

INVESTIGACIÓN Y REVISIÓN TÉCNICA

Puentes de grandes luces los puentes colgantes

Por: Ing. Percy F. Camacho Rioja
Director de Carrera Ingeniería Civil
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología



Figura 1 – Puente Golden Gate San Francisco, CA, USA

RESUMEN (ABSTRACT)

Los Puentes Colgantes, Grandes Luces o Puentes Atirantados, se han construido en Bolivia solo para uso peatonal, en su estructura se utilizan cables de acero de alta resistencia siguiendo las normas de las construcciones, introduciendo tecnología de cálculo y ejecución, además

que estas superestructuras muestran otros métodos de diseño y construcción. En este artículo, se analizan los aspectos especiales como diseño y operación, se recomienda modelar la estructura con el uso de programas de software como el SAP2000, MIDAS-CIVIL y otros.

Palabras Claves (Key Words)

Estructuras (construcción) / elementos estructurales / aceros / hormigones / tecnología de la construcción / superestructuras (construcción).

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente en Bolivia se han diseñado y construido puentes de hormigón armado, de madera, de acero, de hormigón pretensado y de estructura mixta. Las luces que se pueden vencer con este tipo de puentes son relativamente reducidas. Los diseños modernos de carreteras y autopistas imponen condiciones muy exigentes de pendiente, curvatura, y altura sobre los cauces de los ríos, lo que unido a las condiciones topográficas y fluviales del país define la necesidad de diseñar y construir puentes de gran longitud.

En muchos casos no es posible evitar el diseño y construcción de puentes con grandes luces por lo que la única alternativa válida consiste en buscar otros métodos de diseño y construcción, como los puentes colgantes

(cable-suspended bridges / suspension bridges), los puentes atirantados mediante cables (cable-stayed bridges / cable-supported bridges), o los puentes de hormigón pretensado en volados sucesivos.

La experiencia en el país, con puentes colgantes, no ha sido alentadora. En las carreteras de primer orden, el balance del uso de puentes colgantes ha sido negativo, fundamentalmente por la falta de experiencia en la coordinación entre el diseño y la construcción. Los pocos puentes colgantes vehiculares que están en desuso se limitan a estructuras livianas de madera, suspendidas de cables de acero, construidas ya hace muchos años (Puente Sucre, Puente Arce, Puente La Concordia,.....)

Existe, sin embargo, un número importante de puentes colgantes, de pequeña luz, utilizados para la circulación peatonal (Puente Jorochito y Puente El Torno, sobre El río Piray, Puente La Tunita, en el río Mizque,....). Se presenta la circunstancia especial de que el autor del presente artículo, ha realizado diseños y ha participado en la construcción de este tipo de puentes.

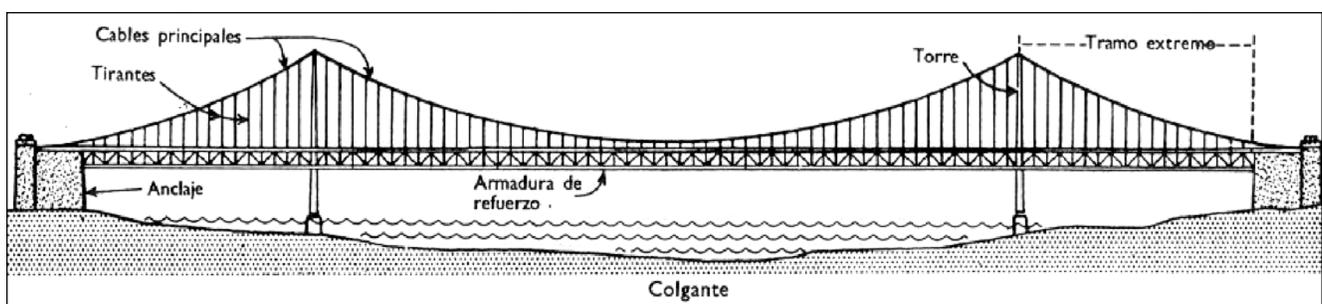


Figura 2 – Esquema general de un Puente Colgante

2. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LOS PUENTES COLGANTES

Los principios de funcionamiento de un puente colgante son relativamente simples. La implementación de estos principios, tanto en el diseño como en la construcción, es el principal problema de ingeniería.

En principio, la utilización de cables como los elementos estructurales más importantes de un puente tiene por objetivo el aprovechar la gran capacidad resistente del acero cuando está sometido a tracción.

El soporte físico de un puente colgante está provisto por dos torres de sustentación, separadas entre sí. Las torres de sustentación son las responsables de transmitir las cargas al suelo de fundación.

Las torres de sustentación pueden tener una gran diversidad de geometrías y materiales de construcción (la cimentación de las torres de sustentación generalmente es construida en hormigón armado por su permanente contacto con el agua y la tierra, aunque la superestructura puede ser de acero, hormigón armado e inclusive de madera), pero generalmente presentan como característica

típica una rigidez importante en la dirección transversal del puente y muy poca rigidez en la dirección longitudinal. Este se constituirá en un factor importante para la estructuración de todo el puente colgante.

Apoyados y anclados en la parte superior de las torres de sustentación, y ubicados de una manera simétrica con

relación al eje de la vía, se suspenden los cables principales de la estructura (generalmente un cable a cada lado de la torre).

Debido a que los cables principales van a soportar casi la totalidad de las cargas que actúan sobre el puente, se suele utilizar acero de alta resistencia (tensiones de rotura superiores a los 15000 Kg/cm^2)

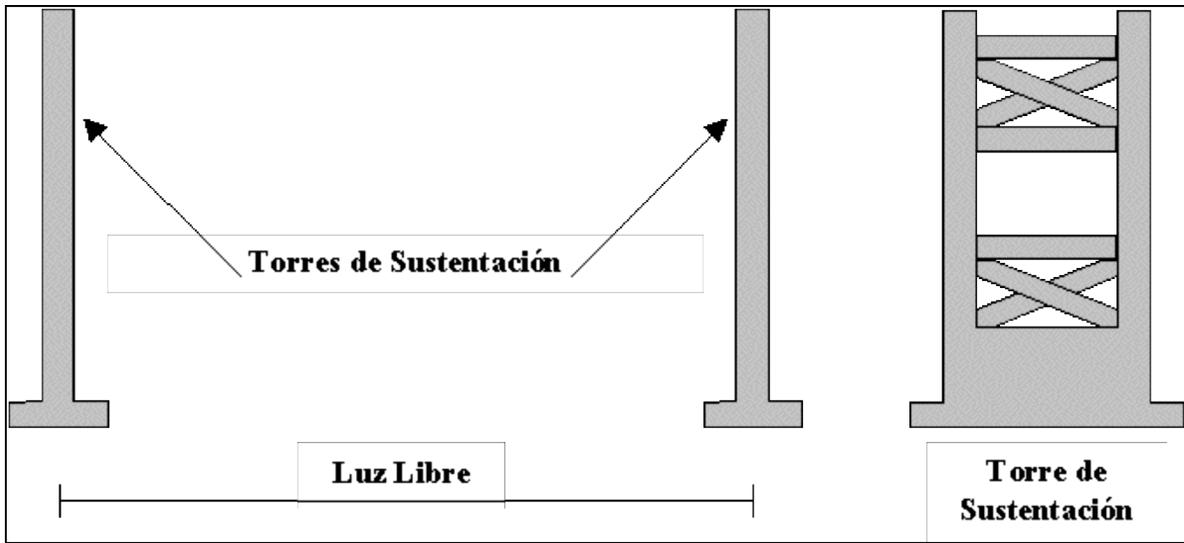


Figura 3 – Torres de sustentación de un Puente Colgante

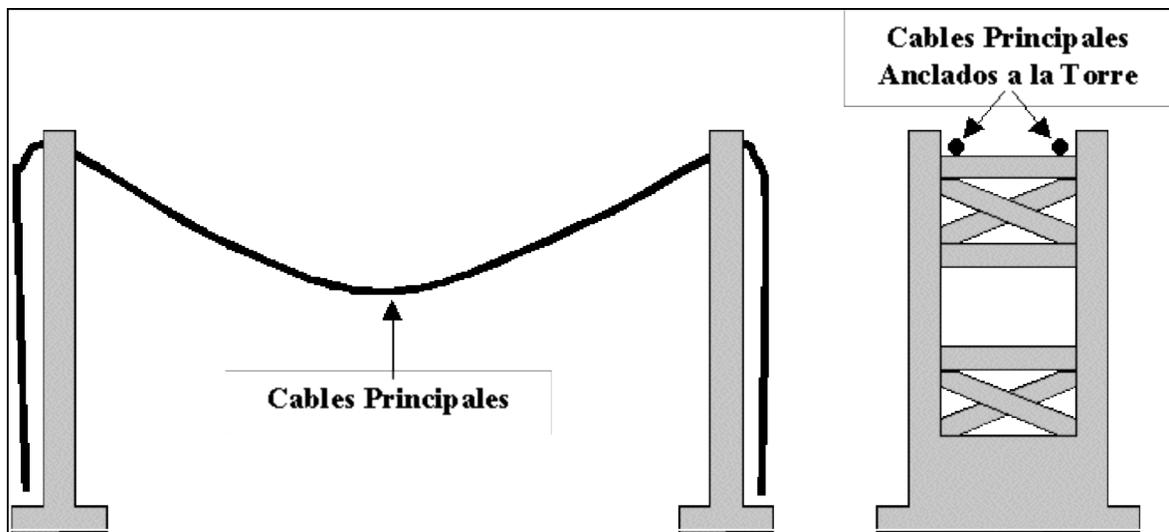
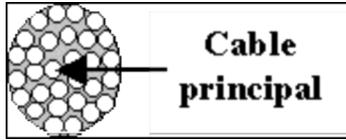


Figura 4 – Cables principales de gran diámetro de un Puente Colgante

Con el objeto de que los cables tengan la flexibilidad apropiada para trabajar exclusivamente a tracción, los cables de gran diámetro están constituidos por un sin número de cables de diámetro menor.



De los cables principales se sujetan y se suspenden tensores o péndolas, equidistantes en la dirección

longitudinal del puente, que generalmente son cables de menor diámetro o varillas de hierro enroscadas en sus extremos.

La separación entre tensores es usualmente pequeña, acostumbrándose valores comprendidos entre 3 y 8 metros. De la parte inferior de los tensores sostenidos en cables principales de eje opuesto, se suspenden elementos transversales (vigas prefabricadas de acero, de hormigón e inclusive de madera para puentes secundarios) que cruzan la vía a lo ancho.

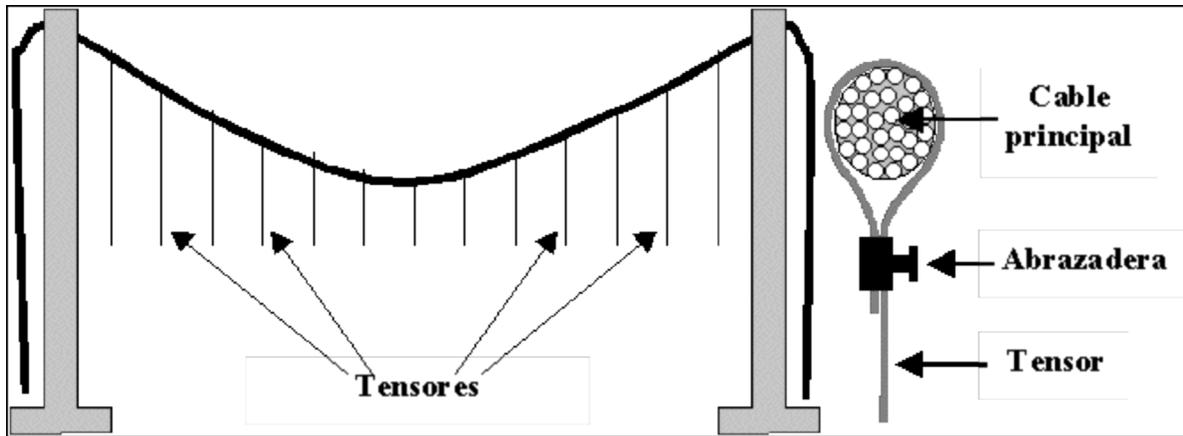


Figura 5 – Distribución de los tensores o péndolas Cables principales

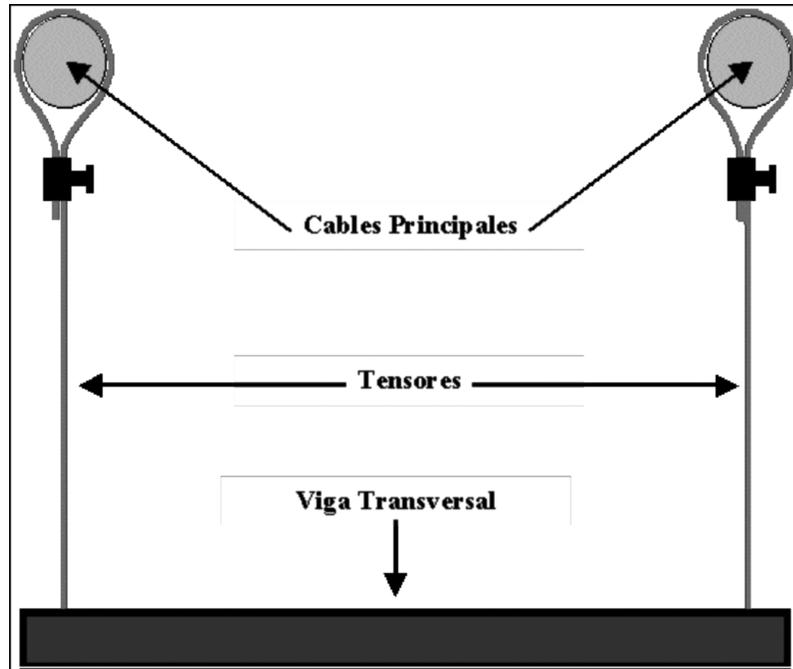


Figura 6 – Esquema típico del tablero colgante

De igual forma, en la dirección longitudinal del puente, de la parte inferior de los tensores se suspenden y sujetan elementos longitudinales (vigas prefabricadas) que unen todos los tensores.

Las vigas longitudinales conforman una estructura similar a una viga continua sobre apoyos elásticos. Cada tensor constituye un apoyo elástico.

Este esquema de funcionamiento estructural permite que las dimensiones transversales de las vigas longitudinales (y de las vigas transversales) dependan de la distancia entre tensores y no dependan de la distancia entre torres de sustentación.

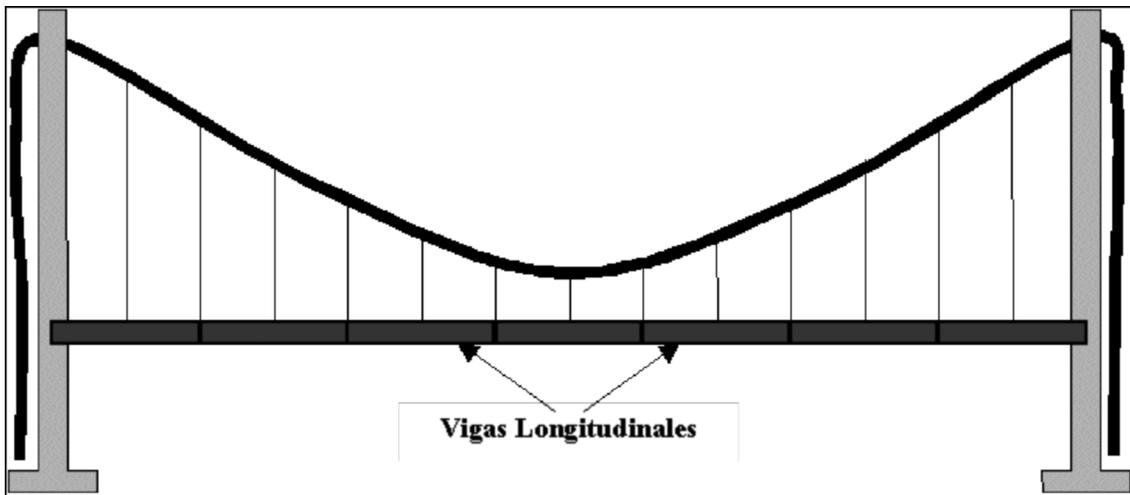


Figura 7 – Estructura de las vigas longitudinales



Figura 8 - Estructura similar a una viga continúa sobre apoyos elásticos

Las vigas transversales y longitudinales conforman una malla de elementos estructurales sobre un plano horizontal.

La viga Vierendel que se formaría solamente con las vigas transversales y longitudinales, es normalmente insuficiente para resistir las sollicitaciones transversales al puente sobre ese plano horizontal (acción dinámica de los sismos y del viento).

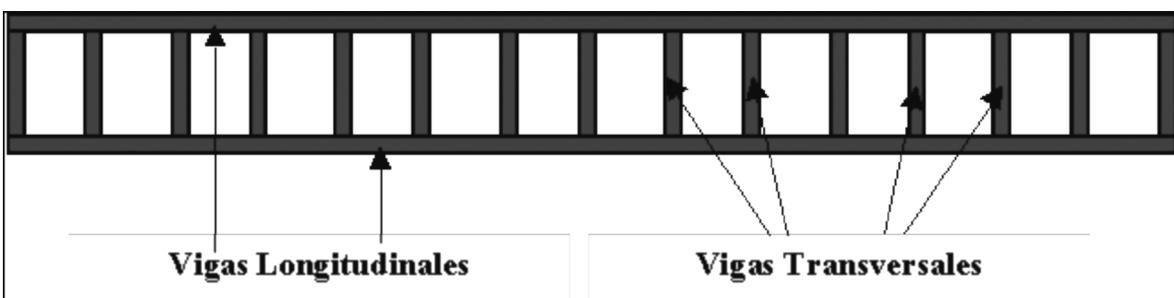


Figura 9 – Disposición de las vigas longitudinales y transversales

La malla de vigas longitudinales y transversales se puede arriostrar y rigidizar mediante diagonales y contra diagonales.

Apoyada en las vigas transversales se construye la estructura que soportará directamente a los vehículos que circulan por el puente. Usualmente esta estructura es una losa de hormigón, pero podría ser una estructura con planchas metálicas.

Debido a la gran rigidez de la losa sobre el plano horizontal, en caso de su uso podría prescindirse del uso de diagonales y contra diagonales. En el caso de una superestructura metálica para la circulación vehicular, las diagonales y contradiagonales (o algún otro mecanismo de rigidización) serán necesarios.

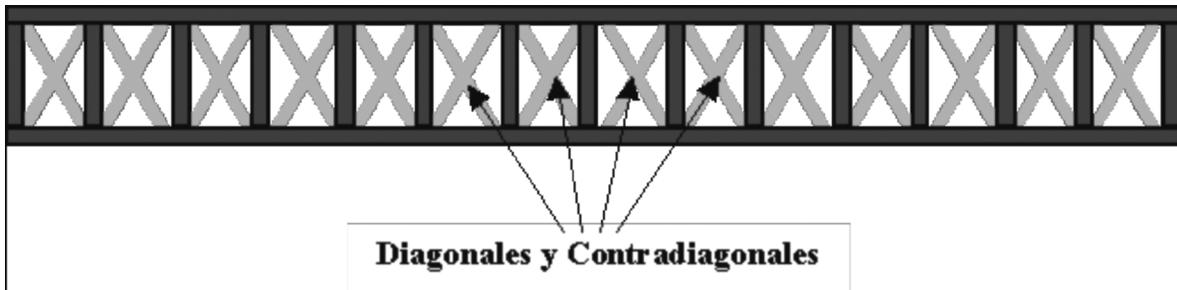


Figura 10 - Diafragma horizontal, arriostrado del tablero

La colocación de las diagonales y contra diagonales persigue la formación de un diafragma horizontal de gran resistencia a la flexión en la dirección horizontal (similar a una losa en un edificio).

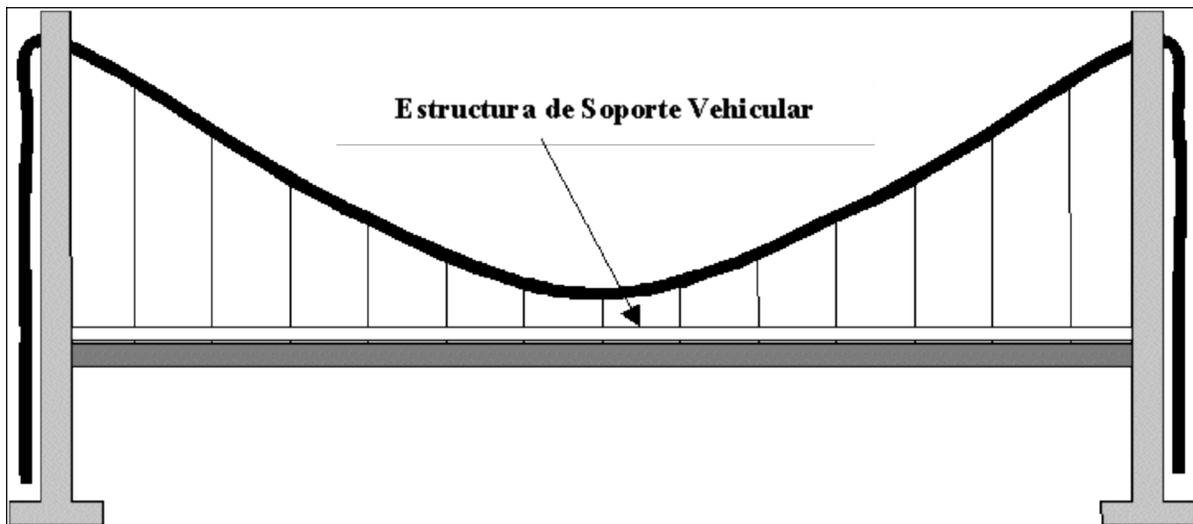


Figura 11 - Estructura de soporte vehicular

En principio, la carga viva vehicular es transmitida a su estructura de soporte; la estructura de soporte vehicular transmite la carga viva y su propio peso a las vigas transversales; las vigas transversales con sus cargas, a su vez, se sustentan en los tensores; los tensores, y las

cargas que sobre ellos actúan, están soportados por los cables principales; los cables principales transmiten las cargas a las torres de sustentación; y, por último, las torres de sustentación transfieren las cargas al suelo de cimentación.

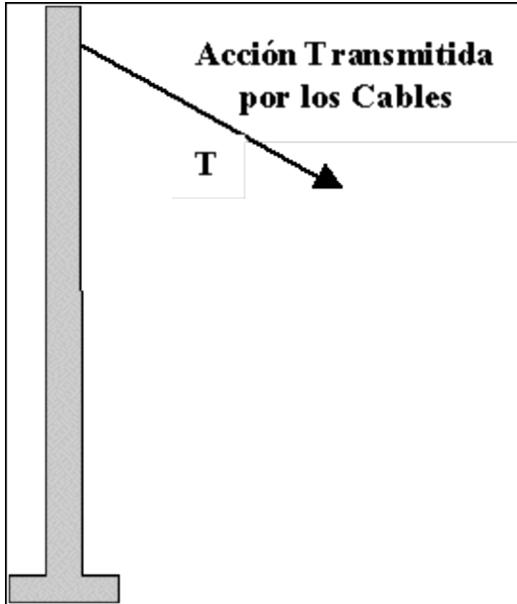


Figura 12 – Tensión en el cable principal

Claramente se puede establecer una cadena en el funcionamiento de los puentes colgantes; la falla de cualquiera de los eslabones mencionados significa la falla del puente en su conjunto.

La componente vertical de la tensión del cable es fácilmente resistida por las torres de sustentación, pero la componente horizontal produciría volcamiento. Para superar este limitante se deben crear mecanismos que permitan a la torre compensar esa fuerza horizontal.

La geometría presentada hasta el momento no es la más apropiada para un puente colgante, pues la tensión en el extremo de los cables principales se convierte en una acción que no puede ser soportada directamente por las torres de sustentación.

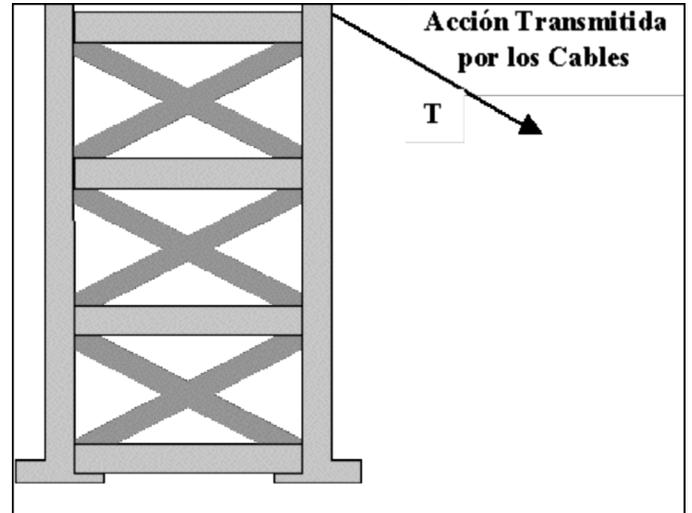


Figura 13 – Tensión en el cable principal en torres tipo pórtico

Una primera alternativa, válida exclusivamente para puentes de pequeñas luces (hasta 40 m.) consiste en crear torres de sostenimiento tipo pórtico en la dirección longitudinal, lo que facilita la estabilización de la carga proveniente de los cables principales.

En puentes de grandes luces, la primera fase de la solución del problema consiste en extender el puente y los cables principales hacia el otro lado de la torre, para equilibrar total o parcialmente las cargas permanentes.

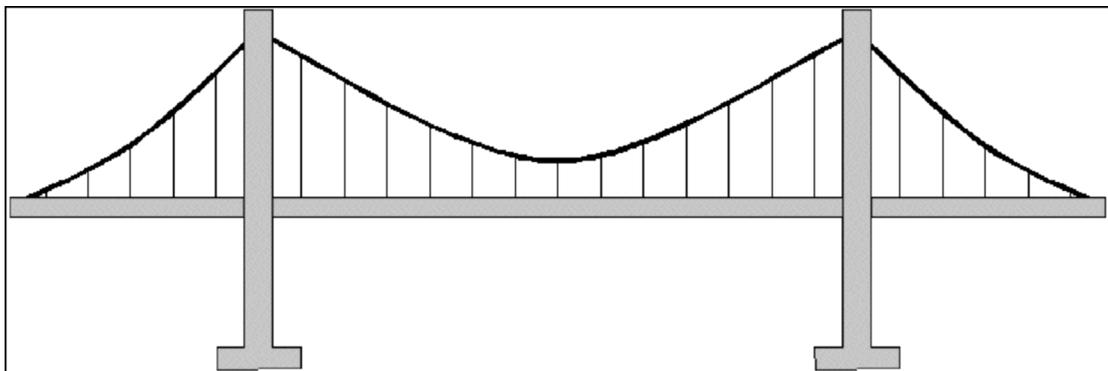


Figura 14 – Puente de gran luz equilibrando carga permanente

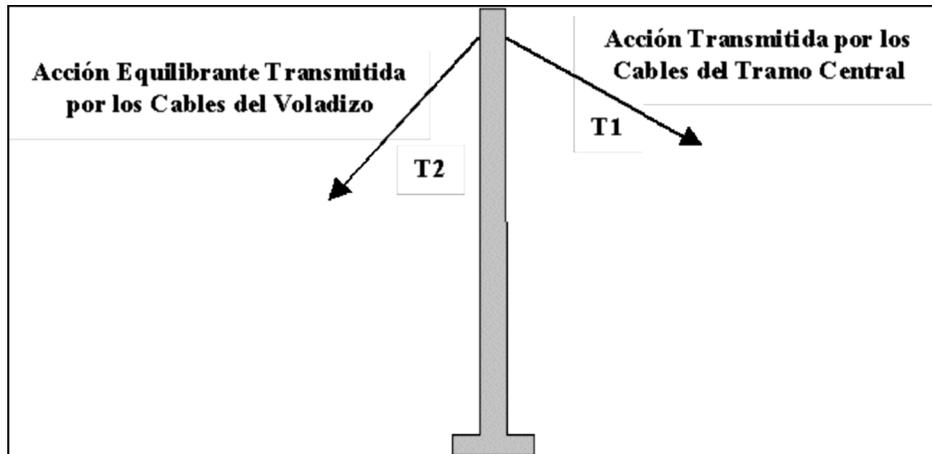


Figura 15 – Fuerzas laterales de los cables en la torre

En caso de no disponerse de una longitud apropiada hacia los extremos del puente (muchas veces en zonas montañosas el acceso a los puentes es muy restringido), se pueden construir contrapesos como parte de los volados.

Con el objeto de reducir los costos de los macizos de anclaje, los estribos son construidos en hormigón armado, conformándose celdas selladas llenas de lastre (piedra y tierra) dentro de los estribos.

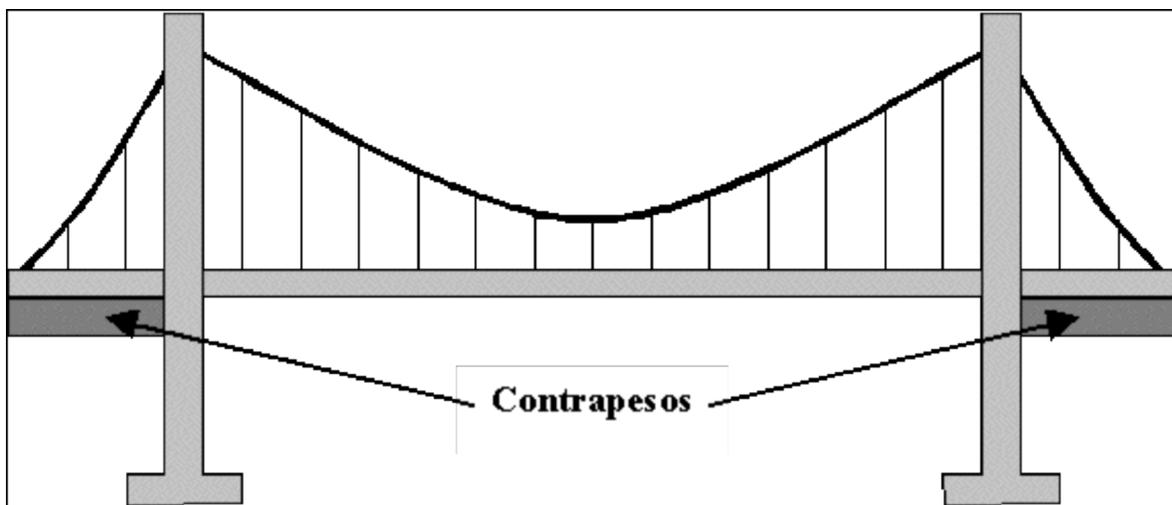


Figura 16 - Ubicación de los contrapesos

La carga muerta no equilibrada y la carga vehicular que circula por el tramo central son resistidas por anclajes gravitacionales de los cables, en sus extremos. La carga vehicular actuante en los tramos extremos del puente puede ser resistida por estribos. Generalmente los estribos son convertidos en anclajes para los cables.

Esta estructuración de los puentes colgantes permite resistir eficientemente las cargas gravitacionales, pero existen otras alternativas de estructuración, como puentes colgantes continuos, puentes con un solo eje central de cables, puentes con más de un cable en los extremos de la vía, etc.

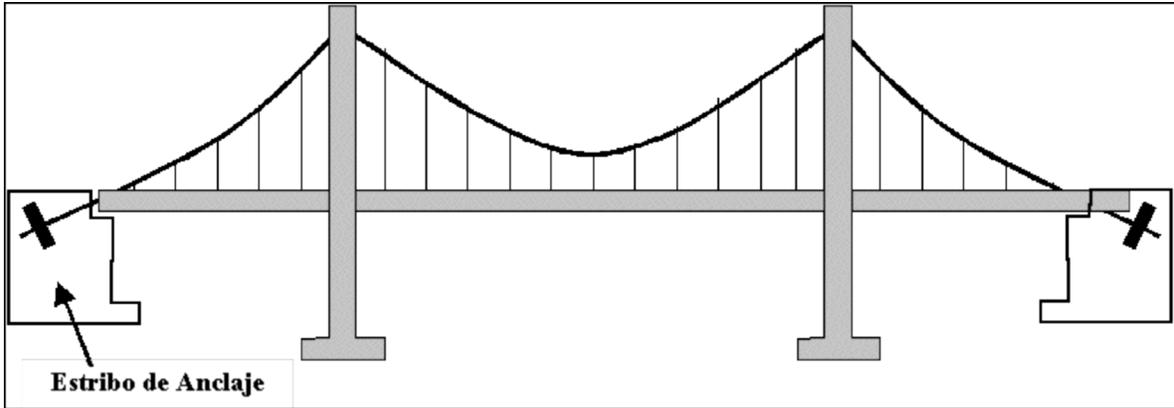


Figura – 17 Anclajes gravitacionales de los cables en los extremos

3. PESO PROPIO DE LOS CABLES CON DEFLEXION SIMETRICA

Debido a su peso propio (carga vertical uniformemente distribuida en toda la longitud del arco), los cables describen una curva conocida como Catenaria.

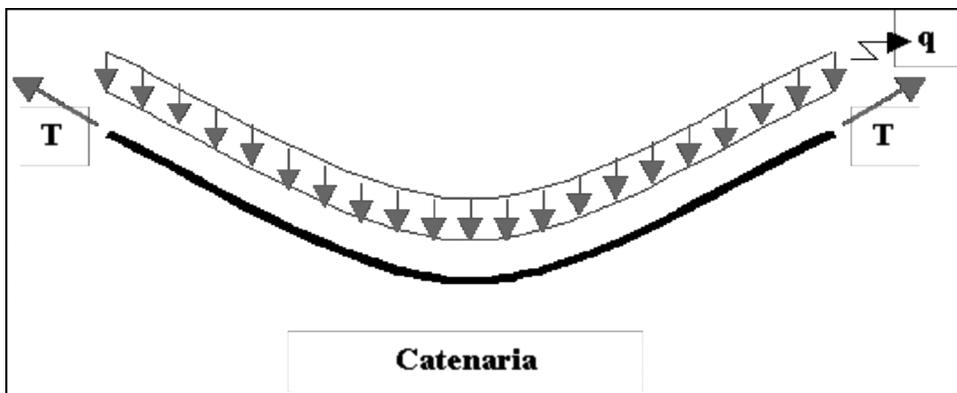


Figura 18 – Curva catenaria del cable

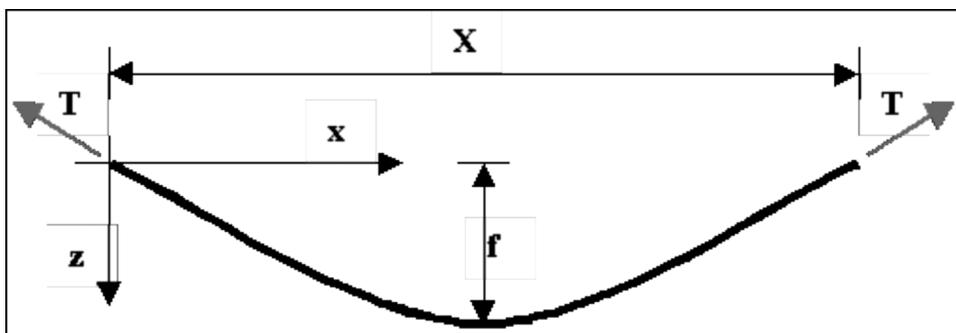


Figura 19 – Esquema del equilibrio del cable

En el caso más común, en que no existe desnivel entre los dos extremos, la fuerza de tensión en el extremo del cable (y la tensión a lo largo del cable también) depende de la longitud entre extremos, del peso por unidad de longitud, y de la flecha en el centro de la luz.

En este caso:

$$H \frac{d^2 z}{dx^2} + q \frac{dL}{dx} = 0 \quad (3.1)$$

$$T = H \cdot \text{Cosh}(\alpha) \quad (3.2)$$

Donde:

T: tensión en el extremo del cable

H: componente horizontal de la tensión en el extremo del cable

$$\alpha = \frac{q \cdot L}{2H} \quad (3.3)$$

$$z = \frac{H}{q} \left[\text{Cosh}(\alpha) - \text{Cosh}\left(\frac{qx}{H} - \alpha\right) \right] \quad (3.4)$$

$$f = \frac{H}{q} [\text{Cosh}(\alpha) - 1] \quad (3.5)$$

Como alternativa se puede utilizar una aproximación parabólica de segundo grado a la catenaria (la diferencia es pequeña), con lo que la descripción del cable y su comportamiento se podrían calcular con las siguientes expresiones:

$$H = \frac{q \cdot L_1^2}{8f} \quad (3.6)$$

$$z = \frac{4f \cdot x(L_1 - x)}{L^2} \quad (3.7)$$

$$T_{\max} = H \left[1 + 16 \left(\frac{f}{L_1} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.8)$$

$$L = L_1 \left[1 + \frac{8}{3} \left(\frac{f}{L_1} \right)^2 \right] \quad (3.9)$$

Donde:

L1: luz libre entre apoyos del cable

4. PESO PROPIO DE LOS CABLES CON DEFLEXIÓN ASIMÉTRICA

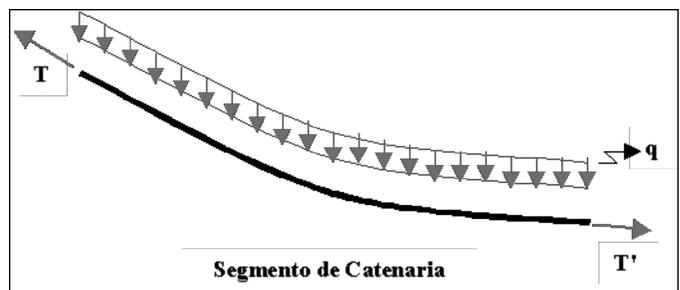


Figura 20 – Equilibrio del segmento de catenaria

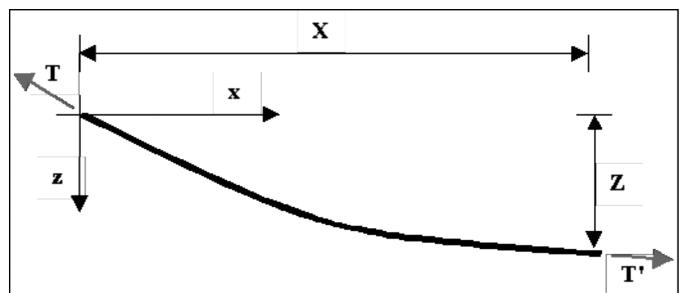


Figura 21 – Sistema de coordenadas del cable

En este caso las expresiones que describen el comportamiento del cable son bastante más complejas que en el cable simétrico:

$$\beta = \frac{q \cdot X}{2H} \quad (4.1)$$

$$\alpha = \text{Sinh}^{-1} \left[\frac{\beta \cdot \left(\frac{Z}{X} \right)}{\text{Sinh}(\beta)} \right] + \beta \quad (4.2)$$

$$L = \frac{2H}{q} \cdot \text{Sinh}(\beta) \cdot \text{Cosh}(\alpha - \beta) \quad (4.3)$$

$$T = H \cdot \text{Cosh}(\alpha) \quad (4.4)$$

$$T' = \frac{q}{2} [L \cdot \text{Coth}(\beta) - Z] \quad (4.5)$$

$$S = H \text{Senh}(\alpha) \quad (4.6)$$

$$S' = \frac{q}{2} [Z \cdot \text{Coth}(\beta) - L] \quad (4.7)$$

$$X = \left(\frac{H}{q} \right) \ln \left(\frac{T + T' + q \cdot L}{T + T' - q \cdot L} \right) \quad (4.8)$$

$$Z = \left(\frac{S + S'}{T + T'} \right) \cdot L \quad (4.9)$$

$$\Delta L = \left(\frac{H L^2}{X} \right) \frac{1}{E \cdot A} \quad (4.10)$$

$$Z = \frac{H}{q} \left[\text{Cosh}(\alpha) - \text{Cosh} \left(\frac{2\beta \cdot x}{X} - \alpha \right) \right] \quad (4.11)$$

$$H \frac{d^2 z}{dx^2} + q \frac{dL}{dx} = 0 \quad (4.12)$$

Donde:

T: tensión en el extremo más alto del cable, T': tensión en el extremo más bajo del cable

H: componente horizontal de la tensión en el extremo más alto del cable

H': componente horizontal de la tensión en el extremo más bajo del cable

S: cortante en el extremo más alto del cable, S': cortante en el extremo más bajo del cable

L: longitud del segmento de catenaria, X: proyección horizontal del segmento de catenaria

Z: desnivel entre los dos extremos del segmento de catenaria

dL: incremento de longitud del cable por efecto del peso propio

E: módulo de elasticidad del material constitutivo del cable, A: sección transversal del cable

5. ASPECTOS ESPECIALES DE ANÁLISIS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Como se podrá observar a continuación, es muy difícil desligar el análisis y diseño de puentes colgantes, de su construcción.

El peso propio del cable constituye una fracción de las cargas gravitacionales que actúan sobre los puentes colgantes. Adicionalmente actúa el peso de los restantes elementos estructurales, la carga permanente no estructural y las cargas vivas.

La mejor manera de modelar el comportamiento del cable (que es el componente más importante de la estructura) consiste en utilizar programas estándar de Análisis Matricial de Estructuras Espaciales como SAP2000, SAP90 o MIDAS-Civil. Se dividen los cables en un alto número de segmentos y se analizan las solicitaciones provocadas por los diferentes tipos de cargas.

Es importante notar que la carga permanente, adicional al peso propio del cable, es generalmente una carga uniformemente distribuida (o bastante cercana a ello), por lo que la geometría esperada en el cable, luego de las deformaciones del mismo será bastante cercana a una catenaria, conviniendo asumir inicialmente que la geometría del cable corresponde a una catenaria.

La primera sorpresa con la que nos encontramos cuando se analiza un cable bajo su propio peso, por el Método Matricial, es que las deformaciones son muy importantes

(en un cable de 300 m de longitud y 60 m de flecha es frecuente obtener deflexiones del orden de los 3 m en el centro de la luz).

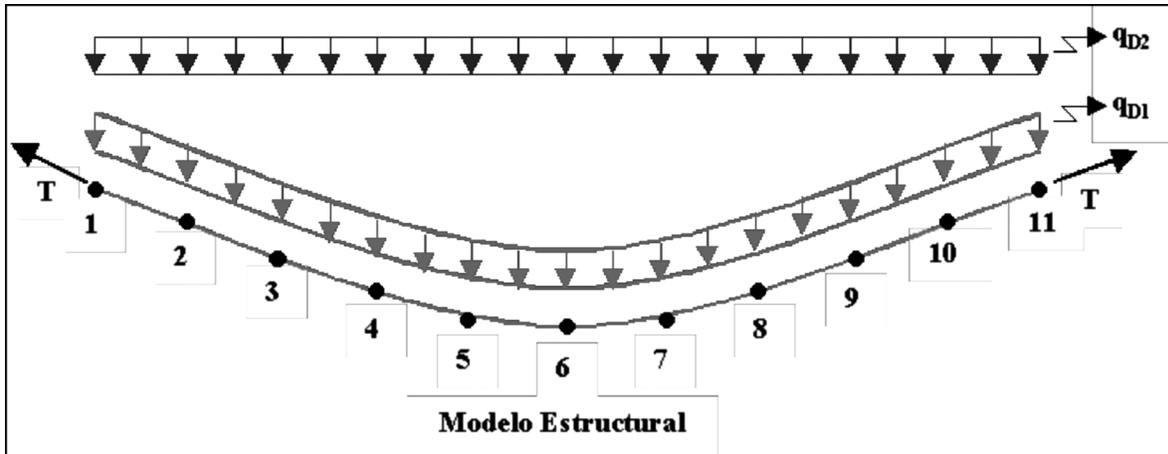


Figura 22 – Esquema de la modelación estructural

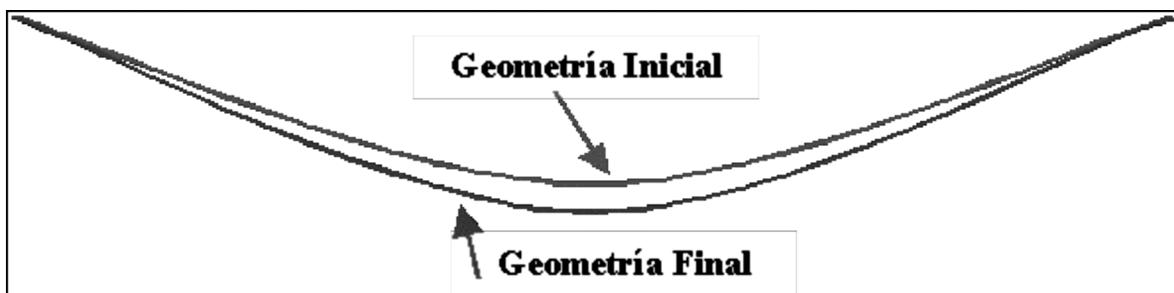


Figura 23 – Deflexiones inicial y final del cable

Si un cable cambia su flecha de 60 m a 63 m, la primera consecuencia lógica es que los esfuerzos en el cable serán diferentes (serán menores), por lo que podría convenir analizar la estructura con Teoría de Segundo Orden, o con varias Aproximaciones de Primer Orden hacia la geometría final del cable. Pero, este es el menor de los problemas en los cables estructurales de puentes colgantes. Junto con el cable descenderá toda la estructura los mismos 3 m, en el centro de la luz, lo que provocaría efectos indeseables.

Si durante la colocación del cable se lo tensa desde la zona de anclaje para que la flecha quede en 60 m (y no en 63 m en el presente ejemplo), el problema quedaría solucionado para esta fase. Es evidente que este proceso constructivo determinará la manera de realizar el análisis

y el diseño del cable y de toda la estructura. Si se compensa la deflexión, basta realizar el análisis con Teoría de Primer Orden

Nuevamente tendríamos deformaciones indeseables que podrían ser compensadas total o parcialmente mediante nuevos tensados de los cables desde la zona de anclaje. Para poder llevar a cabo este proceso será necesario que los cables no tengan un anclaje definitivo, sino provisional, durante las fases iniciales de la construcción.

Además deberá calcularse el efecto del tesado adicional del cable sobre la posición final de los restantes componentes estructurales, y las solicitaciones que podrían generarse sobre esos componentes.

Dependiendo de las fases de la construcción en que se realicen los ajustes de las flechas, el análisis estructural para ciertas cargas, y ciertos elementos, podrá ser realizado con Teoría de Primer Orden en lugar de Teoría de Segundo Orden.

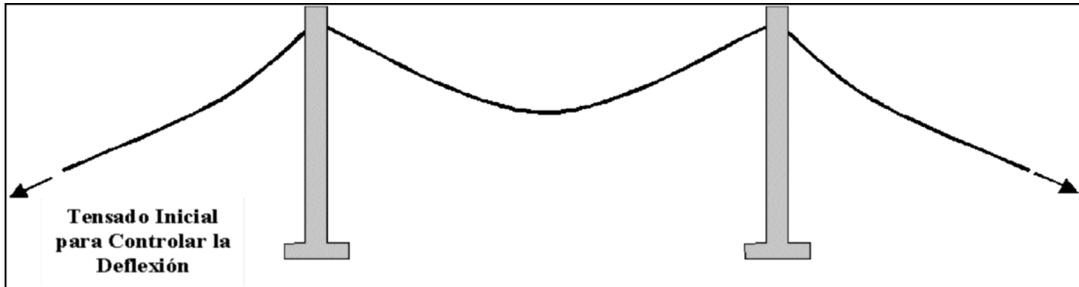


Figura 24 – Proceso constructivo, Tensado inicial

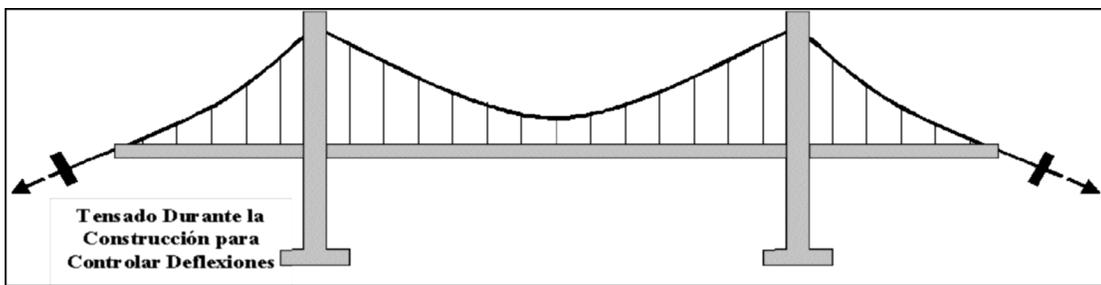


Figura 25 – Control de deflexiones, tensado durante la construcción

Cuando se colocan los tensores, las vigas transversales, las vigas longitudinales, las diagonales y contra diagonales, la estructura de soporte vehicular, y toda la carga permanente, se producen sucesivamente nuevas deflexiones tanto o más importantes que las provocadas por el cable.

Al igual que los cables principales, los tensores también pueden estar sujetos a pequeños ajustes de longitud, para controlar adecuadamente las deflexiones. Estos esquemas de construcción también tendrán su efecto sobre la manera de analizar la estructura.

Generalmente lo que se realiza en construcción es un tensado del cable durante su colocación, de modo que se produzcan contra flechas iniciales que compensen las flechas que se generarán posteriormente debido a las cargas permanentes. Este hecho facilita considerablemente el proceso constructivo.

Adicionalmente a esto se introduce geoméricamente, durante el diseño, una mayor elevación de la zona central de los puentes colgantes (estructura de soporte vehicular), con el objeto de que durante las fases de máxima carga viva, las deflexiones naturales en este tipo de estructuras pasen desapercibidas para los usuarios.

En todo caso, el efecto de las cargas vivas sobre la estructura deberá ser analizado con Teoría de Segundo Orden, pues para esas instancias el anclaje definitivo ya deberá haber sido realizado.

Es evidente que las actividades de ajuste realizadas durante la construcción tienen influencia decisiva sobre el Análisis y Diseño Estructural. Así mismo, las hipótesis de análisis y diseño deben transformarse en actividades clave durante la construcción.

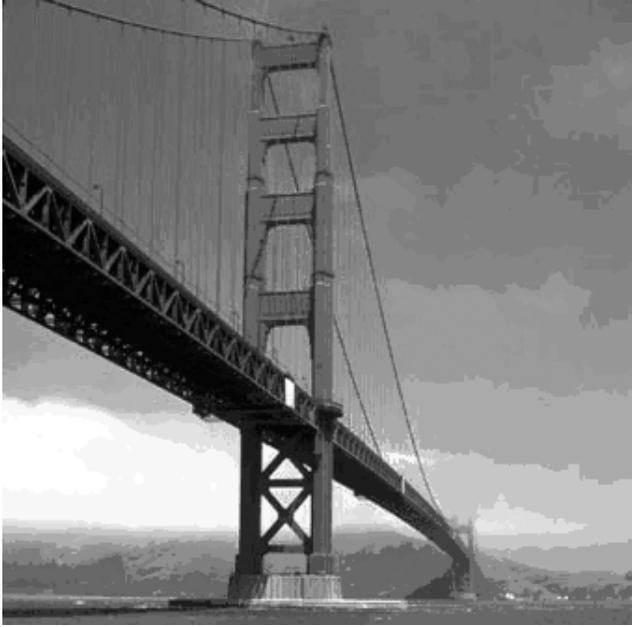


Figura 26 – Puente Golden Gate San Francisco

En definitiva, deberán manejarse diferentes modelos estructurales que tomen en consideración el comportamiento de cada elemento estructural durante la fase de construcción. Esos modelos ocasionalmente podrán ser planos pero conforme avance el proceso constructivo se convertirán en modelos tridimensionales.

Otro aspecto primordial dentro del análisis y diseño de puentes colgantes constituye la necesidad de tomar en consideración los efectos dinámicos causados por el viento. Los puentes colgantes son particularmente sensibles a las oscilaciones, por lo que normalmente se requieren redistribuciones de masas y ajustes de rigideces laterales para disminuir los efectos dinámicos a magnitudes manejables.

Desde el punto de vista constructivo, el manejo de los grandes pesos que tienen los cables principales constituye un serio limitante, particularmente para nuestro país. Otro problema serio constituye la infraestructura necesaria para poder realizar el tesado progresivo de los cables hasta realizar su anclaje definitivo.

Los detalles constructivos constituyen otro problema en nuestro medio. Durante el diseño se deben tomar muchas de las decisiones sobre la construcción.

¿Se utilizarán elementos prefabricados?, ¿Se colocarán varios cables en cada uno de los extremos de las torres de sustentación?

6. CONCLUSIONES GENERALES SOBRE LOS PUENTES COLGANTES

El diseño y la construcción de puentes colgantes es una alternativa válida para puentes de grandes luces. La implementación en nuestro país de este tipo de puentes debe incluir un cambio en la manera tradicional de mirar el diseño y la construcción como actividades separadas e independientes dentro de la práctica ingenieril, convirtiéndolas en actividades íntimamente ligadas.

La incorporación de nuevas tecnologías, como la requerida para construir puentes colgantes de luces mayores, requiere la creación de una infraestructura costosa y el manejo de estas tecnologías al momento no existen en nuestro país.

BIBLIOGRAFIA

COLIN O' Connors

Pontes – Superestructuras. 2ed.
Rio de Janeiro, Universidad de São Pablo, 1996

PFIEL, WALTER

Pontes em Concreto Armado. 3ed.
Rio de Janeiro-Brasil Livros Tecnicos e Científicos,v.2

M. S., Troitsky DSc.

Cable – Stayed Brigdes

W. Podolny, J. B. Scalzi

Construcction and Design of Cable Stayed Brigdes

SUBIETA Otarola, Alfonso

Hormigón Prensado. 2ed.
La Paz Bolivia, Talleres de Artes Gráficas, 2000

TIMOSHENKO, S

Resistencia de Materiales
España, Espasa-Calpe, 1990.