada elemento.
3. Especificar la manera en que se encuentra soportada la estructura.
4. Ensamblar los elementos para obtener el modelo de elementos finitos de la estructura completa.
5. Aplicar las cargas conocidas.
6. Resolver el sistema de ecuaciones simultáneas para determinar los desplazamientos y/o rotaciones de cada nodo.
7. Calcular los esfuerzos que se producen en los elementos a partir de las deformaciones en los mismos obtenidas del campo de desplazamientos del elemento (interpolación) y de los grados de libertad de los nodos.

Para su cálculo en la Tridilosa se puede seguir el siguiente procedimiento:

- Se cuantifican y analizan las cargas que intervendrán en la estructura
- Se define la localización espacial de cada nudo por medio de coordenadas.
- Se determinan las propiedades de los materiales y de los miembros
- Se aplican las cargas antes analizadas
- Se especifican los grados de libertad de los apoyos
- Se obtienen los desplazamientos
- Se obtienen los elementos mecánicos que actúan en cada barra así como las deflexiones.

El Método de elemento finito es un procedimiento que sirve para conocer el estado de esfuerzo y deformaciones, y por ende los desplazamientos en un medio continuo. Si se considera un medio continuo, dividido en triángulos, al aplicar un sistema de fuerzas el medio se deforma y presenta desplazamientos, valuando el trabajo de fuerzas externas y el acumulado a esfuerzos internos. Para el caso

elástico lineal, los trabajos se igualan conduciendo a un sistema de ecuaciones lineales en que las fuerzas en los vértices de los triángulos quedan en función de los desplazamientos; la resolución de este sistema permite conocer los desplazamientos en los nudos, y estos, a su vez, los esfuerzos de los triángulos en los que se dividió.

Los miembros de la armadura se modelan como elementos de armadura de dos nodos con tres grados de libertad por nodo, la losa de concreto con elementos de placa rectangular de cuatro nodos, con cuatro grados de libertad por nodo (u, v, w, ϕ_x, ϕ_y).

3.2.2. MÉTODO MATRICIAL

Actualmente se dispone de procedimientos matriciales de principios sumamente simples como el método de las fuerzas o flexibilidades y el de rigideces o desplazamientos, que permiten calcular los elementos mecánicos producidos en estructuras debido a las acciones exteriores actuantes en las mismas.

Estos métodos son de gran utilidad para analizar estructuras con muchos grados de hiperestaticidad con la desventaja que para la solución del problema se plantean grandes sistemas de ecuaciones lineales. Es por esto que el empleo del álgebra matricial y la ayuda de las computadoras, han cambiado los procedimientos tradicionales de análisis.

El análisis de la Tridilosa se hace como una armadura en el espacio perfectamente definida. Este análisis se basa en los fundamentos de la teoría de las estructuras articuladas isostáticas e hiperestáticas, exterior e interiormente. Para una armadura isostática el número de incógnitas es igual al número de ecuaciones, cuando el número de incógnitas es mayor que el de ecuaciones independientes se dice que es hiperestática, siendo necesario recurrir a las deformaciones que sufre el cuerpo, de acuerdo con las características del material que este constituido.

Procurando obtener una armadura isostática en el espacio, se obliga a que se cumpla:

$$B = 3N - 6 \quad (3.1)$$

Donde:

B = Numero de barras.

N = Numero de nudos y apoyos.

Con la expresión anterior se asegura que la estructura es estáticamente determinada, mas no su estabilidad; en el espacio, lograr esto último es muy difícil,

mas cuando se esta procurando una geometría definida en la estructura, sin embargo, lo mas adecuado es, ya determinada su condición Isostática, observar cuidadosamente todas las posibilidades de mecanismos y una vez determinada la duda proceder al análisis.

Siendo $(3N - 6) < B$ se dice que la estructura es interiormente hiperestática de grado igual a $B - (3N - 6)$, pero cuando las reacciones en la estructura son más que las tres ecuaciones estáticas que se pueden plantear, se dice que la estructura es exteriormente hiperestática del grado que las reacciones sobrepasen a las tres ecuaciones estáticas.

a) Estructuras articuladas Isostáticas.

Estas estructuras serán formadas por barras articuladas entre si y cargadas solo en sus nudos. Se desprecia el peso de cada barra, y se impone que en ninguna barra habrá flexión y únicamente trabajaran a esfuerzos normales.

Para que una estructura articulada sea Isostática interiormente debe cumplir con la condición de nudos y barras, esto es, al formar la estructura se parte de un triangulo y por cada nudo que se le aumente, se le agregan dos barras, es decir, "El numero de barras debe ser igual al triple del número de nudos, menos seis."

Entonces, se dice que una estructura articulada está resuelta cuando se hayan determinado las matrices que dan los esfuerzos y los desplazamientos originados por cualquier sistema de cargas.

Esto es, para los esfuerzos

$$a_{ij} F_i = N_i \quad (3.2)$$

Donde:

a_{ij} = es una matriz invariante de la estructura, pues los esfuerzos solo dependen de las propiedades geométricas y elásticas de la estructura y de ninguna manera del sistema de cargas.

F_i = Fuerzas externas.

N_i = Esfuerzos normales en las barras.

Para los desplazamientos verticales:

$$\delta_{ij} F_i = \Delta_i \quad (3.3)$$

Donde:

δ_{ij} = Desplazamientos en el nudo i, provocados por una carga unitaria en el nudo j.

F_i = Fuerzas externas.

Δ_i = Desplazamientos verticales en la estructura.

Con estas dos ecuaciones se resuelve el problema Isostático.

b) Estructuras articuladas hiperestáticas

Una estructura es hiperestática cuando las ecuaciones de la estática son insuficientes para resolver el número de incógnitas que se presenten. El grado de hiperestaticidad de una estructura es el número de incógnitas estáticamente indeterminadas que tiene.

En las estructuras articuladas pueden presentarse el exceso de las incógnitas de dos formas:

- En los apoyos, teniendo a las estructuras hiperestáticas exteriormente.
- En el número de barras, para las estructuras hiperestáticas interiormente.

Para lo anterior, independientemente del método que se utilice para resolver esos dos casos, se llegará a las dos ecuaciones descritas para las estructuras articuladas isostáticamente, de donde obtendremos los esfuerzos y los desplazamientos verticales correspondientes.

Finalmente al aplicar lo anterior al caso de las Tridilosa, que es una estructura en el espacio, se deberán calcular las matrices de los esfuerzos y de los desplazamientos, tal como se describió, pero considerando que la estructura se encuentra en el espacio tridimensional.

Una armadura espacial esta formada por elementos aislados, unidos por articulaciones, provocando solo fuerza axial en los miembros rectos. Es claro que la Tridilosa no trabajará únicamente con esfuerzos normales de tensión y compresión en sus miembros, pero si serán estos los elementos mecánicos predominantes y los que rigen el diseño de la misma. Los nudos estarán definidos tanto en las intersecciones de los elementos como en los apoyos del sistema. Se considera que los miembros tienen un comportamiento elástico lineal y que los desplazamientos que pueden sufrir los nudos son relativamente pequeños comparados con las dimensiones generales de todo el sistema.

Método de las rigideces o desplazamientos.

Se conoce la geometría del conjunto, las dimensiones y propiedades de los miembros y el sistema de fuerzas exteriores estáticas que actuaran en los nudos de la armadura. Se pretende obtener el desplazamiento que sufren las barras (alargamiento o acortamiento) y los elementos mecánicos, que en este caso por tratarse de una armadura solo serán tensiones o compresiones.

Todo el conjunto puede estar referido a un sistema global de 3 ejes coordenados, de tal forma que los nudos pueden estar representados por puntos en el espacio y los miembros como líneas que ligan dichos puntos.

La armadura es hiperestática y la condición de equilibrio exterior no es suficiente para plantear un sistema de ecuaciones que nos permita resolver el conjunto.

El método propiamente se basa en el planteo de las ecuaciones de: Compatibilidad de deformaciones, Relación Fuerza-Deformación y Equilibrio.

a) Compatibilidad de Deformaciones

Aprovechando la continuidad del conjunto, se puede plantear un sistema de ecuaciones que nos relacione los alargamientos o acortamientos de las barras con los desplazamientos posibles de los nudos.

Por simple convención, se considera como positivo un alargamiento producido por la fuerza de tensión en el miembro y negativo un acortamiento producido por una fuerza de compresión. El desplazamiento de los nudos se considerará positivo o negativo de acuerdo con el sistema global de referencia. Aplicando desplazamientos unitarios de traslación y rotación se obtienen las deformaciones axiales, angulares y lineales en una barra cualquiera. En la figura 3.2 se indica la obtención de la rigidez axial.

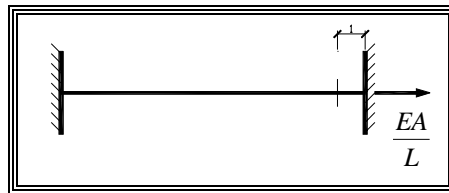


Fig. 3. 2. Rigidez axial

El sistema de ecuaciones planteado de esta manera, bien puede ser representado en forma matricial; con la expresión:

$$\{e\} = |A|\{\delta\} \quad (3.4)$$

Donde:

$\{e\}$ = Es un vector columna de “ B ” elementos.

$|A|$ = Matriz de coeficientes del sistema, orden “ $B \times 3N$ ” conocida como matriz de continuidad.

$\{\delta\}$ = Vector columna de “ $3N$ ” renglones que representa por grupos de 3 las componentes de desplazamiento paralelas a los ejes de referencia.

b) Relación Fuerza deformación

Considerando la relación lineal que existe entre las fuerzas interiores en las barras y la deformación que sufrirán las mismas en el rango elástico, se puede plantear otro sistema de ecuaciones, que en forma matricial condensada se escribe.

$$\{P\} = |k|\{e\} \quad (3.5)$$

Donde:

$\{P\}$ = Es un vector columna de "B" renglones que representa la fuerza axial de cada miembro.

$|k|$ = Es una matriz diagonal de orden "B x B" que contiene la rigidez de cada uno de los miembros.

La rigidez axial de los miembros se calcula:

$$(K)_i = \frac{E_i A_i}{L_i} \quad (3.6)$$

Donde:

$(K)_i$ = Rigidez de miembro i

E_i = Modulo de elasticidad de su material

A_i = Área de la sección transversal

L_i = Longitud del mismo

c) Equilibrio

Para obtener el mismo número de ecuaciones que incógnitas, podemos recurrir a las ecuaciones de equilibrio, el equilibrio nos relaciona las acciones exteriores que actúan en los nudos con las fuerzas interiores axiales en las barras. El sistema de ecuaciones que se plantea, se expresa en forma matricial condensada como sigue:

$$\{F\} = |A^T|\{P\} \quad (3.7)$$

Donde:

$\{F\}$ = Vector columna, de orden "3N x 1" que contiene, siguiendo el orden usual las componentes paralelas a cada una de las tres direcciones del sistema coordinado de las fuerzas exteriores actuantes en cada uno de los nudos de la armadura.

$|A^T|$ = Denominada matriz de equilibrio, matriz de coeficientes del sistema y su orden es de $3N \times B$

Sustituyendo la ecuación de continuidad en la relación fuerza desplazamiento.

$$\{F\} = |A^T|k|A|\{\delta\} \quad (3.8)$$

Es costumbre denominar al producto $|A^T|k|A| = |K|$ como la matriz de rigidez de la estructura o matriz de rigidez ensamblada. Por lo que se puede escribir:

$$\{F\} = |K|\{\delta\} \quad (3.9)$$

De aquí que se conocen $\{F\}$ y $|K|$. Por lo que es fácil obtener los desplazamientos de los nudos $\{\delta\}$, ambos miembros de la ecuación por la inversa de la matriz $|K|$

$$\{\delta\} = |K^{-1}|\{F\} \quad (3.10)$$

Conocidos ya los desplazamientos de los nudos recurrimos a la ecuación de continuidad para calcular las deformaciones de los miembros y a Ley de Hooke para calcular las fuerzas axiales en las barras, teniendo así:

$$\{e\} = |A|\{\delta\} \quad (3.11)$$

$$\{P\} = |k|\{e\} \quad (3.12)$$

3.2.2.1 PROGRAMA DE ANÁLISIS “TRIDI”

Con base en esta metodología, se presentan los resultados de un programa desarrollado en Fortran (TRIDI) específicamente para el análisis de estructuras espaciales modulares, como es el caso de la Tridilosa y se compara con los resultados de un programa comercial (SAP2000).

La ventaja de usar el programa TRIDI es que solo hay que indicarle las dimensiones generales de la Tridilosa en planta y su peralte, así como las cargas aplicadas. El programa se encarga de construir la geometría de barras.

Ejemplo: Teniendo un área por cubrir de 5m x 4m

Utilizando módulos cuadrados con ángulo de inclinación de las diagonales de 45° y una relación de peralte máximo de: L/15

Se puede deducir las longitudes de las diagonales, así como del modulo.

$$L_D = L_M = \sqrt{2}d$$

Para la losa se procede al cálculo del peralte.

$$d = \frac{500}{15} = 33.33 \approx 35\text{cm}$$

la longitud del modulo y por consiguiente de las diagonales será:

$$L_M = L_D = \sqrt{2} * 35 = 49.5 \approx 50\text{cm}$$

Se propone una carga repartida de:

$$\omega = 200 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2}$$

La Tridilosa tiene un área en la malla inferior y en la superior:

$$A_I = 20\text{m}^2 \quad A_S = 4.5 * 3.5 = 15.75\text{m}^2$$

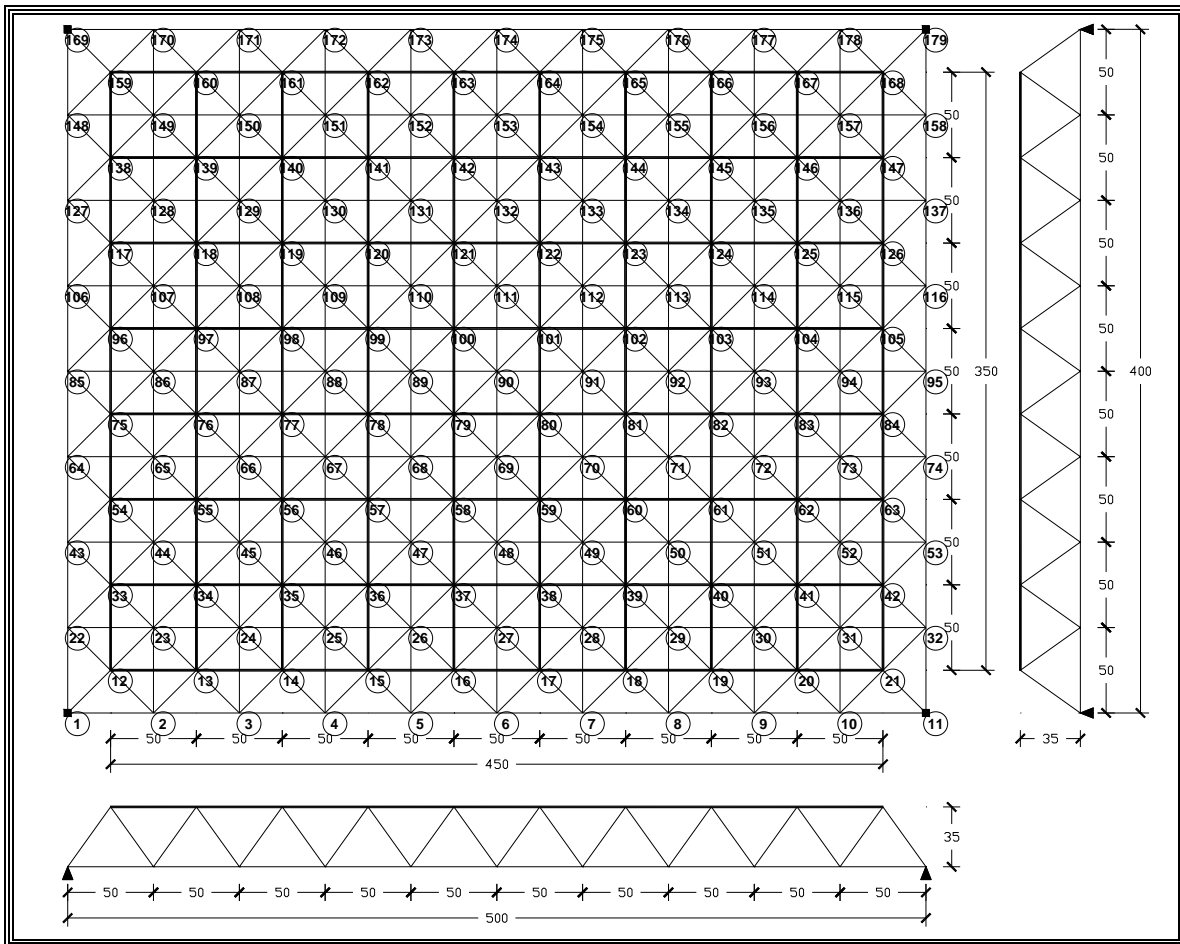


Fig. 3.3 Ejemplo de aplicación con numeración de nudos

Por lo cual se puede obtener una Tridilosa con 179 nudos y 640 barras, entre los cuales 99 nudos corresponden a la parte inferior y los restantes 80 a la superior, donde la numeración de nudos en los programas se hace coincidir con la figura 3.3, para que los resultados en cada numeración de nudo sea el mismo, en cuanto a las barras se tienen 178 barras en la retícula inferior, 142 en la retícula superior, y las restantes 320 barras son diagonales, y donde la numeración se procedió, primero por la retícula inferior en dirección "x" después en dirección "y", siguiéndose con la retícula superior de la misma manera, y concluyendo con las diagonales que concurren a cada nudo en la parte superior de la retícula (por modulo).

Revisando la condición de la Tridilosa, con los nudos y barras obtenidos de la distribución espacial.

$$B = 640 \qquad N = 179$$

Como $(3N - 6) < B$ se tiene una armadura hiperestática con grado

$$B - (3N - 6) = 640 - (3(179) - 6) = 109$$

Lo que implica que tiene mucha hiperestaticidad, por lo que el pandeo de un elemento, no producirá la falla de la estructura.

Esta revisión de la estructura es importante en el planteamiento para el análisis, ya que una estructura que no cumple con las condiciones de isostaticidad e hiperestaticidad, estaría fuera del alcance de solución ya que se tendría una estructura hipostática, lo cual implica que no tiene solución y al considerar en las armaduras articulaciones sin fricción se volvería un mecanismo.

Actuando la carga en toda el área de la retícula superior

$$\varpi = 200 \frac{Kg}{m^2} (15.75m^2) = 3150Kg$$

se tienen 80 nudos por lo que actúa una carga en cada nudo de

$$\varpi_{T/N} = 39.375Kg / N \approx 40kg$$

Así, para el programa TRIDI se tienen como datos:

Longitud y # de divisiones en "x"	
500.0	10
Longitud y numero de divisiones en "y"	
400.0	8
Peralte	
35	
Nudo, clave fuerza	

Teniendo para cuando es apoyo la clave “-1”, y cuando es nudo “-2” así como la fuerza en sus componentes F_x , F_y , F_z .

Con el programa TRIDI se obtienen los desplazamientos de los nudos y la fuerza en las barras, por lo que se analizan 4 módulos en la esquina y 4 módulos centrales con sus correspondientes nudos inferiores y superiores, barras horizontales inferiores y superiores y barras diagonales, a su vez se comparan resultados con los que se obtienen de un análisis en el programa SAP2000.

Para los 4 módulos de esquina se tomo la esquina donde inicia la numeración de nudos, teniendo así, que los nudos considerados y barras son las siguientes:

- Nudos inferiores: 1, 2, 3, 22, 23, 24, 43, 44, 45.
- Nudos superiores: 12, 13, 33, 34.
- Barras de la malla inferior: 1, 2, 11, 12, 21, 22, 91, 92, 93, 102, 103, 104.
- Barras en la malla superior: 179, 188, 251, 252.
- Diagonales: 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368.

De igual manera para los módulos centrales:

- Nudos inferiores: 68, 69, 70, 89, 90, 91, 110, 111, 112.
- Nudos superiores: 79, 80, 100, 101.
- Barras de la malla inferior: 35, 36, 45, 46, 55, 56, 128, 129, 130, 139, 140, 141.
- Barras en la malla superior: 210, 219, 285, 286.
- Diagonales: 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504.

En las figuras 3.4 y 3.5 se muestra la numeración de nudos y de barras para los módulos considerados, de esquina y centrales, respectivamente.

Los resultados obtenidos de nudos y barras se presentan en la tabla 3.3 y 3.4 respectivamente.

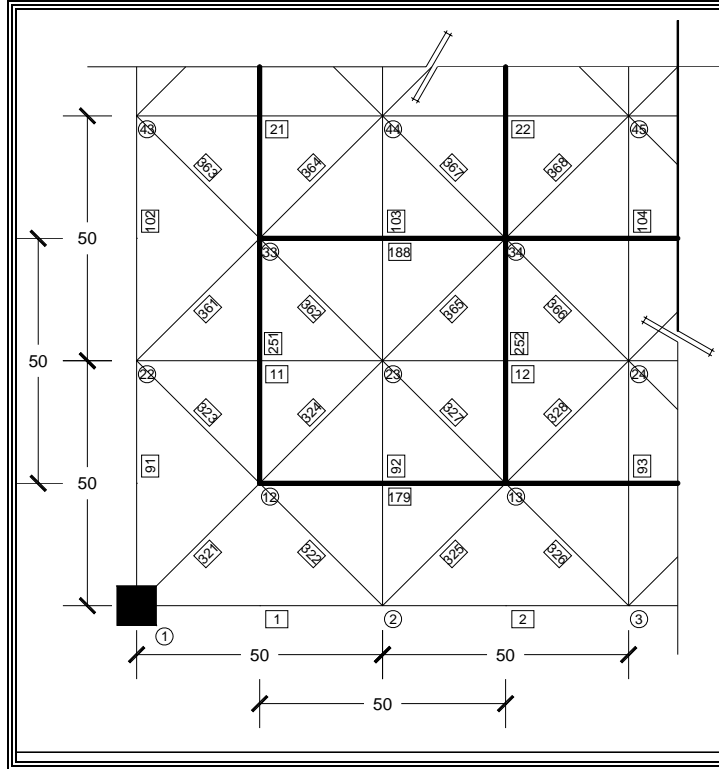


Fig. 3.4 Módulos de esquina con numeración de nudos y barras consideradas

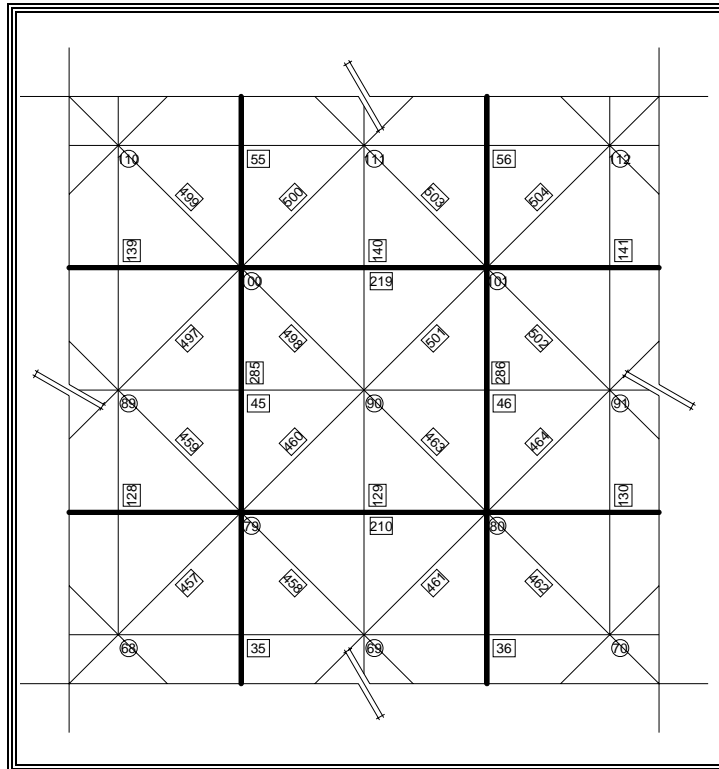


Fig. 3.5 Módulos centrales con numeración de nudos y barras consideradas

Tabla 3.3 Presentación de resultados obtenidos del programa TRIDI

DESPLAZAMIENTOS DE LOS NUDOS (ESQUINA)				DESPLAZAMIENTOS DE LOS NUDOS (CENTRALES)			
NUDO	DESPLAZAMIENTO			NUDO	DESPLAZAMIENTO		
	dx	dy	dz		dx	dy	dz
1	0.000	0.000	0.000	68	13796.000	-382.775	-1307176.250
2	38031.719	-38864.289	-402402.750	69	0.600	1094.032	-1336657.375
3	45650.234	-24199.875	-781394.875	70	-13794.756	-382.373	-1307181.500
12	-195855.031	142824.094	-322321.313	79	-11255.842	2200.641	-1329356.750
13	-170217.719	80593.656	-679277.000	80	11253.900	2200.233	-1329358.250
22	55213.172	-32094.441	-310249.094	89	12566.113	-4.377	-1312285.625
23	55213.070	-38864.359	-622702.125	90	-0.084	-4.148	-1338971.750
24	48864.121	-24199.805	-907493.750	91	-12565.968	-3.368	-1312287.500
33	-124899.055	117525.578	-588092.688	100	-11255.828	-2199.171	-1329364.125
34	-111946.164	67796.508	-846342.563	101	11254.295	-2199.712	-1329363.750
43	46003.156	-34114.461	-596417.500	110	13795.092	373.999	-1307190.875
44	46003.195	-31480.955	-815150.188	111	-0.839	-1102.498	-1336670.500
45	41256.797	-19811.920	-1019671.125	112	-13796.345	375.314	-1307190.250

Tabla 3.4 Presentación de resultados obtenidos del programa TRIDI

FUERZAS EN LAS BARRAS (ESQUINA)		FUERZAS EN LAS BARRAS (CENTRALES)	
1	760.634	35	-275.908
2	152.370	36	-275.907
11	-0.002	45	-251.324
12	-126.979	46	-251.318
21	0.001	55	-275.919
22	-94.928	56	-275.910
91	641.889	128	-7.568
92	0.001	129	21.964
93	-0.001	130	-7.580
102	40.400	139	-7.568
103	-147.668	140	21.967
104	-87.758	141	-7.574
179	512.746	210	450.195
188	259.058	219	450.202
251	505.970	285	87.996
252	255.943	286	87.999
321	1137.078	457	34.520
322	-605.209	458	-0.718
323	-598.470	459	23.057
324	123.469	460	-0.005
325	605.218	461	-0.724
326	-322.127	462	34.507
327	-270.383	463	-0.005
328	44.160	464	23.058
361	598.473	497	23.058
362	-249.808	498	0.001
363	-312.292	499	34.530
364	20.487	500	-0.713
365	396.733	501	-0.013
366	-169.674	502	23.059
367	-151.541	503	-0.723
368	-18.673	504	34.518

Los resultados obtenidos se comparan con los resultados del análisis del mismo modelo hecho en el programa SAP2000, dejando en claro que la numeración de barras así como de los nudos coincide con las que arroja el programa TRIDI.

Se presenta además una imagen del modelo en 3 dimensiones como lo muestra la figura 3. 4.

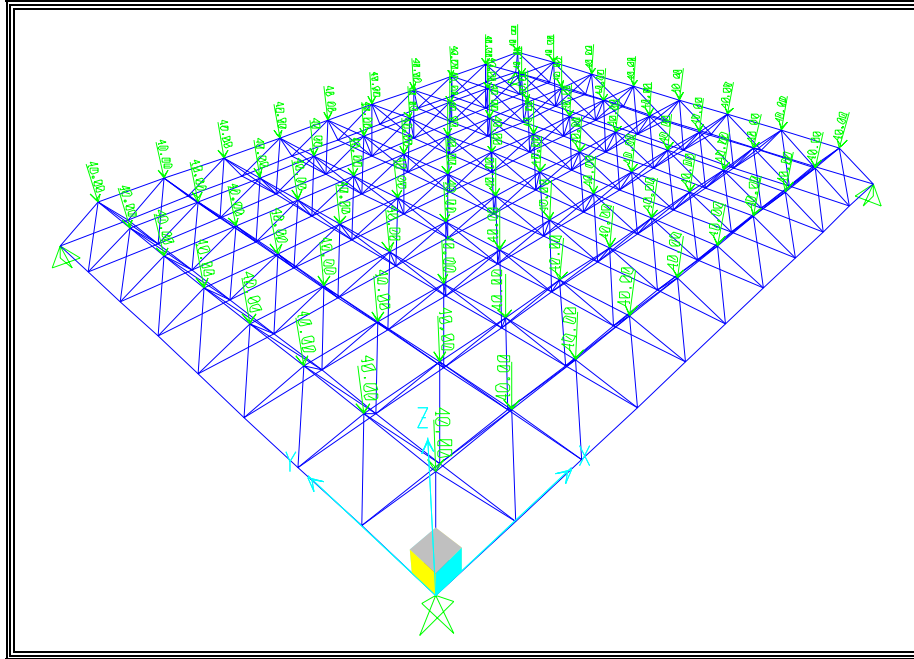


Fig. 3.4 Ejemplo de aplicación realizado en SAP2000

Se muestran los resultados en las tablas siguientes, la Tabla 3. 5. muestra los desplazamientos en los nudos para los módulos de esquina, la 3.6 para los módulos centrales, y las tablas 3.7 y 3.8 las fuerzas en las barras de los módulos de esquina y centrales respectivamente.

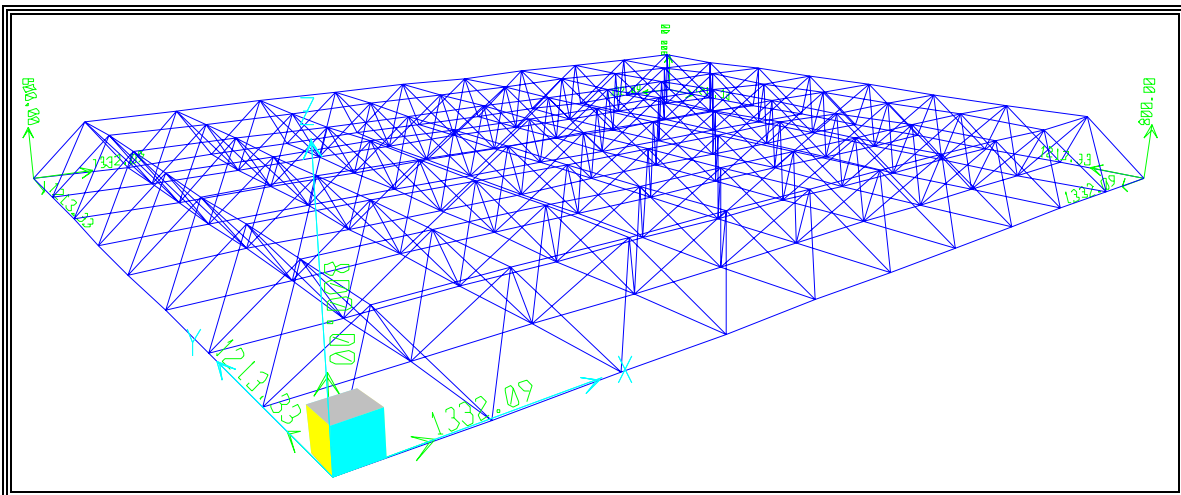


Fig. 3.4 Reacciones del ejemplo realizado en SAP2000

Tabla 3.5. Desplazamientos de nudos de los módulos de esquina obtenidos del programa SAP2000

TABLE: Joint Displacements						
Joint	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	cm	cm	cm	Radians	Radians	Radians
1	0	0	0	0	0	0
2	-38033.2891	-38864.1484	-402424	0	0	0
3	-45652.1016	-24198.7793	-781433.875	0	0	0
12	195865	142830.797	-322336.813	0	0	0
13	170226.203	80598.3828	-679310.313	0	0	0
22	-55215.9883	-32095.2207	-310262.688	0	0	0
23	-55215.9883	-38864.1484	-622731.813	0	0	0
24	-48866.4219	-24198.7793	-907537.688	0	0	0
33	124905.297	117531.102	-588118.813	0	0	0
34	111951.797	67800.6016	-846382.813	0	0	0
43	-46006.0391	-34114.9102	-596441.625	0	0	0
44	-46006.0391	-31480.2891	-815187.125	0	0	0
45	-41259.25	-19810.4297	-1019719	0	0	0

Tabla 3.6. Desplazamientos de nudos de los módulos centrales obtenidos del programa SAP2000

TABLE: Joint Displacements						
Joint	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	cm	cm	cm	Radians	Radians	Radians
68	-13796.0498	-379.426208	-1307233	0	0	0
69	1.3563E-09	1097.42505	-1336713	0	0	0
70	13796.0498	-379.426208	-1307233	0	0	0
79	11255.4297	2200.39111	-1329411	0	0	0
80	-11255.4297	2200.39111	-1329411	0	0	0
89	-12566.5596	-6.5097E-09	-1312336	0	0	0
90	1.3749E-09	-7.0444E-09	-1339022	0	0	0
91	12566.5596	-6.5999E-09	-1312336	0	0	0
100	11255.4297	-2200.39111	-1329411	0	0	0
101	-11255.4297	-2200.39111	-1329411	0	0	0
110	-13796.0498	379.426208	-1307233	0	0	0
111	1.1416E-09	-1097.42505	-1336713	0	0	0
112	13796.0498	379.426208	-1307233	0	0	0

Tabla 3.7. Fuerzas en las barras de nudos de los módulos de esquina obtenidos del programa SAP2000

Barras	TABLE: Element Forces - Frames						Barras	TABLE: Element Forces - Frames					
	Frame	P	V2	V3	M2	M3		Frame	P	V2	V3	M2	M3
	Text	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf-cm	Kgf-cm		Text	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf-cm	Kgf-cm
Inferiores	1	-760.665894	0	0	0	0	Diagonales	321	-1137.12903	0	0	0	0
	2	-152.376099	0	0	0	0		322	605.240723	0	0	0	0
	11	4.5475E-13	0	0	0	0		323	598.495483	0	0	0	0
	12	126.991302	0	0	0	0		324	-123.464203	0	0	0	0
	21	-5.6843E-13	0	0	0	0		325	-605.240723	0	0	0	0
	22	94.9358292	0	0	0	0		326	322.140015	0	0	0	0
	91	-641.90448	0	0	0	0		327	270.401093	0	0	0	0
	92	2.2737E-13	0	0	0	0		328	-44.1568718	0	0	0	0
	93	-1.4211E-12	0	0	0	0		361	-598.495483	0	0	0	0
	102	-40.3938103	0	0	0	0		362	249.819	0	0	0	0
Superiores	103	147.6772	0	0	0	0	363	312.295288	0	0	0	0	
	104	87.7668762	0	0	0	0	364	-20.4751492	0	0	0	0	
	179	-512.775024	0	0	0	0	365	-396.75589	0	0	0	0	
	188	-259.070587	0	0	0	0	366	169.6772	0	0	0	0	
	251	-505.995911	0	0	0	0	367	151.546097	0	0	0	0	
	252	-255.955505	0	0	0	0	368	18.6762009	0	0	0	0	

Tabla 3.8. Fuerzas en las barras de nudos de los módulos centrales obtenidos del programa SAP2000

Barras	TABLE: Element Forces - Frames						Barras	TABLE: Element Forces - Frames					
	Frame	P	V2	V3	M2	M3		Frame	P	V2	V3	M2	M3
	Text	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf-cm	Kgf-cm		Text	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf-cm	Kgf-cm
Inferiores	35	275.921112	0	0	0	0	Diagonales	457	-34.5165405	0	0	0	0
	36	275.921112	0	0	0	0		458	0.72037232	0	0	0	0
	45	251.331207	0	0	0	0		459	-23.0602608	0	0	0	0
	46	251.331207	0	0	0	0		460	-7.276E-12	0	0	0	0
	55	275.921112	0	0	0	0		461	0.72037232	0	0	0	0
	56	275.921112	0	0	0	0		462	-34.5165405	0	0	0	0
	128	7.58852386	0	0	0	0		463	3.638E-12	0	0	0	0
	129	-21.9484901	0	0	0	0		464	-23.0602608	0	0	0	0
	130	7.58852386	0	0	0	0		497	-23.0602608	0	0	0	0
	139	7.58852386	0	0	0	0		498	3.638E-12	0	0	0	0
Superiores	140	-21.9484901	0	0	0	0	499	-34.5165405	0	0	0	0	
	141	7.58852386	0	0	0	0	500	0.72037232	0	0	0	0	
	210	-450.217407	0	0	0	0	501	3.638E-12	0	0	0	0	
	219	-450.217407	0	0	0	0	502	-23.0602608	0	0	0	0	
	285	-88.0156479	0	0	0	0	503	0.72037232	0	0	0	0	
	286	-88.0156479	0	0	0	0	504	-34.5165405	0	0	0	0	

Se observa de la comparación que los resultados son muy similares, por lo que se puede concluir que los programas basados en métodos matriciales pueden ser de gran ayuda en el análisis y consecuentemente en el diseño de este tipo de estructuras.

3.2.3. TEORÍA DE LOSA SÁNDWICH

Esta teoría considera a la Tridilosa constituida por tres capas: la capa superior e inferior que resisten momentos flexionantes y la capa intermedia que absorbe el cortante y que constituye el núcleo de la losa.

La justificación de haber considerado la losa sándwich como el modelo estructural para estudiar el comportamiento de las estructuras espaciales compuestas, no solo se debe a la semejanza entre ellas, si no además a la importancia que adquieren las deformaciones por esfuerzo transversal.

3.2.4. TEORÍA DE LOSA ORTOTROPICA EQUIVALENTE

Método alternativo de análisis que nos permite calcular una estructura espacial compuesta, asimilándola a una losa ortotrópica equivalente, con parámetros adecuadamente determinados; empleando los procedimientos de análisis matricial se analizan esquemas estructurales de formas generales no existiendo limitación en geometría apoyos o secciones, con lo que es posible igualmente considerar la interacción de la estructura espacial compuesta con las vigas de borde y las columnas que la soportan.

Losas Isotrópicas: Tienen igual refuerzo en dos direcciones perpendiculares, el momento resistente será ML siendo M el momento resistente por unidad de longitud y será igual en 2 direcciones perpendiculares. Para esta disposición del armado, si el momento de falla es igual en 2 direcciones perpendiculares los momentos de falla serán iguales en todas direcciones.

Losas Ortotropicas: Son losas con diferentes refuerzos en dos direcciones perpendiculares ya sea en cantidad o en calidad; esto hace que la losa tenga en una dirección un momento de falla por unidad de longitud M y en la otra tendremos XM siendo X una constante de proporcionalidad.

4. DISEÑO DE TRIDILOSAS

Una vez realizado el análisis estructural, se procede a efectuar el diseño de cada componente, aclarando que el proceso de diseño es un ciclo en el cual los resultados del análisis se retroalimentan de la revisión estructural, como una manera de calibrar el modelo analizado, hasta lograr el resultado óptimo requerido ante esfuerzos y deformaciones, en el cual se verificará que estos no sobrepasen los límites establecidos por los reglamentos y normas.

Generalmente, el diseño de Tridilosas se basa en los siguientes reglamentos:

- AISC ASD, Método de diseño alternativo basado en el control de esfuerzos permisibles.
- AISC LRDF. Método de diseño de aceptación generalizada, que sirvió de base para la norma propuesta en el RCDF, basado en el uso de factores de carga y resistencia.
- Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF) y sus Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas (NTC Estructuras Metálicas), en las cuales se establecen los lineamientos y consideraciones sobre ductilidad, utilizando el método de diseño por factores de carga y resistencia.

La filosofía de diseño basada en el estado de esfuerzos de los materiales (ASD), en la que se consideran los esfuerzos permisibles, es esencialmente una forma simple de diseño, a diferencia de la filosofía basada en la resistencia de los elementos estructurales, en la que se consideran factores de carga y resistencia (LRFD).

Independientemente del reglamento aplicado, el cálculo en el diseño de la Tridilosa, tiene que tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Diseño por carga axial. Esta revisión es quizás la más importante debido a que prácticamente los elementos de la Tridilosa estarán sujetos a tensión o compresión axial. En este tipo de elementos la falla a tensión es provocada por la fluencia del material, mientras que la falla de compresión es ocasionada por pandeo general debido a las condiciones de frontera y apoyo del elemento. Un factor importante en este último tipo de falla es el nivel de restricción de los extremos de la barra.
- Diseño por flexocompresión. Esta revisión es de poca influencia, pero debido a la aparición de pequeños momentos en las cuerdas de la Tridilosa, y más si son tableros relativamente grandes, las cargas se transmitirán de manera transversal produciendo los mismos efectos, por lo que, será necesaria una revisión del diseño por esfuerzos combinados, que no sobrepasen los esfuerzos preestablecidos.

- Diseño de conexiones. Este punto requiere un tratamiento más detallado, ya que es el elemento de unión entre todas las barras. Existen numerosos sistemas patentados, sin embargo, es común encontrar los siguientes tipos de conexiones:
 - Conector esférico. El elemento básico son los tornillos extremos de las barras, diseñados por fluencia en la sección total y por fractura en la sección neta de la cuerda, previniendo cualquier tipo de falla frágil.
 - Placa plana, Representa una conexión soldada o atornillada, donde la resistencia de la soldadura es un dato importante para el correcto funcionamiento. Los tornillos pueden estar trabajando a cortante simple, doble o triple dependiendo del arreglo.
 - Arreglo de placas diagonales.

- Aspectos Geométricos. En cuanto a las relaciones geométricas, dependiendo de la distribución e intensidad de las cargas estimadas, es recomendable dar a la Tridilosa un peralte entre 1/15 a 1/30 veces el claro libre; para el peralte mínimo, hay que revisar las deflexiones que pueden ocasionar la aparición de vibraciones.

- Diseño de la losa de concreto. Se diseñará la losa utilizando los elementos mecánicos obtenidos en el análisis de la estructura, cuidando el pandeo general de las barras. Se partirá de la base de considerar que la losa de concreto trabaja únicamente a compresión, por lo que, en este proceso, el diseño, toma en cuenta el efecto de temperatura dependiendo del panel o cuadro que se tenga, y las dimensiones del mismo lo que arroja que el acero en estos paneles sea el mínimo. Otra parte importante del diseño de la losa es el control de calidad de los materiales en cuanto a:
 - Resistencia a la compresión del concreto
 - Esfuerzos reducidos del concreto
 - Módulo de elasticidad del concreto
 - Límite de fluencia del acero
 - Modulo de elasticidad del acero

El efecto de la compresión del concreto en la rigidez de los miembros, se basa en algunos estudios realizados sobre tableros de Tridilosa. Se ha observado un gran número de grietas en las parrillas de concreto, debidas a esfuerzos de tensión provocados por muy distintas causas. Además de los esfuerzos de tensión provocados por las acciones exteriores, el efecto de contracción del concreto por cambios de temperatura o humedad es capaz de agrietar los delgados lechos, debido a esto, no se puede esperar que el concreto contribuya en forma efectiva a aliviar los esfuerzos de tensión provocados por las cargas exteriores. Sin embargo, se puede esperar un cierto trabajo en las zonas de compresión.

El criterio de análisis más usado, considera entonces a los tableros de Tridilosa como una armadura espacial, con miembros trabajando a tensión o compresión.

Por supuesto los miembros comprimidos de las parrillas superior e inferior, embebidos en una capa de concreto, serán tratados en forma especial. Se considera que el concreto contribuye en la rigidez de las barras embebidas en él. Con base en lo anterior, se tomarán en forma diferente los miembros (barras) de las losas y los dados de concreto si existen. Debido a que el análisis propuesto está comprendido dentro de la Teoría Elástica, es conveniente hacer consideraciones similares para el estudio de estos miembros.

En la teoría elástica, para vigas compuestas, es común determinar la sección de concreto que realmente trabaja en conjunto con el elemento metálico. En vigas T, se determina un ancho teórico, que es función de la longitud del miembro considerado, de la relación de Poisson en los materiales empleados y de la forma del diagrama de momentos. Por supuesto este ancho, que define la sección de trabajo, está propuesto en especificaciones de reglamentos de diseño.

No es alejado de la realidad suponer condiciones similares para el caso de la Tridilosa, ya que se puede determinar un ancho teórico de la porción de losa que trabaja en conjunto con el miembro comprimido y obtener entonces una sección compuesta de acero y concreto para el cálculo de la nueva rigidez.

Así, por ejemplo, las especificaciones típicas para el ancho efectivo en vigas compuestas son las siguientes:

- a) Un cuarto de la longitud de la viga
- b) La distancia centro a centro entre vigas
- c) Doce veces la mínima dimensión de la losa

Se puede considerar entonces, en el caso de la Tridilosa, que el miembro comprimido equivale a la parte en compresión que queda arriba del eje neutro en una viga compuesta o T y de esta similitud calcular el ancho efectivo de la losa. De aquí, las propiedades de la sección supuesta serán las que se le adjudiquen al miembro comprimido. Definida de esta manera la sección teórica de trabajo, se debe transformar el área de concreto en área equivalente de acero a fin de tener un miembro homogéneo. En forma similar a la teoría empleada en el diseño de concreto reforzado, se calcula el área equivalente de acero, dividiendo el área de concreto de la sección estimada entre la relación modular n , obtenida como el cociente entre el módulo elástico del acero y el módulo elástico del concreto, debido a que se trata de dos materiales distintos, es requisito indispensable para que sean válidas las suposiciones anteriores, que las fuerzas de fricción y adherencia sean capaces de transmitir el cortante generado entre ambos, esto puede aclararse mediante experimentos.

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

El trabajo de conjunto del acero y el concreto es en sí muy incierto. Se sabe que la rigidez del concreto varía en función del tiempo y la carga. En algunos experimentos realizados en un tablero de Tridilosa se efectuaron algunas

mediciones dentro de concreto de las parrillas y se confirmaron efectos de tipo viscoelástico en él.

Es importante aclarar que defectos en la construcción de las losas, así como fenómenos propios en el comportamiento del concreto como son el flujo plástico y agrietamientos por contracción del concreto, alteren en forma considerable la efectividad o contribución de concreto. Por esta razón los esfuerzos son usualmente determinados con las propiedades de una sección teórica calculada usando un valor de n igual a 3 veces su valor original.

Para el diseño se tomarán además, algunas consideraciones, características de los materiales y recomendaciones que se enumeran a continuación:

- I. El concreto en la losa tapa (patín de compresión) deberá tener un espesor mínimo de 6 cm. y 10 cm. como máximo.
- II. El peralte de la Tridilosa se recomienda entre $1/15$ a $1/30$ de la longitud del claro a cubrir.
- III. Se recomienda que la longitud de las barras diagonales no sea menor que la de las barras que forman el modulo en la parrilla.
- IV. Se recomienda que:
 - a) El peralte de la estructura tenga una relación de 0.7071 de la longitud del modulo.
 - b) La dimensión de las placas y su espesor sobre las que se forman los nudos, será de acuerdo a la sección de los perfiles.
 - c) La longitud de la diagonal en un modulo no deberá ser mayor de 1.5 veces el peralte de la estructura.
 - d) Se podrá utilizar diferentes perfiles de acero estructural como se refiere en la tabla 4.1

Nomenclatura		f_y	f_u
NOM	ASTM		
B-254	A-36	2530	4080-5620
B-99	A-526	2950	4220-5975
B-282	A-242	2950	4430
		3235	4710
		3515	4920
B-284	A-441	2810	4220
		2950	4430
		3235	4710
		3515	4920
B-177		2460	4220
B-199		3235	4360

Tabla 4.1. Propiedades de los aceros recomendados para la fabricación de Tridilosas

- V. La separación mínima al paño de la diagonal con la placa será lo suficientemente grande para colocar la soldadura; a su vez, este no será mayor de $3/16$ o 2.5 cm.

- VI. Se recomienda colocar no más de 5 varillas de diámetro de 1" $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$ en una placa del nudo.

El diseño de las barras es muy simple, se diseña a tensión y a compresión cuidando el pandeo general, así el diseño consistirá en calcular las fuerzas sobre las barras y buscar cual de las secciones disponibles satisface la necesidad. Lo común es no utilizar más de tres secciones de barras distintas en el dimensionamiento del sistema completo.

Diseño basado en AISC (ASD)

- *Concreto.*

Se considerará un esfuerzo de trabajo en el concreto de:

$$f_c = 0.45 f'_c \quad (4.1)$$

Por ejemplo, para un $f'_c = 200 \text{ kg/cm}^2$ se tiene:

$$0.45 f'_c = 90 \text{ Kg/cm}^2$$

- *Acero*

Los esfuerzos en el acero serán:

- Tensión

$$f_t = 0.60 f_y \quad (4.2)$$

- Compresión

Que para esfuerzos permisibles solo se contempla el pandeo por flexión y no se considera el pandeo por flexotorsión o torsión.

$$\frac{KL}{r} \geq C_c; \quad f_a = \frac{12\pi^2 E}{23(KL/r)^2} \quad \text{Pandeo elástico} \quad (4.3)$$

$$\frac{KL}{r} < C_c; \quad f_a = \frac{\left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}\right] f_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}} \quad \text{Pandeo inelástico} \quad (4.4)$$

Donde:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \text{ - Relación de esbeltez que separa las dos formas de pandeo}$$

E - Módulo de elasticidad del acero

K - Factor de longitud efectiva

L - Longitud real en el plano de flexión sin arrostramiento

r - Radio de giro alrededor de cada uno de los ejes principales de inercia de la sección transversal.

- Flexocompresión, combinación de compresión axial y flexión, debe dimensionarse de manera que se cumplan las condiciones siguientes:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_a}{F'_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_a}{F'_{ex}}\right) F_{by}} \leq 1.0; \quad \text{Columna completa} \quad (4.5)$$

$$\frac{f_a}{0.60F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0; \quad \text{Secciones extremas} \quad (4.6)$$

Permitiendo F_{bx} y F_{by} menores de $0.60F_y$

$$C_m = 0.6 - 0.4 \frac{M_1}{M_2} \quad (4.7)$$

Diseño basado en AISC (LRFD)

➤ Concreto

Para concreto se tiene un factor de reducción de $F_R = 0.85$ y un factor de carga de $F_C = 1.2$, usando la resistencia nominal f'_C

➤ Acero

- Compresión

Estado límite de inestabilidad por flexión:

$$R_D = F_R P_n \quad (4.8)$$

$$F_R = 0.85$$

$$P_n = A_t F_{cr} \quad (4.9)$$

$$\text{Si } \lambda_c > 1.5 \quad P_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) F_y \quad \text{Pandeo elástico} \quad (4.10)$$

$$\text{Si } \lambda_c \leq 1.5 \quad P_n = \left(0.658^{\lambda_c^2} \right) F_y \quad \text{Pandeo inelástico} \quad (4.11)$$

$$\lambda_c = \frac{kL}{r} \sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 E}} \quad (4.12)$$

Donde:

R_D - Resistencia de diseño

P_n - Resistencia nominal en compresión axial

A_t - Área transversal

F_{cr} - Esfuerzo crítico de pandeo en compresión

Estado límite de inestabilidad por torsión o flexotorsión:

$$R_D = \phi_c P_n \quad (4.13)$$

$$\phi_c = 0.85$$

$$P_n = A_t F_{cr} \quad (4.14)$$

$$\text{Si } \lambda_e \sqrt{Q} > 1.5 \quad F_{cr} = \left(\frac{0.877}{\lambda_e^2} \right) F_y \quad (4.15)$$

$$\text{Si } \lambda_e \sqrt{Q} \leq 1.5 \quad F_{cr} = Q \left(0.658^{Q \lambda_e^2} \right) F_y \quad (4.16)$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} \quad (4.17)$$

El esfuerzo crítico de pandeo por torsión o flexotorsión F_e se calcula para:

a) Secciones con dos ejes de simetría

$$F_e = \sigma_t = \frac{1}{A r_0^2} \left(GJ + \frac{\pi^2 E C_a}{(K_t L_t)^2} \right) \quad (4.18)$$

b) Secciones con un eje de simetría

$$F_e = \frac{1}{2H} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4H\sigma_{ex}\sigma_t} \right] \quad (4.19)$$

que alternativamente se puede obtener una estimación conservadora con

$$F_e = \frac{\sigma_{ex}\sigma_t}{\sigma_{ex} + \sigma_t} \quad (4.20)$$

c) Secciones asimétricas, el esfuerzo es igual al menor de las raíces de la ecuación cúbica

$$(F_e - \sigma_{ex})(F_e - \sigma_{ey})(F_e - \sigma_t) - F_e^2(F_e - \sigma_{ey})\left(\frac{x_0}{r_0}\right)^2 - F_e^2(F_e - \sigma_{ex})\left(\frac{y_0}{r_0}\right)^2 = 0 \quad (4.21)$$

Donde:

R_D - Resistencia de diseño

P_n - Resistencia nominal en compresión axial

A_t - Área transversal

F_{cr} - Esfuerzo crítico de pandeo en compresión

F_e - Esfuerzo crítico de pandeo elástico por torsión o flexotorsión

$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2}$ Esfuerzo crítico de Euler pandeo por flexión alrededor de x

$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(K_y L_y / r_y)^2}$ Esfuerzo crítico de Euler pandeo por flexión alrededor de y

$\sigma_{ez} = \sigma_t = \frac{1}{Ar_0^2} \left(GJ + \frac{\pi^2 EC_a}{(K_t L_t)^2} \right)$ Esfuerzo crítico por torsión

- Flexocompresión

El diseño debe cumplir con las ecuaciones de interacción:

$$\text{Si } \frac{P_u}{\phi_c P_n} \leq 0.2 \quad \frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1.0 \quad (4.22)$$

$$\text{Si } \frac{P_u}{\phi_c P_n} \leq 0.2 \quad \frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1.0 \quad (4.23)$$

Diseño basado en el Reglamento de construcciones del Distrito Federal (RCDF 2004) y sus Normas técnicas Complementarias (NTC Acero)

- Compresión

Estado límite de inestabilidad por flexión:

$$R_C = \frac{F_y}{(1 + \lambda^{2n} - 0.15^{2n})^{\frac{1}{n}}} A_t F_R \leq F_y A_t F_R \quad (4.24)$$

$$n = 1.4 \quad F_R = 0.9$$

$$\lambda = \frac{kL}{r} \sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 E}} \quad (4.25)$$

Estado límite por torsión o flexotorsión:

Evaluando en la misma ecuación 4.24, solo con los siguientes valores

$$n = 1.4 \quad F_R = 0.85$$

$$\lambda_e = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} \quad (4.26)$$

Donde F_e al igual que en AISC LRFD, es el menor de los esfuerzos críticos de pandeo elástico por torsión o flexotorsión, y se calculan con:

- a) Secciones con dos ejes de simetría

$$F_e = \frac{1}{I_x + I_y} \left(GJ + \frac{\pi^2 EC_a}{(K_t L_t)^2} \right) \quad (4.27)$$

- b) Secciones con un eje de simetría

$$F_e = \frac{F_{ey} + F_{ez}}{2H} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{ex} F_{ez} H}{(F_{ex} + F_{ez})^2}} \right] \quad (4.28)$$

c) Secciones asimétricas, el esfuerzo es igual al menor de las raíces de la ecuación cúbica

$$(F_e - F_{ex})(F_e - F_{ey})(F_e - F_{ez}) - F_e^2(F_e - F_{ey})\left(\frac{x_0}{r_0}\right)^2 - F_e^2(F_e - F_{ex})\left(\frac{y_0}{r_0}\right)^2 = 0 \quad (4.29)$$

Donde:

$$r_0^2 = x_0^2 + y_0^2 + \frac{I_x + I_y}{A}$$

$$H = 1 - \left(\frac{x_0^2 + y_0^2}{r_0^2}\right)$$

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2} \text{ Esfuerzo crítico de Euler pandeo por flexión alrededor de } x$$

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(K_y L_y / r_y)^2} \text{ Esfuerzo crítico de Euler pandeo por flexión alrededor de } y$$

$$F_{ez} = \sigma_t = \frac{1}{Ar_0^2} \left(GJ + \frac{\pi^2 EC_a}{(K_t L_t)^2} \right) \text{ Esfuerzo crítico por torsión}$$

- Flexocompresión

Los miembros se dimensionaran de manera que se satisfagan los requisitos:

$$\frac{P_u}{F_a P_y} + \frac{M_{uox}}{F_R M_{px}} + \frac{M_{uoy}}{F_R M_{py}} \leq 1.0 \quad \text{Secciones extremas} \quad (4.30)$$

$$\frac{P_u}{F_a P_y} + \frac{M_{uox}^*}{M_m} + \frac{M_{uoy}^*}{F_R M_{py}} \leq 1.0 \quad \text{Columna completa} \quad (4.31)$$

Así con estas formulas y teniendo básicamente el tipo de diseño, se procede al cálculo de las secciones o dimensionamiento, haciendo una revisión con los resultados de los elementos mecánicos considerados, y verificando los desplazamientos máximos permitidos.

5. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

La Tridilosa es un sistema de piso que se puede fabricar tanto en la obra como empleando un sofisticado sistema de producción en planta. Cualquiera que sea el sistema elegido, la solución óptima requerirá abatir costos y tiempos, con seguridad y estética aceptable.

El proceso constructivo puede seguir las siguientes etapas:

- Diseño
- Fabricación de la estructura metálica
- Armado de la parrilla
- Montaje y nivelación
- Colado de losa

Definida la estructuración mas adecuada para satisfacer las solicitudes de carga y de claros, con las características geométricas y metalúrgicas de los elementos, se procede al **dimensionamiento** cumpliendo con el criterio de resistencia establecido por las normas antes mencionadas.

La **fabricación**, sea en planta o en obra, se dedica a la producción de las partes componentes, de tal forma que después, se formen armazones de acero (módulos), siendo de la mayor calidad posible y con gran precisión, para evitar errores en las siguientes etapas. Como en todo tipo de obras será importante realizar pruebas de laboratorio de los elementos componentes.

Durante el ensamble de la Tridilosa, se buscará desarrollar un proceso de fabricación eficiente, en el cual, mediante planos de taller y cuantificación de piezas, se establezca una ruta de producción que conlleve a un proceso atractivo, interesante y eficiente que evite desperdicios.

El **armado de la parrilla** consiste en unir varillas o elementos de los lechos superiores e inferiores, con las diagonales por medio de cordones de soldadura o sistema de conexión por nudos, sean estos comunes o sistemas patentados. En los armazones originalmente se empleaban comúnmente varillas corrugadas tanto en los lechos superiores como en los inferiores, y ángulos de acero estructural en las diagonales (Las juntas se logran previos cortes especiales en los ángulos, mediante soldadura al arco eléctrico o por nudos), aunque en la actualidad puede formarse solo por acero estructural, considerando las propiedades de los elementos embebidos en concreto.

Los acabados se realizan con pintura alquidámica, horneada, barniz poliéster, recomendando una norma de conservación y limpieza sencilla para garantizar el mantenimiento de la estructura.

Consideraciones generales en la construcción de la estructura metálica:

- I. Los elementos, tanto en la retícula superior como inferior y los elementos diagonales deberán ser totalmente rectos.
- II. El acero en el cordón superior e inferior será de la misma calidad si no lleva concreto, en cuyo caso el lecho que no lleve puede ser diferente al que así actúa. Los elementos diagonales pueden ser o no del mismo material que cualquiera de los dos lechos, pero siempre en acero.
- III. En los nudos, el tramo de elemento que queda embebido en el concreto, puede admitir curvaturas que se ajustaran a lo indicado en la especificación No. 801 del ACI.
- IV. Cada elemento que concurra en un nudo deberá estar soldado a los elementos que le son adyacentes.
- V. Considerando que los nudos quedaran embebidos en concreto, en caso de que en algunos nudos la especificación anterior no se cumpliera adecuadamente, o que la soldadura aplicada no cumpliera con las especificaciones generales, se podrán utilizar conectores que unan los elementos deficientemente soldados y no será necesario por lo tanto deshacer el nudo.
- VI. Todos los elementos de las retículas, superior e inferior, deberán quedar dentro del concreto, para lo que se procurara tener el mínimo de lechos entre las varillas. En caso en que por condiciones constructivas especiales se tuviera que utilizar varios lechos, habrá la necesidad de engrosar la capa de concreto en las zonas para que los elementos de acero pudieran quedar descubiertos.
- VII. Cuando haya necesidad de hacer empalmes de las varillas, el cordón de soldadura deberá sujetarse a lo indicado en la siguiente tabla.

Var.	Espesor del cordón	Long. del cordón	Espesor del cordón	Longitud del cordón (cm.)
2.5	3/16	7	1/4	6
3	3/16	20	5/16	6
4	1/4	15	3/8	9
5	1/4	20	3/8	15
6	5/16	25	3/8	20
8	3/8	35	3/8	35
10	3/8	40	3/8	40

Tabla 5.1 Especificaciones en la unión de varillas.

VIII. Las uniones entre los elementos metálicos deberán preferentemente hacerse a traslape con un cordón de soldadura. También se admite la unión a tope, pero en, este caso, se requerirá en cuidado especial, para que la soldadura cumpla estrictamente con lo especificado por la A. W. S.

Montaje y nivelación.

Una vez que se encuentra en el lugar por cubrir, deberá colocarse en el lugar adecuado con la ayuda de una pluma, fijándola sobre cuatro puntos de apoyo, equidistantes simétricamente, y se soldará hasta estar ligada a las cabezas de las columnas o elementos de soporte.

Teniendo un adecuado programa de montaje, puede ayudar a optimizar recursos totales de construcción, funcionando la estructura como autosoportante, durante el proceso constructivo y ahorrando tiempo en la construcción de los niveles superiores.

El montaje de estas armaduras debe realizarse intentando evitar la necesidad de cimbras completas que la mantengan durante su erección, por este motivo, es conveniente empezar la construcción a partir de todos los apoyos de la armadura teniendo en cuenta que es posible una estandarización de las longitudes de las barras, usando nudos adecuados. En este proceso los nudos son fijados en el espacio mediante barras unidas a algunos nudos previamente inmovilizados.

Otra posibilidad consiste en montar elementos de la estructura en el suelo, para posteriormente colocarlos donde les corresponda. Si las mallas poseen claros muy grandes, es necesario la utilización de elevadores, o grúas.

En las uniones soldadas la producción de calor es un factor el cual se tiene que controlar, tanto la velocidad de calentamiento, como de enfriamiento para obtener un material homogéneo, garantizando valores óptimos de propiedades mecánicas. Por lo que es conveniente el conocimiento elemental de la forma en que resulta afectado el acero al someterlo a las condiciones generadas por la soldadura.

Colado de la losa

Se colocan en cada uno de los cuadrados, casetones que están hechos de material ligero, calafateando las juntas que existen entre ellos, para después colar la losa, para colar primero la capa inferior de concreto y después la superior.

El colado de la capa inferior de concreto, si es que existe, se realiza en forma común; para colar la losa superior es común recurrir a una cimbra ligera que se cuelga de la parrilla superior y queda dentro de la Tridilosa.

A continuación se da algunas recomendaciones que deben contener los planos estructurales en cuanto al armado de los elementos diagonales:

- 1) Cuando se tengan en el diseño ángulos diferentes para un modulo, habrá que señalar cada uno de estos.
- 2) Cuando el armado del modulo es con un mismo ángulo, se señala con una sola letra.
- 3) Cuando de llegan a presentar armados en los cuales es una misma zona de losa los módulos son iguales, esto se puede indicar con una misma letra para toda la zona.

En cuanto al concreto:

- I. El revenimiento del concreto, tanto en el lecho inferior como en el superior será de 13 a 15 cm.
- II. Los agregados serán de máximo $\frac{3}{4}$.
- III. Es recomendable la utilización de concreto con fraguado rápido para activar el descimbrado.
- IV. Se procura un especial cuidado en la colocación de concreto, alrededor de los nudos, de tal modo que se evite la posibilidad de oquedades o acumulación de agregado grueso.

Cada tablero de Tridilosa se forma con un armazón, para lograr continuidad de tableros, se corre un cierto porcentaje de acero de los lechos superiores e inferiores, que se suelda después de colocados los armazones. Existe además en las zonas de columnas un refuerzo adicional logrando al colar un dado macizo de concreto si existe.

En la Tridilosa, el concreto recibe las cargas horizontales que le transmiten las diagonales, por eso, el concreto debe quedar ahogando al nudo.

El proceso de soldar y todo proceso calórico quedarán suspendidos cuando exista lluvia, viento huracanado o la temperatura ambiente sea menor a 0° C.

Especificaciones de pintura:

- Todas las superficies deberán estar perfectamente secas y totalmente libres de oxido, aceite, grasa suciedad o cualquier otra sustancia extraña, antes de aplicar pintura.
- La eliminación de suciedad y materiales extraños pueden llevarse a cabo por cualquier método.
- En los nudos de la superestructura, donde por causa de la soldadura se hayan formado pequeñas cavernas o superficies porosas, estas después de la limpieza superficial deberán ser selladas para evitar un secamiento lento o sangrado, debido a la humedad, grasas aceites etc. absorbidos por el material. El sellado deberá dejarse secar antes de aplicar la primera mano de pintura.

- Se empleará una pintura a base de resina epoxy, de secamiento al aire. La aplicación de dicha pintura se hará con brocha o pistola de aire.
- Capas sucesivas de una misma pintura deberán ser aplicadas en forma tal hasta que el recubrimiento de la superestructura quede garantizada.
- Las superficies metálicas se pintaran inmediatamente después de ser limpiadas. Por ningún motivo el lapso entre limpieza y pintado excederá las 24 hr.
- No se aplicara ninguna pintura exterior bajo condiciones atmosféricas húmedas, lluviosas o frías.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es evidente la evolución que han tenido las estructuras espaciales para resolver problemas de ingeniería. Esto se ha dado no solo por los desarrollos tecnológicos actuales relacionados con los programas de computo, si no también por el desarrollo de modernos métodos constructivos y conexiones. Por sus características de ligereza requerida para salvar grandes claros, ha sido empleando el acero como material por excelencia.

La Tridilosa es una derivación de las estructuras espaciales y nace como una necesidad de contar con sistemas de piso que, manteniendo sus características de funcionalidad, rigidez y resistencia como cubierta de techo y fundamentalmente como piso útil, son más ligeros que los convencionales. Esta particularidad es de especial importancia y beneficia a las estructuras en el análisis y diseño ante solicitaciones sísmicas, ya que, las fuerzas laterales que simulan esta acción, son función directa de la masa de la estructura y por tanto, para este caso, pueden disminuir relativamente si se comparan con otros sistemas de piso.

La Tridilosa hace un uso eficiente y racional de los materiales que la constituyen, es decir, aprovecha la capacidad que tiene el acero para poder soportar esfuerzos de tensión y la gran resistencia que tiene el concreto a compresión. Esta combinación permite construir sistemas de piso que, con un peralte adecuado, pueden salvar claros importantes sin necesidad de apoyos intermedios.

Entre las ventajas y desventajas mas importantes que se identificaron de este sistema de piso denominado Tridilosa, se pueden mencionar las siguientes:

- Ventajas:
 - Uso racional de materiales constitutivos
 - Reducción de carga muerta
 - Deflexiones pequeñas
 - Resistencia al fuego si se cuenta con la protección adecuada o bien si el patín de concreto se coloca en las caras superior e inferior de la losa
 - Estandarización productiva (producción en serie)
 - Ensamble, con alta precisión y rapidez
 - Posibilidad de crecimiento con uniones seguras
 - Por su alta hiperestaticidad estructural, puede existir variabilidad en la distribución de los apoyos
 - Espacio adecuado para alojar instalaciones hidráulicas y sanitarias
 - Atractiva apariencia estética y arquitectónica
 - Gran estabilidad elástica
 - Por el bajo peso de los niveles es posible contar con cimentaciones mas sencillas
 - Disminución de la fuerza sísmica
 - No necesita trabes

- Propiedades térmicas y acústicas
- Evita la colocación de puntales o cimbra
- Posee una baja relación de peso muerto a carga útil

- Desventajas:
 - Falta de normatividad y/o especificaciones detalladas
 - Necesidad de asesoría estructural
 - Instalación con la ayuda de grúa o montacargas
 - Requerimiento de mano de obra con cierto nivel de especialización
 - Necesidad de un estudio costo-utilidad y costo-tiempo para evaluar su factibilidad en determinada estructura
 - Se requiere un control de calidad detallado en el cimbrado para colocar el concreto en los módulos
 - Si el sistema es muy flexible, se pueden presentar efectos de fatiga en sus elementos y conexiones
 - Escasa rigidez a torsión
 - Requiere un mantenimiento periódico en climas costeros

Recomendaciones.

- Existen relaciones geométricas entre el tamaño del modulo, el claro total y el peralte de la Tridilosa que permiten lograr un mejor aprovechamiento de estos sistemas de piso, por lo que es importante tomarlas en cuenta en su diseño. Estas recomendaciones no solo están encaminadas a optimizar el uso de los materiales, si no también a limitar los desplazamientos excesivos y efectos patógenos como vibraciones.
- Mejorar la información técnica para su diseño, ya que este se basa en una adaptación de la normatividad de acero y de concreto. Una información de mucha utilidad seria el desarrollo de ayudas de diseño, como existe en otros tipos de losas.
- Desarrollo de software para el análisis y diseño de este tipo de losa.
- Estudiar mecanismos de transmisión efectiva de la fuerza lateral entre la losa y los elementos del entrepiso como muros, diagonales y columnas.
- Uno de los aspectos que, sin duda, es crítico, es la conexión o unión de sus elementos que, por lo general, se logra mediante soldadura, por lo cual se requiere un buen control de calidad de estos trabajos, particularmente en las piezas que están sujetas a fuerzas de tensión.
- Mejorar el sistema de cimbrado de cada módulo, empleando sistemas modernos donde la cimbra es parte integral del piso, como la losacero.
- Para fines de prediseño, se puede considerar los resultados del análisis de un sistema espacial.
- Para su uso en puentes es importante mejorar la rigidez torsional del sistema mediante el empleo de diafragmas

- En zonas de terreno blando, se requiere que los tableros posean un confinamiento lateral importante para que puedan cumplir con su función de diafragma rígido y lograr la transmisión de fuerzas a la estructura.

7. BIBLIOGRAFÍA.

- Makowski, Z. S. **“Estructuras Espaciales de Acero”**, Ed. Gustavo GILI, Barcelona España 1972.
- Bresley Boris, Lin T. X. Scalzí John B, **“Diseño de estructuras de acero”** Limusa 1990.
- Demeneghi Colina Agustín, **“Método del elemento finito. Análisis Lineal”** FI-UNAM, México 2000
- Heino Engel, **“Sistemas de estructuras”** Ed Gustavo GILI, Barcelona España 2001
- Flores Vera Rafael, **“Respuesta no lineal de cubiertas colgantes ante la acción del viento”** Tesis de Maestría en Ingeniería civil, 2003.
- Heinrich Schmitt, Andreas Heene **“Tratado de construcción”** Ed Gustavo GILI, Barcelona España 1998, 7ª Edición.
- García Flores Alejandro **“Estructuras espaciales, una opción adaptable”** Tesis de Maestría en Arquitectura. 1998.
- **“Apuntes de Estructuras Isostáticas”**, Facultad de Ingeniería, UNAM
- **“Apuntes de Análisis Estructural”**, Facultad de Ingeniería, UNAM
- **Reglamento de construcciones del Distrito Federal RCDF – 2004.**
- **Normas Técnicas Complementarias para diseño de estructuras de Acero NTC - 2004**
- **Normas Técnicas Complementarias para diseño de estructuras de Concreto NTC – 2004**
- Instituto Mexicano de la construcción en Acero A. C. **“Manual de construcción en acero diseño por esfuerzos permisibles”**, Volumen 1, Limusa, México 2001
- De buen López de Heredia Oscar, **“Diseño de estructuras de acero, Miembros en compresión (la columna asilada)”** Fundación ICA, 1999
- De buen López de Heredia Oscar, **“Diseño de estructuras de acero, Columnas aisladas flexocompromidas”** Fundación ICA, 1999