

III CONGRESO DE ACHE DE PUENTES Y ESTRUCTURAS

LAS ESTRUCTURAS DEL SIGLO XXI
Sostenibilidad, innovación y retos del futuro



Realizaciones



4 VIADUCTOS MIXTOS EN MÉXICO

Luis **MATUTE RUBIO**¹, Francisco **MILLANES MATO**²
Gonzalo **ANTÚNEZ CID**³

¹ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. IDEAM, S.A.

² Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. IDEAM, S.A.

³ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. IDEAM, S.A.

RESUMEN

Esta ponencia describe las soluciones proyectadas y construidas para una serie de viaductos mixtos situados en una zona de alta sismicidad, con condiciones geotécnicas exigentes y geometrías complejas en planta, resueltos con tableros que conjugan altos rendimientos de construcción con cuantías reducidas y subestructuras definidas a partir de un riguroso análisis de reparto de fuerzas entre elementos portantes, que pone en juego la ductilidad y la interacción suelo estructura.

PALABRAS CLAVE

Puente mixto, México, sismo, ductilidad, IDEAM, OHL

1. INTRODUCCIÓN. DESCRIPCIÓN GENERAL

En julio de 2003 IDEAM recibió el encargo por parte de OHL de llevar a cabo el proyecto de cuatro Viaductos para el tramo Tultepec-Autopista Peñón-Texcoco, dentro del Circuito Exterior Mexiquense (México). Las subestructuras se empezaron a construir a comienzos de 2004, mientras que los trabajos relativos a la estructura metálica se iniciaron en agosto de 2004, estando prevista la finalización de las obras en el verano de 2005.

Los cuatro viaductos a desarrollar son:

- Viaducto del Ramal Periférico, de 344 m. de longitud, con 9 vanos de luces 32+7,40+32 y 20,20 m. de ancho constante, resuelta con tableros mixtos de 4 vigas armadas de 1,40 m. de canto, de acero $f_y = 350$ MPa y losa de 0,30 m. La planta es curva, con radios de 163 m. en los 5 primeros vanos que pasan a 916 m. en los últimos.
- Viaducto Peñón-Texcoco, de 447 m. de longitud, de luces 35+60x8,40+32, ancho de 12,26 m. resuelta con tablero mixto de 2 vigas armadas de 1,40 m. de canto, análogas a las del Ramal/Periférico, excepto en el vano de 60 m. donde se dispone una zona de canto variable en pila hasta 2,70 m. El trazado en planta es variable con dos curvas alternas de radios en torno a 250 m.

- Viaducto Hank González, de 842,5 m. de longitud total, permitiendo el paso de la Autopista sobre la Avda. Central, el ferrocarril y el Gran Canal, con luces de $40+55,5+62+8 \times 55,5+90+2 \times 55,5+40$, y ancho variable entre 22,08 y 25,58 m. El tablero es mixto, con 4 vigas de 2,10 m. de canto, losa de 30 cm., doble acción mixta en pilas, con una excepción en las pilas del vano de 90 m. donde se establece una zona de canto variable con un máximo de 4 m. en pila. El trazado en planta es variable, pasando de un tramo casi recto y un tramo circular de 916 m. de radio, hasta un nuevo círculo de 416,7 m.
- Viaducto México-Pachuca, de 666,8 de longitud total, compuesto por doce vanos de luces $40+10 \times 58,70+40$, con apoyos esviados a 38° aproximadamente. El trazado es sensiblemente recto, pero el ancho es muy irregular en los 4 primeros vanos, debido a la entrada y salida de ramales, permaneciendo constante en el resto, con 22,08 m.

El tablero es mixto, con vigas de 2,10 m. de canto, losa de 30 cm. y doble acción mixta en pilas.

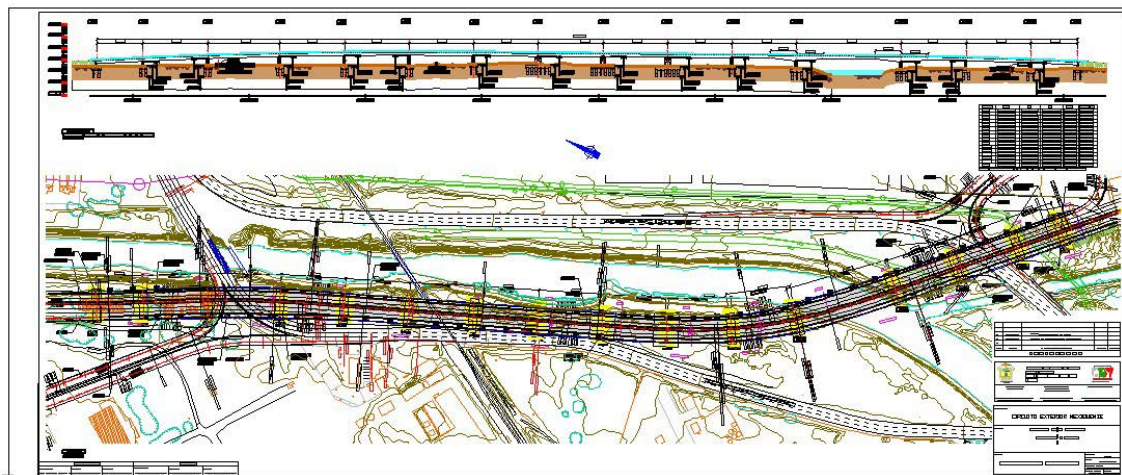


Figura 1. Planta y Alzado Viaducto Hank González

Tabla 1. Caracterización geométrica de los Viaductos

<u>Viaducto</u>	<u>Longitud total (m)</u>	<u>Luces (m)</u>	<u>Ancho (m)</u>	<u>Canto tipo (m)</u>	<u>Canto máximo (m)</u>	<u>Radio de Curvatura</u>
<u>Ramal Periférico</u>	<u>344</u>	<u>32+7x40+32</u>	<u>20,20</u>	<u>1,40+0,30</u>	<u>1,40+0,30</u>	<u>163 mínimo</u>
<u>Peñón- Texcoco</u>	<u>447</u>	<u>35+60+8x40+32</u>	<u>12,26</u>	<u>1,40+0,30</u>	<u>2,70+0,30</u>	<u>250</u>
<u>Hank-González</u>	<u>842,5</u>	<u>40+55,5+62+8x55,5+ 90+2x55,5+40</u>	<u>Variable 22,08 a 25,58</u>	<u>2,10+0,30</u>	<u>4+0,30</u>	<u>416,7 mínimo</u>
<u>México-Pachuca</u>	<u>666,8</u>	<u>40+10x58,70+40</u>	<u>Variable 22,08 en zona tipo</u>	<u>2,10+0,30</u>	<u>2,10+0,30</u>	<u>recto</u>

2. CONDICIONANTES DE DISEÑO

2.1 Acciones Sísmicas

Las condiciones impuestas por las acciones sísmicas han sido determinantes en el diseño de las soluciones mixtas planteadas. Las importantes fuerzas horizontales inducidas por el sismo han llevado a buscar una solución lo más ligera posible, de forma que la cimentación y las pilas se vieran afectadas en la menor cuantía posible. Esto favorece las soluciones mixtas frente a las soluciones de hormigón, notablemente más pesadas y que encarecerían notablemente las ya de por sí importantes cimentaciones.

Los criterios de las acciones sísmicas han venido dados por las siguientes Normativas:

Acciones:

- Normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Dirección General de Carreteras Vehiculares (SCT). (México)
- Manual de diseño por Sismo. Comisión Federal de Electricidad. (México)

- AASTHO, LFRD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS Second Edition 1998. Capítulo 3.

Dimensionamiento:

- AASTHO, LFRD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS Second Edition 1998, Capítulos 5 (Hormigón) y 6 (Estructuras metálicas y mixtas).

Los parámetros básicos especificados por estas Normativas son los siguientes:

a) Espectro a considerar

Es de aplicación el espectro correspondiente a la zona sísmica E (Zona Metropolitana de México), con el terreno tipo III.

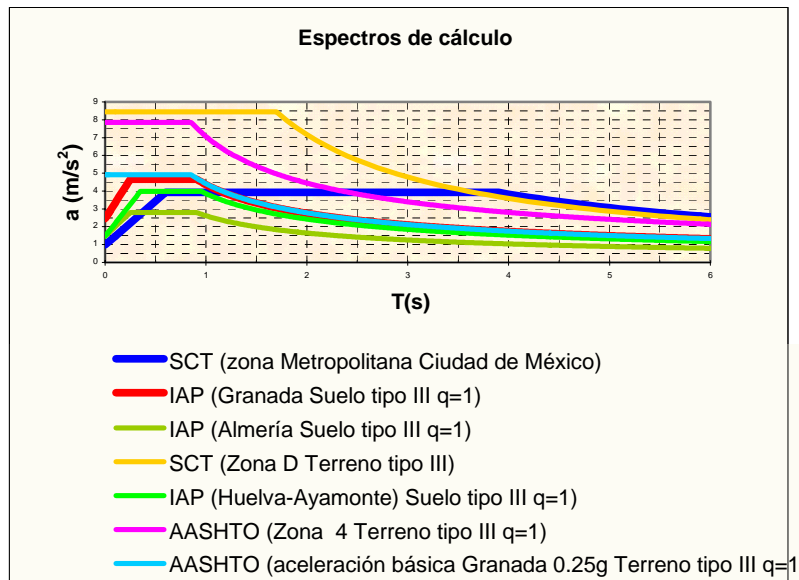


Figura 2. Comparativa de espectros de respuesta

El gráfico muestra la comparación con diversos sismos españoles, para terreno tipo III, sin coeficiente de ductilidad ni de importancia. Del sismo mexicano llama la atención la gran longitud de la zona de meseta, que impide prácticamente reducir la fuerza sísmica actuando sobre la rigidez de la estructura. Esto llevó inmediatamente a descartar cualquier posibilidad de actuación sobre la rigidez global de la estructura, pudiéndose actuar solamente en el reparto adecuado entre elementos o en la disposición de elementos antisísmicos aislantes.

b) Coeficientes de ductilidad

El coeficiente de ductilidad establecido por las Normativas citadas es el siguiente:

Tabla 2. Coeficiente de ductilidad según normativas

	<u>Pilas aisladas</u>	<u>Marcos de 2 ó más columnas de hormigón armado</u>
<u>SCT</u>	2	4
<u>Manual de diseño por sismo</u>	<u>2</u>	<u>3</u>
<u>AASTHO</u>	<u>2</u>	<u>3,5</u>
<u>EC-8</u>	1,5 (ductilidad limitada) 3,5 (dúctil)	

Se adoptó como criterio inicial $Q = 2$ para las pilas aisladas y $Q = 3$ para las soluciones porticadas. Sobre el diseño final establecido se comprobó que los coeficientes resultantes según EC-8 son similares a los que se tomaron para el cálculo. Estos coeficientes llevaron a buscar soluciones porticadas en aquellos puntos de importante concentración de fuerzas longitudinales (Viaductos de gran longitud, Hank González y Pachuca). En transversal se diseñaron en todos los casos soluciones en pórtico

c) Condiciones de ductilidad

Es de reseñar que la AASTHO y las Normativas Mexicanas trabajan, en general, con un dimensionamiento en “Esfuerzos Permisibles”, es decir, se establece la resistencia de la sección a partir de sus resistencias nominales, siendo esta resistencia nominal mayor, en un cierto grado variable en función del tipo de sollicitación, de los esfuerzos mayorados.

En el caso de las zonas de Alta Sismicidad, este coeficiente, para secciones de hormigón armado, varía con el axil, al modo establecido en EC-8 para los “Proyectos según Capacidad”.

La AASTHO establece una relación $\frac{M_{Rd}}{M_n}$ de 0,9 para axil reducido igual a 0 y de 0,50 para axil reducido igual a 0,20 $\left(\eta_k = \frac{N_d}{A_c \times f_{ck}} \right)$.

Esto supone un factor de sobrerresistencia igual a 2, sensiblemente mayor que el establecido por el EC-8 en las mismas condiciones.

Como valor comparativo, para $q = 2$ y $\eta_k = 0,20$, el EC-8 establece una sobrerresistencia de 1,12.

Como consecuencia, se han diseñado soluciones en las que las pilas tengan un axil reducido no mayor de 0.10, de forma que no queden condicionadas por un factor de sobrerresistencia excesivamente penalizante.

Por otro lado se siguen las oportunas condiciones relativas al armado establecidas en la AASTHO, entre las que se encuentran las siguientes:

- Armadura mínima longitudinal 1% Ac en elementos comprimidos.
- Longitud de las rótulas plásticas: 1 canto.
- Armadura mínima de confinamiento.

2.2 Condicionantes geométricos y del entorno

Todas las estructuras se encuentran situadas en un ambiente semiurbano, que presenta interferencias con vías de gran capacidad. Además, la traza interfiere en varias ocasiones con el Gran Canal, enorme vía de desagüe de aguas negras de la Ciudad de México.

Como consecuencia, prácticamente todos los viaductos están condicionados en cuanto a las luces a salvar. En concreto, el viaducto Hank González atraviesa el Canal con un vano de 90 m y salva la Avenida Hank González por dos veces y el Ferrocarril México-Veracruz. Por su parte, el viaducto de Pachuca se ve afectado por la Vía Morelos y la Autopista a Pachuca. Como consecuencia, las luces a disponer quedan relativamente obligadas, con vanos en el entorno de los 55 – 60 m (con la excepción del vano de 90 m), adecuados para soluciones mixtas.

Los otros dos viaductos tienen plantas muy curvas, pasando a su vez sobre la Autovía Peñón Texcoco y, en el caso del Viaducto Peñón, sobre el Canal (vano de 60 m), lo que recomienda también soluciones mixtas, con vanos tipo esta vez de 40 m

2.3 Condicionantes geotécnicos

En general, el terreno atravesado por las estructuras es de muy baja resistencia. En concreto, los viaductos Periférico y Peñón se encuentran junto a la zona más lacustre del Estado de México, que actualmente se encuentra en proceso de depresión continua. La cimentación de estos viaductos se realiza mediante pilotes prefabricados de 60 x 60 cm², de 30 m. de longitud y 70 T de capacidad, flotantes en el terreno. Se prevén asientos globales de la zona mayores de 1 m. Los terraplenes de acceso no superan los 4 m. de altura, estando ejecutados con material ligero (tezontle).

La estructura necesita de un control topográfico continuo, y está diseñada para permitir sustituir y/o calzar los apoyos en caso de asientos diferenciales.

Los encepados deben ser esbeltos, para no reducir la capacidad de los pilotes. Por tanto no se dispone de ningún punto donde se puedan concentrar las fuerzas, ya que esto supondría unas dimensiones de la cimentación que obligarían a unos cantos de encepado que absorberían gran parte de la ya de por sí escasa capacidad de los pilotes.

Por su parte, los viaductos Hank González y México Pachuca presentan condiciones algo más favorables, aunque siguen siendo problemáticos. La cimentación se basa fundamentalmente en pilotes in situ, de 1.500 mm de diámetro, con una tensión de diseño en el entorno de 17 kg/cm² una vez descontado el rozamiento negativo.

3. SOLUCIONES ADOPTADAS

3.1 Subestructura

a) Viaductos Peñón y Periférico

En estos Viaductos, todas las pilas consisten en dos fustes cuadrados (de 1,50 m. en Peñón y 1,20m en Periférico), unidos transversalmente mediante un dintel en cabeza de 1x1 m².



Figura 3. Alzado de pila tipo. (Viaducto “Peñón-Texcoco”)

El tablero se vincula de la siguiente manera:

- *Transversalmente*, se fija en todas las pilas mediante un tope situado en el dintel.

Este tope, que sale del mamparo metálico, incide sobre un aparato de neopreno teflón vertical, plenamente accesible y sustituible en caso de deterioro.

- Longitudinalmente, se vinculan las pilas centrales, que son, proporcionalmente, las “menos bajas”, mediante un tope bidireccional, que también impacta sobre neoprenos verticales. El número de pilas vinculadas es de 6 en el viaducto Peñón (de la 3 a la 8), y de 5 (de la 2 a la 6) en el Periférico.

Tanto la geometría de las pilas como el número de ellas vinculadas en longitudinal está condicionado por los siguientes motivos:

- *Nº de pilas vinculadas.*
 - Se vinculan aquellas pilas suficientemente flexibles como para absorber las deformaciones térmicas y de retracción con fuerzas horizontales moderadas. El resto de las pilas tienen neopreno o neopreno-teflón, según el movimiento diferencial pila-tablero.

- Cumpliendo la premisa anterior, se vinculan las pilas necesarias para que la acción sísmica resulte poco condicionante sobre las cargas permanentes y sobrecargas. *Geometría de la sección.*
 - Dados los condicionantes de la AASTHO, que impone un coeficiente 2 para un axil reducido de 0,20, se buscaron secciones con axil reducido del orden de 0,10.
 - Conseguir un plano de rotura con pivote en el acero.
 - Obtener una relación C_c/C_y suficiente para el grado de ductilidad considerado.

La sección condicionante (base pila) presenta el siguiente diagrama M- χ , para el axil concomitante con la hipótesis de sismo condicionante.

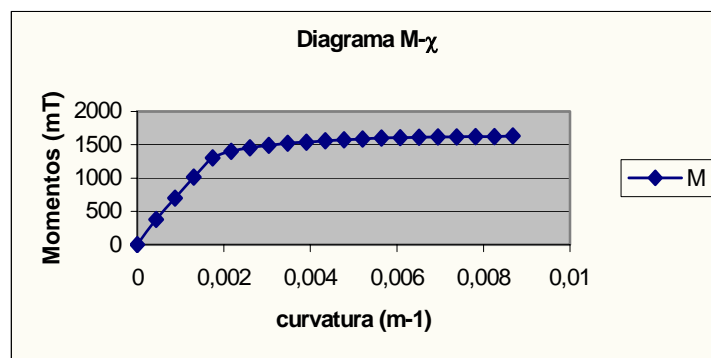


Figura 4. Diagrama momentos-curvatura en sección condicionante. (Peñón-Texcoco)

Para este gráfico, la relación $\mu_c = \frac{C_c}{C_y} \simeq 5$ y por tanto, la ductilidad según el Anexo B del EC-8 es de $q = 2,31$, muy similar al $q = 2$ adoptado.

a) Viaductos Hank González y Pachuca

Estos viaductos son sensiblemente más largos que los anteriores, y, en consecuencia, las fuerzas que movilizan no pueden ser recogidas de la misma forma que en el caso anterior.

La solución planteada es la siguiente:

- Transversalmente, se mantiene el sistema de los viaductos anteriores, mediante topes sustituibles en todas las pilas. Estas son del tipo ya

Los movimientos horizontales máximos obtenidos son de 9 cm. en estribos, en cálculo elástico, lo que permite disponer de juntas y aparatos de apoyo relativamente convencionales.

3.2 Tablero

La solución planteada para el tablero es coincidente en todos los viaductos: Consiste en 2 ó 4 vigas metálicas de acero S355, de canto 1.40 m en Peñón y Periférico y 2.10 m en Pachuca y Hank González. Las vigas presentan una sección en doble T, con arriostramientos verticales en celosía a una distancia de aproximadamente 3.5 veces el canto.

En la zona de flexión positiva las vigas funcionan de manera independiente, conectadas sólo por la losa superior, mientras que en la zona de pilas se cierran también por la parte inferior mediante hormigón de fondo. De esta forma se optimiza el rendimiento de los materiales, recogiendo las compresiones que se producen en cabeza inferior de pila mediante hormigón. Visualmente la sección es tipo cajón en zona de pila, mientras que en el centro de vano se puede disponer opcionalmente una placa de hormigón de cierre, para presentar aspecto de cajón continuo, o dejarlo abierto, lo que muestra el arriostramiento entre las vigas.

Los vanos de 90 m en Hank González y de 60 en Peñón se han resuelto mediante unas piezas de canto variable sobre pila. Estas piezas efectúan una transición lineal desde las piezas estándar hasta un canto de 4 m en Hank y 2.5 en Peñón, en una longitud de aproximadamente un 25% del vano. De esta forma, el 50% central del vano se también resuelve con piezas estándar.

En todos los casos las vigas se montan de pila a pila. Las condiciones del terreno y las limitaciones de espacio obligan a subir las vigas individualmente en algunos casos, mientras que en otros se izan por parejas con los arriostramientos ya instalados. Salvo en los vanos de canto variable las vigas salvan de una sola vez el espacio entre pilas, una vez se unen en obra los distintos segmentos en que se transportan.



Figura 6. Vigas montadas en viaducto Hank González



Figura 7. Vigas acopiadas previamente al izado



Figura 8. Vista de la sección transversal y arriostamientos internos