

102
2g.



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

La Estructura Espacial como Alternativa
en la Construcción de Puentes

T E S I S

Que para obtener el título de
INGENIERO CIVIL
p r e s e n t a

ALFREDO MASSAD YSBAILE

México, D. F.

1987



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 está 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.

I N D I C E

I	Introducción	1
II	Introducción a las Estructuras Espaciales	3
II	1.- Antecedentes	3
II	2.- Definiciones y Clasificación	9
III	Resumen de Métodos de Análisis de Estructuras Espaciales	22
III	1.- Introducción	22
III	2.- Métodos de Análisis	23
IV	Procedimientos Constructivos en Puentes con Estructuras Espaciales	35
IV	1.- Descripción de la Estructura Espacial aplicada a puentes	35
IV	2.- Procedimientos Constructivos	39
IV	3.- Ejemplos de Puentes Realizados con estas Estructuras	64
V	Descripción de Procedimientos Constructivos Tradicionales para puentes	66
V	1.- Introducción	66
V	2.- Descripción de los Procedimientos Constructivos	69
VI	Ventajas y Desventajas en la Aplicación a puentes de las Estructuras Espaciales	95
VI	1.- Introducción	95
VI	2.- Ventajas y Desventajas	97
VII	Conclusiones	102
	Bibliografía	105

I INTRODUCCION

En un país en desarrollo como lo es México, con poblaciones todavía muy incomunicadas y con gran escasez de recursos, y que su incorporación al desarrollo nacional implica la construcción de caminos principalmente rurales, en los cuales uno de los principales problemas que presentan es la construcción de puentes debido a las limitaciones de infraestructura, como son la construcción de puentes sobre carreteras en funcionamiento donde no hay vías alternas y su consecuente interrupción de tráfico, o limitaciones socio-económicas, en donde la falta de recursos humanos -como mano de obra calificada-, materiales y la lejanía a los lugares de abastecimiento implicarían costos muy elevados, así como las limitaciones ambientales en cuanto a clima, orografía y topografía, obligan a tomar en cuenta alternativas en la ejecución de obra de los puentes, y desechar la idea de un procedimiento único para su ejecución.

El siguiente trabajo es un reporte de lo que son las "Estructuras Espaciales", y su aplicación en la construcción de puentes en México, los cuales son únicos en el mundo, y su objetivo es resaltar las ventajas que tiene el sistema, para que se le tome aún más en cuenta en la elección de futuros puentes, ya que también se ha considerado a la construcción de puentes, como una de las más "extremadamente interesantes posibilidades" para las estructuras espaciales en un futuro.

El trabajo está dividido de manera que en el primer capítulo se da una breve descripción de lo que son las estructuras espaciales y su clasificación, le sigue un resumen en el que se mencionan de manera superficial los métodos de análisis empleados para su cálculo y diseño.

En el tercer capítulo se describe, en forma particular el tipo de estructura espacial que se utiliza en los puentes y en forma detallada el proceso constructivo de fabricación y montaje del puente, seguido de un capítulo en el que se describen una serie de procedimientos para la construcción de puentes de

acero y concreto realizados hasta ahora y por lo que se les ha llamado tradicionales, con el objeto de formar un criterio que permita resaltar finalmente, las ventajas y desventajas del sistema de "La Estructura Espacial como Alternativa En La Construcción De Puentes".

II INTRODUCCION A LAS ESTRUCTURAS ESPACIALES.

II 1.- Antecedentes.-

El progreso tecnológico sobre materiales, estructuración y cálculo, ha incidido poco en los temas de arquitectura más tradicionales como el de la vivienda urbana por ejemplo y dando origen, a la aparición de un tipo de construcciones de grandes claros, como puentes y lugares para la reunión pública, con características y problemáticas específicas que definen una parte muy concreta de la arquitectura.

Esa parte de la arquitectura es la que representan las llamadas "Estructuras Espaciales", que son una transformación de la arquitectura tradicional provocada por:

- Los modernos procesos constructivos, en los que se toma en cuenta la estructura, en términos lógicos y funcionales, es decir, la que ordena y organiza los componentes individuales, creando y logrando formas y dimensiones de estructuras completamente diferentes en belleza, ligereza y resistencia. Sin extrañarnos que tales estructuras concebidas por el hombre, sean parecidas a ciertos sistemas encontrados en la naturaleza, como es la configuración tetraédrica. Así, la estructura resistente

- sistema que tiene por objeto dirigir las fuerzas estáticas y dinámicas que actúan sobre ella - es un subsistema dentro del conjunto estructural lógico total y la construcción será la realización efectiva de este subsistema ayudada de diversos materiales y procedimientos de ensamblaje.

- Los resultados de la investigación industrial y técnica, que nos proporcionan, en el caso de la industria siderúrgica, aceros de alta resistencia y en la investigación técnica la fabricación de concretos (materiales esenciales en la estructura resistente) con diferentes características que permiten el diseño y construcción de elementos cada vez más resistentes y económicos que apoyan el desarrollo de los procesos constructivos y de los proyectos arquitectónicos.
- El progreso de mecanismos auxiliares como son las computadoras y de métodos de análisis que en conjunto reducen las dificultades para el cálculo de tales obras.

Estos progresos rompieron con los obstáculos en el desarrollo de las estructuras espaciales, que a manera de resumen se mencionan:

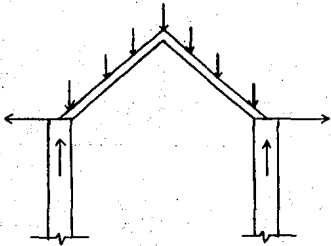
- 1.- Dificultades para el cálculo de tales obras. Superadas por el desarrollo de métodos matriciales para el cálculo de estructuras y el progreso de las computadoras.
- 2.- Las dificultades para ensamblar en el espacio elementos dispuestos según ángulos diferentes. Superadas por las nuevas estructuraciones lógicas.
- 3.- La carencia de materiales adecuados con sus consecuentes dificultades constructivas. Superadas por los nuevos materiales fabricados y el consecuente desarrollo de procesos constructivos.

El antecedente de la estructura espacial, la armadura (llamada también viga en celosía o entrearmado), se basa en la triangulación, por ser el triángulo la forma geométrica más rígida que puede obtenerse en el plano. Esta disposición en triángulos hace que la armadura conserve los cordones de compresión y tensión como de viga maciza, pero el alma queda sustituida por una red de barras, unas a compresión y otras a tensión, que absorben los esfuerzos cortantes. Estas, evolucionaron con el objeto de absorber los empujes que provoca sobre los muros un techo de doble vertiente mediante un tirante, a partir del cual, nació el pendolón, para evitarle excesiva flexibilidad, que a su vez, dió origen a los codales.

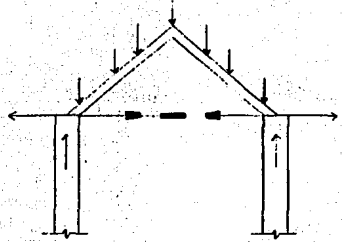
Con el objeto de aligerar vigas y arcos de gran claro, se diseñó una armadura en la que todas las diagonales arrancan desde los apoyos, de forma que cada par de diagonales recibiera la carga del montante correspondiente, pero debido a que los ángulos que forman así las diagonales son muy agudos o muy obtusos, junto a la existencia de miembros de gran longitud, con sus correspondientes problemas de pandeo, se optó por mantener los ángulos semejantes entre sí, de 45° a 60° , con pocas barras, naciendo así las armaduras o vigas tipo Warren, Howe y Pratt, esta última sustituyó a la anterior por la ventaja de que las diagonales trabajan a tensión sin problemas de pandeo. La posibilidad de variar la distribución de barras a causa de variar el estado de cargas, dió origen a las vigas en celosía en Cruz de San Andrés que presenta un número excesivo de barras, además toda una serie de diagonales a compresión, aunque introduce nudos en el cruce de las barras que reducen la longitud de pandeo.

La viga en K, surge de la necesidad, de que no actúen cargas más que sobre los nudos, para evitar flexiones en las barras junto con la de tener elementos que no sean excesivamente robustos, logrando así una separación entre los nudos de los cordones mitad que en la de tipo Warren, así como una disminución en la longitud de montantes y diagonales.

EVOLUCION DE LA ARMADURA

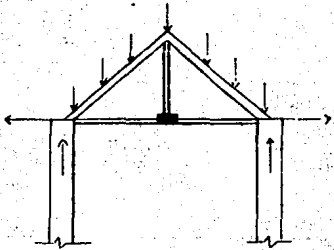


1.- Empuje sobre los muros de un techo de doble vertiente.

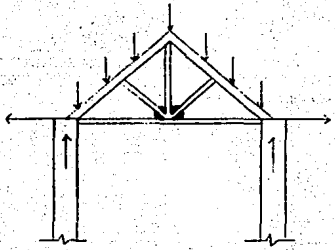


2.- Colocación del tirante para absorber empujes.

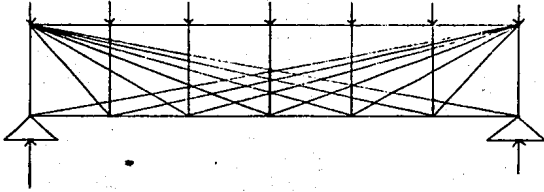
3.- Nace el pendolón para evitar flexibilidad excesiva.



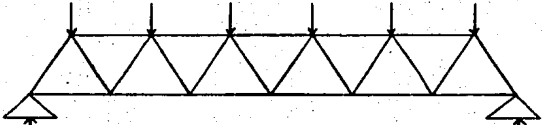
4.- Codales que reducen aún más la flexibilidad y dan origen a la ARMADURA.



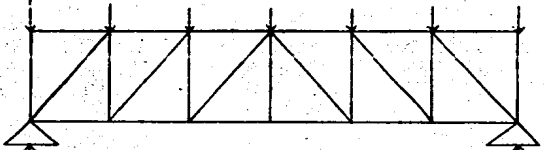
TIPOS DE ARMADURAS



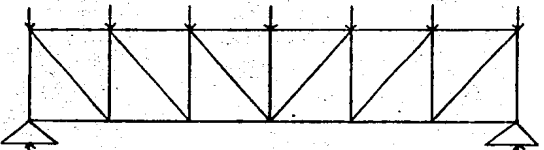
Diseño Original



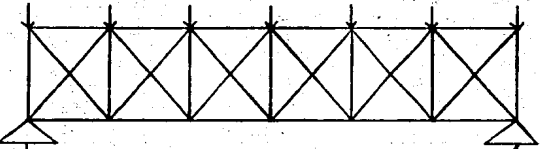
Warren



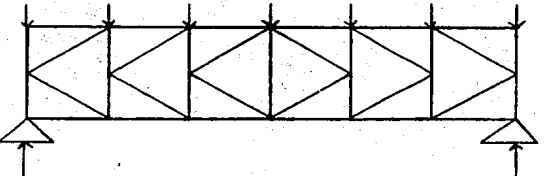
Howe



Pratt



Cruz de San Andrés



Viga "K"

Sin embargo, la estructura plana, aún pudiéndose adecuar a cualquier tipo de exigencias, no tiene grandes posibilidades arquitectónicas, así como de salvar grandes claros con poco material; temas en los que el uso de la estructura espacial ha generalizado su uso en los últimos diez años, ya que solo se les conocía hasta hace poco (principalmente la construida con barras tubulares) en andamiajes y construcciones provisionales.

II 2.- Definiciones y Clasificación.-

Se puede definir a las estructuras espaciales bajo puntos de vista diferentes aunque cumpliendo objetivos comunes.

Desde el punto de vista de su apariencia, lo que se ha dado por llamar "estructuras espaciales", en realidad no es más que la versión, en tres dimensiones, de los entrearmados usados antiguamente, es decir hasta cierto punto son la extensión al espacio de la armadura tradicional.

Prácticamente son una forma de construcción, caracterizada por la tendencia de ingenieros y arquitectos, a repartir cargas, distribuir y reducir momentos, sacar máxima utilidad de la materia, en las que armonizan estrechamente las ventajas técnicas y la belleza arquitectónica.

Por su comportamiento la división que aún subsiste, entre las estructuras planas y espaciales se refiere no a la estructura en sí, que siempre es espacial, sino a los métodos de análisis. En una construcción plana, todos los elementos sustentantes se encuentran en un mismo plano de modo que las líneas de acción de las fuerzas son coplanarias, soportando estas estructuras esfuerzos que actúan en su propio plano. Distintivos de estos sistemas son el pórtico y el entrearmado, es decir, un conjunto de barras unidas entre sí por nudos (armaduras de cubierta clásica). En la estructura espacial los elementos sustentantes pueden estar dispuestos siguiendo diversas direcciones en el espacio, siendo un tipo de éstas la malla espacial, que expresa una disposición estructural consistente en un gran número de barras, de longitud pequeña comparada con la de toda la estructura, unidas entre sí a través de sus extremos, dando lugar a una red tridimensional, en donde las fuerzas solicitantes pueden actuar en cualquier punto de la superficie exterior, bajo cualquier ángulo y en cualquier dirección, (la cúpula es un ejemplo típico) al estar las barras, y en consecuencia las líneas de acción de las fuerzas ramificadas en el espacio, las fuerzas se igualan en su mayor parte y constituyen sensiblemente

un campo de fuerzas homogéneo, sin puntos de sobrecarga grande, confiriendo a la estructura una gran resistencia a las sollicitaciones exteriores. Los esfuerzos disminuyen, y con ello las secciones necesarias de los elementos estirados o comprimidos, lo que conduce a una ganancia apreciable de material. Cumpliendo con esto último con algunas de las tendencias y objetivos de la ingeniería y arquitectura, como son la construcción ligera, sin considerar al concepto de aligerado en base a lograr piezas estructurales con mayor momento de inercia y menor cantidad de material, como puede ser el caso de las vigas T, I, C, las losas nervadas, las piezas mixtas, etc. sino estructuras aligeradas en toda su extensión, es decir, la sustitución del macizo continuo de una lámina curva, una placa plana o un sistema de vigas, por conjuntos de gran número de barras de pequeña longitud y sección y en consecuencia una gran economía y belleza.

Por lo anterior, la eficacia de una estructura espacial reside, en la posibilidad que presenta de distribuir tan ampliamente como sea factible - cualquier acción concentrada de las cargas y gracias a la disposición de un gran número de elementos unidos bajo forma de entreamado, las cargas aisladas que actúan en ciertos puntos de la estructura no son sostenidos únicamente por los elementos cargados directamente, sino también por otros situados a considerable distancia de la carga, lográndose una distribución más homogénea de las sollicitaciones en el conjunto de las estructuras, redituando así en la ligereza, economía y belleza, aunado a un alto grado de seguridad consecuencia de su gran hiperestaticidad.

Como una clasificación de las estructuras espaciales, se les ha agrupado en tres categorías:

- 1.- Entreamados, constituidos por un conjunto de barras unidas entre sí por nudos.
- 2.- Las estructuras de láminas metálicas, en las que los revestimientos de cierre participan en la resistencia a los esfuerzos solicitantes.
- 3.- Las construcciones de cubiertas colgantes.

Como ejemplos típicos de la primera categoría, encontramos a las cúpulas de entreamado, las bóvedas de cañón de entreamados y los reticulados de dos capas. En la segunda categoría podemos citar a las construcciones plisadas, como ejemplo característico de las estructuras laminares; así como las cubiertas de cables son construcciones colgantes, siendo éstas la tercera categoría.

Según la clasificación anterior, se nota la tendencia de la utilización de las estructuras espaciales como cubiertas exclusivamente, lo cual es bastante razonable por sus características, como su ligereza mencionada anteriormente, que permite el uso de éstas para cubrir grandes claros.

Tomando en cuenta lo anterior, se ve la importancia de utilizar a la estructura espacial no solo como cubierta, sino como estructura sustentante principal, como sería el caso de utilizar la estructura espacial como la superestructura en algunos casos de puentes, lo cual es bastante factible, ya que mientras en las estructuras clásicas, los esfuerzos producidos por el peso propio y las cargas permanentes son generalmente muy elevados, en las estructuras espaciales se ha conseguido reducir los pesos propios de la obra, lográndose con ello aumentar la carga útil, si bien que los esfuerzos críticos en los puentes dependen sobre todo de la magnitud de las cargas móviles. Estas son en este tipo de estructuras mucho mayores que el peso muerto y su acción no se encuentra limitada localmente.

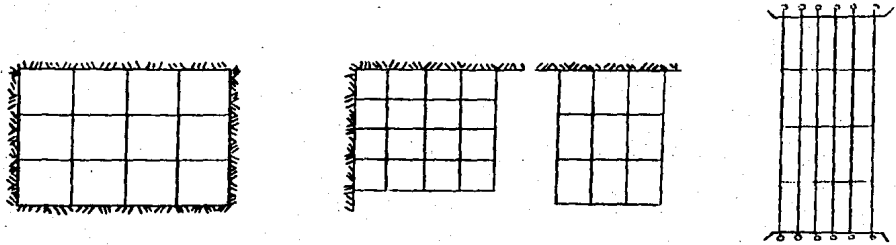
Dentro de las estructuras espaciales que podemos utilizar como superestructura de puentes, caemos en la primera categoría de la clasificación anterior, por lo que eliminando a las cúpulas y bóvedas de cañón entearmado, se mencionan los distintos reticulados (por geometría y estructura) posibles de utilizar con dicho fin.

Reticulados de Vigas o Mallas de una Capa: Aquí vale la pena aclarar que retícula y malla son el mismo concepto, ya que ambas son cada uno de los cuadriláteros que constituyen la estructura espacial. Este tipo de estructuras están constituidas por una serie de vigas situadas en un plano, cruzándose respecto a sus apoyos en ángulos recto u oblicuamente (llamados reticulados rectangulares o diagonales respectivamente) pero siendo ortogonales entre sí, generalmente sus cuatro lados son utilizados como apoyos. Ya que estas estructuras se utilizan para cubrir claros sin apoyos intermedios, también es posible utilizar, solamente como apoyo uno, dos o tres de sus lados, pero estos casos sólo se logran con los reticulados rectangulares.

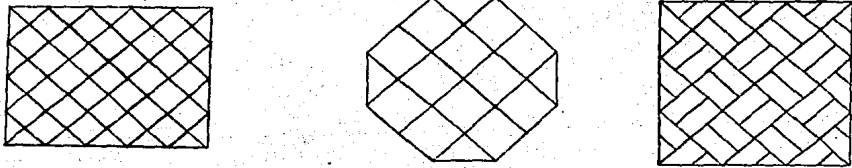
Aunque desde el punto de vista de repartición de esfuerzos el reticulado diagonal sea más aconsejable, ya que tiene una mayor rigidez, conduciendo a una apreciable reducción de flechas, está más extendido el uso del reticulado rectangular por la variedad en la forma de apoyarse.

Comparando entre sí estos reticulados cuando están apoyados en sus cuatro lados, vemos que la diferencia reside en que las vigas del reticulado en diagonal son de longitudes diferentes. Por esta razón la rigidez relativa EI/L varía notablemente aun en el caso de que el valor EI de las vigas sea idéntico, la consecuencia es que las vigas de esquina más cortas tienen mayor rigidez a la flexión y sirven de apoyo a las más largas, que pasan a ser vigas continuas, entendiéndose así también el por qué se necesita que esté apoyada en sus cuatro lados.

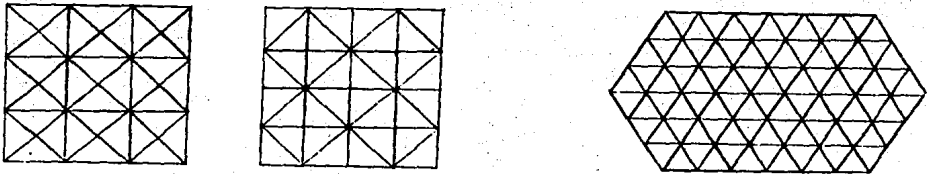
RETICULADOS DE VIGAS O MALLAS DE UNA CAPA



Reticulados rectangulares apoyados sus lados en distintas formas.



Reticulados diagonales siempre apoyados en sus cuatro lados.



Reticulados triangulares.

Para que estas estructuras de una capa no se conviertan en mecanismos incapaces de equilibrio, se aconseja que sean trianguladas, es decir tres sistemas de vigas entrecruzadas, ya que tienen una extraordinaria rigidez y conducen a una repartición más uniforme de los esfuerzos.

El empleo de reticulados de una capa es económico para claros de 30m. como máximo y conviene a formas con nulas o pequeñas "perturbaciones flectoras" como cubiertas curvas o plisadas y cúpulas, siendo inútil en los casos de estructuras planas y por lo tanto en la utilización como superestructuras de puentes.

Reticulados de Vigas o Mallas de dos Capas: Para lograr cubrir claros muy grandes, es indispensable, una mayor rigidez de la malla espacial, lo cual se ha logrado por medio de los reticulados de vigas o mallas de dos capas, éstos se componen de dos redes de vigas dispuestas en dos planos paralelos-redes que no han de tener necesariamente la misma trama, ya que dependerá para cada sistema de reticulado, de la o las unidades espaciales (módulos) que se utilice para conformar el sistema - la capa del plano superior está unida a la capa del plano inferior por un gran número de barras rectilíneas verticales o diagonales unidas entre sí en los nudos, con lo que se obtiene un tipo de construcción tridimensional en la que la acción de las cargas exteriores se reparte inmediatamente en un gran número de elementos con diferentes direcciones lográndose un alto grado de hiperestaticidad evitándose una destrucción del conjunto a causa de una falla local.

Los reticulados de dos capas se pueden dividir en dos grupos principales:

- 1.- El reticulado de entreamado constituido por vigas de celosía (armaduras) entrecruzadas.
- 2.- El reticulado espacial propiamente dicho, formado por la reunión de un cierto número de elementos - unidad espacial o módulo - con cierta geometría en particular.

En función de la forma que tiene la unidad espacial, se mencionan los distintos sistemas de reticulados.

Sistemas reticulados espaciales compuestos por:

Prismas rectangulares. Dentro de este sistema encontramos tres tipos diferentes:

"A" El primer tipo es el sistema, en el que los prismas tienen reticulado simple en cada una de sus caras.

"B" El segundo tipo, las caras de los prismas tienen doble reticulado.

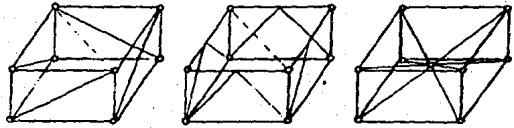
"C" En el tercer tipo, el sistema tiene reticulado diagonal en los prismas.

De estos sistemas los dos primeros tipos, forman parte de los reticulados del primer grupo, en el que el entrearmado está constituido por vigas de celosía (armaduras) entrecruzadas, como sería el caso del reticulado espacial de dos capas y con dos direcciones formado por armaduras planas tipo Warren, en donde los prismas rectangulares que se forman (o los prismas que forman el sistema) tienen doble reticulado en sus caras.

Prismas triangulares. En este sistema encontramos prismas triangulares de base triangular y de base cuadrada y en ambos casos, el reticulado en la cara de los prismas puede ser simple o doble.

Los de base triangular forman un sistema al que puede considerarse como una variante entre los reticulados del primer y segundo grupo, debido a que pueden verse como mallas formadas por vigas con celosías triangulares y en tres direcciones a 60° definiendo triángulos equiláteros cayendo así en el primer grupo, o de otro modo, malla de dos capas que son triángulos equiláteros unidos entre sí por barras diagonales de modo que se forman prismas triangulares de base triangular, siendo así de las del segundo grupo.

PRISMAS RECTANGULARES



A

B

C

Reticulado Simple

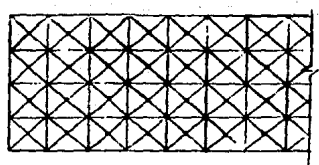
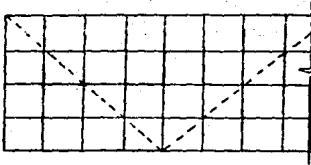
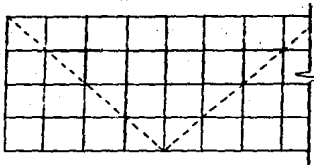
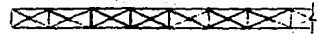
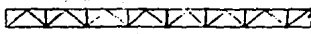
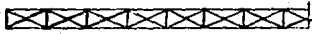
A

Reticulado Doble

B

Reticulado Diagonal

C

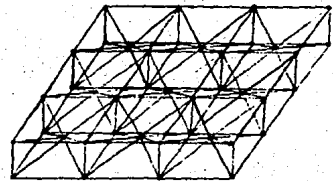
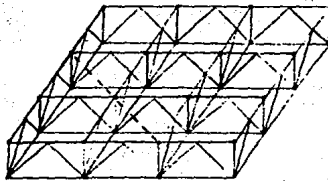
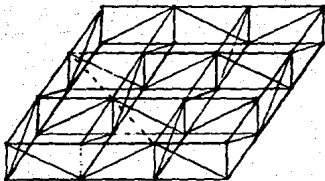


Planta y Cortes

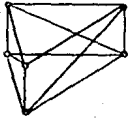
A

B

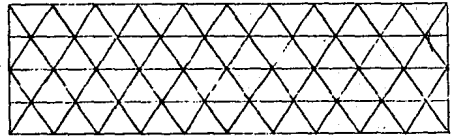
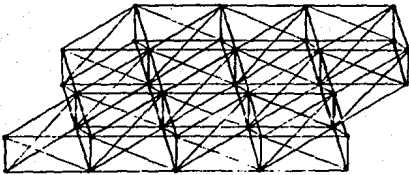
C



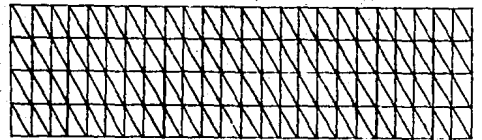
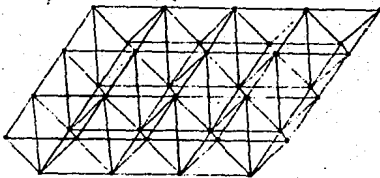
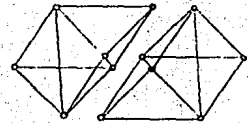
Perspectiva



**PRISMAS TRIANGULARES
DE BASE TRIANGULAR.**



**PRISMAS TRIANGULARES
DE BASE CUADRADA.**



Con los prismas triangulares de base cuadrada se construye un tipo de entrearmado conocido como malla multitriangulada en donde sus dos capas son iguales y los prismas en sus caras tienen reticulado simple.

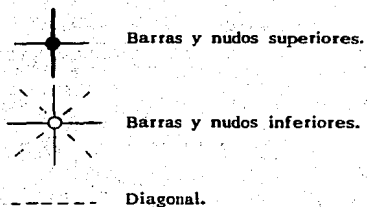
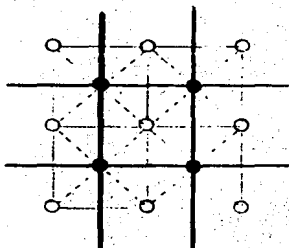
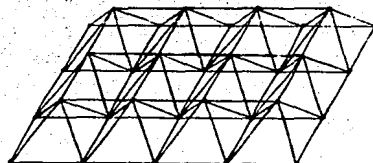
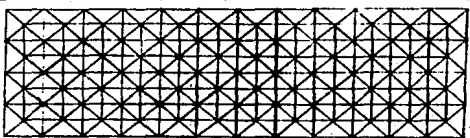
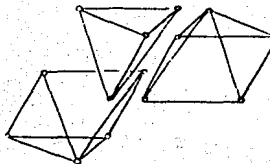
Prismas tetraedros y semi-octaedros. Este sistema está formado por pirámides de base cuadrada, que al ensamblarse una al lado de otra originan dos capas iguales de cuadrados, siendo este un reticulado espacial de dos direcciones; es decir que cada capa está formada por dos redes de barras entre cruzadas. Es común en el uso de cubiertas formar el sistema por pirámides con el vértice hacia abajo, uniendo las bases cuadradas entre sí por pernos y los vértices por tirantes con tensores. En el caso de débil sollicitación se puede de suprimir una pirámide de cada dos.

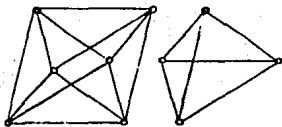
Otra alternativa para originar este sistema es utilizando las armaduras tipo Warren inclinadas a 45° y uniendo los cordones superiores e inferiores.

Prismas tetraedros y octaedros. Es el sistema más común en donde las dos capas son iguales a base de triángulos equiláteros, resultado del ensamble de tetraedros. La combinación de tetraedros y octaedros regulares da como resultado un reticulado espacial en tres direcciones, sistema muy eficaz, de excepcional rigidez a la flexión y la torsión, y susceptible de cubrir grandes espacios.

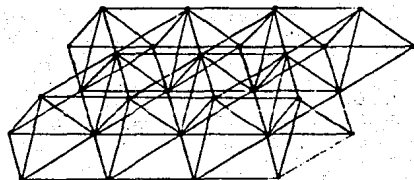
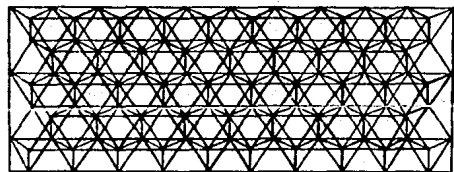
Pirámide hexagonal. Es el resultado de la idea actual, de conseguir estructuras de dos capas formadas por unidades hexagonales prefabricadas, se pueden concebir diversas variantes, pero el tipo más rígido está formado por pirámides prefabricadas de base hexagonal, cuyas cúspides están unidas por tirantes. Las dos capas tienen barras en tres direcciones y las dos capas son distintas entre sí, siendo que la capa exterior está formada por triángulos y la interior por hexágonos. Este tipo de reticulados son ideales para las bóvedas de cañón y las cúpulas.

**PRISMAS TETRAEDROS
Y SEMI-OCTAEDROS.**

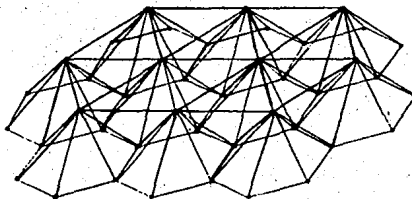
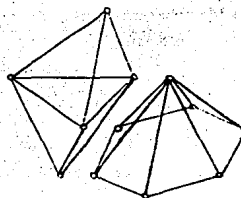
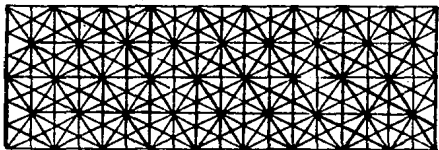




**PRISMAS TETRAEDROS
Y OCTAEDROS.**



PIRAMIDE HEXAGONAL.



A partir de estas formas clásicas, la variedad de la tipología es prácticamente infinita, de modo que 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 (unidad espacial - tetraedro o pirámide por ejemplo) hasta conjuntos más importantes de módulos (anillos, hileras, etc.) y una economía notable de material, que redonda en una facilidad de transporte y un costo reducido.

Esta libertad naturalmente plantea un grave problema de optimización. Una tipología estructural con pocas limitaciones será difícil plantearla en forma óptima. La experiencia al respecto, sin embargo, ha producido, en cuanto a la forma del módulo, las mallas tetraédricas (es decir, a base de tetraedros y octaedros) en pirámide cuadrada (tetraedros y semi-octaedros) multitrianguladas (prismas triangulares de base cuadrada) siendo éstas la tendencia fundamental de la forma estructural para mallas de dos capas planas, posibles a utilizar como superestructura de puentes.

III RESUMEN DE METODOS DE ANALISIS DE ESTRUCTURAS ESPACIALES

III 1.- Introducción.-

El análisis en una forma u otra, forma parte integral de el proceso de diseño aplicado a la mayoría de las estructuras. En el caso de estructuras espaciales, su análisis se ha basado en gran parte en la experiencia y en hipótesis simplificadoras, derivadas del conocimiento de las armaduras coplanares, sin embargo como por regla general son estáticamente muy indeterminadas, no se puede confiar en él para un análisis final, sin embargo la evolución de técnicas efectivas y más exactas de análisis fueron sin duda uno de los factores más significativos que contribuyeron a su rápido desarrollo y uso extendido. El propósito de este capítulo, es revisar brevemente los diferentes métodos de análisis que se aplican comúnmente a las estructuras espaciales.

No se detalla la descripción de los métodos de análisis y es justo decir, que la mayoría de los ingenieros estructuristas utilizan computadoras, en los que se manejan programas escritos por otros, por lo que no es necesario que conozcan los detalles de un programa en particular, pero es deseable que se entiendan los fundamentos y limitaciones de los métodos de análisis en que está basado.

III 2.- Métodos de Análisis.-

El rasgo que es común a todos los métodos de análisis, es el uso de un modelo, el comportamiento del cual puede ser estudiado y usado para predecir el comportamiento de una estructura real, existente o en proyecto. Los aspectos del comportamiento que comúnmente son más estudiados, son la **magnitud de esfuerzos internos y deformaciones**, resultado de la aplicación de fuerzas externas y deformaciones, sin embargo el rango de variables del comportamiento que pueden ser estudiadas es mucho mayor, tales como los efectos de la distribución de temperatura, asentamientos, respuesta dinámica a tránsito de cargas, pandeo elástico, plasticidad, fatiga y propagación de fallas, frecuencias naturales de vibración, y la determinación de cargas de colapso.

Un modelo puede ser descrito como un artefacto, dispositivo o utensilio el cual es tan afín a un sistema físico real, que observaciones en el modelo puedan ser usadas para predecir exactamente el comportamiento de el sistema físico real, en el aspecto deseado. El modelo puede ser un sistema físico, en cuyo caso su uso en una predicción sería clasificado como un análisis experimental, o éste puede ser un modelo matemático dando origen a un análisis puramente matemático.

La mayoría de los métodos de análisis estructural pueden ser clasificados como sigue:

- a) **Métodos Experimentales**
- b) **Métodos Clásicos de Mecánica Continua**
- c) **Métodos Basados en Discretización del Elemento Finito**
- d) **Métodos Empleando la Analogía a Estructuras Continuas**
- e) **Métodos de Análisis de Diferencias Finitas**

a) **Métodos Experimentales:** Aunque los modelos experimentales no se asemejan físicamente a sus prototipos, como en el caso de la analogía de las redes eléctricas por ejemplo, la mayoría de los modelos experimentales estructurales aparecen físicamente similares a sus prototipos y son usados típicamente para mediciones directas de esfuerzos y deformaciones, pero también, como instrumento de investigación y como suplemento importante de los métodos matemáticos utilizados en el proyecto.

Las razones principales para su utilización son:

- Porque el análisis matemático del problema es virtualmente imposible.
- Porque, aunque sea posible, es tan pesado y complicado que el análisis de modelos representa un método mucho más corto y ventajoso.
- Porque la importancia del problema es tal que justifica la comprobación de la solución matemática con ensayos de modelos.

En la utilización (producción e instrumentación) de modelos, es importante que éste, esté proyectado de modo que se pueda deducir el comportamiento del prototipo a escala natural del correspondiente al modelo. Para conseguirlo, las dimensiones del modelo (escala) y las características del material utilizado en su construcción deben guardar ciertas proporciones con las dimensiones y material del prototipo. Los principios que rigen la relación entre un modelo y su prototipo se llaman principios de semejanza, los cuales regulan el modelo, y otros establecen los medios de extrapolar los resultados del ensayo del modelo para predecir las cualidades del prototipo.

Estos principios nos indicarán, la proporción (escala) que deberá guardar el modelo, respecto al prototipo, tales como las longitudes de barras, momentos de inercia y módulo de elasticidad y se obtendrán el o los factores que relacionan los esfuerzos entre ellos. Otro factor importante en la elección de la escala es la capacidad del equipo a emplear para cargarle, las dimensiones de los instrumentos de ensayo, las limitaciones de ensayo, las limitaciones de la maquinaria para fabricarle y los fondos y el tiempo disponible para el programa experimental.

También es de gran importancia la elección del material apropiado para la construcción del modelo, el cual debe ser tal que su acción estructural sea apropiado al uso, y que facilidades tiene para la fabricación de modelos pequeños.

Muchas veces se prefiere utilizar un material que tenga un módulo de elasticidad más bajo que el del prototipo, para que se puedan obtener deformaciones suficientemente grandes y medirlas con precisión, sin tener que aplicar fuerzas demasiado grandes.

Los métodos de análisis de modelos se pueden dividir en dos tipos:

- a) **Método Directo:** Es aquel en el que se obtienen los resultados buscados, cargando al modelo del mismo modo que el prototipo, con lo que la deformación elástica es semejante para los dos, y las mediciones de las deformaciones conducen a los resultados.
- b) **Métodos Indirectos:** En estos métodos se carga el modelo en una forma que guarda relación directa con la carga real del prototipo. Generalmente exigen hallar primero las líneas de influencia del modelo, extrapolando los resultados para el prototipo, pudiendo calcularse los esfuerzos producidos en éste para las hipótesis de carga dados, a partir de las líneas de influencia extrapoladas.

El planteamiento del método de análisis de modelos, se basa en:

Determinar, si el objeto del análisis es para comprobar el proyecto de una estructura real, establecer los principios de semejanza, cuidando su cumplimiento tan estrechamente como sea posible y práctico, al proyectar y construir el modelo o si el modelo se usa para desarrollar o estudiar la teoría matemática para un cierto tipo de problema, considerando al modelo como una estructura real de tamaño pequeño, para

la que se puede calcular los resultados matemáticos y compararlos con los experimentales.

. Elegir el método más apropiado de análisis , el cual viene limitado por factores como la disponibilidad de equipo y material de modelos apropiados, o la experiencia del personal de laboratorio, si no existen tales limitaciones, se elige el método a base de las ventajas e inconvenientes de los distintos métodos al problema considerado.

. Elegido el método, se establecen las dimensiones límites del modelo, impuestas por el método, con el fin de que se cumplan los principios en los que se basa el método.

Parece ser poco razonable construir modelos físicos de estructuras, cuyo comportamiento pudiera de manera razonable estar dentro o cerca del rango elástico lineal, puesto que los métodos matemáticos de análisis para tales casos están bien probados y son bastante accesibles.

Estructuras Espaciales (de dos capas principalmente) bajo cargas de trabajo, son generalmente buenas dentro del rango elástico-lineal, pero estudios experimentales son apropiados sin embargo, si los efectos de cargas a niveles más altos, (como cargas móviles) o estructuras de más de dos capas, como las utilizadas en puentes, son objeto de investigación.

A este respecto, vale la pena mencionar que hasta hace poco las Estructuras Espaciales eran utilizadas en techumbres y en entrepisos, sin experiencias, especificaciones ni teoría para ser utilizadas en puentes, siendo México el primer país en utilizarlas, por lo que fué necesario desarrollar una teoría estructural para realizar el análisis considerando cargas verdaderamente móviles y para disipar las dudas en cuanto a las hipótesis de cálculo, se instrumentaron algunos de los puentes construídos con estas estructuras, mediante deformímetros eléctricos, efectuando las mediciones con el puente cargado y posteriormente haciendo relajación de esfuerzos cortando diferentes barras e incluso mediciones hechas desde la etapa de corte y soldado de los elementos de los tramos, para obtener el registro de la evolución histórica de los esfuerzos en estas piezas, así como para conocer la influencia de las varia-

ciones que se producen en los esfuerzos por efecto de la mano de obra en los procesos de ensamble y de montaje.

Los resultados obtenidos indican que en general los esfuerzos medidos son inferiores a los calculados y bastante alejados de los esfuerzos permisibles de proyecto, lo que lleva a inferir que las hipótesis adoptadas para el cálculo son adecuadas y seguras. Por otra parte, los bajos valores registrados para los esfuerzos medidos, sugieren la conveniencia de optimizar los diseños, para lo cual se han realizado modelos, instrumentándolos y midiéndolos con el fin de afinar las hipótesis de cálculo.

Estos resultados, hacen ver que las incertidumbres que generan los diseños racionales pueden evaluarse mediante una aplicación apropiada de la ingeniería experimental, ya que mediante una observación instrumentada de modelos y de prototipos puede anticiparse en forma veraz y confiable el comportamiento real de las obras diseñadas.

b) Métodos de Mecánica Continua: Generalmente, el análisis de un sistema continuo por métodos clásicos empieza por considerar las propiedades de pequeños elementos diferenciales de el continuo. Las relaciones se basan en la satisfacción de las condiciones de equilibrio, compatibilidad y las leyes constitutivas de el material (es decir, relaciones entre esfuerzos y deformaciones a partir de las propiedades de los materiales) que se establecen mediante la evaluación de varias cantidades asociadas con los elementos infinitesimales y ecuaciones diferenciales parciales o ecuaciones integrales; todas estas relaciones y ecuaciones basadas en los principios del trabajo virtual y desplazamientos virtuales, método de la carga unidad y diversos teoremas de desplazamientos y trabajos recíprocos, que regulan el comportamiento de el continuo, limitando su estudio a cierto tamaño del elemento permitiéndole que tienda a cero, así como que el número de elementos aumente indefinidamente hasta cubrir todo el continuo. Para sistemas conservativos, las ecuaciones requeridas, pueden establecerse en forma alternativa en los principios de energía de deformación, que es la capacidad de las fuerzas internas -las cuales se desarrollan al aplicar cargas externas- de hacer

trabajo debido al estado de deformación complementaria que comprenden los teoremas de Castigliano así como sus relaciones con los métodos de flexibilidades y rigideces y obtenida por integración sobre el continuo del elemento de energía individual junto con la energía de las fuerzas externas, es decir, la energía total será la integración del producto de las cargas aplicadas por su desplazamiento producido.

Una vez establecidas las ecuaciones que regulan el fenómeno, pueden ser resueltas analíticamente en muy pocos casos y en los cuales la estructura es muy simple. En general las ecuaciones tienen que ser resueltas ya sea por integración numérica o por métodos de diferencias finitas, dando origen a soluciones aproximadas, las cuales satisfacen las ecuaciones en algunos puntos.

Los métodos de mecánica continua, aunque son inadecuados para aplicación directa a estructuras complicadas, juegan un papel contributivo importante en los métodos de análisis basados en la discretización de elementos finitos, donde las ecuaciones del continuo pueden ser usadas para obtener las relaciones fuerza-desplazamiento u otras propiedades de los elementos simples en los que fué discretizada la estructura.

c) Métodos Basados en la Discretización de Elementos Finitos: Independientemente de las hipótesis iniciales y el método usado para formular un problema, si se recurre a métodos o técnicas numéricas en la etapa final de solución, resulta entonces que el continuo ha sido, de algún modo, substituido por un modelo discreto en el curso de la solución. Este hecho sugiere una alternativa aproximada para la formulación del problema, es decir, la de reemplazar el continuo por un modelo discreto desde el principio, de modo que mayor aproximación puede llegar a ser innecesaria.

La práctica de reemplazar una función continua por una fragmentada es reciente en la aplicación a problemas de análisis estructural.

La aproximación fundamental en el método del elemento finito es para empezar, idealizar la estructura dentro de un conjunto de elementos de tamaño finito, con una supuesta forma de desplazamiento (u ocasionalmente de

esfuerzos) dentro de cada elemento expresado como una función de un número finito de grados de libertad asociados con el elemento. (Generalmente, los desplazamientos en puntos seleccionados, conocidos como nodos, sobre los nudos o puntos de conexión de los elementos intermedios). Las propiedades de los elementos individuales son determinados por los métodos clásicos de mecánica continua. En muchos casos los elementos son de forma muy simple y su etapa para la solución es comparativamente trivial.

Finalmente, la aplicación de las condiciones de equilibrio y la ejecución de la compatibilidad de desplazamientos en los elementos intermedios dan como resultado, un sistema de ecuaciones algebraicas y no un sistema de ecuaciones integrales o de diferenciales parciales; el continuo con una infinidad muy grande de grados de libertad ha sido reemplazado por un modelo simplificado con grados de libertad finitos.

La etapa final puede ser formulada de dos maneras distintas dando origen a dos métodos de análisis conocidos respectivamente como el método de las rigideces (o desplazamientos) y el método de las flexibilidades (o fuerzas)

Métodos de las Rigideces.

En este método, las ecuaciones de equilibrio se plantean en función de los desplazamientos nodales como incógnitas. Una vez resueltas estas ecuaciones, las fuerzas internas o esfuerzos, se determinan, elemento por elemento, usando las propiedades fuerza-desplazamiento (rigidez) de cada elemento y los desplazamientos nodales.

Método de las Flexibilidades.

En este método, las ecuaciones de equilibrio se plantean en términos de las fuerzas internas en los elementos (barras) como incógnitas. Para estruc

turas estáticamente determinadas estas ecuaciones pueden ser resueltas directamente por las fuerzas, pero en general el número de ecuaciones será insuficiente para este propósito y deberán ser aumentadas por ecuaciones adicionales, las cuales se obtienen por compatibilidad de deformaciones en puntos libres internos (capaces de desplazarse) y en términos de fuerzas "redundantes" desconocidas, es decir, suprimiendo las barras necesarias (que podemos considerar como fuerzas redundantes) hasta obtener una estructura estáticamente determinada, llamada "estructura primaria" en la cual se obtendrán fácilmente los desplazamientos nodales por el método de la carga unidad producidos al suprimir las barras y provocados por la aplicación de una fuerza unitaria en cada una de las posiciones en las que había una barra, así como los desplazamientos producidos por el sistema de cargas real, de modo que al superponer los desplazamientos en cada punto se obtendrá el desplazamiento total en ese punto, en función de las fuerzas redundantes, y éstas serán las ecuaciones de compatibilidad adicionales. Estas ecuaciones de compatibilidad se resuelven primero para obtener las fuerzas redundantes, después las fuerzas restantes pueden ser obtenidas muy fácilmente de las ecuaciones de equilibrio estático.

Los desplazamientos nodales reales pueden ser encontrados de las propiedades fuerza - desplazamiento (flexibilidad) del elemento, una vez conocidas las fuerzas.

Este método era comúnmente más utilizado para el análisis de elementos finitos, debido a la extensa existencia de técnicas tradicionales manuales de cálculo, y aunque aún es utilizado muy frecuentemente para la formación de programas para computadora, la gran mayoría de los programas prácticos para el análisis estructural, están ahora basados en el método de las rigideces. Ya que no es necesario la intervención del calculista durante el proceso de análisis (como la obtención de la estructura primaria) sino únicamente dar

las características de la estructura y sus cargas, es decir permite un análisis más sistemático.

En ambas aproximaciones, rigideces o flexibilidades, su formulación involucra el manejo de gran cantidad de álgebra lineal y ha sido encontrado que la rama de las matemáticas más conveniente para su representación y manejo es el álgebra matricial. Como resultado el nombre de "Métodos Matriciales" ha sido frecuentemente empleado para describir estas técnicas o métodos de análisis.

Estructuras Esqueléticas. Se conocen como estructuras esqueléticas a aquellas compuestas únicamente por vigas, puntales o riostras, cables, etc., constituyendo un espacial e importante caso en el campo del análisis, del elemento finito, en las que la idealización inicial de los elementos puede hacerse de modo que coincidan con los elementos naturales o miembros de la estructura original. La única limitación para ser empleada, es que los elementos estructurales sean unidimensionales, de este modo sus propiedades necesarias pueden estar expresadas como una función de la distancia a lo largo del eje del miembro.

Por otra parte si además se supone que los elementos son linealmente elásticos, que su comportamiento fuerza - desplazamiento es lineal y que toda la estructura se comporta linealmente, entonces la solución puede ser obtenida sin mayor aproximación y es esencialmente exacta, sujeta únicamente a exactitud aritmética. El análisis en tal caso es descrito en algunos casos como un método "exacto", un título quizás engañoso, el cual sugiere que el problema inicial ha sido resuelto exactamente, siendo que el problema inicial ha sido sólo idealizado a un grado tal, que el problema es tan fácil, que se puede resolver exactamente.

d) **Métodos Empleando la Analogía a Estructuras Continuas:** Los métodos mediante la analogía o asimilación a estructuras continuas, tienen el objetivo de proporcionar estimaciones del comportamiento de estructuras esqueléticas con un mínimo de cálculos. Con objeto de hacer esto, las estructuras esqueléticas, tales como las estructuras espaciales, son reemplazadas por una estructura continua equivalente, como lo son las placas o láminas, con propiedades adecuadamente elegidas, de tal modo que su comportamiento macroscópico guarde alguna relación con el entrearmado original.

Las razones, por las cuales, se asimilan las estructuras espaciales - pensando en ellas como armaduras - a las láminas son: Según las condiciones de esfuerzos predominantes que se desarrollan bajo las cargas de proyecto y condiciones más importantes, tanto las armaduras como las láminas son formas estructurales en las que los esfuerzos son uniformes en toda la profundidad de los elementos que constituyen las armaduras o los esfuerzos son uniformes en todo el espesor de un panel en el caso de láminas. Lo anterior sólo es posible, cuando en la sección de un elemento cualquiera, encontramos únicamente esfuerzos axiales (compresión o tensión) o podemos encontrar otro tipo de esfuerzos (flexión y/o cortante) que en comparación con los esfuerzos axiales son tan pequeños, que se les consideran esfuerzos secundarios y no influyen en el diseño final del elemento.

Este es el caso de las armaduras y láminas. Como lo señalan las hipótesis para el análisis de armaduras, los nudos se consideran articulados de modo que no se generan flexiones en los elementos que unen, y cuando se les llega a considerar rígidos, los esfuerzos de flexión son de importancia secundaria.

La lámina aun cuando tenga resistencia y rigidez a flexión, posee la estabilidad estructural básica en lo que concierne a satisfacer las exigencias de equilibrio. Es decir, en las láminas se presentan tres fuerzas para satisfacer tres ecuaciones de equilibrio sin la ayuda de esfuerzos de flexión. En

consecuencia, mientras la carga está distribuida, la lámina la soportará principalmente bajo un estado de esfuerzos uniforme, pero debido a su rigidez, tendrá una ligera tendencia a cambiar de forma; produciéndose alguna ligera flexión secundaria, éstas flexiones pueden llegar a tener un valor considerable si se consideran cargas concentradas.

En el análisis de láminas es posible obtener como resultado esfuerzos de tensión y compresión únicamente en sus diferentes secciones, al igual que en las armaduras, lo que permite asimilarlas, haciendo notar que para evitar los esfuerzos de flexión, en las armaduras hay que considerar el sistema de cargas como fuerzas concentradas en los nudos y en las láminas el mismo sistema pero como cargas repartidas.

La placa es entonces analizada y los resultados interpretados en términos del comportamiento de la estructura original.

No necesita ser una placa físicamente equivalente, se ha demostrado que las ecuaciones que regulan el continuo equivalente pueden ser generadas y usadas con igual efecto.

El método ha probado ser útil en análisis preliminares, pero es esencial que el problema de la estructura continua equivalente, sea mucho más fácil de resolver que el problema de la estructura esquelética original, ya que los esfuerzos que aparecen en la placa asignada mediante las expresiones para obtener esfuerzos en las estructuras laminares son expresiones complejas que se obtienen de la teoría de placas resolviendo ecuaciones diferenciales parciales, que involucran cálculo de esfuerzos y deformaciones, método que a pesar de ser factible de programarse, es poco utilizado en la práctica.

e) **Método de Análisis de Diferencias Finitas:** El método de las diferencias finitas, con aplicación a las estructuras esqueléticas, depende de la existencia de la regularidad de nodos repetidos o concurrentes, conectados a nodos adyacentes por repetición de miembros modelos. Esto es, en el caso de estructuras espaciales, deben ser simétricas por lo menos en una dirección y sus extremos paralelos a esa dirección y deberán ser simplemente apoyados; condiciones que frecuentemente ocurren en estructuras espaciales de planta rectangular. Bajo estas condiciones las ecuaciones de rigidez de la estructura simétrica, mostrará también un patrón o modelo de recurrencia (repetición), y escribiendo tales ecuaciones en forma de operador de diferencias finitas y sintetizando cargas y desplazamientos con series de Fourier, una solución puede ser obtenida para la longitud requerida definida de la estructura simétrica.

El método ha demostrado dar soluciones muy parecidas a aquellas obtenidas por análisis "exacto" de elementos discretos con menos trabajo de cálculo.

Estrictamente hablando, el método debería ser clasificado como aproximado, y su uso bajo condiciones en las cuales la regularidad de la estructura considerada está sujeta a cualquier perturbación debiendo contemplarse únicamente después de un estudio cuidadoso.

IV PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS EN PUENTES CON ESTRUCTURAS ESPACIALES.

IV 1.- Descripción de la Estructura Espacial Aplicada a Puentes.-

El sistema de estructura espacial que se ha venido utilizando para la construcción de superestructuras de puentes, consiste fundamentalmente en una estructura cuyos módulos o elemento básico son pirámides de base rectangular, que comúnmente se les llama "piñas" y consisten en cuatro aristas o diagonales, de perfiles estructurales, anteriormente estos elementos diagonales se constituían por dos perfiles angulares, con dimensiones que variaban de $2\frac{1}{2}'' \times \frac{1}{4}''$ a $1\frac{1}{2}'' \times \frac{3}{16}''$, soldados de tal forma, que constituían una sección cuadrada, sin embargo, últimamente se ha optado por utilizar perfiles estructurales rectangulares (PTR o PER) con el objeto de evitar la soldadura al unir dos ángulos y por haber demostrado un comportamiento adecuado, estos perfiles varían en sección y calibre desde $1'' \times 1''$ y 2.8 mm. de espesor hasta $3'' \times 3''$ y $4'' \times 3''$ y 4.8 mm. de espesor, la sección y el calibre dependerán de la posición de la piña que forman, dentro de la estructura total, siendo estas piñas formadas por PER de mayor sección (área) cuando son piñas que están en los extremos del puente, cerca de los apoyos y de menor área, cuando forman piñas que van cerca o en el centro de la estructura, en el caso de una estructura simplemente apoyada. Y haciendo el análisis y diseños correspondientes cuando la estructura es continua.

Estos perfiles estructurales, que se ha optado por utilizar por la facilidad y seguridad que representa el evitar la soldadura, repercutiendo en economía de tiempo y dinero en la fabricación de éstas, conforman las caras triangulares de la pirámide y coinciden en el vértice superior de la misma, el cual se forma al soldar a una placa rectangular los perfiles estructurales en el punto de coincidencia, formando así los nudos intermedios de la estructura, las pirámides se unen entre sí, por sus vértices y aristas conformando con ellas una estructura espacial de capas múltiples.

La estructura espacial más utilizada hasta la fecha en la construcción de puentes, es la de 3 capas, habiéndose construido también algunas de 2 capas. Por capas se entiende cada plano paralelo al plano que contiene a las cuerdas superiores o inferiores, que contienen placas que forman nudos, de modo que el plano que contiene la cuerda superior es una capa y el que contiene la cuerda inferior es otra, así la estructura espacial elemental formada por una pirámide es de dos capas, al introducir una segunda pirámide sobre la anterior, el plano que contiene las placas que unen la cúspide de las pirámides inferiores y sirven de base para las pirámides superiores, forman la tercera capa. De modo que una estructura con 2 pirámides superpuestas es de 3 capas. Por cada pirámide que se aumente se crea una capa adicional. Así vemos que siempre el número de capas es un número mayor al número de pirámides.

Las placas que forman los nudos, tienen el cometido de transmitir los esfuerzos a lo largo de la estructura. Por considerarse a las barras articuladas en ellos, estarán sometidas solamente a esfuerzos de tensión y compresión, determinables a partir de las fuerzas que les transmiten las barras concurrentes.

Los nudos están constituidos por placas rectangulares o cuadradas de aproximadamente 18 x 18 cm. y 1/2" ó 3/8" de espesor, a las que se unen por soldadura eléctrica los PER que forman las barras diagonales en cualquier dirección, a las placas se les conoce como nudo electrosoldado.

Haciendo una analogía de la estructura espacial con una armadura, las diagonales en ésta, son los elementos que forman a las pirámides con las que se construye la estructura espacial, se eliminan prácticamente los montantes, excepto en los extremos o apoyos de la estructura donde si se requieren, ya que soportan las compresiones debidas a las reacciones de los apoyos directamente, mientras que los demás elementos se distribuyen las fuerzas de compresión o tensión y algunos de ellos de las dos formas, dependiendo de la posición de la carga.

Lo que forma el cordón inferior en las armaduras llamado aquí también como malla ó capa inferior, está formada por acero de alta resistencia (acero de refuerzo) que generalmente son varillas de 1½" de diámetro y varían de 2 varillas en los extremos (pudiéndose utilizar únicamente una, respetando el análisis, pero por montaje, como se verá más adelante, se utilizan dos para evitar el aplastamiento en la varilla, además de obtener un poco de mayor seguridad a un costo mínimo -el costo de una varilla de más, de 1½" de diámetro, en el tramo del puente donde sólo se requiere de una-) hasta llegar a 6 u 8 varillas (o más) en el centro, dependiendo del claro y las tensiones que se producen en esa sección de la estructura.

Estas varillas van de un apoyo a otro, aumentando su número en el centro y disminuyendo en sus extremos, como ya se explicó y van uniendo los extremos que forman las bases de las pirámides, soldándose éstas a la varilla por medio de una placa, en la parte superior de las placas llegan los perfiles que forman las aristas de las pirámides (dos en los extremos longitudinales y cuatro en los intermedios) y en la parte inferior las varillas que pasen en esa sección, formándose así los nudos de la malla inferior.

El cordón, malla o capa superior, está formada por elementos estructurales PER de mayor sección y calibre que los utilizados para formar las pirámides y por la losa de concreto armada, que sirve de superficie de rodamiento, esta losa varía de 10 a 30 cm. de espesor y a su vez sirve como elemento resistente de las compresiones que se crean en la parte superior.

Tanto los nudos de la capa superior e inferior se contravientean transversalmente por medio de varillas de 3/4" de diámetro que van de extremo a extremo de la estructura y soldada en cada nudo.

En realidad los elementos estructurales de la malla superior, se diseñan para que tomen las compresiones y tensiones en su caso, durante el transporte y montaje de la estructura, y contribuyen junto con la losa de concreto, a tomar las compresiones a que estará sujeta la capa superior durante su trabajo normal, además estos perfiles, sirven de apoyos intermedios, al armado de la losa de concreto, reduciéndose los claros y consiguiendo así menores peraltes de losa.

La estructura terminada, se apoyará en los estribos, pilas o caballetes intermedios, sobre unos apoyos formados por una placa de 1/2" de espesor, sobre ésta, una pieza de Neopreno que sirve como amortiguador, sigue otra placa de 1/2" de espesor sobre la cual se apoya la placa del extremo de la cuerda inferior que viene soldada por debajo de las 2 varillas que la forman, por ser pequeñas las tensiones en los extremos y se le sueldan 2 tramos más de varilla, una a cada lado de las varillas que forman el cordón inferior para tener una mayor sección de apoyo.

Así pues, la superestructura del puente la constituye una estructura metálica electrosoldada con elementos de concreto reforzado. Y según la clasificación descrita en el primer capítulo, es un reticulado de entrearmado (de vigas o mallas) de dos, tres o más capas, cuyos módulos son prismas tetraedros o semi-octaedros. En general la altura de las pirámides y el número de capas de la estructura, que le dan el peralte, son función del claro y tipo del puente (simplemente apoyado o continuo). El ancho depende del número de carriles proyectados y del tipo de carretera, aunque la estructura se construye con hileras de pirámides, cuyo ancho de base es generalmente de un metro y se unen tantas como lo requiere el ancho de calzada, y mediante la losa de concreto, se deja un volado a cada lado de aproximadamente 1.50 mt. de ancho y a todo lo largo del puente para alojar los parapetos y banquetas.

IV 2.- Procedimientos Constructivos.-

El sistema de estructura espacial, permite una gran variedad de alternativas durante el proceso constructivo, al cual lo podemos dividir en cuatro etapas:

- Fabricación de la estructura
- Transporte
- Montaje
- Terminación

La alternativa para la ejecución de obra se determina según las características de la obra como son: caminos de acceso, disponibilidad de materiales y mano de obra en la región, caudal de aguas, profundidad de la barranca en su caso, longitud de los tramos y ancho de la estructura, clima, etc., así, para las diferentes etapas tenemos:

Fabricación de la Estructura: La estructura metálica puede ser construída al pie de la obra ó en planta (taller) totalmente, y en ocasiones se hace mediante un proceso intermedio, es decir, fabricar parte en el taller y otra parte en el campo.

Son las condiciones de la obra las que determinan la fabricación de la estructura, en el caso de caminos rurales, donde no es posible transitar con camiones que transporten la estructura completa, se han transportado elementos pequeños y la fabricación se ha realizado en el lugar instalando talleres provisionales, otro caso en el que la fabricación se hace al pie de la obra, es en la construcción de grandes puentes en donde se conjugan algunas condiciones tales como, las facilidades que se tienen en el sitio, la magnitud y rapidez que se requiere para la construcción, así como la lejanía a talleres ya instalados, lo cual motiva a instalar en el lugar de la obra un taller.

En la mayor parte de las ocasiones, se opta por construir en taller y transportar la estructura seccionada, hasta el sitio de la obra en donde se procede a ensamblarla para después montarla.

El procedimiento de fabricación, está organizado de tal forma, que su producción en planta o taller, esté o no al pie de la obra, sea de tipo industrial.

Una vez diseñados todos los elementos de la superestructura y elaborados los planos de fabricación se sigue el siguiente procedimiento:

Primero: Los perfiles estructurales rectangulares (PER ó PTR) que se utilizan en las diagonales de la estructura, (aristas de una pirámide), se seleccionan según su sección y calibre, los cuales dependen de la posición que ocupará la pirámide que forma parte de la estructura y se cortan a su mayor dimensión a golpe (corte mecánico), a continuación, dependiendo de su posición como arista en la pirámide y la posición de la pirámide, se efectúan los cortes geométricos definidos en gabinete y marcados en los planos, en los extremos de los perfiles mediante un disco abrasivo operado con energía eléctrica para que se puedan acoplar a los demás elementos e ir formando la estructura.

Segundo: Dependiendo del peralte total de la estructura (distancia entre cuerda inferior y superior), el número de capas que la forman y la sección de los perfiles de las diagonales que forman las pirámides, estas diagonales tendrán una cierta inclinación y posición, misma que se les dará mediante un escantillón metálico, los cuales se fabrican para cada puente y se ajustan según la sección del perfil a utilizar y el peralte del puente, sobre el cual se colocan los perfiles que forman las pirámides y se sueldan entre sí, en su plano de convergencia, previamente pulidos sus extremos, con el fin de evitar una mala soldadura, y a la placa que constituirá el nodo o nudo intermedio o superior de un módulo.

Tercero: En bancos metálicos, se arma la cuerda inferior de la estructura, proceso que se puede realizar simultáneamente a los dos primeros pasos; sobre los bancos se tienden las varillas, una a una con el objeto de ir soldándolas a las placas que formarán los nudos inferiores, la cantidad de varillas varía a lo largo del tramo como ya se indicó y para conseguir la longitud del tramo se sueldan las varillas a tope, evitando que coincidan en esa misma sección uniones de otras varillas paralelas que integren esa o cualquier otra cuerda, las placas se colocan previamente debajo de la o las varillas, a la distancia que defina la dimensión de los módulos y conforme se van colocando varillas se van soldando a las placas, al terminar de colocar las varillas y de soldarlas a las placas, se sueldan entre sí mediante cordones longitudinales a espaciamientos definidos por la dimensión de los módulos. Mediante una grúa viajera o algún otro equipo o medio, según se fabrique la estructura en planta o en taller de obra, se giran las varillas que integran la cuerda inferior, para soldarlas en el otro plano y dejar las placas en posición de recibir los elementos diagonales del sistema de pirámides.

Cuarto: Sobre una plataforma de concreto, la cual tiene un cierto abombamiento al centro con el objeto de ayudar a dar la contraflecha a las cuerdas inferiores, calzándolas de manera que se produzca al centro del tramo una contraflecha del 1% de la longitud del tramo, se tienden las cuerdas inferiores alineándolas transversalmente, de modo que coincidan los ejes de las placas que forman los nudos inferiores y a su vez se separan longitudinalmente a la misma distancia que la dimensión de la base de la pirámide (módulo), y se les colocan elementos transversales, punteados a manera de atiesadores provisionales con el objeto de que no se desalineen los nudos longitudinal ni transversalmente.

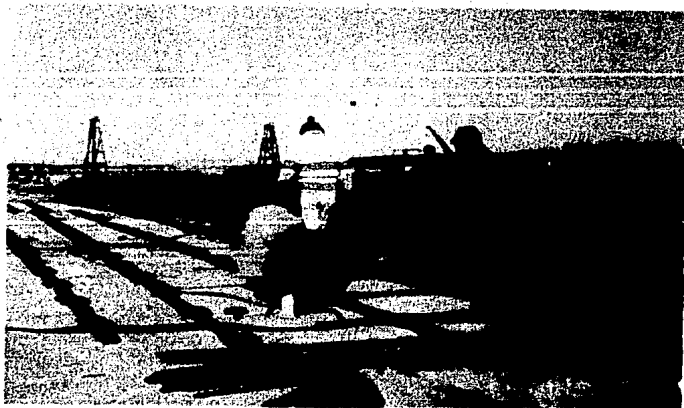
Se colocan las pirámides sobre las placas punteándolas provisionalmente; una vez colocadas todas (proceso que se hace manualmente debido al poco peso de las pirámides) se revisa que cada tipo de pirámide, formada por distintos perfiles esté en el lugar que le corresponde y que estén completamente alineadas tanto longitudinalmente como transversalmente, confirmado lo anterior, se sueldan cada uno de sus cuatro elementos a la placa del nudo inferior que le corresponde.



Fabricación de las pirámides "PIÑAS" con la ayuda de un escantillón metálico.

ETAPAS DE FABRICACION

Plataforma de concreto en donde se están uniendo las pirámides a los nudos de las cuerdas inferiores.



Como las diagonales de las pirámides concurren en su extremo superior en una placa, éstas formarán la segunda capa (de nudos) de la estructura y sobre éstas se sienta la segunda capa de pirámides, repitiéndose el proceso de punteado, alineamiento, revisión y soldado y sus placas a su vez forman una tercera capa. El proceso se repite hasta complementar el número de capas que indica el diseño; colocadas y soldadas las pirámides que con sus placas forman la última capa, se tienden los perfiles que forman la cuerda superior y se sueldan a dichas placas.

Se evita, en lo posible, efectuar soldaduras de cabeza girando la estructura con la grúa viajera o el equipo disponible.

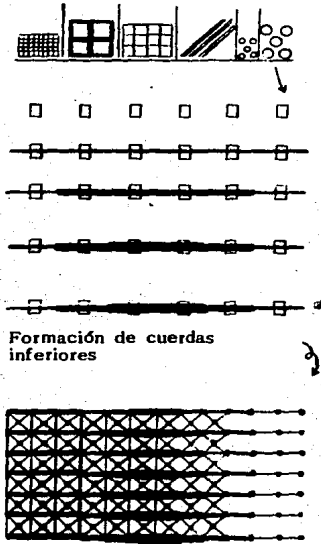
En algunos casos por motivos de transporte o montaje, la estructura no se suelda completamente y se deja preparada para hacer las soldaduras después del transporte o del montaje según sea el caso. En ocasiones se corta o secciona una vez terminada. Generalmente cuando es por motivos de transporte, la estructura se secciona tanto longitudinalmente como transversalmente y cuando es por montaje exclusivamente se corta longitudinalmente.

El cortar la estructura longitudinalmente no tiene ningún problema, ya que sólo se evita soldar o se desoldan las diagonales que llegan a los nudos en la sección del corte y en ocasiones se aísla una hilera completa de piñas para una mayor facilidad en el transporte.

En cambio en el corte transversal, implica cortar las cuerdas superiores e inferiores; para la conexión de las cuerdas superiores se hace mediante soldadura a tope de los elementos, logrando así la continuidad sin ningún problema, y para las cuerdas inferiores, no se efectúa mediante traslape de varillas, sino que al conjunto de varillas que forman la cuerda se les bisela, de modo que al colocarlas a tope forman una sección 'v', se les aplica un tratamiento térmico por ser varillas de alta resistencia y evitar modificaciones en las características del acero y se tienden cordones corridos soldando simultáneamente todas las varillas, además bajo la sección de corte se coloca una placa llamada de respaldo que recibe la soldadura; en realidad ésto es

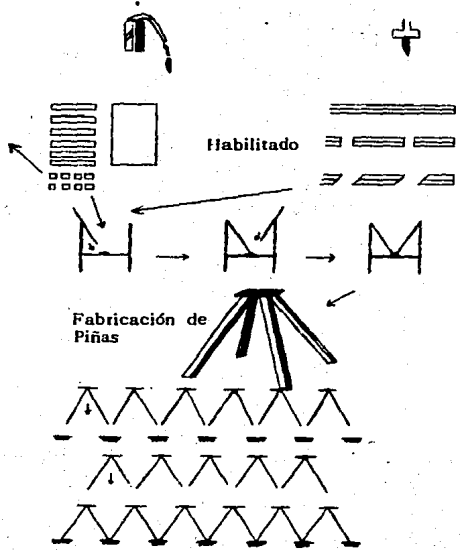
PROCESO DE FABRICACION DE LA ESTRUCTURA

Almacén y selección de material



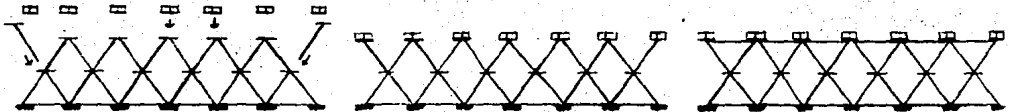
Formación de cuerdas inferiores

Cortes



Secuencia de colocación y soldado de piñas

Secuencia de soldado de cuerda superior y atiesadores



suficiente para darle continuidad a las varillas, sin embargo con el objeto de lograr una mayor seguridad, se suelda un tramo de varilla adicional sobre la sección del corte a cada lado del nudo, con una longitud tal que abarque de nudo a nudo.

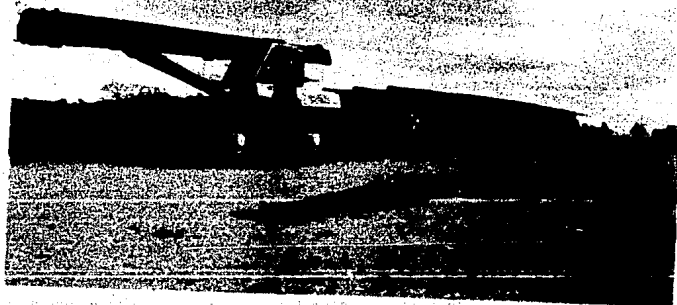
Quinto: Finalmente, se sueldan en la capa inferior y superior de la estructura, las varillas que refuerzan transversalmente a la estructura a manera de atiesadores para que no se abra la estructura y darle rigidez lateral, en la capa superior es de las pocas soldaduras que se realizan de cabeza. Por último se le da un baño de primer anticorrosivo, como una primera protección a toda la estructura o a veces se le da ahí mismo el tratamiento anticorrosivo completo como se describirá en la etapa de terminación. Esto depende de la distancia del taller al puente, facilidad de montaje, clima, tiempo de almacenamiento o premura en el programa de obra, etc.

De este modo, queda completamente terminada en cuanto a la etapa de fabricación se refiere, la estructura metálica que servirá de superestructura del puente y lista para ser montada o transportada según sea el caso.

Transporte: Para transportar la estructura metálica una vez fabricada, se utilizan ya sea trailers con plataforma o bien empleando un eje de dos ruedas y la quinta de un trailer, las cuales se colocan bajo tramos de 8m a 12m de largo y 3m de ancho de la estructura (según las características geométricas del camino) ésta se equipa debidamente con luces y frenos y se utiliza a ella misma como chasis de un remolque, jalándola con un camión que hace las veces de tractor de un trailer.

Montaje: El proceso de montaje, que se realiza una vez fabricada o transportada la estructura a la obra, tiene en términos generales dos opciones.

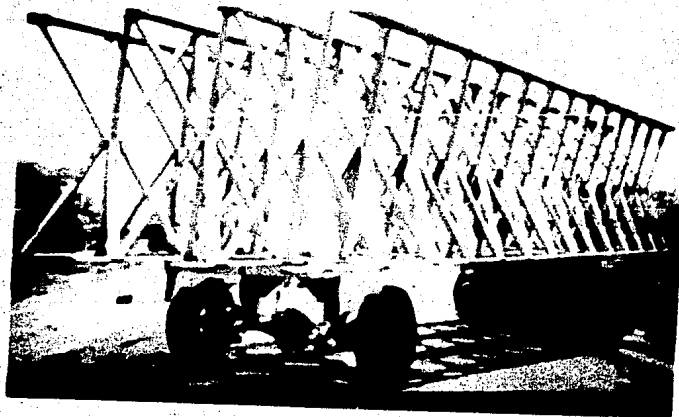
Para las dos opciones existen las alternativas de montar la estructura metálica a todo su ancho o en partes longitudinales y una vez colocada se conecta o ensambla con los tramos ya colocados en su lugar definitivo.



Remolcando a la estructura con una grúa.

T R A N S P O R T E

Mediante la utilización de un eje de dos ruedas, la quinta de un trailer y como chasis a la misma estructura.



La decisión en cuanto a las opciones de montaje y sus alternativas se fundamenta en los siguientes parámetros: ancho de los accesos, número de tramos consecutivos por montar, peso de los tramos, el programa general de obra, caudal de aguas y la profundidad de la barranca en su caso.

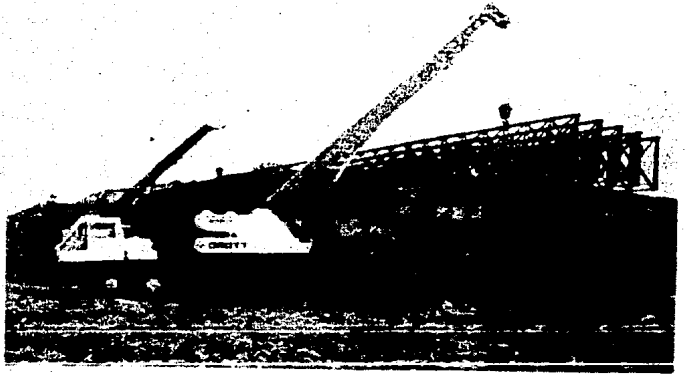
Así, sea cual sea la alternativa para montar la estructura (completa o seccionada) se tiene como primera opción, el montaje mediante el uso de grúas y mediante el procedimiento de "lanzado" como segunda opción.

El montaje con el uso de grúas, es como el de cualquier estructura, para estas estructuras mediante la coordinación de dos grúas se iza la estructura y se coloca sobre las pilas, caballetes o estribos según el caso, pudiéndose descansar la estructura por cualquier motivo que así lo requiera, sin ningún problema que dañe a la estructura. Este procedimiento es muy versátil y rápido debido a la gran variedad de grúas que existen, pero es poco empleado ya que generalmente las características topohidráulicas y orográficas de los puntos elegidos para el cruce del puente no permiten el acceso de las grúas o su movilidad, ya que esta maniobra se realiza desde el fondo de la barranca o del lecho del río cuando no son muy profundos y no desde sus extremos como en el procedimiento de "lanzado".

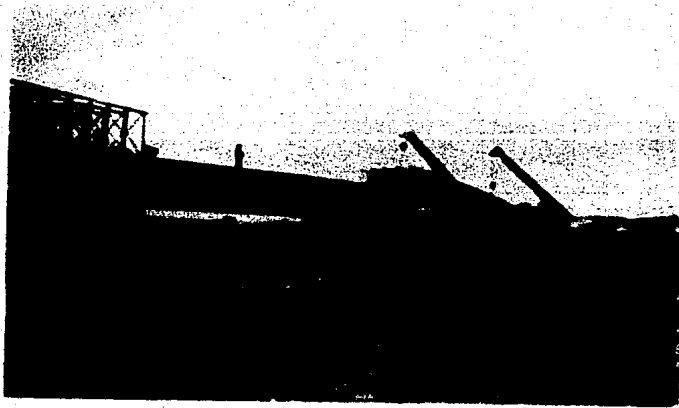
El procedimiento de "lanzado", toma su nombre por la forma en como se coloca la estructura sobre sus apoyos, ya que prácticamente se "lanza" de un apoyo al otro como se describe a continuación.

Al procedimiento se le puede dividir en dos etapas; una referente a los preparativos y la otra al proceso de montaje o "lanzamiento" de la estructura.

Es tan importante la etapa referente a los preparativos para el lanzado, que en la ejecución del montaje es la que consume el mayor tiempo dentro del programa de obra, desde un día hasta 15 días e incluso un mes, según condiciones de acceso, distancia entre extremos de barranca o río, el tipo de suelo por motivo de excavaciones y anclajes, etc.



MONTAJE CON EL USO DE GRUAS



Estos preparativos consisten en revisar y colocar todo el equipo necesario para el "lanzamiento", repitiéndose algunos movimientos para cada tramo por lanzar. El equipo que se emplea es pequeño, sencillo y de fácil operación, ya que el procedimiento es prácticamente manual.

El equipo fue diseñado como parte del sistema de la estructura para el montaje, puesto que en ocasiones equipos similares son muy sofisticados o de muy alto costo y consiste en: ejes con llantas, rodamientos (metal - mecánicos), cables de acero (cable "gufa"), desde grúas hasta malacates manuales (como Tirfor de 3 ton. de capacidad) las cuales se emplean según disponibilidad y costeabilidad, guías, poleas que una vez armadas y haciendo juego se le nombra polipasto y torres en celosía que hacen la función de "plumas".

En general la colocación del equipo, se puede hacer simultáneamente a un extremo y otro de los apoyos de la estructura e incluso durante la fabricación o transporte de la estructura, pero a manera de describir el proceso, éste empieza con la elaboración de "muertos" de concreto, es decir, bloques de concreto armado de poca resistencia ya que lo que se requiere es peso y no resistencia, de modo que algunas varillas salgan y sirvan de estacas, estos muertos varían de tamaño según el peso de la estructura y las condiciones del suelo (si es roca, terreno blando o duro, etc) y se elaboran a una distancia igual a la longitud del tramo a montar más 2 ó 3 metros más, a partir del apoyo extremo más cercano por donde se va a lanzar la estructura, esto se hace con el objeto de que el peso de la estructura no pueda "jalar" en dirección vertical y sacar a los "muertos" de anclaje, llamados así porque en ellos se anclará la estructura, mediante un polipasto, el cual lleva como parte de él un malacate manual (Tirfor) para empujar a la estructura durante el lanzamiento.

En el extremo contrario en donde se apoyará el tramo de estructura en lanzamiento, se levanta una pluma la cual se contraventea y se sujeta al terreno y apoyo correspondiente al tramo por montar, con una altura tal que permita levantar y montar en su apoyo a la estructura. A algunos de los cables que fijan a la pluma se les instala su sistema de polipasto para jalar a la estructura durante el lanzamiento.



Pluma colocada al extremo contrario al de lanzado, para levantar y montar la estructura en su apoyo.

ETAPA DE PREPARATIVOS E INICIO DE LANZADO

Extremo de lanzado donde se aprecia el tiorfor, parte del polipasto y el muerto de anclaje.



En el apoyo por donde se lanza a la estructura, se colocan los rodillos o rodamientos metal-mecánicos, que en el caso de los claros extremos se ponen en el diafragma del estribo, a una distancia entre sí, que quede repartido el ancho de la estructura en tres partes iguales y además centrados al eje de la cuerda que rodará por encima de ellos; cuando son tramos interiores, estos rodamientos se sueldan al extremo del tramo anterior montado.

Se tienden cables de acero de apoyo a apoyo del tramo a colocar, fijándolos en los muertos de anclaje, pila o el terreno, según el caso, separados a una distancia igual al ancho del tramo por montar, a estos cables se les denomina "cable gufa" y servirán como superficie de apoyo en el caso de que se tenga que suspender la maniobra para reemplazar cables, malacates, etc., o por cualquier otro motivo, estos cables se colocan cuando la barranca a librar es muy profunda y no permite descansar a la estructura directamente sobre el terreno; en algunas ocasiones también se utiliza como superficie de deslizamiento aligerando las fuerzas en los malacates y cables de anclaje, pero generalmente se colocan por seguridad.

Una vez terminados todos los preparativos, se procede al "lanzamiento" de la estructura.

El procedimiento comienza colocando un tramo del claro extremo del puente sobre el camino y siguiendo el eje del mismo, se va deslizando primero sobre ejes con llantas, hasta donde se encuentra el estribo.

Se monta el extremo del tramo sobre los rodamientos y es aquí donde son importantes las varillas adicionales que se ponen en los extremos de la cuerda inferior, ya que una sola varilla aunque por diseño sea necesaria no es suficiente por montaje, puesto que se aplastaría bajo el peso de la estructura. Se sujetan los cables a la estructura procedentes de la pluma del otro apoyo, los cuales tienen su sistema de polipasto, mientras que en el extremo contrario (es decir el de lanzamiento) se fijan los polipastos necesarios, según sea el peso y ancho de la estructura, al muerto de anclaje, de modo que el malacate (Tirfor) quede fijo, y saliendo de él, el juego de poleas que irá avanzando al ir soltando cable con el malacate; se calcula que

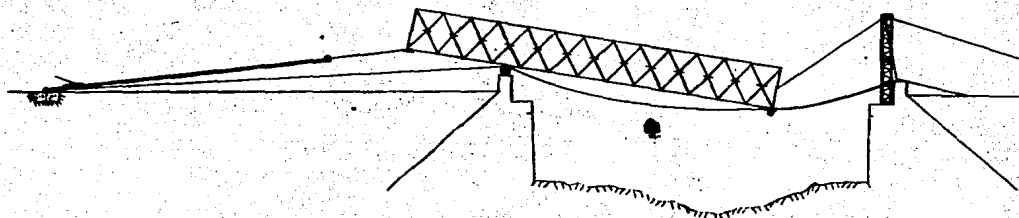
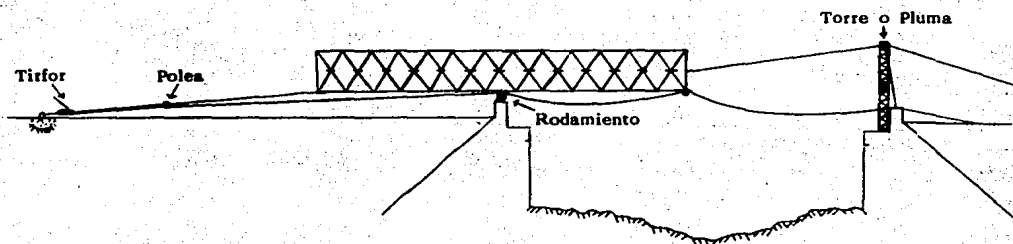
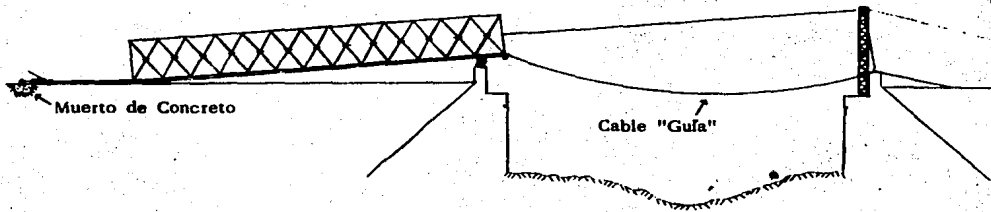
la longitud del cable que une la última polea del polipasto con la estructura sea tal que pueda bajar el extremo del tramo hasta su apoyo sin que la polea llegue al rodamiento, para evitar suspender la maniobra del montaje.

Ya sujeta la estructura por sus dos extremos al sistema de cables y polipastos, y engarzada mediante un pequeño sistema de yugo al cable guía, se procede al lanzado, el cual se logra soltando cable en el extremo de lanzado y recogiendo cable en el otro, es decir en un extremo se "empuja" y en el otro se "jala", este proceso es importante hacerlo alternadamente para evitar sobrecargar alguno de los cables extremos y reventarlos.

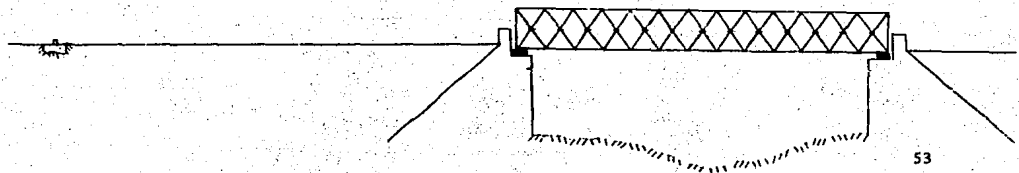
Se continúa con esta secuencia de empuje y jalado, hasta lograr que el tramo recorra todo el claro y llegue a su apoyo correspondiente posando la estructura en él, mientras que en el extremo de lanzamiento se baja a su apoyo. Como los cables están alineados de modo que el tramo montado quede ya en su posición definitiva, únicamente será necesario levantar mediante unos gatos, un extremo a la vez del tramo, para colocar los apoyos de neopreno. Esto se hace una vez unida la estructura cuando fué seccionada longitudinalmente para el montaje. Antes de colocar los apoyos se nivelan y perfilan perfectamente los cabezales de las pilas o coronas de los estribos, dejando así perfectamente nivelada y peraltada la estructura según proyecto.

Para los tramos siguientes o intermedios, se sigue el mismo procedimiento, solo cambiando parte del equipo durante la etapa de preparativos.

Con ésto queda terminada la etapa del lanzado, la cual por lo general se lleva de medio día a un día de trabajo por tramo, lo que permite ver su gran versatilidad para montar estructuras prefabricadas en plazos de emergencia; finalizado el montaje se procede a la terminación del puente.



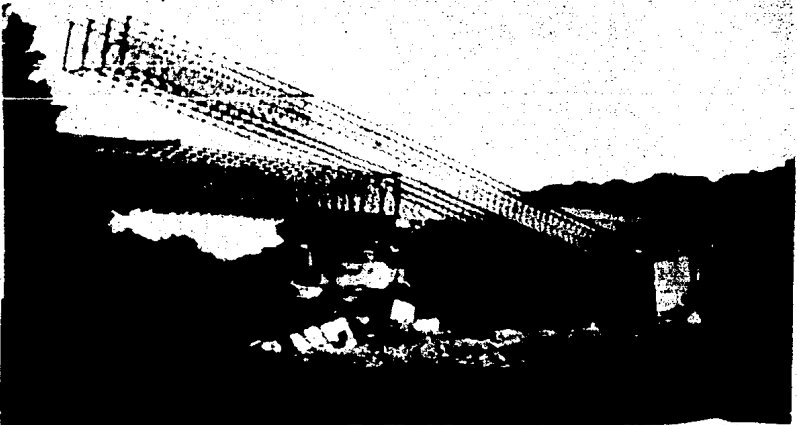
MONTAJE DE LA ESTRUCTURA ESPACIAL
"LANZADO"



SECUENCIA DEL LANZAMIENTO



Etapa Final



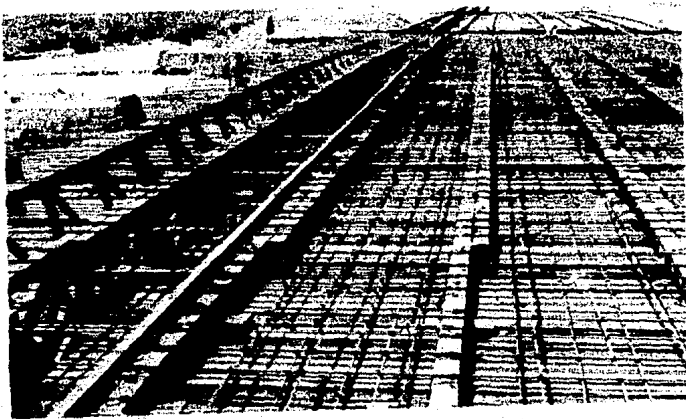
Puente Capirio

Terminación: Esta etapa se refiere al cimbrado y colado de la losa de concreto y la protección anticorrosiva de la estructura metálica.

Ya colocada la estructura en su lugar y debidamente soldadas las secciones de los tramos montados por separado, así como en el caso de puentes continuos se prolongan y traslapan los elementos de acero que forman los cordones superiores e inferiores soldándolos para lograr la continuidad de los tramos, se procede a realizar el cimbrado para colar posteriormente las losas de concreto.

El proceso de cimbrado es muy sencillo, ya que se puede trabajar por arriba de la estructura y por dentro, es decir, utilizando los corredores o pasillos que se forman entre las piñas.

La cimbra es un sistema diseñado especialmente para estas estructuras y consiste en moldes metálicos "charolas" ligeras, de sección canal debidamente moduladas y dobladas para que ensamblen unas con otras y se adapten a las diagonales, lográndose así un mínimo de detalles por tapar y para los cuales se usa madera. Estos moldes se soportan en la misma estructura colgándolos de las cuerdas superiores, dado que la superestructura regularmente se proyecta y construye como autoportable, es decir, no se requiere de obra falsa para apuntalar mientras se realiza el colado del concreto, aunque en condiciones particulares podría resultar más económica una obra falsa que el acero que se invierte en darle la característica de autoportable. Para el caso de los volados, que alojarán parapetos y banquetas, se utiliza como cimbra a las mismas charolas, ya que como se verá en el procedimiento de colado, éste no se realiza a un solo tiempo, sino por etapas, lo que permite recorrer las charolas a la zona de volados, en donde si se requiere un sistema de obra falsa el cual ha evolucionado desplazando el uso de la madera que lo hacía más costoso y lento y se ha diseñado de manera que se adapte a los elementos de la superestructura y sea fácilmente montable y desmontable. Este sistema consiste, como elemento aislado, en dos perfiles tubulares y una pequeña armadura, formando un marco en donde las columnas son los perfiles y la armadura el cabezal.



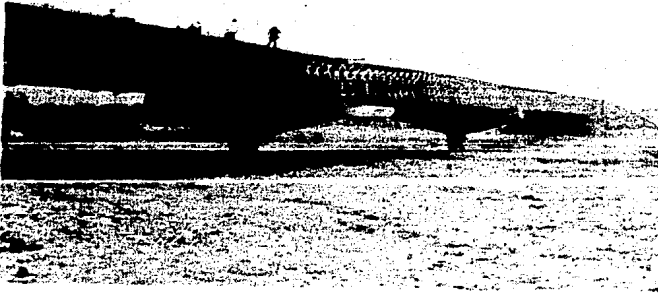
Moldes metálicos
"charolas" para
cimbra la losa
de concreto.

T E R M I N A C I O N

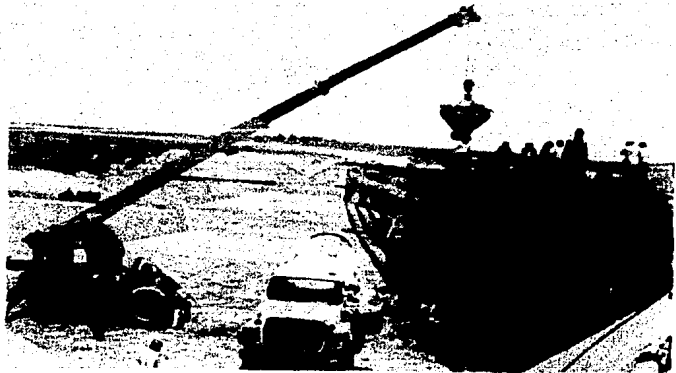
Marco diseñado como obra falsa para
soportar la cimbra de volados.



Vista general de un puente



Una de las formas de colar aprovechando el equipo disponible.



Las columnas tienen adaptadas en sus extremos, unos gatos que le permiten ajustar su longitud, y articulados a unas prensas que sirven de base en la cuerda inferior, con el objeto de poderlas inclinar y dar el peralte necesario para recibir las charolas, las cuales se apoyan en el cabezal del marco y en los perfiles de la cuerda superior, también el cabezal está articulado en sus extremos a las columnas mediante pernos, para una mayor facilidad de descimbrado y ajuste de las charolas.

Una vez cimbrado el tramo central de la estructura, se arma la losa de concreto, la cual consiste en dos mallas de varilla corrugada, de diferentes diámetros, según lo especifique el proyecto.

El procedimiento de colado tiene una gran importancia, ya que debido al peso de la cimbra, armado y concreto de la losa, la contraflecha se irá reduciendo produciendo esfuerzos en la cuerda superior, las cuales trabajan a toda su capacidad a la compresión incluyendo las soldaduras y placas de refuerzo, que conforme vaya fraguando el concreto y adquiriendo resistencia, contribuirá a resistir las compresiones relajando así los esfuerzos en los perfiles; para evitar que el peso del concreto fresco sea muy grande, aumentando los esfuerzos en la cuerda superior, así como evitar juntas frías, se sigue el siguiente procedimiento.

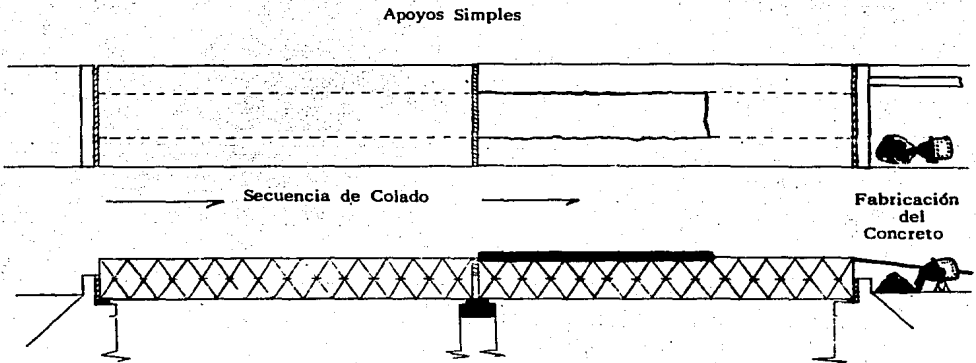
En el caso de puentes simplemente apoyados, para cualquier tramo del puente (extremos o intermedios), se comienza por colar una franja central, a todo lo largo del tramo, vaciando el concreto del punto más alejado al más cercano del lugar de fabricación del concreto, adquirida la resistencia suficiente para poder retirar las charolas, éstas se deslizan hacia los laterales y se cuelan los volados, dejando preparaciones previas para los parapetos y banquetas.

Para los puentes continuos (ya que también se les da contraflecha por tramos) una vez dada la continuidad a la estructura metálica, se cue-
lan las losas de concreto correspondientes a la zona de compresión de

la cuerda inferior, es decir en los apoyos intermedios. Para la superficie de rodamiento, el colado se comienza en los tramos extremos del puente y después los tramos intermedios, avanzando hasta llegar al tramo central. En cada tramo extremo el colado se lleva a cabo con la misma secuencia que los simplemente apoyados y en los intermedios también se cuela por franjas pero empezando del centro del tramo a sus extremos.

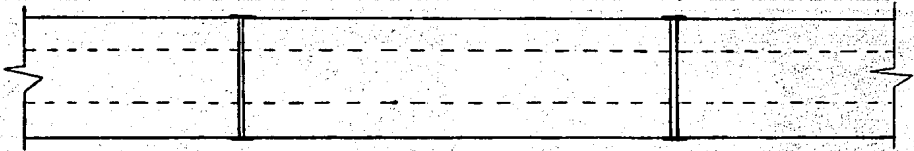
Terminada la losa, se procede a colar banquetetas y parapetos, en algunos casos se prefabrican los parapetos alcanzando producciones de 32 m. lineales de vigueta del parapeto en tramos de 2 m. y utilizando la misma madera de cimbra para colar hasta 150 m. Las pilastras también se pueden prefabricar.

SECUENCIA DE COLADO DE LA CAPA DE COMPRESION

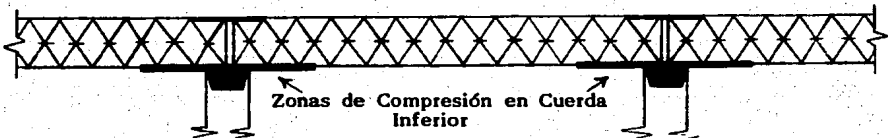


SECUENCIA DE COLADO DE LA CAPA DE COMPRESION

Apoyos Continuos

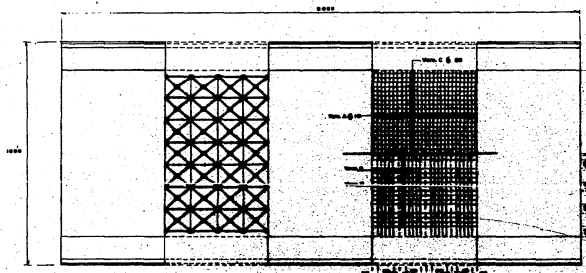


Secuencia de Colado Trámo Central

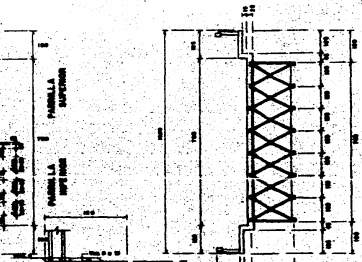


A la estructura metálica, se le da una protección anticorrosiva a través de pintura y limpieza previa. El procedimiento consiste en dar limpieza mecánica con cerdas ó esmeril para eliminar escoria y posible óxido, posteriormente se da una limpieza química con ácido fosfórico o ferroso y neutralizador, rebajados con agua al 9%, el cual se aplica con guantes y estopa dejándolo actuar por 7 horas, luego se neutraliza lavándolo con agua y se le seca con estopa, no se le deja secar a la interperie para evitar oxidación, se le da una capa de catalizador para una mejor adhesión de la pintura, que consiste en una capa de primetal rojo (primer) y 2 capas de pintura de hule clorado anticorrosivo.

De este modo terminan las cuatro etapas, en las que se dividió el procedimiento constructivo.



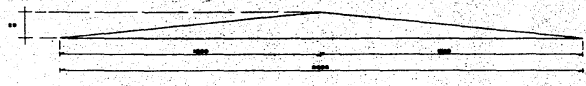
PLANTA



CORTE TRANSVERSAL



CORTE LONGITUDINAL

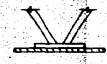


CONTRAFLECHA

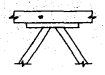
DETALLE DEL ARCADEO DE LA ENFRENTE



**VISTA LATERAL
DETALLE II**



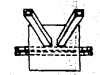
**VISTA LATERAL
DETALLE III**



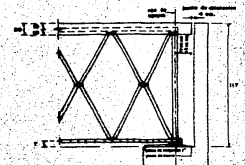
**VISTA LATERAL
DETALLE I**



**PLANTA
DETALLE II**



**PLANTA
DETALLE III**



LISTA DE MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR	VALOR TOTAL	NOTAS
A 7 30 300	100	KG	700	700	32
B 8 30 300	100	KG	700	700	32
C 9 30 300	100	KG	700	700	32
D 10 30 300	100	KG	700	700	32
E 11 30 300	100	KG	700	700	32
F 12 30 300	100	KG	700	700	32
G 13 30 300	100	KG	700	700	32
H 14 30 300	100	KG	700	700	32
I 15 30 300	100	KG	700	700	32
J 16 30 300	100	KG	700	700	32
K 17 30 300	100	KG	700	700	32
L 18 30 300	100	KG	700	700	32
M 19 30 300	100	KG	700	700	32
N 20 30 300	100	KG	700	700	32
O 21 30 300	100	KG	700	700	32
P 22 30 300	100	KG	700	700	32
Q 23 30 300	100	KG	700	700	32
R 24 30 300	100	KG	700	700	32
S 25 30 300	100	KG	700	700	32
T 26 30 300	100	KG	700	700	32
U 27 30 300	100	KG	700	700	32
V 28 30 300	100	KG	700	700	32
W 29 30 300	100	KG	700	700	32
X 30 30 300	100	KG	700	700	32
Y 31 30 300	100	KG	700	700	32
Z 32 30 300	100	KG	700	700	32

NOTAS GENERALES

- 1. LAS OBRAS DEBEN SER HECHAS...
- 2. EL MATERIAL DEBEN SER DE BUENA CALIDAD...
- 3. EL DISEÑO DEBEN VERSE EN EL DISEÑO...

FACULTAD DE INGENIERIA		U. N. A. M.	
PROYECTO: ARENAS			
PROYECTO TIPO	EST. C.S.O.	COSTAS CH. CUB.	
TECIS PROFESIONAL	ALFONSO MARRAS Y.		
PROYECTADO EN	CERCHERA	AGOSTO 1964	

IV 3.-Ejemplos de Puentes Realizados con Estas Estructuras.-

A lo largo y ancho de todo el país, se han construido más de 100 puentes de Superestructura Espacial, desde Sonora hasta Chiapas, en todo tipo de clima, topografía y caminos; desde caminos rurales hasta autopistas.

Dentro de las obras más importantes se tienen:

Puente "las Flores" en Chiapas, con una longitud total de 231 m. con 6 tramos de 36 m. y uno de 15 m. todos simplemente apoyados. El puente se localiza sobre la carretera Panamericana, en las proximidades de Cintalapa, Chis.

Este puente ocupa el lugar de otro que se colapsó en 1980, debido a que una avenida extraordinaria rebasó considerablemente su rasante. Tanto la subestructura, que hubo necesidad de elevar 8 m., como la superestructura, que se prolongó 72 m. de la longitud original, fueron construidas en 4 meses. Para su montaje se procedió a lanzar la estructura.

Puente "José Colomo" en Tabasco, este puente originalmente era de 4 tramos con un claro cada uno de 30 m. pero las necesidades de navegación, forzaron a eliminar una pila intermedia, quedando un tramo con claro de 60 m. el cual fué resuelto mediante un tramo libremente apoyado de estructura espacial sin necesidad de modificar la subestructura. Su montaje fué mediante el procedimiento de lanzado.

Puente "Capirio" este puente construido en Michoacán, originalmente tenía una superestructura a base de vigas de concreto pretensado, en las cuales se deterioró el acero de preesfuerzo por lo que hubo necesidad de dinamitarlo, conservando la subestructura y construir la superestructura del nuevo puente con 3 tramos continuos de estructura espacial, los 2 extremos de 37 m. y el central de 57 m. Su montaje fué mediante el procedimiento de lanzado.

Puente "Lacantún" es otro ejemplo de puente en forma continua, el cual fué lanzado sobre la carretera fronteriza del sur y consta de 3 claros de 60 m. y 2 de 45 m.

Puente "Yecapixtla" en Morelos sobre una barranca de más de 60 m. de profundidad con un claro de 35 m.

Puente "Sacramento" en Chihuahua, es un ejemplo montado con grúas sobre la carretera Chihuahua - Cd. Juárez el cual consta de tres tramos simplemente apoyados de 35 m. de claro cada uno.

Puentes "Aguaje" y "Morita" estos puentes ubicados en la carretera Chihuahua - Hermosillo en el estado de Sonora, Tienen la característica de estar esviados en sus apoyos y tener la superficie de rodamiento (losa de concreto) curva para seguir el trazo del camino. El primero consta de dos claros simplemente apoyados de 15 m. y el segundo dos tramos de 12 m.

Como se puede ver hay una gran variedad de puentes, siendo la mayoría rectos, simplemente apoyados y montados por el procedimiento de lanzado.

Su desarrollo surgió al demostrar su versatilidad al reconstruir puentes en plazos de emergencia y bajo cualquier condición climatológica, continuándose su aplicación ya como una nueva opción en la construcción de puentes.

V DESCRIPCION DE PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES PARA PUENTES.

V 1.- Introducción.-

Los puentes, definidos como un medio de sostén de tráfico sobre una obstrucción, siendo este tráfico peatonal o vehicular, medirán su éxito al satisfacer los objetivos básicos implícitos en su diseño, tales como: funcionalidad, suficiencia estructural (seguridad), economía y estética.

Siendo el puente un conjunto, formado por una infraestructura o cimentación, encargada de transmitir todas las cargas al terreno ayudándolo al mismo tiempo mediante zapatas pilotes o cilindros a soportarlas; una subestructura formada por estribos, pilas y caballetes, encargados de librar el espacio vertical para sostener la superestructura donde se alojará la superficie de transporte del tráfico y transmitirá sus cargas a la cimentación; y la superestructura, la cual libra y une el espacio horizontal y sostiene o conjuntamente forma la superficie para el paso del tráfico, deberán aisladamente y en conjunto satisfacer los objetivos antes señalados de la manera más eficientemente posible para lograr un puente de calidad óptima.

La decisión acerca de qué tipo de puente, así como de cada una de sus partes, que además influyen entre sí, dependen, además de los objetivos señalados anteriormente de aspectos geológicos, topográficos, climatológicos, zonas inundables, socavaciones, vientos, maniobras de tránsito, etc.

Para el caso que ocupa este capítulo, se describe el proceso constructivo de sistemas de superestructuras usuales en claros similares.

La selección del material y forma estructural para la superestructura principal, es un complejo problema y puede ser determinada solamente tomando en cuenta todos los factores que afectan el diseño de un puente en particular. La elección es función del claro. Pero está también influenciada por la calidad y costo de materiales, condiciones de cimentación, peso de la superficie de rodamiento y restricciones en el sitio de construcción.

A continuación se enlistan los tipos de superestructuras, material y rango de claros, más usuales en la construcción de puentes.

TIPO DE SUPERESTRUCTURA

CLARO

Concreto Reforzado:

losa plana maciza	hasta 10 m
losa plana aligerada	9 - 20 m
losa nervurada	15 - 30 m
vigas sección "T"	9 - 25 m
vigas sección cajón simplemente apoyadas	25 - 35 m
vigas sección cajón continuas	25 - 45 m
arcos	30 - 305 m

Concreto Preesforzado:

vigas simples sección "I", rectangular, "TIB"	15 - 30 m
vigas compuestas	25 - 45 m
vigas sección cajón simplemente apoyadas	30 - 50 m
vigas sección cajón continuas	30 - 60 m

Acero:

vigas simples perfil laminado	10 - 15 m
vigas de placa compuestas. Simplemente apoyadas	20 - 40 m
vigas de placa compuestas continuas	30 - 70 m
vigas de placa preesforzadas	30 - 45 m
sección cajón simplemente apoyada	30 - 50 m
sección cajón continua	40 - 80 m
armaduras planas simplemente apoyadas	45 -180 m
armaduras planas continuas	75 -240 m
armaduras planas en voladizo	150 -550 m
armaduras espaciales simplemente apoyadas	10 - 60 m
armaduras espaciales continuas	25 - 70 m
arcos	60 -520 m
atirantados	150 -400 m
colgantes	300 -1500m

En los puentes en que se utiliza la estructura espacial como superestructura, los claros utilizados varían en un rango que va desde 10 ó 12 m hasta 60 m, en la lista anterior se ve que es un rango cubierto por diferentes sistemas que se han utilizado frecuentemente, por lo que se les ha llamado tradicionales y a continuación se describen.

V 2.- Descripción de los Procedimientos Constructivos.-

Es importante mencionar que para cualquier tipo de superestructura, el procedimiento constructivo dependerá siempre de las condiciones físicas de la obra, así como de los efectos que el montaje, en su caso, tenga en la estructura por montar. Por lo que al describir algún procedimiento en particular, no hay que perder de vista la gama de alternativas que se pueden presentar durante su construcción.

Superestructuras de Concreto Reforzado: Los puentes en los que se ha utilizado el concreto reforzado como material de construcción, pueden estar resueltos por varios sistemas estructurales como son:

- losas: planas macizas
planas aligeradas
nervuradas (2, 3 ó 4 nervaduras)

- vigas: de sección "T", "bulbo" o trapezoidal
de sección cajón simplemente apoyadas
de sección cajón continuas

- arcos

Los puentes son quizás las estructuras representativas, en la que el diseño final no es el óptimo desde el punto de vista estructural en condiciones de servicio, ya que durante el proceso constructivo se generan una serie de condiciones que hacen modificar su diseño óptimo, al grado que en ocasiones es necesario cambiar la sección o material elegidos originalmente con objeto de obtener claros económicos; e incluso una vez terminado el puente, alcanza una estabilidad tal, que supera los factores de seguridad normales.

Así, vemos que al seleccionar cualquier tipo de losa, siempre y cuando la nervurada no sea de más de dos nervaduras, con objeto de reducir la carga muerta, estarán simplemente apoyadas en sus extremos salvando claros de 10 a 20 m. resultando más económicas que los preesforzados. Cuando hay necesidad de salvar claros mayores, en los que el uso de 2 nervaduras obligan a - que éstas, tengan un gran peralte, dando lugar a rasantes no aceptables; así como en el caso de grandes anchos de calzada, en los que el efecto de torsión limita el empleo de 2 nervaduras, se pueden emplear más nervaduras - (3 ó 4), o vigas de sección 'T', "bulbo" (con el patín ensanchado y el alma esbelta), sección trapezoidal (con el lado menor en el lechó inferior del patín) y secciones tipo cajón, con apoyos simples o continuos, obteniendo claros que varían entre 30 y 60 m., según la sección y tipo de apoyo, haciéndolas - competitivas con las estructuras de concreto preesforzado.

También la sección estructural más eficiente, puede ser reemplazada por otra, que constructivamente sea mejor, como el caso de la sección "bulbo" que es reemplazada por la trapezoidal por la facilidad de cimbrado y descimbrado que ofrece, a un tiempo y costo menores.

La utilización del arco en la construcción de puentes de concreto, es consecuencia de su comportamiento estructural, ya que se utilizan de un modo pleno las aptitudes propias del concreto y el acero, al tener una forma y soporte tal que las cargas transversales intermedias son transmitidas a los apoyos principalmente por fuerzas axiales de compresión en el arco. Hay algunas variantes de arcos, arcos empotrados, articulados, atirantados, colgados, etc. con los que se logra salvar claros mayores a los 30 m. de manera económica.

Las condiciones que pueden llevar a su utilización son el reducir momentos flexionantes comparados con una estructura equivalente recta simplemente apoyada o armadura, o también y quizás sea una de las razones principales, es cuando el puente librará un valle con la barranca muy profunda y los apoyos de la estructura (en este caso el arco) se localiza en las rocas del talúd del valle.

Cualquiera que sea el sistema elegido como superestructura del puente, cuando se utilice al concreto reforzado como material de construcción, podemos dividir su proceso constructivo en tres etapas que son: el cimbrado o construcción de la obra falsa (andamiajes) que sostendrá a toda la estructura hasta que ésta sea autosoportable; el habilitado y armado del acero de refuerzo y por último la elaboración y colocación (colado) del concreto.

Obra Falsa.

Las condiciones constructivas de esta etapa, ya sea sobre cauces temporalmente secos, en época de estiaje, cauces de agua permanente o épocas de lluvia, sobre barrancas profundas, etc. son las que revisten mayor importancia, al grado de determinar en un momento dado el tipo de estructura a emplear e incluso cambiar el material de construcción por concreto preesforzado o acero con tal de evitar esta etapa o reducirla al máximo.

Su construcción se integra por dos estructuras fundamentales, la cimbra de contacto y la obra falsa. La cimbra de contacto estará en contacto con el concreto, al cual lo va a contener y configurar según el diseño elegido y su ejecución no tiene mayor problema que lo caprichoso de las formas. La obra falsa está constituida por elementos que trabajan estructuralmente soportando a la cimbra de contacto y a toda la superestructura durante la construcción y es el proceso más importante.

La construcción de éstas, tienen una gran variedad y su aplicación está en función de las condiciones particulares de cada caso, tanto del lugar de la obra como del tipo de la estructura.

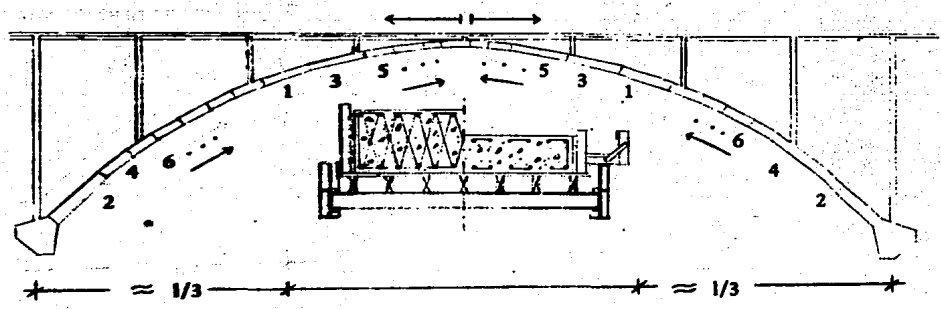
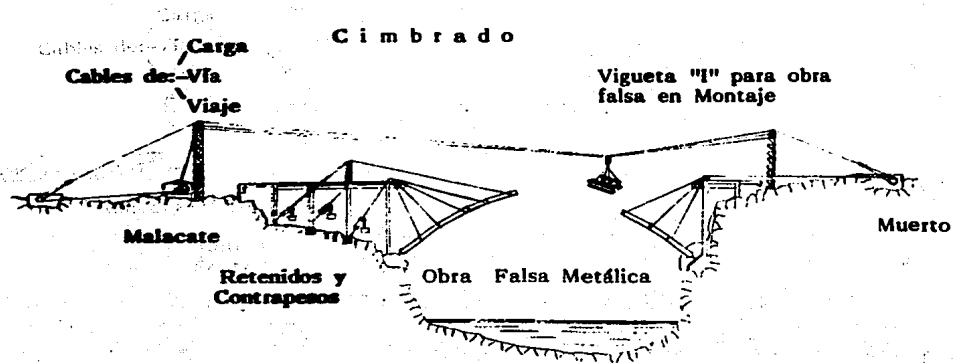
Para sistemas planos (losas y/o vigas) con el lecho del río o barranca utilizable como apoyo, se pueden utilizar: andamios tubulares o de madera, o caballetes de madera o metálicos.

Los caballetes se emplean con el fin de construir una superficie de apoyo que no sea el terreno natural, reduciendo la altura del andamiaje requerido, lo cual se logra contraventeando los caballetes entre sí y colocando viguetas de acero o madera entre ellos para formar la nueva superficie de apoyo. A partir de esta superficie se construye la obra falsa como si estuviera desde el lecho, en madera o acero según se amortice su uso; su construcción es de forma tradicional a base de vigas mdrinas, pies derechos y contravientos, durante su construcción se debe tener en cuenta la contraflecha de proyecto y los posibles asentamientos del terreno.

Cuando la superestructura se construye en cauces de aguas permanentes o en épocas de lluvias, donde no es posible utilizar el lecho del río o barranca como apoyo, es usual emplear armaduras, las cuales se montan con el fin de servir como superficie de apoyo para la obra falsa o como misma obra falsa, para su montaje se procede a lanzarla con un cable vía o izándolas desde el lecho del río de un chalán, mediante malacates y plumas, que dependiendo del claro y peso por soportar, se apoyan sobre cables tipo vía o hasta los apoyos.

En el caso de los arcos, el procedimiento dependerá del tipo de arco, así un tipo de montaje será usando obra falsa constituida por dos viguetas, separadas mediante piezas de puente de sección 'I', las cuales se montan formando un arco metálico con el auxilio de un cable vía anclado a 2 torres fijas distantes entre sí y ancladas a muertos de concreto, cada tramo de viguetas colocado se sostiene mediante cables hasta cerrar el arco metálico; sobre éste se instalan para el colado del arco, viguetas de madera dándoles la curvatura interior del arco y colocando las duelas de cimbra de contacto, hay que observar lo complejo de esta operación, lo que puede significar un alto incremento del costo total de la estructura.

ARCOS DE CONCRETO



Los números indican secuencia del colado

Habilitado y Armado.

Esta etapa, que consiste en cortar y armar el acero de refuerzo de la estructura, no tiene ningún problema en particular, siendo algunas de sus alternativas, el habilitar y armar el acero sobre la obra falsa de la estructura o fuera de la estructura y después montar secciones completas del armado, lo que incluso a veces se hace aún antes de construir la obra falsa.

Elaboración y Colocación del Concreto.

A esta etapa que comúnmente se le conoce como "colado", la parte que se refiere a la elaboración, dependerá de los medios que se tengan en la obra, así como del volumen de concreto por fabricar, pudiéndose hacer ésto desde con revolvedoras pequeñas hasta con plantas premezcladoras instaladas en el lugar.

En cambio la colocación, llega a tener una gran importancia en su procedimiento para algunos tipos de sistemas estructurales. En general la colocación del concreto se hace desde con carretillas y botes hasta usando bombas para concreto, vaciándolo desde el punto más alejado hasta el más cercano del sitio de su fabricación. Sin embargo, sistemas estructurales, como en el caso de los arcos, requieren de un proceso de colado cuidadoso. En términos generales el colado de un arco se hace vaciando el concreto por tramos llamados dovelas, se inicia con el colado simultáneo de las dovelas que se encuentran en posición simétrica respecto al eje del centro del claro a una distancia horizontal respecto a sus apoyos poco menor a $\frac{1}{3}$ parte del claro (siendo un punto de inflexión según el sistema de cargas) utilizando un bote transportado por el cable vía, el colar estas dovelas produce una deformación en la obra falsa (arco metálico) que en parte se contrarresta con el colado de las dovelas inmediatas a los arranques o apoyos y que son de mayor volumen, se continuarán colando las dovelas en forma alternada, una dovela adyacente a la primera colada, con una adyacente a las inmediatas de los arranques, hasta llegar a la dovela que ocupa la clave o corona del arco, la cual no se cuela hasta no introducir esfuerzos en el arco, mediante la aplicación de una fuerza de gateado en la clave, con el fin de liberar al arco de las deformaciones por peso propio y haciéndolo trabajar

desde su construcción a sus esfuerzos finales de servicio, ésto ayudará también a desaprisionar la obra falsa por el peso del arco, permitiéndole descimbrar con facilidad a la estructura. Simultáneamente se van colando las pilas que sustentan la superficie plana o cubierta de rodamiento, la cual se cuelga del centro a los extremos.

Se ha mencionado que el uso de concreto reforzado algunas veces se ha limitado por el uso de la obra falsa, siendo algunos factores de estas limitaciones, el resultado antieconómico de su empleo, por el elevado costo de los materiales que la componen, el gran tiempo que requiere el cimbrado y descimbrado, el cual se ha reducido considerablemente con otros procesos constructivos; así como la imposibilidad de construir obras falsas sobre cauces muy grandes o en viaductos donde se obstaculiza el tránsito.

Superestructuras de Concreto Preesforzado.

En puentes en los que los claros a salvar son tan grandes, que el utilizar concreto reforzado implica estructuras demasiado robustas debido al incremento en peso propio haciéndolas antieconómicas; así como cuando los puentes han de ser construídos sobre cauces de ríos caudalosos, barrancas profundas o cauces artificiales, como viaductos viales o urbanos, en donde la construcción de la obra falsa necesaria no es posible debido a la fuerza de los ríos, la gran cantidad de material que repercute en altos costos y la imposibilidad de perturbar el tráfico, surge el concreto preesforzado como alternativa para librar tales obstáculos.

Una estructura de concreto preesforzado, se le puede definir como aquella, a la que mediante el artificio del preesforzado, -el cual consiste en tensar el acero de refuerzo- se le han provocado esfuerzos internos con anterioridad a la aplicación de cargas exteriores, o simultáneamente a éstas, en tal magnitud y distribución, que combinados con los esfuerzos resultantes de las cargas externas, sean contrarrestados a esfuerzos comprendidos dentro de los límites deseados.

Con este artificio se logra que toda la sección esté sujeta únicamente a esfuerzos de compresión permanentes, aprovechándose íntegramente y evitando el agrietamiento de modo que permite reducir la geometría de las secciones y la posibilidad de prefabricar estructuras de concreto, salvando así los obstáculos antes mencionados para el concreto reforzado.

El preesfuerzo del concreto se puede conseguir de dos modos: **-Postensado.-** Se realiza después de endurecido el concreto y establece la solidaridad del acero y concreto, mediante anclajes de extremidad, completada en la mayoría de los casos por inyección de los conductos en los que se introduce y aloja el acero para el preesfuerzo, previamente instalados. Este procedimiento es posible realizarlo en cualquier sistema constructivo. **-Pretensado.-** Aquí el tensado del acero se hace previamente a la fabricación y endurecimiento del concreto; la solidaridad o transferencia de los esfuerzos de tensado se transmite del acero al concreto, de un modo directo por adherencia, sin necesidad de conductos. Este procedimiento siempre se realiza simultáneamente a la prefabricación de la estructura, lo cual no implica la imposibilidad de realizar el pretensado 'in situ', pero exige cimbras capaces de resistir provisionalmente los esfuerzos del pretensado, lo cual es totalmente antieconómico.

El preesfuerzo se calcula para el diseño de cualquier tipo de estructura, que puede ser de sección rectangular, I, T, doble T (TT) o T invertida, secciones cajón, etc., simplemente apoyadas o continuas, en las que se debe tomar en cuenta las pérdidas de preesfuerzo ocasionadas por la deformación instantánea y/o diferida del concreto, contracción del concreto, relajación del acero, fricción y corrimiento de los anclajes, por lo cual es también importante considerar los sistemas de preesforzado, cuyos principios básicos son los mismos y solo difieren en el método de aplicar el preesfuerzo y los detalles de anclaje de los extremos y que toman su nombre según el inventor, teniendo así sistemas como Freyssinet, Dywiday, etc.

Los puentes de concreto preesforzado se pueden realizar según: procedimientos tradicionales, por prefabricación o por construcción en voladizos.

Procedimientos Tradicionales.

Al construir puentes de concreto en los que se usa el preesfuerzo con objeto de reducir la sección de la estructura, pero que el cauce o barranca, nos permite utilizar obra falsa, su proceso constructivo tendrá las mismas etapas que el procedimiento para la construcción de puentes de concreto reforzado antes descrito, por lo que se le ha denominado tradicional, con una etapa adicional para el preesfuerzo, que en este caso será postensado. Además de supervisar con especial cuidado las exigencias que deberán cumplir cada una de las etapas y en particular la del colado del concreto, así como las características de éste para lograr el preesfuerzo adecuado.

Una opción en el cimbrado es el utilizar traveses de acero como obra falsa, las cuales se lanzan desde los accesos hasta que apoyen en las dos pilas del claro a colar y sirven como cimbras laterales para colar las traveses de concreto, las cuales una vez fraguadas y tensadas, permiten retirar y lanzar de nuevo las traveses de acero. El lanzamiento de las traveses es todo un procedimiento de montaje.

La etapa del postensado, se realiza cuando el concreto ha superado el 80% de su resistencia y se realiza siguiendo un programa de tensado completo, que indica el orden no sólo en las unidades de un mismo elemento, sino en las distintas vigas que forman el tablero. Conviene empezar por el tensado transversal operando siempre en simetría y desde el centro a los extremos y después en las vigas longitudinales, tomando cada dos simétricas. Según la trayectoria de los cables, que obedecen a los diagramas de esfuerzos, cuando son rectos o con poca curvatura se puede tensar de un solo extremo, en cambio en unidades curvas, hay que tensar desde los dos extremos. En las vigas longitudinales conviene hacer un retensado inmediato de los primeros cables tensados.

Para el procedimiento del tensado, una vez calculados los esfuerzos necesarios de preesfuerzo y en función de la curva esfuerzo-deformación del acero por emplear, se calculan las elongaciones a lograr en el acero de preesfuerzo y mediante gatos se tensa el cable, inicialmente se tensa de un - - 10% a un 20% del total para dejar marcas de referencia y poder medir los alargamientos y se va aumentando la tensión al doble de la inicial midiendo la elongación y así sucesivamente se aumenta con incrementos la tensión, hasta llegar a la prevista para lograr los esfuerzos calculados.

Es importante antes de realizar el tensado comprobar que el cable corra libremente dentro del ducto, con objeto de asegurar la distribución del tensado a todo lo largo del cable.

Terminado el tensado, se realiza el anclaje en los extremos.

El descimbrado se efectúa al entrar en acción el tensado, por lo que no debe hacerse el tensado completo de cada una de las vigas, sino por etapas del 25% en todas ellas.

La última operación al tensado, es la inyección de los conductos, con el fin de preservar el acero de la oxidación y enlazarlo con adherencia al concreto que rodea a los conductos con un mortero fluido.

Procedimiento de Prefabricación.

En este proceso constructivo distinguimos tres etapas: fabricación, transporte y montaje, en las que existe variedad de métodos para su realización.

Fabricación: Para esta etapa encontramos dos tipos de talleres, los permanentes, que desarrollan un proceso de fabricación industrial y los ocasionales, que se instalan provisionalmente para construir un puente determinado y con menos frecuencia, un grupo de puentes próximos y con características semejantes. También un tipo intermedio de talleres, denominados ambulantes, que se trasladan de un lugar a otro para ejecutar puentes que pueden ser muy diferentes. Por lo regular las estructuras postensadas se fabrican en el

sitio, o a inmediaciones de la obra en talleres ocasionales o ambulantes, en cambio las pretensadas son fabricadas en talleres permanentes en donde su producción, altamente mecanizada, permite fabricar un mayor número que si se construyeran en la obra, al grado que compensan los costos de su transporte.

Dichos talleres, dependiendo del tipo, importancia y tamaño de la estructura, tienen naves cubiertas que alojan mesas de pretensado y colado, así como grúas viajeras para el colado y movimiento de las piezas. Cuando la estructura es pretensada, los cables se anclan temporalmente en los extremos de las mesas de colado, armándose tanto el refuerzo longitudinal como el transversal, donde una vez vertido el concreto y alcanzado el 85% de su resistencia a la rotura, se suelta el anclaje de los cables produciéndose el preesfuerzo. Cuando son postensadas, se pone especial atención a la colocación de los ductos que alojarán los cables de preesfuerzo antes de vaciar el concreto. Para lograr una producción más rápida se procede a curar el concreto a vapor.

En la fabricación existe la opción de colar las piezas por tramos completos o por unidades longitudinales y transversales combinando el pretensado y postensado tanto longitudinal como transversal en la fabricación y montaje, logrando así estructuras monolíticas finalmente, condiciones que se deciden según tipo de puente y condiciones para el montaje.

Transporte: Para el transporte se puede utilizar la carretera, ferrocarril y el transporte fluvial o marítimo, siendo el más común el transporte por carretera por medio de trailers de plataforma o utilizadas como chasis apoyadas sobre ejes traseros y en la quinta rueda del trailer.

Montaje: En cuanto al montaje de estructuras precoladas, no es posible hablar de un procedimiento único, son varias las posibilidades a seguir, tanto en montar separada la estructura, en secciones transversales y/o longitudinales o montarla completa, algunas de estas posibilidades son las siguientes:

1.- Mediante dos grúas que se mueven en el fondo del cauce o de la vía inferior en viaductos a desnivel o desde la plataforma ya construida de los tramos inmediatos o desde los estribos. En elementos cortos puede utilizarse una sola grúa.

2.- Para traveses completos, se puede utilizar un sistema formado por pórticos ergidos cerca o en los apoyos y armaduras montadas sobre los pórticos, de modo que su cuerda inferior coincida con el nivel de apoyo de las traveses. Los pórticos servirán para mover vertical y transversalmente -- así como colocar sobre la armadura, la trabe por montar, mediante una -- grúa viajera instalada en el cabezal del pórtico, a su vez las armaduras tendrán un sistema de vías y trucks de cuatro ruedas, equipados con gatos para que la trabe deslice sobre la armadura bajo la acción de gatos o malacates de mano tipo Tirford hasta su sitio de proyecto, en donde será necesario bajar la trabe a su posición definitiva mediante el uso de caballetes y gatos. Una variante de este sistema es deslizar la trabe por debajo de la armadura, colocando a ésta más alta para poder hacer descender a la trabe a su posición. A este sistema se le conoce como lanzamiento longitudinal.

3.- Sistema de empuje o incrementos sucesivos, el cual se emplea para estructuras de cuerpos seccionados, precolados y pretensados que sientan en apoyos comunes. Estos cuerpos independientes se fabrican por partes mediante cimbras mecanizadas, en uno de los accesos del puente, una vez coladas y pretensadas, se inicia su lanzamiento mediante gatos de doble acción, vertical para levantar la estructura y horizontal para empujarla, de modo que la primera dovela fabricada quedará en la posición más alejada del punto de fabricación, una vez colocados tramos adyacentes se traslapa el refuerzo y mediante postensado se preesfuerzan logrando así la continuidad de la estructura. Este procedimiento es conveniente para claros entre 30 y 50 m.

4.- Se puede lanzar la estructura longitudinalmente, con la ayuda de torres, por las que pasan cables que soportan la trabe a montar en uno de sus extremos, mientras que el otro avanza deslizando o rodando sobre vía instalada en la zona construida.

5.- Elevando lateralmente a la trabe junto a las pilas, para lo cual es necesario llevarla al claro correspondiente por flotación o por descenso mediante vía en plano inclinado adaptado a la ladera.

Estas, son algunas de las posibilidades que se presentan en el montaje de estructuras preesforzadas, procediendo después a la etapa de acabados.

Acabados: Una vez montadas las trabes que forman la superestructura del puente, se realiza el colado de la losa superior, utilizándose distintos tipos de cimbras en función de la separación entre trabes, su tipo de sección o apariencia inferior de la superestructura. Así, se podrá usar cimbra convencional apoyada sobre el peralte de las propias trabes, armando la losa sobre la cimbra y anclando las varillas a ganchos previamente ahogados en las trabes, o mediante cimbra de elementos precolados, la cual queda ahogada sirviendo como elemento de liga y lográndose así estructuras monolíticas.

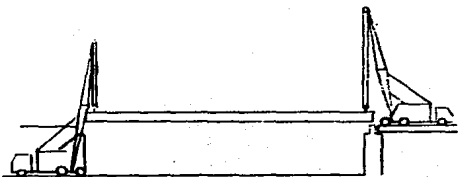
También en el caso de las estructuras prefabricadas postensadas o en las pretensadas montadas por secciones, se realiza el postensado necesario para lograr su continuidad.

Procedimiento de Construcción en Voladizos Sucesivos.

Procedimiento también conocido como cantiliver o en doble voladizo cuando el avance es simultáneo en ambos lados de una misma pila y se utiliza en puentes con claros entre 50 y 120 m. Los puentes construidos con este sistema pueden ser bajo el sistema tradicional colando en sitio o en segmentos precolados (prefabricación) convirtiéndose entonces en un método de montaje.

El procedimiento consiste en avanzar con la cimbra colgada de un carrilón que va quedando en voladizo, sustentándola sobre la parte construida dos secciones atrás, ya sea por contrapeso que compensa el vuelco, o bien mediante anclaje vertical. Cuando se utilizan dovelas prefabricadas, se van añadiendo sucesivamente uniéndolas a la parte ya ejecutada mediante las unidades

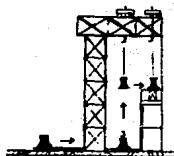
PROCEDIMIENTOS DE MONTAJE DE TRABES PREFABRICADAS DE CONCRETO



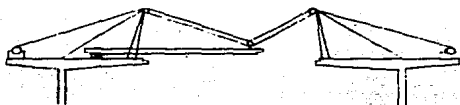
Mediante Grúas



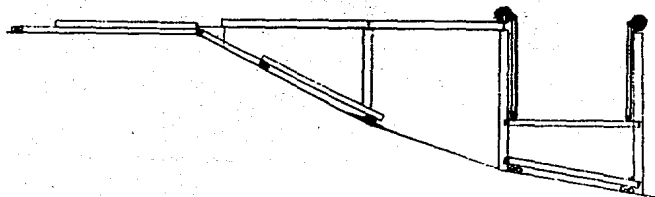
Mediante Armaduras y Pórticos
"Lanzamiento Longitudinal"



Sistema de Empuje o Incrementos
Sucesivos



Lanzamiento Longitudinal con
Torres y Cables.



Por Elevación Lateral

de preesfuerzo. Es muy común, para evitar errores de acoplamiento, que al prefabricar, se haga dentro de una cimbra general que reproduzca la forma definitiva, dejando los planos de separación sucesivos.

Cuando se realiza bajo el sistema tradicional, el cimbrado tiene algunas variantes, como es el llevar la cimbra mediante torres metálicas que se mueven a lo largo de una pasarela provisional, lo cual implica el perder la independencia del río o tráfico inferior, también se traslada la cimbra en torres que avanzan sobre vía dispuesta a través del cauce.

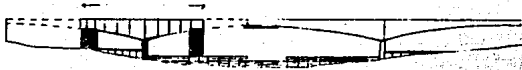
Cuando son dovelas prefabricadas, los sistemas de montaje serán según el tipo de superestructura, así para un solo claro y con tramos compensados, se avanza desde los extremos utilizando los tramos compensados como contrapesos naturales, uniendo al centro mediante el preesfuerzo. En caso de secciones tipo T y con mayor número de claros, se construye por avance simétrico, una vez que se han colado 'in situ' los arranques necesarios para poder montar los carretones. En claros continuos, en donde no es posible ejecutar sobre andamio normal claros extremos que sirvan de contrapeso al voladizo, se avanza por ambos lados desde las pilas centrales para conservar el equilibrio en las pilas, siendo éste el método de doble voladizo.

Es posible avanzar de un apoyo al opuesto, soportando las dovelas mediante cables que se anclan en el claro inmediato ya construido y pasen por una torre auxiliar provisional colocada sobre la pila. En general las dovelas inmediatas a las pilas "arranques" son coladas 'in situ' para poder montar los carros móviles que permitirán colar o colocar las dovelas siguientes.

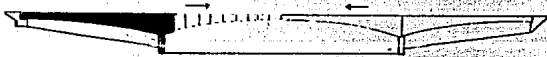
Para el preesfuerzo, se proyectan cables de tal manera que en cada dovela colada o colocada, terminen algunos de los cables, de modo que cuando éstos se tensan, las dovelas quedan unidas con las precedentes dando así la capacidad suficiente de autoapoyarse y soportar a la siguiente.

Este proceso se hace durante la construcción, introduciendo los cables en sus ductos a medida que se tensan, hasta terminar con la última dovela y logrando así el preesfuerzo total de toda la estructura.

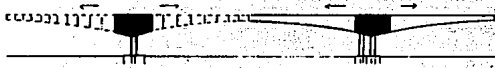
PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCION EN VOLADIZOS SUCESIVOS



Sistema tradicional colando
"In Situ" sobre torres.



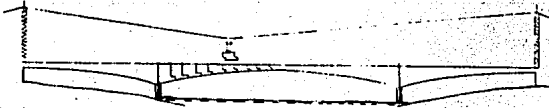
Dovelas prefabricadas aprove-
chando los tramos compensados
como contrapesos.



Avance simétrico a partir de
los arranques.



Avance en un sentido con ayuda
de cables provisionales.



Dovelas prefabricadas con pre-
esfuerzo que las hace autosopor-
tables.

Superestructuras de acero.

El empleo del acero estructural en la construcción de superestructuras de puentes, con la prefabricación como característica distintiva, hace que el montaje de estas estructuras sea la etapa más importante del proceso constructivo, ya que la misma fabricación de la estructura, como su transporte, involucran el montaje de elementos que conforman los sistemas estructurales tales como:

- vigas o traveses:
 - simples de perfil laminado compuestas por placas simplemente apoyadas o continuas y conectadas a la losa de concreto.
 - de placas preesforzadas de sección cajón simplemente apoyadas o continuas
 - sistemas de vigas paralelas y estructuras ortotrópicas.
- armaduras:
 - planas simplemente apoyadas, continuas o en voladizo.
 - espaciales simplemente apoyadas o continuas.
- arcos:

La fabricación de los sistemas estructurales, consiste en elegir los perfiles laminados o mediante placas de acero y diferentes perfiles, armar las secciones que satisfacen las condiciones de análisis y diseño, ensamblándolos para formar las traveses, armaduras y arcos, mediante remaches y/o soldadura, siendo la tendencia actual la unión mediante soldadura.

Estos ensambles se pueden hacer en plantas especiales, a pie de obra en talleres provisionales o de manera intermedia. En ocasiones los talleres de obra son plataformas que se construyen en el río y sobre la cual se arma la estructura, e incluso la fabricación es propiamente la construcción o montaje

de la superestructura sobre la subestructura (pilas y/o estribos) como se verá más adelante en el montaje.

Para el transporte, dependiendo si se fabricó completa o en partes, y en dónde se fabricó, se emplean trailers o el ferrocarril para el transporte de elementos aislados, tramos ya ensamblados o el transporte completo de la estructura, pudiendo incluso remolcarla por el río mediante chalanes o remolques.

Montaje: Así como las condiciones propias de la obra influyen en la forma de montar cualquier tipo de estructura, aquí también el sistema estructural del puente proporciona diferentes alternativas, como son:

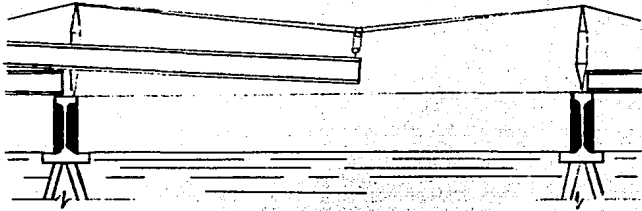
Montaje de traveses.

La alternativa más sencilla, cuando las condiciones del río, barranca o viaducto lo permiten, es izar las traveses y colocarlas sobre sus apoyos mediante el uso de grúas o plumas accionadas por malacates, para lo cual es necesario primeramente colocar o bajar, en su caso, la trabe a la barranca o viaducto.

En el caso de cauces con aguas permanentes o barrancas demasiado profundas, se procede al montaje mediante el uso de un "cable vía". Es un sistema de lanzamiento para el cual, un extremo de la trabe se cuelga del cable de carga mediante un polipasto. El extremo opuesto se suspende con una grúa desde el punto de lanzamiento, que a su vez empuja a la trabe en el sentido del avance, de este modo el polipasto del extremo, avanza a la vez que suelta cable, se recoge el cable para permitir que la grúa vuelva a empujar, repitiéndose el proceso hasta que la trabe libra el claro por salvar.

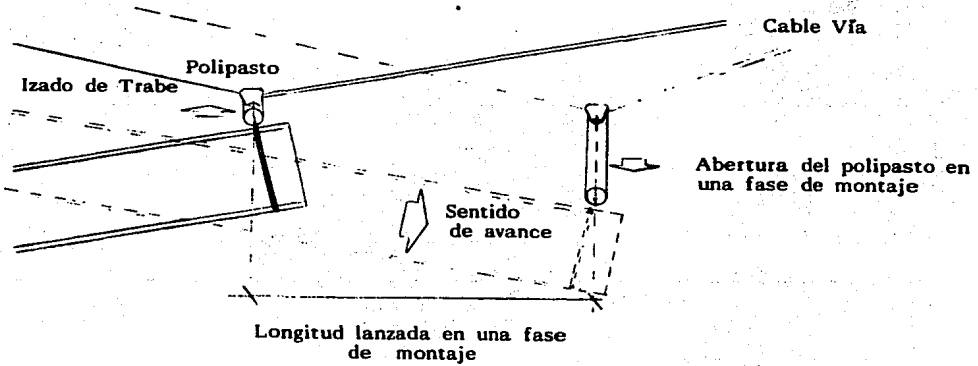
Cuando la superestructura consta de varios tramos y se dispone del espacio en los accesos necesario para conectarlos provisionalmente entre sí, se procede a montarlos mediante el procedimiento de "lanzamiento" de modo que algunos tramos actúan como lastre de los que se están montando. Este procedimiento consiste en unir los tramos por lanzar mediante placas y perfi-

Vista General del Sistema de Lanzamiento

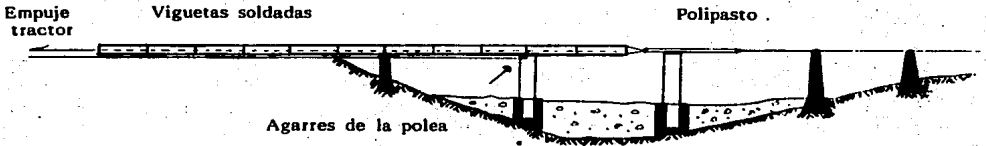


MONTAJES DE TRABES DE ACERO

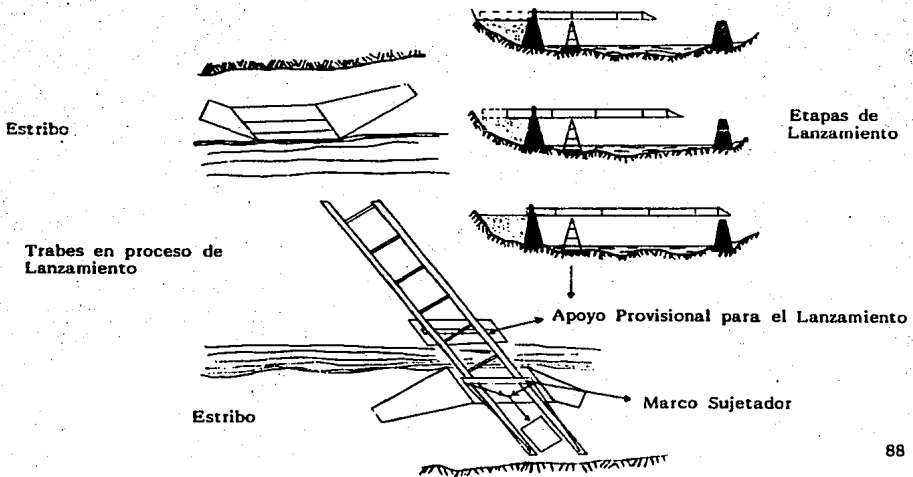
Detalle



Procedimiento de Lanzamiento



LANZAMIENTO EN VOLADIZO POR DOVELAS



les soldados en el alma y patín superior, y contraventear las traves por lanzar entre sí. Mediante un sistema de poleas ancladas a muertos y unidas a las traves y mediante el empuje de un tractor, se hace avanzar a las traves has ta sus apoyos.

Una variante de este sistema, es el **lanzamiento en voladizo por dovelas**, y para evitar el volteamiento por falta de lastre cuando la longitud lanzada es mayor a la apoyada, se coloca un marco sobre el estribo para evitar tal volteamiento.

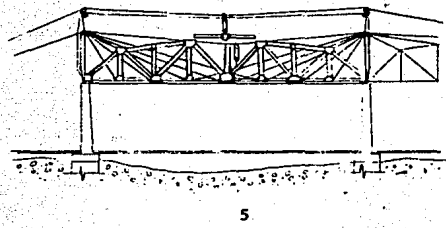
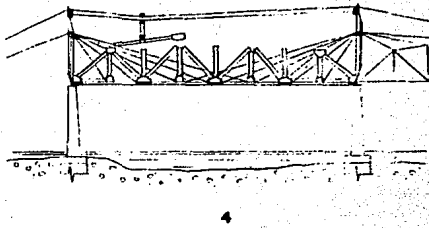
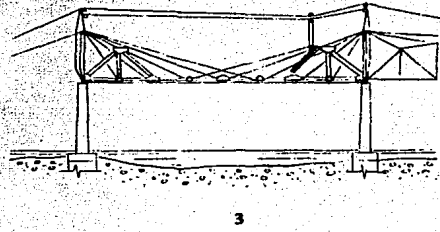
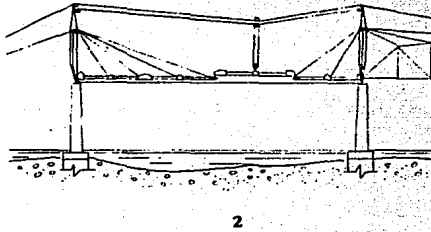
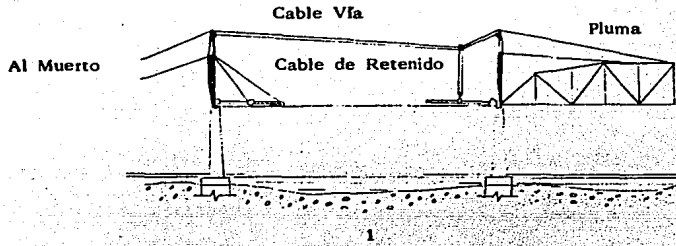
En el caso de **montaje de traves por secciones**, se puede utilizar el cable vía colgado de dos torres, (una en cada extremo del puente) por el que transita una grúa viajera transportando los tramos, los cuales colocados en su posición definitiva se remachan o sueldan entre sí, durante el montaje, mientras no es estable la parte montada de la estructura, se le detiene por cables (retenidas). Otra forma de colocar estos tramos es mediante el uso de grúas de montaje, que utilizan los tramos montados como superficie de rodamiento.

Montaje de armaduras.

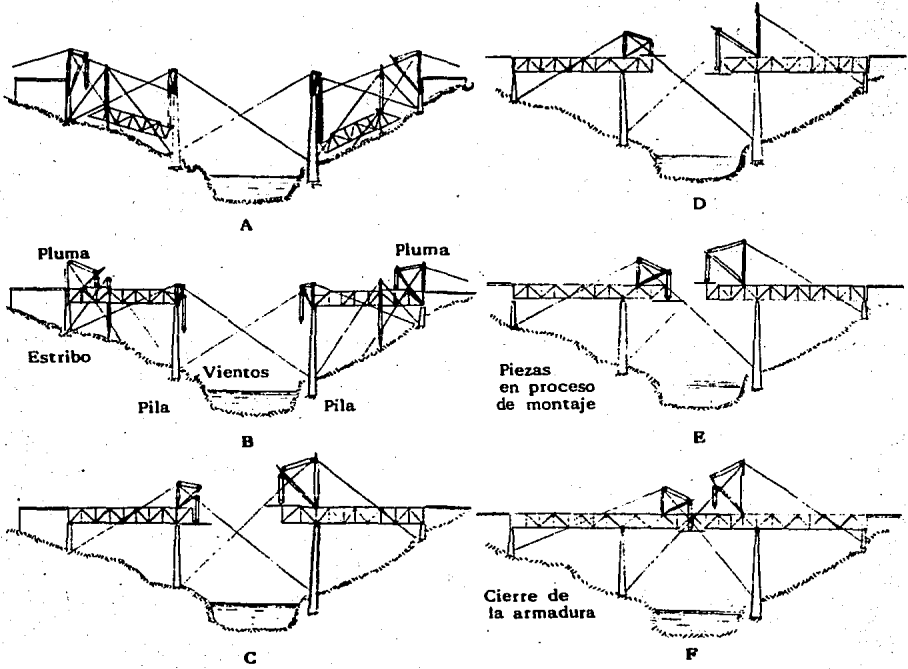
La relativa ligereza de las armaduras, permite que su erección sea posible ensamblando la estructura elemento por elemento usando equipo de izado de poca capacidad, alternativamente se puede reducir el número de conexiones en campo fabricando y montando la estructura **panel por panel**, e incluso la armadura completa.

Para el caso de **montar la estructura por elementos** era común el empleo de obra falsa como superficie de trabajo, sin embargo se ha optado por el empleo del cable vía el cual transporta y coloca los elementos en su lugar, dándoles retenida mediante cables que se anclan a muertos de concreto, pasando por plumas colocadas en los apoyos o extremos de la armadura por montar. En el caso de **montar por paneles**, ésto se hace mediante el uso de plumas y grúas al igual que con las armaduras completas, pero prestando atención en contraventear convenientemente el panel, para que los esfuerzos a los que se sujetará durante el montaje, para los cuales no está diseñado, no le produzcan deforma-

PROCESO DE MONTAJE DE ARMADURA POR ELEMENTOS
CON CALBE VIA



**PROCEDIMIENTO DE MONTAJE DE ARMADURA
POR PANELES**



ciones permanentes debido al pandeamiento, y en el caso de las armaduras completas, en las maniobras de transporte, así como en la capacidad en el equipo de izado.

Montaje de arcos.

Los procedimientos para la construcción de arcos, varían según el tipo de arco, pudiendo ser construidos en cantiliver, sobre obra falsa o mediante cables suspendidos.

El procedimiento de cantiliver o voladizo, es el más común, y se efectúa partiendo simultáneamente de los apoyos de ambos márgenes empleando los largueros del puente como cuerdas de retenida, anclados en muerlos de concreto. Mediante grúas viajeras, que avanzan sobre las cuerdas apernadas a tope que forman el extrados o lomo del arco, montando todos los elementos que integran un tablero como son las cuerdas inferiores y superiores y el sistema de contraventeo tanto horizontal como vertical, hasta llegar a la corona del arco, se gatea la estructura con el objeto de soltar y retirar las cuerdas de anclaje, anular los esfuerzos de tensión en los miembros producidos durante el montaje y permitir el cierre del arco, quedando todos los nudos en sus posiciones correctas y pudiendo así, hacer el remachado definitivo de todos los miembros. Este procedimiento es el más común, debido al comportamiento natural de los arcos que es a compresión, pero en el tipo de arcos en los que existen flexiones o fuerzas horizontales, para los cuales el arco las estabiliza mediante el sistema de piso o loza de rodamiento la cual es muy común que se construya después del arco; al sistema de voladizo se le ayuda con cables de retenida desde los apoyos para cada tramo nuevo que se coloca, lo cual sucede generalmente en los arcos atirantados, pudiéndose construir sobre obra falsa, que cada vez es menos común o con cables suspendidos de extremo a extremo del arco, los cuales mediante grúas van levantando los tramos del arco del fondo de la barranca o río, a partir de la corona hacia los extremos, quedando todo el tiempo suspendido el arco de los cables, práctica poco común.

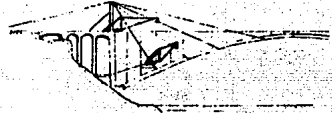
Un factor común en la erección de superestructuras de acero, es la necesidad de retenidas de los miembros y de conexiones provisionales durante el montaje, y de un procedimiento de gateo y ajuste final en el ensamble pa-

MONTAJE DE ARCOS DE ACERO



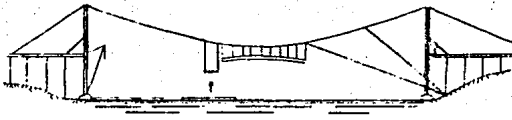
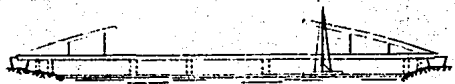
Procedimiento de Cantiliver ó Voladizo

Montaje mediante Grúas Viajeras



Construcción sobre Obra Falsa

Erección del Arco una vez terminado el Sistema de Piso



Utilización de Cable y Grúa para Levantar los Tramos del Arco

ra poder hacer las conexiones definitivas de los miembros, trabajo que implica una gran supervisión por la importancia que representan las conexiones en toda estructura.

VI VENTAJAS Y DESVENTAJAS EN LA APLICACION A PUENTES DE LAS ESTRUCTURAS ESPACIALES.

VI 1.- Introducción.-

Los claros salvados por puentes con superestructura a base de estructura espacial, son longitudes factibles de librar con los procedimientos tradicionales mencionados anteriormente, sin embargo las ventajas o desventajas que se obtienen al utilizar un sistema y material u otro, son el resultado de satisfacer **de manera global** y exitosamente los objetivos básicos implícitos en el diseño de puentes, como son: Funcionalidad o versatilidad, seguridad, economía y estética; y **de manera particular** para la elección de la superestructura, factores como el menor peso muerto con objeto de aprovechar una mayor carga útil (viva) y su influencia en las fuerzas axiales longitudinales y de flexión bajo cargas transversales; una mayor durabilidad que reduzca los costos de mantenimiento y sus efectos; el menor costo de construcción y la mayor suavidad en la superficie de rodamiento que de una manera u otra son parte o afectan a los objetivos básicos globales.

Tales objetivos y factores a cumplir están íntimamente relacionados entre sí, afectándose unos a otros, de modo que al elegir el procedimiento constructivo a seguir se trate de cumplir de manera óptima todos los objetivos ya que no solo se deben construir puentes seguros, sin que con ésto les reste funcionalidad o aumente su costo inicial y de mantenimiento, o que los problemas de construcción impliquen la necesidad de equipo especial que retrase la ejecución y aumente los costos.

El costo de un puente, está integrado por su costo inicial distribuido a lo largo de su vida útil, junto con sus cargos de mantenimiento anual. Sin embargo es erróneo considerar el costo como el único factor significativo que afecte el diseño del puente deseado. **El diseño de costo mínimo no es necesariamente el mejor diseño**, al contrario, la elección de un diseño realmente óptimo debe tomar en cuenta factores tales como funcionalidad y apariencia, siendo bastante razonable el aceptar un 20% de incremento en el costo inicial para conseguir beneficios en tales factores de funcionalidad y apariencia, y no recomendar un diseño basado en la apariencia sin una primera estimación en los costos que éste involucra, **la apariencia de la estructura es importante en la influencia de su medio ambiente y es de lo más importante para el usuario, para él cual los costos son algo invisible**. Es notable la dificultad de medir o definir los valores estéticos, sin embargo hay juicios estéticos que encuentran aceptación general.

El diseño seguro de un puente es de mucha importancia y afectará su posibilidad de construcción, costo, funcionalidad y apariencia. Sin embargo, no siempre es tomada como una cualidad que necesite ser evaluada y comparada contra otras características, pero es un **prerequisito esencial** para un buen diseño, así como la factibilidad de construcción lo es para puentes de gran claro y en otros tipos de puentes lo es el costo, la funcionalidad o la apariencia, de modo que la seguridad tendrá entonces solamente una secundaria o derivada importancia para la evaluación del tipo de puente cuyos beneficios se reflejarán influenciando en los otros tres parámetros básicos.

En cuanto a los **factores particulares de la subestructura**, la durabilidad se ve muy afectada principalmente en las cubiertas de acero debido a la corrosión a la cual hay que prestarle atención especial y no sólo en las cubiertas sino en todos los elementos de acero, incluyendo el de refuerzo de las estructuras de concreto reforzado y preesforzado.

Para un diseño eficiente de la subestructura, las cubiertas o superficies de rodamiento deben actuar como parte de la estructura primaria y participar en la resistencia de los esfuerzos resultantes por la transferencia de cargas en la dirección longitudinal lo cual repercutirá en pesos muertos menores; por

ejemplo la cubierta puede actuar como el patín superior de una viga, parte del cordón superior de una armadura, el cable de un arco, etc. La importancia de cuidar el peso muerto de la cubierta, radica en su contribución a la carga sobre la estructura primaria y en consecuencia a la subestructura y puede llegar a ser de importancia crítica en el diseño de puentes de gran claro.

También la forma en como actúa la cubierta como parte de la estructura primaria, es un factor que influye en el material a emplear en la cubierta y por lo tanto en su economía, así, por ejemplo, una cubierta ortotrópica de acero, normalmente no compite en costo con concreto reforzado si es visto únicamente como losa, sin embargo será bastante competitiva si se utiliza para tomar carga axial y así reducir peso propio.

Ahora veamos en que medida satisfacen los puentes construidos con estructura espacial los objetivos mencionados.

VI 2.- Ventajas y Desventajas.-

En el aspecto **seguridad**, las estructuras espaciales tienen la capacidad de distribuir ampliamente cualquier acción de cargas entre sus elementos y en caso de fallar, lo hacen de manera dúctil. Es capaz de ser reparada fácil, económica y confiablemente e incluso aumentarle su capacidad de carga mediante refuerzos rápidos y fáciles de colocar.

En su análisis, se toman en cuenta esfuerzos de montaje, que le aumentan los factores de seguridad de una manera razonable y económica, y no como en otros procedimientos en que la incertidumbre y las necesidades del montaje, llevan a estructuras con factores muy altos y su consecuente incremento en costo, como es el caso de los arcos de concreto.

En lo referente a **Economía**, es una estructura que en su fabricación se pueden utilizar racionalmente los materiales, evitando colocar material con esfuerzos cero o prácticamente cero; utiliza materiales existentes en el mercado,

como es el caso de utilizar el PER en lugar de los ángulos por facilidad de trabajo y seguridad al reducir el uso de la soldadura, o substituir los elementos del diseño original por otros elementos existentes en el mercado sin alterar notablemente su costo y rapidez.

Su fabricación es susceptible de tener una línea de producción en serie a gran escala de tipo industrial, abatiendo los costos y utilizando mano de obra disponible y no muy especializada.

Es una estructura que al aumentar el claro, no aumenta desproporcionadamente su peso propio lo cual repercute en una subestructura de menor dimensión; como ejemplo se tiene el puente "José Colomo" en el que fué posible substituir dos claros de 30 m. salvados por traveses de concreto preesforzado, por un solo claro de 60 m. con estructura espacial, sin necesidad de reforzar las pilas de apoyo.

En las estructuras de concreto preesforzado, aunque es posible una producción de tipo industrial, hay una mayor necesidad de supervisión y calidad en la mano de obra, con el objeto de tener exactitud en las dimensiones de la estructura, una mejor calidad del concreto y que la ejecución del preesfuerzo sea adecuado, lo cual repercute en mayor cantidad de gente especializada. Además su peso propio obliga a estructuras primarias o principales demasiado robustas, con sus consecuentes incrementos en tamaño y costo de la subestructura.

La estructura espacial permite corregir errores o sujetarse a modificaciones debido a circunstancias no previstas, ya sea cortando o reforzando, lo cual no es posible en los preesforzados debido a las líneas de esfuerzos que hay que respetar y la naturaleza del concreto que una vez fraguado no se le pueden alterar sus características originales.

En lo que se refiere a mantenimiento, el diseño y geometría de la estructura, crea "pasillos" en su interior que sirven de andamios y le permite

un fácil acceso a las operaciones de mantenimiento, que consisten en pintura y sustitución de miembros corroídos, lo cual se puede realizar sin necesidad de interrumpir el tránsito, ya que los miembros quedan por debajo de la superficie de rodamiento y su hiperestabilidad permite quitarle barras para sustituirlas sin que se corra riesgo alguno. En caso de que la superficie de concreto sea la que requiera mantenimiento, se puede demoler por tramos de modo que se deje algún carril de circulación, sin con ésto restarle seguridad al puente, cosa que muchas veces no es posible hacer con los puentes de concreto, ya que la losa es parte fundamental de la estructura, y en otros tipos de puentes de acero, las reparaciones son llevadas a cabo sobre la superficie de rodamiento, interrumpiendo el tráfico y la sustitución de miembros se debe hacer con la menor carga posible en el puente para evitar su falla total o de otros miembros.

Se les ha criticado, a diferencia de los puentes de concreto, la gran frecuencia en mantenimiento que requieren debido a la corrosión en el acero, en comparación con la gran durabilidad en el concreto y sobre todo en el concreto preesforzado en donde el agrietamiento es mucho menor, sin embargo se ha demostrado que el **acero tanto de refuerzo, como de preesfuerzo en las estructuras de concreto, es susceptible de sufrir corrosión**, con la gran desventaja de no percatarnos de ello, hasta que el concreto se deshace, fenómeno que en los elementos de acero estructural a simple vista es muy fácil de detectar y reparar a tiempo; como un ejemplo tenemos el puente "Capirio", el cual originalmente era de vigas de concreto preesforzado, en donde el acero de preesfuerzo se corrió, sin percatarse de ello, hasta que los cables quedaron colgando, de modo que se tubo que dinamitar el puente conservando la subestructura y substituyéndola por estructura espacial.

En lo que respecta a **Funcionalidad o Versatilidad**, encontramos las mejores y mayores ventajas sobre otros procedimientos constructivos.

Es un sistema que se **puede fabricar en taller o en campo** o parte en taller y parte en campo, sin necesidad de una planta sofisticada y su construcción puede ser simultánea a la de la subestructura reduciendo tiempo de

ejecución en la construcción de la obra, aprovechando en forma racional la mano de obra calificada y la de personal no especializado. Ciertamente que las estructuras de concreto preesforzado se pueden fabricar de igual manera, pero las plantas, equipo y personal es más sofisticado por la naturaleza del concreto, el cual requiere mesas de colado, curado a vapor, etc. En cuanto a otras estructuras de acero, su tamaño y forma dificultan su transportación, ya que para transportar estructuras espaciales no hay necesidad de utilizar un equipo complicado como ya se vió, y que no corre riesgos de inversión de esfuerzos durante el transporte que la pudieran dañar, como es el caso en las estructuras de concreto, en las cuales la inversión de esfuerzos por un golpe o mala maniobra en el transporte la pudieran dañar e incluso dejarla inservible.

Para su montaje, el clima y la época de estiaje o lluvia no interfiere en forma definitiva en el programa de ejecución; no se requiere de obra falsa por ser una estructura autosoportable que permite el colado de la superficie de rodamiento (que además le ayuda a soportar los esfuerzos de compresión), con una cimbra sencilla y económica, con lo que se concede el sueño de todo constructor de puentes, que es "el hacerse independientes de la obstrucción (río, barranca, etc.) durante el montaje", para lo cual no se requiere de equipo sofisticado debido a su ligereza, haciéndose de manera muy segura e incluso suspenderse por algún imprevisto, sin que la posición en que quede o el lugar en donde se apoye, le afecten por inversión de esfuerzos a la estructura.

Es un sistema que puede cambiar fácilmente sin afectar a la estructura en sí, su forma o dimensiones, con el objeto de satisfacer demandas futuras, además permite absorber errores de fabricación y sufrir modificaciones en campo debido a circunstancias no previstas.

Sistemas tradicionales como losas de concreto, en las que en su procedimiento se requiere de obra falsa, están sujetas al clima o a la época de estiaje, otros sistemas estructurales de acero (armaduras o traveses) o concreto preesforzado, no se libran de obra falsa y un gran equipo de montaje e

incluso el uso de estructuras adicionales para el montaje, en las estructuras de concreto preesforzado se necesita de apoyos adicionales, para evitar que falle la superficie de apoyo en los extremos produciendo inversión de esfuerzos y provocar la fractura de las trabes, durante su montaje se ha llegado a utilizar estructuras espaciales como superficie de deslizamiento de las trabes. El tiempo de montaje puede llegar en ocasiones a ser tan grande, que el suspender la maniobra puede provocar la pérdida de la estructura obligándose a turnos extras y a que cualquier imprevisto pueda hacer fracasar la operación.

El sistema de estructura espacial se ha utilizado para claros que van de 12 m. a 60 m., sin embargo, para claros menores a los 15 m., sus peraltes son muy reducidos -ya que el peralte es función del claro y si el puente es continuo o simplemente apoyado- por lo que constructivamente tiene muchos problemas y utilizar un peralte mayor es antieconómico, ya que una losa común sería de un espesor aproximado de 40 cm., mientras que con estructura espacial sería de 20 cm. más todo el acero inferior de las pías que la forman.

Para claros mayores a los 60 m. se está estudiando la posibilidad de aumentar los peraltes de la estructura mediante el uso de más capas.

Estéticamente, su apariencia se pierde para la mayoría de los usuarios, ya que la estructura queda por debajo de la superficie de rodamiento, pareciendo un puente tradicional, sin embargo en algunos puntos donde es posible verlo llaman la atención su ligereza y esbeltez. Se les ha criticado la contraflecha que los hace verse "jorobados", la cual no desaparece debido a la gran hiperestaticidad y elasticidad del sistema después de cargada la estructura.

Algunas otras ventajas del sistema, es que se han utilizado como puentes provisionales, utilizando como superficie de rodamiento elementos de madera, que después se han ensanchado y vuelto definitivos, pasos peatonales y de tuberías e inclusive como ya se mencionó, se han utilizado para montar, deslizando sobre las estructuras tridimensionales, trabes para puentes de concreto preesforzado.

VII CONCLUSIONES

- Las Estructuras Espaciales son la extensión al espacio de la armadura tradicional, en las que su forma de construcción las caracteriza la disposición de un gran número de elementos unidos bajo forma de entrearmado, dispuestos en tal forma que siguen diversas direcciones en el espacio, de modo que las fuerzas solicitantes que actúan en la superficie exterior, bajo cualquier ángulo y en cualquier dirección, y las cargas aisladas que actúan en ciertos puntos de la estructura no son sostenidos únicamente por los elementos cargados directamente, sino también por otros situados a considerable distancia de la carga, lográndose una distribución más homogénea de las sollicitaciones en el conjunto de elementos que conforman a la estructura, produciendo esfuerzos menores en los elementos y reduciendo así en ligereza, economía y belleza de la estructura, aunado a un alto grado de seguridad consecuencia de la hiperestaticidad que produce la gran cantidad de elementos.

Por lo tanto la eficiencia de una Estructura Espacial, reside en la posibilidad que presenta de distribuir tan ampliamente como sea posible cualquier acción de cargas.

- Debido al gran progreso que han tenido las computadoras, tanto en velocidad de cálculo como en capacidad de almacenamiento de datos, el análisis estructural de las Estructuras Espaciales se realiza mediante programas prácticos basados en el método de las rigideces, formulándolo de tal manera que su representación y manejo se realice mediante álgebra matricial, debido al gran número de datos que se requiere manipular, pero con la ventaja de la

poca intervención del calculista durante el proceso de análisis, después de especificadas las características de la estructura y las cargas a que está sometida, lográndose así un análisis más sistemático y con menor probabilidad de errores aritméticos.

El análisis de estas estructuras también se realiza o se complementa mediante la instrumentación y medición de los efectos producidos por las cargas en modelos de estructuras a escala y en estructuras reales construidas. Debido a que México es el primer país en utilizar este tipo de estructuras en puentes, la falta de teoría, especificaciones y experiencias anteriores, motivaron el desarrollo de una teoría estructural por técnicos mexicanos para realizar el análisis considerando cargas verdaderamente móviles, dando como resultado de las mediciones en las estructuras reales instrumentadas, valores inferiores a los calculados y bastante alejados de los permisibles de proyecto, lo que lleva a inferir que las hipótesis adoptadas para el cálculo son adecuadas y seguras, pero sugieren la conveniencia de optimizar los diseños, mediante la instrumentación y medición de modelos estructurales a escala con el fin de extrapolar los resultados a estructuras reales y de afinar las hipótesis de cálculo.

- La Estructura Espacial aplicada a la superestructura de puentes, constituye una estructura metálica electrosoldada con elementos de concreto reforzado, dicha estructura metálica es un reticulado de entrearmado, generalmente de tres capas, cuyos módulos son prismas tetraedros o semiocetaedros, variando la dimensión de los módulos y el número de capas en función del claro y del tipo de apoyos del puente.

Su proceso constructivo consiste en la fabricación de la estructura, transporte, montaje y terminación, cada una de las etapas estará sujeta a diferentes alternativas según las características propias de cada obra.

- Debido a la variedad de alternativas que presenta la construcción de la superestructura, junto a la simultaneidad de hacerlo con las demás estructuras componentes del puente (redituando en ahorro de tiempo y dinero); a las mínimas limitaciones que se presentan para el montaje de la estructura;

a la economía y factibilidad de construcción que representa la mínima utilización de obra falsa, bajo cualquier condición topográfica y climatológica; a la utilización de mano de obra, en su mayoría poco especializada, y a las facilidades que presenta para su mantenimiento, la utilización de la Estructura Espacial en la superestructura de puentes, en lugar de cualquier sistema tradicional, es especialmente ventajosa en puentes cuyos tramos tengan claros que varíen entre 15 m. y 60 m. (por ahora) sean de eje recto o ligeramente curvos y en donde estéticamente no se busque una obra espectacular.

La aplicación de este sistema a puentes se ha venido desarrollando desde 1973, con tecnología, técnicos, obreros e ingenieros mexicanos, dando como resultado una tecnología pensada en resolver las necesidades de México con sus propios recursos, aumentando así las posibilidades de "La Estructura Espacial Como Alternativa En La Construcción de Puentes".

BIBLIOGRAFIA

- Makowski, **"Estructuras Espaciales de Acero"**
Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona 2a. ed. (1972)
- J. Margarit. C. Buxadé, **"Las Mallas Espaciales en Arquitectura"**
Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona 1a. ed. (1972)
- Makowski, **"Analysis, Design and Construction of Double-Layer Grids"**
Applied Science Publishers Ltd., London 1st. ed. (1981)
- Norris and Wilbur, **"Elementary Structural Analysis"**
Ed. Mc. Graw Hill U.S.A. 2nd. ed. (1960)
- Calderón Ollivier Alejandro. López Ch. Arturo, **"Construcción de Puentes con Estructura Espacial"**
Ponencia 1985
- Calderón Ollivier Alejandro, **"Proyecto de Puentes con Estructura Espacial"**
Ponencia, Querétaro 1986
- C. King. A. Calderón. H. Zambrano, **"Estructuras Estereoespaciales para la Construcción de Puentes en los Caminos Rurales de México"**
S.A.H.O.P. Ponencia para el Congreso de Viena el 4 de marzo de 1981
- S.C.T., **"La Construcción de Puentes en México"**
S.C.T. México, D.F. (1985)
- Carlos Fernández Casado **"Puentes de Hormigón Armado Pretensado"**
Vol. II, Editorial Dossat, S.A., Madrid (1965)
- O'Connor, **"Design of Bridge Superstructures"**
Wiley -Interscience- John Wiley & Sons, Inc. U.S.A. (1971)
- Wittfoht, **"Puentes Ejemplos Internacionales"**
Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona (1975)
- Engel, **"Sistemas de Estructuras"**
H. Blume Ediciones, Madrid 2a. ed. (1978)
- Maza Vallejos. García Mendoza. Tesis Profesional, **"Estudios para Proyecto de Puentes"**
Facultad de Ingeniería U.N.A.M. (1984)