



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

.....  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ARAGON

“PREDIMENSIONAMIENTO DE LA  
GEOMETRIA DE CABEZAL EN MARCOS DEL  
DISTRIBUIDOR SAN ANTONIO”

TRABAJO ESCRITO EN OPCION DE  
DESARROLLO DE UN CASO PRACTICO  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:  
ARACELI MEJIA RAMOS

ASESOR:  
ING. GILBERTO GARCIA SANTAMARIA GONZALEZ



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

Profesional no es el que obtiene un título,  
sino el que sabe valorar a los demás por lo que son.

Madre es quien tiene su corazón abierto,  
para acoger, esperar comprender  
Madre es quien se cubre de paciencia,  
abnegación, esperanza.  
Madre es quien escucha, ayuda, aconseja.  
Tú eres una madre de todo corazón,  
por eso en este día tan especial te agradezco  
todo lo que has hecho por mi,  
para lograr lo que soy.

La verdad es que amamos la vida,  
no porque estemos acostumbrados a ella,  
sino porque estamos acostumbrados al amor,  
la juventud es el regalo de la naturaleza,  
la edad madura es una obra de arte.  
Gracias Ing. Luis Cabrera Lievano  
Por tu gran apoyo, amistad y confianza.

Un amigo es el que da lo mejor de si mismo,  
Esta en las buenas y en las malas situaciones  
hace ver tus errores y alienta a ser mejor cada día.  
Gracias Mauricio Quiroz S.

Agradezco en general a todas las personas que me han brindado su apoyo en mi vida académica y personal, a sus sabios consejos que en su momento supieron dar para la conclusión de este ciclo profesional. En especial a Blanca González Mijares, Familia Ballesteros e Ing. Leticia Baños L.



# **PREDIMENSIONAMIENTO DE LA GEOMETRIA DE CABEZAL EN MARCOS DEL DISTRIBUIDOR SAN ANTONIO**

## **INTRODUCCION**

### **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **II. DESARROLLO Y METODOLOGIA**

### **III. RESULTADO**

### **IV. CONCLUSIONES**



## INTRODUCCIÓN

En la ciudad de México, hoy en día la tendencia del diseño de puentes consiste en construir elementos de mayores dimensiones, con lo que es posible espaciar los apoyos. Los puentes han logrado el objetivo de proporcionar continuidad a las vías rápidas resolviendo puntos conflictivos por donde fluyen vialidades de tránsito intenso, con base en esta idea, se trazó el Distribuidor San Antonio, desarrollando las soluciones más adecuadas en cada caso.

En este documento se pretende definir a nivel de prediseño, las características esenciales que debió cumplir la estructura, lo que generó diversas alternativas, como son: el de un péndulo invertido (formado por un par de columnas que forman marco en la dirección longitudinal y están en volado en la dirección transversal, lo que semeja un árbol) o un sistema de continuidad hiperestática (en dirección transversal, presenta un par de columnas donde se asienta un cabezal). Con el fin de identificar posibles problemas en su adopción una vez seleccionada la opción más conveniente, se lleva a cabo el planteamiento de la geometría de un cabezal tipo, cabe mencionar que nos referimos a un elemento de la subestructura que recibe directamente las descargas provenientes de la superestructura para transmitir las a las columnas, presentando una excentricidad entre el eje de la trabe que soporta la pista de rodamiento y el eje de columna cuando excede dos o más veces la dimensión de la columna.

La elección de una forma estructural, implica la elección del material con que se piensa construir la estructura. Al hacer esta elección se debe tomar en cuenta las características de la mano de obra y del equipo disponible, así como el procedimiento constructivo más adecuado para el caso.

Se elige provisionalmente una estructuración; se idealiza para estudiar los efectos de las acciones a las que puede estar sometida; después se realiza un análisis estructural donde se determinan las fuerzas internas en los elementos de la estructura, lo cual implica un conocimiento de las acciones que actúan sobre la misma y las dimensiones de dichos elementos. Estos datos son imprecisos cuando se inicia el diseño, ya que sólo se conocen en forma aproximada las dimensiones que tendrán los elementos que influyen en el peso de la estructura y en el comportamiento estructural del conjunto.

Por último se procede a definirla a detalle revisando de manera refinada todas las etapas del proceso constructivo, aun aquí es necesario con frecuencia recorrer más de una vez las diversas etapas, ya que, algunas de las características son supuestas.



## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El objetivo del proyecto del Distribuidor San Antonio es resolver el problema de tránsito vehicular que actualmente existe al poniente de la Ciudad de México, específicamente sobre el Periférico Arco Poniente desde Av. San Antonio hasta Av. San Jerónimo, logrando con esto proporcionar continuidad a las vías rápidas, resolviendo puntos conflictivos por donde fluyen vialidades de tránsito intenso. Se planteo una adecuada distribución de ramas adyacentes a la vía principal para ascenso y descenso del viaducto elevado, basado en los requerimientos del proyecto geométrico y estructural.

Se proporcionaron soluciones que, por medio del aprovechamiento óptimo de los materiales y de las técnicas constructivas disponibles cumpliendo con las restricciones impuestas por los otros aspectos del proyecto, dan lugar a un buen comportamiento de la estructura en condiciones normales de funcionamiento de la obra y a una seguridad adecuada contra la ocurrencia de acciones accidentales.

Entre las acciones o cargas que deben considerarse en el diseño están: los efectos del tránsito de vehículos sobre el puente, viento, sismo, cambios de temperatura y otros, para los cuales deben adoptarse los valores y criterios de diseño especificados por el AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), RCDF (Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal) y Normas Técnicas Complementarias para Diseño Construcción de Estructuras de Concreto, cuando sea aplicable al respecto.

Adicionalmente, el proyecto requiere del conocimiento de las características del subsuelo de las que dependerá la elección del tipo de cimentación y frecuentemente del tipo de estructura. La estructura se clasifica por el tipo de construcción según el Reglamento de Construcciones del Gobierno del Distrito Federal dentro del grupo A y respecto al mapa de regionalización sísmica el tipo de suelo según su ubicación, la estructura se encuentra en un suelo tipo I (lomas).

Con el objeto de facilitar la construcción de la cimentación de cada uno de los tramos, se procedió a trazar en campo la planta de cimentación (zapatas y pilas), con la finalidad de verificar que ningún obstáculo (instalaciones hidráulicas - tuberías y cajas de conexión -, instalaciones eléctricas, vialidades principales y secundarias, instalaciones telefónicas, PEMEX, fibra óptica, vías de ferrocarril, monumentos, árboles, etc.) interfiriera con la excavación y construcción de cada uno de los elementos de la cimentación, en caso contrario sería necesario reubicarlas según proyecto y especificaciones de cada dependencia previa aprobación de la supervisión.



Por lo mencionado, se estudiaron varias soluciones factibles en las cuales se pretende definir de manera clara las funciones que debe cumplir la estructura, las restricciones que impone el entorno físico y de las que fijan otros aspectos del proyecto, es necesario tener datos al menos preliminares sobre condiciones del sitio y requisitos de proyecto, las características esenciales de la estructuración con diversas alternativas todo esto con el fin de identificar posibles problemas. Además, de poder cuantificar sus partes y llegar a una estimación de los costos de las diversas soluciones, teniendo que no sólo se toma en cuenta el costo, si no también, la eficacia con la que ésta se adapte a los aspectos del proyecto, la facilidad de obtención de los materiales, la rapidez y grado de dificultad de las técnicas de construcción involucradas, desarrollando las soluciones más adecuadas en cada caso; como el diseño estructural de los puentes con criterios capaces de soportar las cargas definidas en reglamentos, tanto vehiculares, como de sismo y de movimientos diferenciales por hundimientos de la cimentación, etc., por lo que se tienen dos soluciones como veremos a continuación:

- Una solución idónea, fue la del Apoyo Tipo "A" (figura 1) que es una estructura más económica, trabaja como un péndulo invertido. Este apoyo consiste en dos columnas conectadas cada una a una zapata por medio de un candelero, la zapata a su vez es soportada por pilas y sobre las columnas se asienta una trabe cajón presforzada TA, la cual es conectada a la columna y se postensa la conexión. Longitudinalmente se forma un marco con las dos columnas y la trabe TA, el cual soporta las cargas muertas y vivas, además de las fuerzas sísmicas longitudinales. Transversalmente las columnas están en volado y soportan las fuerzas sísmicas en esa dirección.

El apoyo tipo A puede trabajar de forma excéntrica, siendo el mismo sistema descrito con anterioridad, con la diferencia de que el eje de la pista de rodamiento tiene una excentricidad de hasta 1 m al eje de la trabe sobre columnas.

Por requerimientos geométricos de trazo del viaducto elevado y la gran cantidad de interferencias de las vialidades a nivel de piso, las columnas se movieron a lugares donde no interfirieran, surgiendo una estructura que soporta la trabe que forma la pista de rodamiento del puente fuera del eje de la columna a distancias variables de 1m a 8m, con esto surge otra solución,

- Apoyo Tipo "M", (figura 2), consiste en dos columnas dispuestas transversalmente, por cada una de éstas existe una zapata que a su vez es soportada por pilas, las conexiones entre ambos son monolíticas, salvo ciertas excepciones; sobre el par de columnas se asienta un cabezal, se realiza la conexión entre estos elementos y se postensa el cabezal. A continuación se apoyan una trabe TCA sobre el cabezal;



posteriormente se conecta la trabe al cabezal por medio de un colado y varillas de refuerzo. Este tipo de conexión es capaz de tener un comportamiento similar al de una unión monolítica. Después de la conexión de las trabes TCA con la columna o con el cabezal se precede al montaje de las trabes TC o TCA, montaje de tabletas y por último al colado del firme estructural o de la losa tapa de tabletas. Longitudinalmente existe una continuidad entre columna y trabe, a su vez ésta se apoya isostáticamente en su otro extremo en una trabe, la retícula formada soporta las cargas muertas, cargas vivas y las fuerzas sísmicas longitudinales. En la dirección transversal se forma un marco, el cual soporta las cargas muertas, cargas vivas y las fuerzas sísmicas transversales.

Una vez seleccionada la opción más conveniente, se procede a definirla hasta su detalle, realizando de manera refinada todas las etapas del proceso, aun aquí es necesario con frecuencia recorrer más de una vez las diversas etapas.

### Dimensiones de Elementos y su Función

Las estructuras estudiadas se componen principalmente de los siguientes sistemas estructurales:

- *Pilas.* Son de concreto reforzado colado en sitio,  $f'c= 250 \text{ kg/cm}^2$ . Tienen sección circular con diámetros de 80 cm y en pocos casos de 60 cm, según la zona geotécnica donde se ubiquen y las descargas de cimentación. Su nivel de desplante varía entre 32 y 15 metros, teniendo la mayor cantidad 22 m.
- *Zapatas.* Losas macizas de cimentación de concreto coladas en dos etapas, la primera con concreto reforzado con  $f'c= 350 \text{ kg/cm}^2$ , y la segunda con concreto presforzada con  $f'c= 600 \text{ kg/cm}^2$ . Su peralte total es de 3 m, la primera etapa se cuelan 2.65 m y la segunda 35 cm. Su sección en planta es rectangular, sus tamaños varían de 3.75x3.75 m a 3.95x5.75 m, por lo general. El nivel de desplante de zapatas es de 3.5 m bajo el nivel del terreno. Existen también algunas zapatas prefabricadas con  $f'c= 600 \text{ kg/cm}^2$ , cuyas dimensiones y desplante tienen las mismas características que las coladas en sitio.
- *Candelerero.* Hueco en la cimentación, en el cual penetra el dado de la columna para empotrarse por medio de un colado vaciado en la holgura del candelerero y el dado, de una mezcla de concreto con características especiales.  
Consta de una losa de fondo y cuatro paredes estos elementos confinan los lados del dado y su fondo. En la losa de fondo del candelerero se ubica una placa que recibe el tornillo nivelador del dado de la columna, con la finalidad de dar el nivel fino requerido del proyecto, además de permitir que la mezcla de concreto penetre en esas dos





caras. Debe de existir una holgura de 4 a 10 cm entre paredes de dado y paredes internas de candelero.

La losa soporta la reacción vertical de la columna y las paredes resisten el par (momento) de empotramiento de la columna.

- *Columnas.* Elementos de sección oblonga y en ocasiones circulares, de concreto prefabricado, reforzado y pretensado; aunque en ocasiones especiales, el concreto es colado en sitio y postensado;  $f'c= 600 \text{ kg/cm}^2$  en todos los casos. Sus dimensiones transversales pueden ser de 110x150, 150x180, 140x320, 150x220, 180x240, 180x320, 200x320 y circular de 180; y sus alturas varían entre 4 y 22 metros.
- *Cabezales.* Miembro de sección aproximadamente trapezoidal de concreto prefabricado presforzado,  $f'c= 600 \text{ kg/cm}^2$ . Su peralte varía de 220 cm a 360 cm en promedio, con un ancho superior de 200 cm e inferior de 135 cm; y una longitud que varía entre 10 y 30 metros. El paño superior es recto y el inferior curvo, visto longitudinalmente. En segunda etapa se postensa para lograr un comportamiento adecuado en condiciones de servicio del elemento y de sus conexiones con la columna.
- *Trabe de Rigidez.* Elemento de sección aligerada, aproximadamente trapezoidal, de concreto reforzado colado en sitio,  $f'c= 600 \text{ kg/cm}^2$ . Su peralte es variable de 150 a 300 cm con un ancho superior de 150 cm e inferior de 100 cm. Tiene una longitud aproximada de 15 metros.
- *Trabe TAU.* Trabe “U” de concreto presforzado,  $f'c= 600 \text{ kg/cm}^2$ . Tiene un peralte constante de 195 cm y un ancho superior de 605 cm, su longitud es de 28 metros. Se divide en tres tramos principalmente, un volado izquierdo de 6.50 m, un tramo central entre columnas de 15 m y un volado derecho de 6.50 m. Los extremos de su tramo central se conectan con las columnas o con cabezales.
- *Trabe TCAU.* Trabe “U” de concreto presforzado,  $f'c= 600 \text{ kg/cm}^2$ . Tiene un peralte constante de 160 cm y un ancho superior de 605 cm, su longitud varía de 15 a 33 metros. Se divide en dos tramos principalmente, un volado izquierdo de 2.5 m y un tramo de 30 m. De un lado se conecta con las columnas o con los cabezales y en el otro extremo se apoya isostáticamente sobre una trabe TA o TCA.
- *Trabe TCU.* Trabe “U” de concreto presforzado,  $f'c= 600 \text{ kg/cm}^2$ . Tiene un peralte constante de 195 cm y un ancho a nivel superior de 605 cm, su longitud varía de 18 a 30 metros. Se apoya isostáticamente sobre las trabes TAU o TCAU.
- *Tableta.* Losa con dos nervaduras, de concreto presforzado,  $f'c= 450 \text{ kg/cm}^2$ . La losa tiene un peralte constante de 8 cm y las nervaduras varían de 25 a 38 cm. La longitud



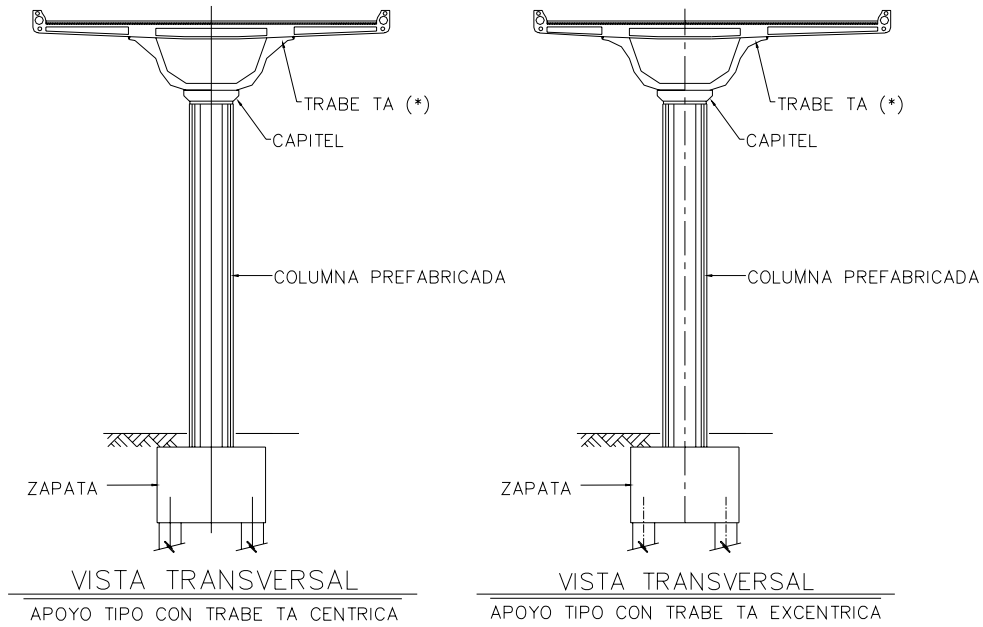
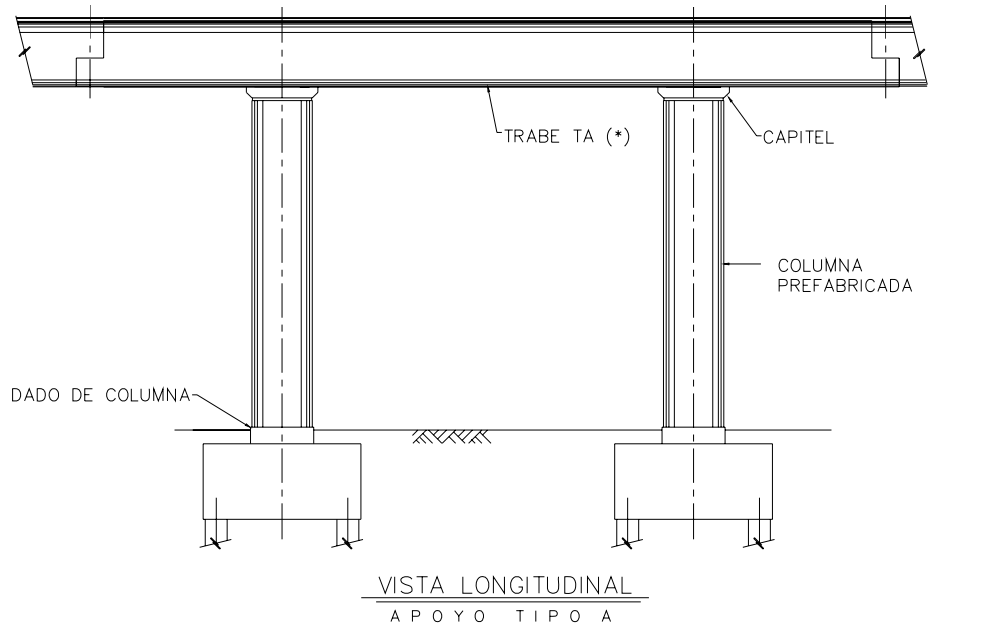
---

de la tableta varía de 13 a 15 metros, con un ancho constante de 3 metros. Se apoya sobre las traveses “U” para formar las traveses cajón compuestas TAU, TCU y TCAU.

- *Losa tapa de tabletas.* Incluye la losa tapa sobre nervaduras de tabletas y tramos de nervaduras adicionales para dar pendiente a la losa tapa, es colada en sitio con concreto reforzado de  $f'c = 450 \text{ kg/cm}^2$ . Su peralte varía en losa de 15 a 12 cm y en nervaduras tiene un espesor de 20 cm con un peralte variable según requerimientos de proyecto geométrico, por las sobre elevaciones en tramos curvos.



“PREDIMENSIONAMIENTO DE LA GEOMETRÍA DE CABEZAL EN MARCOS DEL DISTRIBUIDOR SAN ANTONIO”



F I G U R A 1  
 A P O Y O T I P O A

(\*)

(\*) SISTEMA PATENTADO



"PREDIMENSIONAMIENTO DE LA GEOMETRÍA DE CABEZAL EN MARCOS DEL DISTRIBUIDOR SAN ANTONIO"

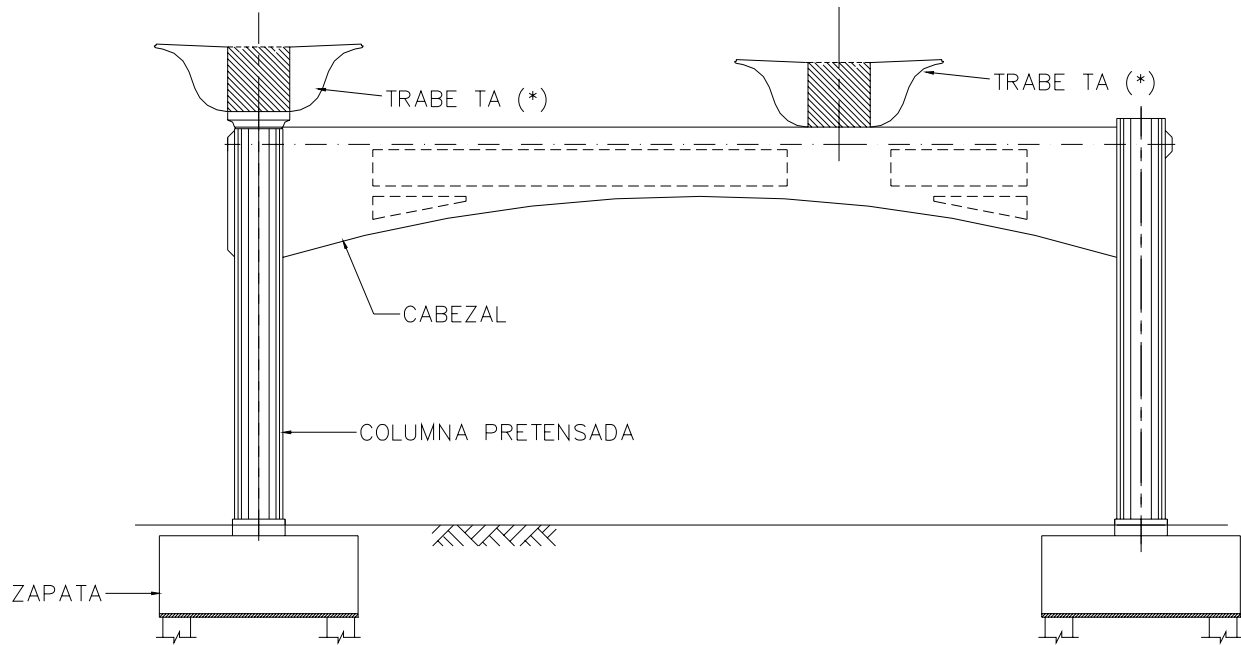


FIGURA 2

APOYO TIPO "M"

(\*)

(\*) SISTEMA PATENTADO



## II. DESARROLLO Y METODOLOGÍA

Después de citar en el capítulo anterior, los problemas que existieron en la definición de las estructuraciones por aplicar en el proyecto y mencionar los sistemas que se estudiaron además de describir los elementos que componen los apoyos. El tipo de apoyo o estructuración que contiene al elemento objeto de este trabajo es el Apoyo Tipo “M. Varios puntos se tomaron en cuenta para poder analizar y diseñar el cabezal, como veremos a continuación:

- Geometría de la estructura.
- Propiedades mecánicas de los materiales.
- Las cargas a las que está sujeta y condiciones de apoyo (análisis).
- Estética.
- Ligereza (montaje).
- Procedimiento constructivo (factible).
- Economía.

### Geometría de la estructura

Para la estructura en cuestión, la solución da énfasis en lograr un aspecto estético en su forma por el gran impacto visual que tendrá sobre los transeúntes. El objetivo del cabezal que soportar las traveses que forman la pista de rodadura del puente fuera del eje de la columna con distancias variables de 1m a 8m, a base de un sistema prefabricado tomando en cuenta la ubicación de las traveses sobre éstos, la ubicación de preesfuerzo y el anclaje en las conexiones siendo esta zona totalmente rígida, ya que la columna nos da un momento continuo.

La continuidad entre el cabezal, columnas y trabe produce hiperestaticidad, lo que hace a la estructura más rígida y determina la forma de la distribución de momentos, permitiendo soluciones más económicas. La diferencia entre el momento negativo en el eje y en el paño de la columna es significativa, conviene diseñar para el momento que se presenta en el paño, el incremento de rigidez en esta zona produce un aumento en el momento negativo y una disminución en el positivo por el mayor empotramiento que tiene.

Para materiales y formas estructurales en las que es práctico variar la resistencia y de momento positivo a negativo, de una a otra sección; como es el caso, con el concreto reforzado, es posible dimensionar las secciones principales para que su resistencia sea



proporcional al diagrama de momentos, que es válida en condiciones de servicio pero que se aproxima a la que puede esperarse en condiciones últimas.

La rigidez relativa del cabezal y las columnas, determina la forma de la distribución de momentos. El dimensionamiento de una viga isostática de sección rectangular y resistencia constante estaría regido por el momento positivo en el centro del claro para carga concentrada.

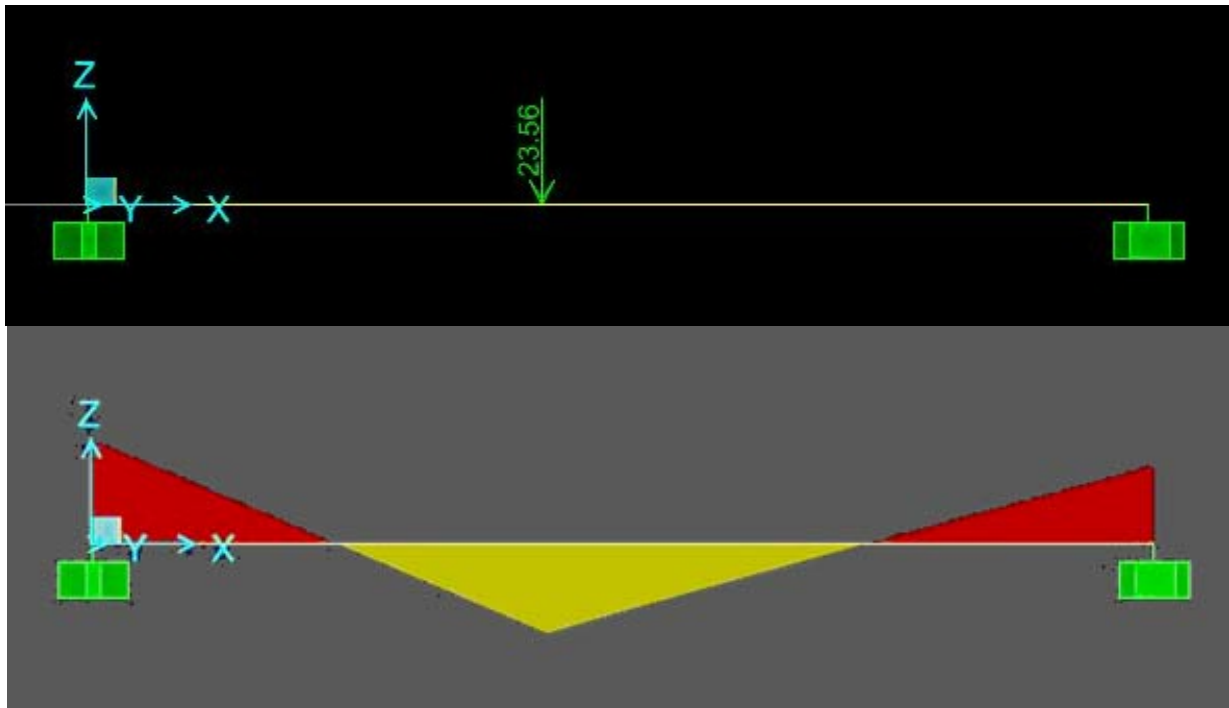
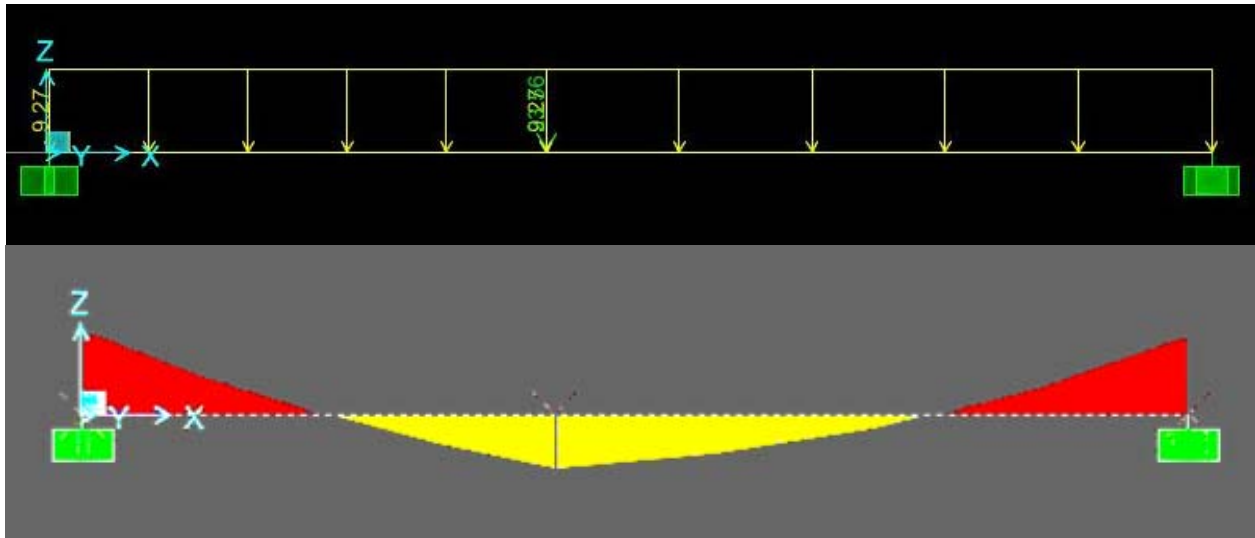


Figura 3(a). Diagrama de momentos para carga concentrada.

Si a los extremos de dicha viga, le damos continuidad con las columnas, podemos observar en la *Figura 3(a)* que como no es un empotramiento completo, el momento positivo es similar o mayor que el negativo, requeriríamos igual sección para momento negativo que para positivo, lo que nos dirigiría a una sección rectangular constante del cabezal.

Para el caso de una carga uniformemente distribuida y la viga continua con columnas, su comportamiento estará regido por el momento negativo en los extremos del claro, como se muestra en la *Figura 3(b)*, teniendo que el momento positivo es menor que el negativo, provocando con esto, que la sección para momento negativo deba ser más grande que para la sección con momento positivo, lo que nos originaría a una sección variable del cabezal.



*Figura 3(b). Diagrama de momentos para carga uniformemente distribuida.*

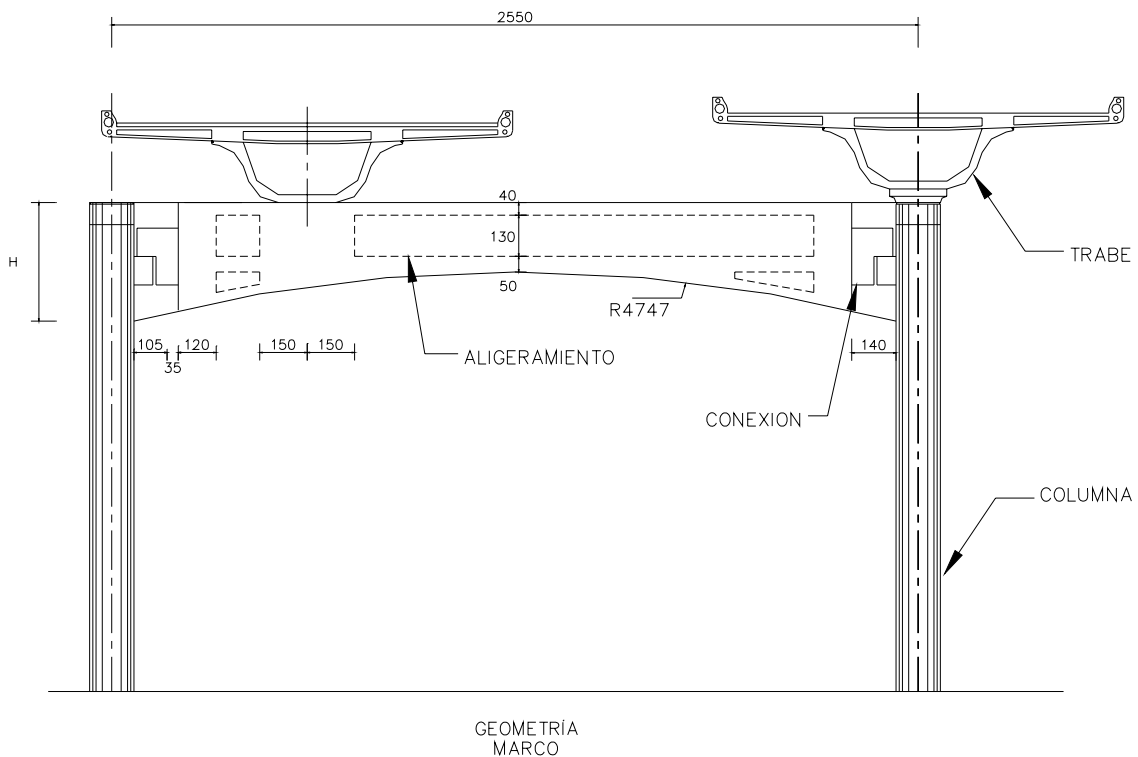
Por lo anterior, se propuso una geometría de cabezal que fuera, cada una de sus secciones, lo suficientemente resistente para cubrir los requerimientos del diagrama de momentos y de estética, permitiendo con ésto optimizar el peralte; haciéndola más ligera para el montaje y conservando la rigidez suficiente para cumplir con los requerimientos de condiciones de servicio del elemento, *Figura 4*.

Además, después de obtener una sección aproximadamente trapezoidal de peralte variable, se determinaron dos tipos de secciones transversales para el cabezal con el objeto de aligerarlo. Una sección maciza y otra aligerada fueron estudiadas, cuyas ubicaciones dependen de la posición de descarga de la trabe tipo “U”, de la trayectoria del preesfuerzo y del el anclaje del refuerzo en las conexiones, *Figura 5*.

La sección maciza se utilizó en las zonas de conexiones cabezal-columna y trabe-cabezal, y la aligerada en las demás secciones. La sección aligerada se dimensionó de tal manera que sus losas, inferior o superior o intermedia, tuvieran el tamaño suficiente, ya sea para soportar la compresión del par resistente o para alojar el acero de refuerzo y de presfuerzo que está en tensión, además sus paredes laterales con el ancho suficiente para soportar el flujo de cortante originado por tensión diagonal (cortante) y torsión. El material aligerante empleado fue el polietileno.

Para proporcionarle la resistencia requerida al cabezal, se hizo de concreto reforzado, pretensado y postensado. Se empleo el concreto, porque requiere de poco mantenimiento, es moldeable, resistente y modula con las demás estructuras empleadas en el viaducto elevado y de concreto reforzado para resistir parte de la flexión, el cortante y la torsión,

además de tomar los cambios de temperatura y mejorar el comportamiento del elemento en condiciones de servicio. Se utilizó concreto presforzado, para soportar las acciones en el cabezal en las etapas de montaje, construcción y parte de las acciones de servicio, así como reducir agrietamientos y deflexiones en estas etapas. Se aplicó concreto postensado, para contribuir a la resistencia y comportamiento (deflexiones, grietas, vibraciones) del cabezal en condiciones de servicio, así como el de la conexión cabezal-columna.



*Figura 4. Geometría de cabezal*

(\*)

(\*) SISTEMA PATENTADO



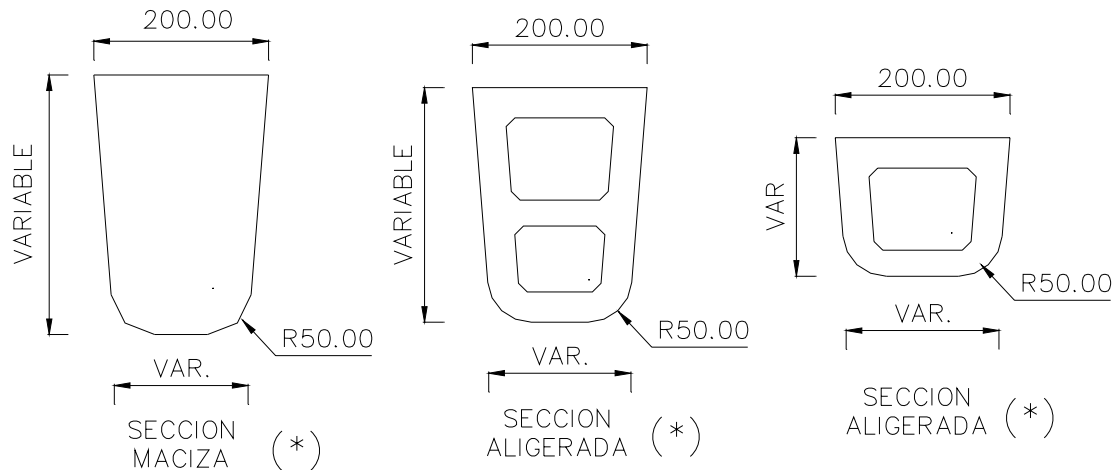


Figura 5. Geometría de cabezal

## Principales materiales empleados

La cimentación está construida en dos partes, una de concreto reforzado y la otra de concreto presforzado, las columnas son de concreto reforzado y presforzado; los cabezales en primera etapa, son de concreto pretensado y en segunda etapa se postensan; las traveses son de concreto pretensado sobre las cuales se colocan tabletas pretensadas, que forman la pista de rodadura de la vialidad.

## Materiales

El concreto presforzado ha demostrado ser técnicamente ventajoso, económicamente competitivo y estéticamente excelente, para puentes; desde las estructuras de claros muy cortos que emplean componentes precolados estándar, hasta las traveses de sección cajón continuas con longitudes de grandes claros.

El concreto presforzado es conveniente, por que, mejora la resistencia, el comportamiento bajo carga de servicio, el control del agrietamiento y la deflexión; también permite la utilización de materiales eficientes de alta resistencia y provoca miembros de menores dimensiones y más ligeros; reduce la relación de carga muerta a la viva, aumenta los claros y amplía considerablemente la gama de aplicaciones posibles del concreto estructural.



El concreto es un material que trabaja a compresión principalmente. El presforzado del concreto implica la aplicación de una carga compresiva previa a la aplicación de las cargas de diseño, en forma tal que reduce o elimina los esfuerzos de tensión que de otra forma se presentarían

Para el control del agrietamiento y la deflexión bajo las cargas de servicio el presforzado se emplea aceros y concretos de alta resistencia, en forma eficaz y económica.

Se empleó el concreto de clase 1 (cuando la resistencia especificada sea igual o mayor a 250 kg/cm<sup>2</sup>), según el RCDF, para los elementos estructurales, las características de acuerdo al elemento son las siguientes:

Elemento	f'c [kg/cm <sup>2</sup> ]	E [kg/cm <sup>2</sup> ]	G [kg/cm <sup>2</sup> ]
Pilas	250	221359	88544
Zapatas	350	261916	104766
Columnas	600	342929	137171
Trabes de rigidez	600	342929	137171
Cabezales	600	342929	137171
Tabletas y sus losas	450	296985	118794
Trabes TA, TC y TCA	600	342929	137171
Firme estructural	300	242487	96995

donde

- f'c Resistencia especificada del concreto a compresión.
- E Módulo de elasticidad del concreto.
- G Módulo de cortante del concreto.

El acero de refuerzo empleado tiene un esfuerzo de fluencia de  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$  y un módulo de elasticidad de  $E_s = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ .

El acero estructural de los accesorios tiene un esfuerzo de fluencia de  $f_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$  y un módulo de elasticidad de  $E_s = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ .

Se consideraron los siguientes pesos volumétricos: suelo de relleno de  $1.6 \text{ ton/m}^3$ , concreto de  $2.4 \text{ ton/m}^3$  para elementos reforzados y  $2.5 \text{ ton/m}^3$  para presforzados, y del asfalto de  $2.0 \text{ ton/m}^3$ .



## Recubrimientos

Los recubrimientos considerados para los elementos estructurales fueron los siguientes:

E l e m e n t o	recubrimiento [cm]
Pilas	4
Zapatas	4
Columnas	4
Trabes de rigidez	3
Cabezales	3
Trabes TA, TC y TCA	3
Firme estructural	3

## Criterios de Diseño

### Reglamentos de Aplicación

Esencialmente se utilizaron:

- Las Especificaciones para Puentes del AASHTO (1996) para definir las acciones actuantes, factores de carga, factores de resistencia y procedimientos de revisión (flexocompresión, flexión, cortante, etc.) de elementos.
- Para definir los coeficientes sísmicos se empleo el Reglamento de Construcción para el Distrito Federal – RCDF - (1993) y las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo – NTCDS -.
- Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (1996).
- El Código del ACI (1999) se utilizaron para cubrir aspectos que el AASHTO no observa.
- Y en el diseño de accesorios metálicos se utilizó el Manual de Construcción en Acero del Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, A. C.



## Cargas Analizadas

Las acciones que se consideraron actuando sobre la estructura fueron las siguientes:

### + *Cargas Muertas*

- Peso propio de cabezal prefabricado y pretensado, (condición isostática).
- Carga muerta. El cabezal precolado en conexión con la columna se logra la continuidad entre los dos elementos formando un marco, en esta etapa se colocan ductos, cables y accesorios del postensado una vez alcanzada la resistencia de los concretos.
- Sobrecarga muerta. Se considera carga adicional por el montaje de trabes TA o TCA sobre columnas y cabezal; conexión de trabe con columna y de trabe con cabezal; y el postensado de conexiones mientras se alcanza la resistencia del concreto. En trabes cajón la sobrecarga debida al peso del firme estructural y el peso propio de las trabes TC o TCA sobre las TA o TCA; las tabletas sobre las trabes tipo “U” y la losa tapa sobre las tabletas, peso de la carpeta asfáltica, parapetos, guarniciones e instalaciones hidráulicas y eléctricas.

### + *Cargas Vivas.*

La carga viva sobre puentes se debe esencialmente a las fuerzas transmitidas por los vehículos que sobre ellos transitan. Su determinación depende del peso y de las características de los vehículos que pueden transitar sobre el puente, así como la distribución más desfavorable que es razonable esperar que se presente



Los valores que se asignan a estas cargas corresponde a vehículos idealizados que pretenden representar efectos de condiciones de tráfico desfavorables. En México y en muchos países se adoptan las cargas especificadas por la AASHTO las cuales se muestran esquemáticamente en la *Figura 6*, donde establecen dos tipos de vehículos: un camión de dos ejes, carga tipo H; y uno de tres ejes, carga tipo HS. Cada uno de estos vehículos deberá colocarse en la posición más desfavorable sobre el claro del puente. Otra carga a considerar es una uniforme más una concentrada en la posición más desfavorable, aplicada sobre cada carril. Para tomar en cuenta que la probabilidad de que se concentren cargas excepcionalmente altas sobre varios carriles es pequeña, esta carga uniforme se reduce a medida que aumenta el número de carriles.

En México la Secretaria de Comunicaciones y Transportes en base a las Normas sobre proyecto de nuevos puentes y estructuras similares consideran los modelos virtuales de cargas vivas denominados IMT 66.5 en caminos tipo ET, A, B y C y con IMT 20.5 en los secundarios, que aun no se frecuentan utilizar para el diseño de puentes. Los puentes de cuatro o más carriles pueden revisarse además para trenes de cargas más pesados llamados T3-S3 y T3-S2-R4. Se establecen restricciones al tránsito de vehículos cuyos pesos exceden de los especificados por estas cargas.

El paso de un vehículo sobre un puente causa vibraciones debidas a irregularidades de la superficie de rodamiento ocasionando incrementos en los efectos de las diferentes acciones sobre el puente, que dependen de la velocidad del vehículo, de las características de vehículo y de la flexibilidad y longitud del puente. El fenómeno es complejo y se recurre a un planteamiento que consiste en considerar un factor de impacto con el que se incrementan los efectos de las cargas vivas calculadas en forma estática. El factor de impacto se basa en algunas mediciones de las amplificaciones de las deflexiones al pasar vehículos a distintas velocidades. El factor de impacto depende exclusivamente del claro del puente, ya que al aumentar el claro la fluctuación de esfuerzos debidos a los



efectos dinámicos se reduce, porque la carga viva representa una fracción cada vez menor de la carga total.

El factor de impacto, según la fórmula de la AASHTO es

$$I = \frac{15}{L + 37.5} \leq 0.3$$

En que L es el claro del puente en metros.

Se presentan fuerzas horizontales por el arranque y frenado de vehículos en la dirección del eje del puente. El código citado especifica que deben tomarse una fuerza longitudinal igual a 20 por ciento del peso del vehículo de diseño. En puentes curvos la fuerza centrífuga produce empujes radiales que se consideran también de 20 por ciento del peso del vehículo. Estas fuerzas influyen en el diseño de los apoyos del puente.

La mayoría de los códigos para puentes incluyen solamente criterios de diseño por esfuerzos admisibles, con valores de estos esfuerzos menores que los usuales, el AASHTO incluye como opción un criterio de diseño por estados límite en que los factores de carga para carga viva son considerablemente mayores que los usuales (por ejemplo, se debe aplicar un factor de 2.17 a la carga viva HS20 incluyendo impacto). La razón de que los factores de seguridad resulten mayores para puentes se debe atribuir a la importancia de estas estructuras, variabilidad de las cargas vivas y a las consecuencias de su falla, así como a pretender indirectamente protección contra los efectos de fatiga.

Las cargas vivas móviles aplicadas a la estructura en este trabajo fueron las debidas a los siguientes camiones:

- Camión HS-20 y carga de línea HS-20, obtenidas del AASHTO.



- Camión T3-S2-R4 y camión T3-S3, según SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes).

Estas cargas de camiones se aplicaron en varias posiciones a lo largo de la pista de rodamiento, tanto en dirección longitudinal como transversal, llenando todos los carriles o considerando sólo algunos con camiones. Lo anterior, con el objeto de determinar los máximos elementos mecánicos en cada sección de la estructura por diseñar, por ejemplo:

- Se ubicaron los camiones en una posición que originan los máximos momentos flexionantes en el volado de la trabe TA.
- Donde provoca el máximo cortante a la trabe TC.
- Máximo momento transversal en la base de columna, ésto ocurre generalmente cuando los camiones se ubican en uno o dos carriles solamente.



## TIPOS DE CARGAS POR APLICAR POR CARRIL

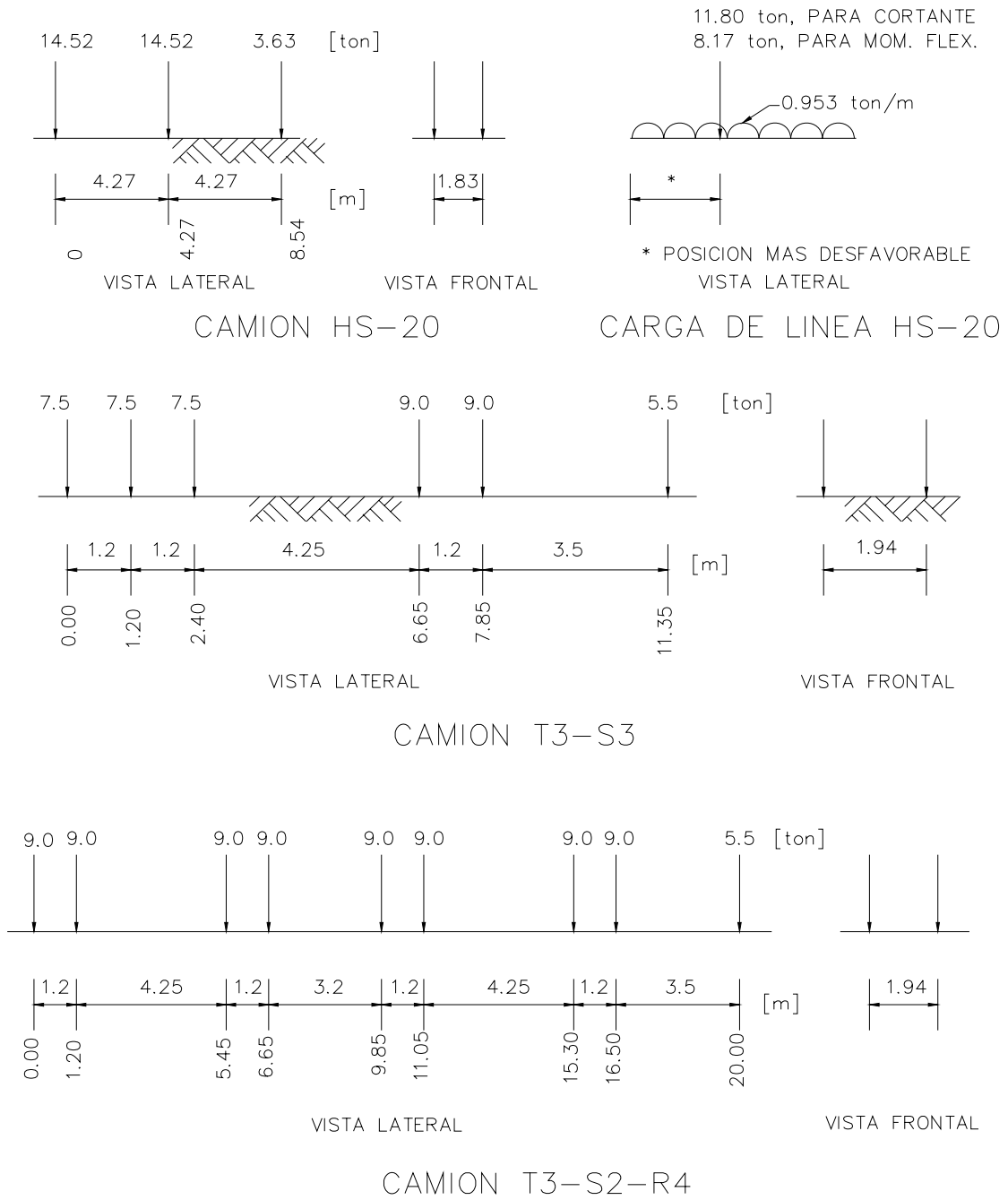


Figura 6. Tipo de cargas por aplicar por carril.





---

+ *Cargas Accidentales.*

Después de revisar los efectos de varios tipos de cargas accidentales sobre la estructura, se llegó a la conclusión que, las cargas sísmicas rigen sobre las otras, fundamentalmente por el tipo de estructuración empleada y por la zona sísmica donde se ubica la obra. Los criterios para determinar las acciones sísmicas fueron los siguientes:

- El factor de ductilidad o de comportamiento sísmico adoptado para todos los apoyos fue  $Q = 2.0$  en todas direcciones, además se clasificó la estructura dentro del Grupo A según RCDF con lo cual se incremento el coeficiente sísmico un 50%.
- Se tomaron en cuenta los efectos bidireccionales del sismo del 100% en una dirección con el 30% en las otras direcciones.
- Se determinaron tanto las cargas sísmicas estáticas, como las dinámicas.
- Las cargas estáticas se calcularon en dirección longitudinal y transversal. Se determinó el cabeceo estático en los casos donde se presenta según el procedimiento de péndulos invertidos definido en NTCDS. Se aplicó la reducción de fuerzas cortantes, definida también en las normas mencionadas.
- Las acciones dinámicas se obtuvieron en dirección longitudinal, transversal y vertical, esta última dirección para considerar el efecto del cabeceo dinámico.
- Para la obtención de la carga sísmica, adicional a lo fijado por el ASSHTO, se considero el 70% de la carga de línea HS-20 actuando en ese instante a lo largo de toda la longitud tributaria del apoyo y en



todos los carriles, lo que provocó un aumento de masa de la estructura por lo tanto un incremento en los elementos mecánicos debidos al sismo.

+ *Empujes del Suelo.*

Empuje activo del terreno sobre la estructura.

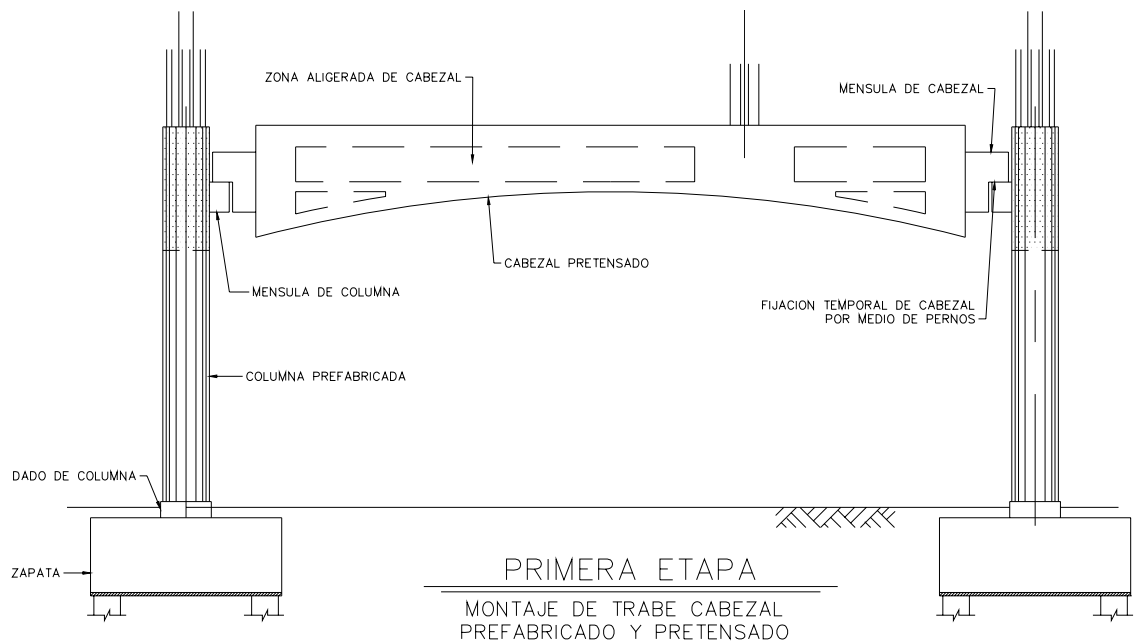
### **Análisis Estructural**

Las fuerzas y momentos internos (elementos mecánicos) producidos por las acciones a que están sujetas las estructuras (apoyos), se determinaron por métodos que suponen un comportamiento elástico lineal. Para la determinación de elementos mecánicos de diseño más apropiados para el dimensionamiento o revisión de elementos de la estructura se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- Los apoyos de la estructura se analizaron tridimensionalmente considerando la interacción suelo–estructura.
- El análisis estructural se hizo por el método de las rigideces y se aplicó un análisis modal espectral para determinar la respuesta dinámica de la estructura ante un sismo.
- Se consideraron los efectos P-delta en la estructura.
- Se idealizaron varios modelos del viaducto elevado en tramos de 200 metros de longitud los cuales estuvieron formados por diferentes tipos de apoyo (estructuraciones), ésto para estimar la influencia de la diferencia de rigideces entre ellos y así poder evaluar con más exactitud las cargas que soporta cada uno.
- Para el diseño de elementos (cimentación, columnas, trabes, etc.) de los apoyos localizados en zona de lomas (suelo tipo I, según RCDF) se consideró la interacción suelo estructura por medio de resortes (idealización de pilas).

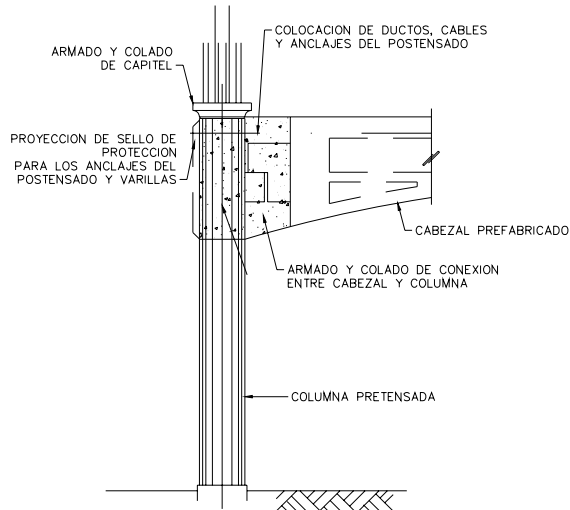


- Para las cargas vivas móviles se obtuvieron las envolventes de los elementos mecánicos y de desplazamientos, para cada sección por revisar.
- Para el diseño de cabezales se analizó cada etapa de construcción de la estructura :
  1. Condición isostática en etapa de fabricación, almacenaje y montaje.
  2. El cabezal precolado conectado con la columna logra la continuidad entre los dos elementos formando un marco, actuando, el peso propio de las traveses TA o TCA y la conexión y las acciones sobre estos elementos, además se considera la ocurrencia de un sismo en esa etapa;
  3. El cabezal funciona como un marco con presencia de las cargas muertas, sobrecargas muertas, cargas vivas y acciones sísmicas, de la etapa de servicio.
  4. Para acciones sísmicas se tomaron en cuenta alrededor de 50 formas modales (por eigen vectores para la obtención de los efectos dinámicos sobre la estructura, aplicando el método CQC).



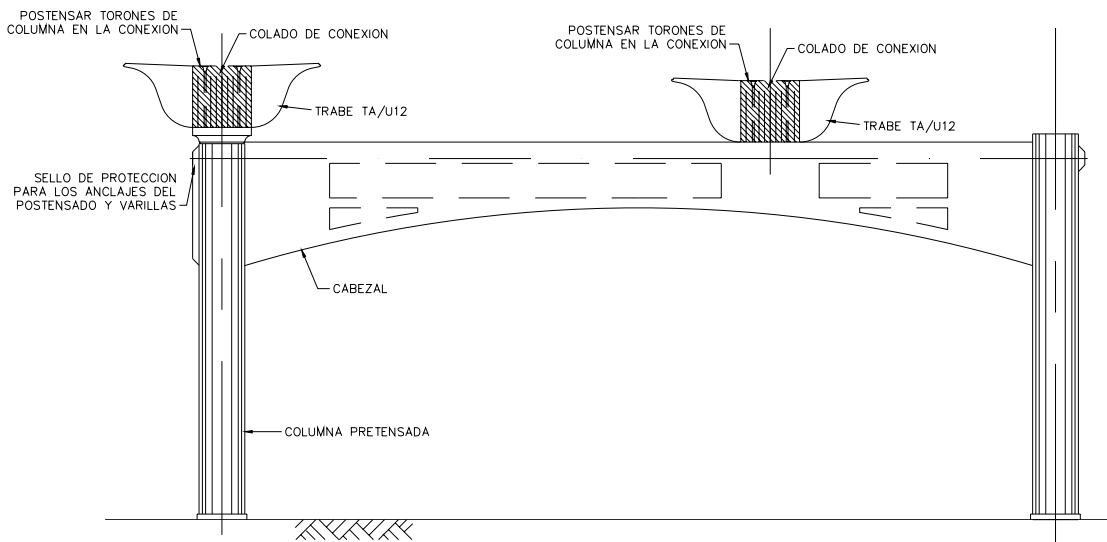


**“PREDIMENSIONAMIENTO DE LA GEOMETRÍA DE CABEZAL EN MARCOS DEL DISTRIBUIDOR SAN ANTONIO”**



SEGUNDA ETAPA

ARMADO DE CABEZAL Y DE CONEXION;  
 COLOCACION DE DUCTOS, CABLES Y ACCESORIOS DEL  
 POSTENSADO; Y, COLADOS DEL COMPLEMENTO DEL  
 CABEZAL Y COLUMNA, CONEXION ENTRE AMBOS. ARMADO  
 Y COLADO DEL CAPITEL. Y POSTENSADO DE CABLES DE  
 POSTENSADO, UNA VEZ ALCANZADA LA RESISTENCIA  
 DE LOS CONCRETOS COLADOS EN ESTA ETAPA



TERCERA ETAPA

MONTAJE DE TRABES TA/U12 SOBRE COLUMNA Y CABEZAL, CONEXION  
 DE TRABE CON COLUMNA Y DE TRABE CON CABEZAL, Y POSTENSADO  
 DE CONEXIONES ALCANZADA LA RESISTENCIA DEL CONCRETO DE ESTAS



## Revisiones

Se revisó la estructura y sus elementos componentes por el criterio de estado límite de falla para su dimensionamiento y por el criterio de estado límite de servicio para prevenir un deficiente funcionamiento en condiciones de servicio.

La distorsión de la estructura bajo cargas sísmicas fue limitada a 0.012, aunque el AASHTO sólo lo limita a una dimensión mínima de apoyo de miembros interconectados. Las deflexiones debidas a cargas vivas en las trabes y sus patines fueron limitadas para evitar vibraciones, a L/800 al centro del claro y L/375 en volados.

Las revisiones que se hicieron a cada elemento se presentan en la siguiente tabla:

Elemento	Flexocompresión o Flexotensión	Flexión	Cortante	Torsión	Esfuerzo Rasante	Temperatura
Pilas						
Zapatas						
Columnas						
Cabezales						
Trabes de Rigidez						
Trabes Cajón						
Trabes “U”						
Losas						
Tabletas						
Puntales						



### III. RESULTADO

Finalmente se obtuvo la geometría del cabezal de manera que fuera proporcional al diagrama de momentos, en forma de un arco, ya que la diferencia en el momento negativo en el eje y en el paño de la columna suele ser significativa, el incremento de rigidez en esta zona produce un aumento en el momento negativo (tensión) es conveniente diseñar para el momento que se presenta en el paño, y una disminución en el positivo por el mayor empotramiento que tiene (compresión), lo que permitió reducir en una cierta cantidad el peralte de la superestructura, haciéndola más ligera al momento de maniobrar en el montaje, con una sección transversal aproximadamente trapezoidal de concreto presforzado, con  $f'c = 600 \text{ Kg/cm}^2$ , de peralte variable de 200 cm a 360 cm en promedio, con un ancho superior de 200 cm e inferior curvo visto longitudinalmente, obteniendo con esto dos secciones transversales:

- Sección Maciza. Se utilizada en las zonas de conexiones cabezal-columna y trabe-cabezal, y cuando por cuestiones de resistencia a cortante y torsión la sección aligerada es ineficiente.
- Sección Aligerada. Se aplica en tramos que no coinciden con conexiones y, en secciones donde a pesar de tener un cortante y torsión grandes los espesores de paredes de las sección aligerada son adecuadas. Para momento positivo la losa superior trabaja a compresión y la inferior a tensión, por lo cual el área de la losa proporcionada debe ser suficiente para desarrollar la fuerza del par resistente a compresión y la losa inferior debe tener las dimensiones suficientes para alojar los aceros de refuerzo y presfuerzo necesarios para generar la tensión requerida por el momento flexionante. Funciona de igual manera para momento negativo, excepto que la losa inferior está en compresión y el acero alojado en la losa superior está en tensión.

Teniendo así:

- Una geometría estética con gran impacto visual.
- Mejor comportamiento ante cargas de servicio por el control del agrietamiento y la deflexión.
- Permite el uso óptimo de materiales de alta resistencia.
- Se obtienen elementos más eficientes y esbeltos con menos empleo de material.



- La producción en serie en plantas permite mayor control de calidad y abatimiento de costos
- Mayor rapidez de construcción al atacarse al mismo tiempo varios frentes o construirse simultáneamente distintas partes de la estructura; ésto en general conlleva importantes ventajas económicas.



---

## IV. CONCLUSIONES

La estructuración de apoyos a base de marcos en una o dos direcciones produce reducciones en las solicitaciones (elementos mecánicos y deformaciones) debidas a la acción de cargas gravitacionales y accidentales (sísmicas); además, mejora la rigidez, ductilidad y resistencia del sistema.

Aunado al uso de concretos de alto desempeño (alta resistencia, fluidez, resistencia rápida, etc.) y al empleo de aceros de alta resistencia (torones de presfuerzo).

Se logró una solución estructural simple y eficiente, que cumple con las solicitaciones estéticas exigidas por el proyecto arquitectónico.

Los elementos resultantes cumplen con la resistencia y el comportamiento requerido en condiciones de servicio, con secciones esbeltas y ligeras.

El configurar la forma geométrica de los elementos de manera que se manipule su distribución de esfuerzos o sus elementos mecánicos en cada sección, permitió la optimización estructural y mejorar su imagen estética.

El avance de la tecnología de puentes (prefabricados) desarrollada permitió, que junto con la industria de prefabricados, construir puentes en tiempos cortos (5 meses) y con mínimas molestias a la infraestructura vial de la Ciudad de México y su área metropolitana. Esta evolución permite en la actualidad salvar claros de hasta 65m de longitud y resolver anchos de vialidad de 4.0m a 12m con una sola trabe y alturas de hasta 25m con columnas prefabricadas.





## REFERENCIAS

Diseño estructural.

Meli Piralla, Roberto  
Editorial Limusa  
México 1987

Aspectos fundamentales del concreto reforzado.

Gonzalez Cuevas, Oscar M.  
Editorial Limusa, 4ta. ed.  
México 2005

Anippac

Manual de diseño de estructuras prefabricadas y presforzadas.  
Reinoso Angulo, Eduardo  
Rodríguez Rodríguez Mario  
Betancourt Ribotta Rafael

AASHTO

American Association of State Highway and Transportation Officials.

Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y Normas Técnicas  
Complementarias para Diseño Construcción de Estructuras de Concreto

Luis Arnal Simon  
Max Betancourt Suárez  
Editorial Trillas,  
México 2001.