



PRUEBAS experimentales en el distribuidor vial de San Antonio

POR: DAVID MURIA VILA
(1), ABRAHAM ROBERTO
SÁNCHEZ RAMÍREZ,
ROBERTO GÓMEZ
MARTÍNEZ, GERARDO
RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ,
MIGUEL ÁNGEL
MENDOZA GARCÍA,
JOSÉ ALBERTO ESCOBAR
SÁNCHEZ, JOSÉ ENRIQUE
BLANCO, CARLOS H.
HUERTA CARPIZO Y
ROBERTO CARLOS
MENDOZA*

FOTOS: PEDRO HIRIART

Este artículo trata sobre las pruebas de vibración ambiental, tracción y cargas vehiculares en tres sitios del distribuidor vial de San Antonio de la ciudad de México para determinar algunas propiedades básicas de su comportamiento estructural que permitan validar y, si es necesario, ajustar los criterios de diseño para futuras obras de este tipo.



Los resultados revelan interesantes aspectos de la respuesta estructural y en los sitios estudiados su comportamiento estructural ante las pruebas

realizadas fue satisfactorio.

INTRODUCCIÓN

Principalmente, con el propósito de corroborar las hipótesis de diseño, detectar posibles discrepancias que afecten las condiciones de seguridad del distribuidor vial (DV) y definir si es necesario ajustar los criterios de diseño para futuras obras de este tipo, el gobierno del Distrito Federal, a través del Comité Técnico que apoya el desarrollo del proyecto del DV, solicitó al Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM) que hiciera diversas pruebas sobre la obra terminada y con una estructuración del tipo péndulo invertido (figuras 1 y 2), para determinar algunas propiedades básicas de su comportamiento estructural.

En atención a dicha solicitud, el IIUNAM propuso la realización de tres tipos de pruebas de campo:

- Pruebas de vibración ambiental en tres sitios seleccionados, con longitudes entre 35 y 200 m
- Pruebas de tracción en una columna esbelta
- Pruebas de carga estáticas y dinámicas en un tramo de 35 m de longitud

CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES

Los tramos del DV estudiados se caracte-

Figura 1 Localización de los tres sitios seleccionados para realizar pruebas



rizan por estar estructurados mediante traveses "Gerber" apoyados sobre columnas de sección circular; la unión entre las traveses y las columnas fue concebida para formar un marco rígido. Las traveses apoyadas sobre las columnas fueron identificadas como TA y las traveses centrales como TC. En ambos casos, se trata de elementos de concreto pretensado, cuya sección transversal es de tipo cajón con voladizos.

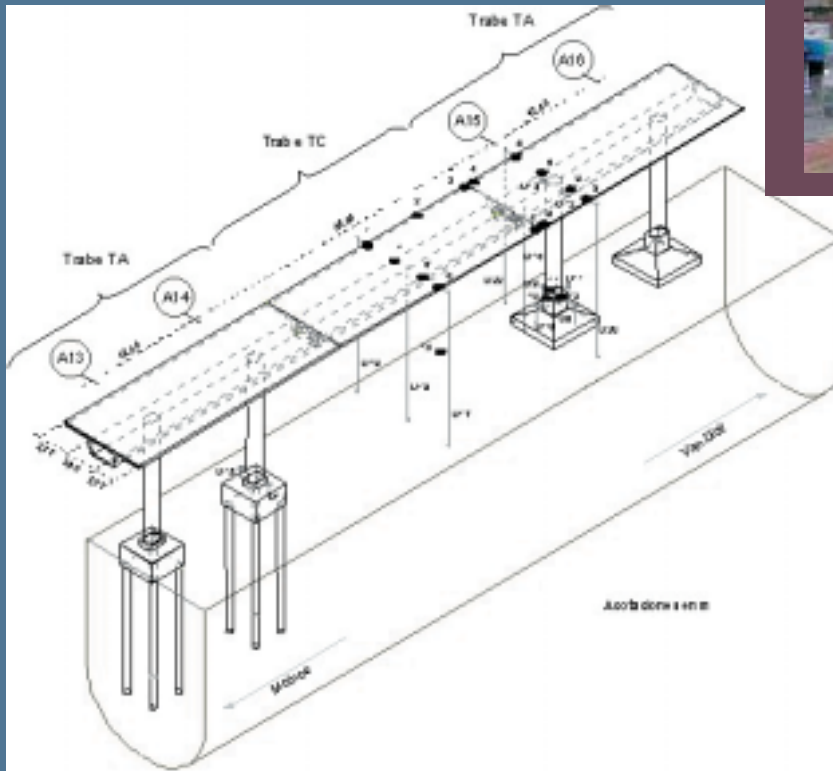
Las columnas, por su parte, son de sección oblonga y se apoyan sobre zapatas, mismas que pueden o no estar desplantadas sobre pilas (figuras 2 y 3).



Figura 2 Vista general de la estructura



Figura 3 Instrumentación en el sitio 2 del distribuidor vial



Las pruebas se aplicaron en los tres sitios indicados en la figura 1 ubicados entre los ejes A1 a A24, A14 a A15 y A24 a A25 del tramo I del DV (figura 1) y están estructurados con vigas TC y TA apoyadas sobre columnas. El primero se eligió debido a que las columnas sobre las que se encuentran apoyadas las vigas TC y TA son de alturas variables de 6.23 a 14.25 m (sitios 1, 2 y 3, figura 1). El segundo se seleccionó por tener las columnas de mayor altura en dicho tramo (13.47 a 14.25 m) y estar cimentadas sobre zapatas aisladas con y sin pilas. El último sitio se

Determinación experimental de parámetros estructurales de dos tramos típicos del segundo piso del Periférico

El Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIUNAM) realizó diversas pruebas experimentales del segundo piso del Periférico, entre el distribuidor vial de San Antonio y San Jerónimo, para determinar algunas propiedades básicas de su comportamiento estructural en algunos tramos típicos del segundo piso. Esto con el propósito de que los responsables del proyecto tengan elementos de referencia que les permitan corroborar las hipótesis de diseño y puedan detectar posibles discrepancias que afecten las condiciones de seguridad del distribuidor vial y, principalmente, para que puedan



Determinación de la ubicación de los trasductores de desplazamiento para medir la deformación lateral de la columna debido al jalón producido por la grúa de 500 ton.

escogió debido que es el que tiene la viga TC de mayor dimensión (37.07 m) y con columnas de 13.21 a 13.52 m de altura cimentadas con zapatas aisladas.

DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS Pruebas de vibración ambiental

En ésta se midieron las aceleraciones generadas por la actividad normal en su entorno en los tres sitios seleccionados de la estructura, identificando las principales frecuencias de vibración en las direcciones vertical (V), transversal (T) y longitudinal (L). Se emplearon ocho servoacelerómetros de alta resolución que fueron colocados en diferentes puntos de observación en la estructura (figura 3). Las señales de estos sensores fueron capturadas con un sistema de adquisición automático de datos de ganancia ajustable para lograr registrar digitalmente las señales de pequeña amplitud de aproximadamente 10-5 g. Los registros de las aceleraciones medidas en campo con posterioridad fueron analizados en gabinete para estimar las principales propiedades dinámicas que definen la respuesta de la estructura ante los sismos.

Pruebas de tracción

Con la prueba de tracción en una columna esbelta (sitio 2) se generó la vibración libre de la estructura utilizando un dispositivo mecánico desarrollado en el Instituto de Ingeniería (Sánchez, 1991). Con un juego de poleas se aplicaron, de manera progresiva, fuerzas de tracción del orden de cinco ton. Una vez alcanzada la carga deseada, ésta se liberó para que la estructura vibrara libremente. Los desplazamientos y las aceleraciones que se produjeron fueron medidos en puntos estratégicos previamente identificados.

El análisis de la respuesta registrada del sistema estructural permitió determinar sus frecuencias de vibración fundamental y los valores de los amortiguamientos correspondientes, sus deformaciones angulares tanto de la base como en el capitel de las columnas, así como la rotación de la superestructura. Esta prueba sirvió para corroborar los resultados de las pruebas de vibración ambiental.

Prueba con cargas estáticas y dinámicas

En el sitio dos de la vía elevada también se efectuaron pruebas bajo cargas

definir si procede hacer ajustes a los criterios de diseño de obras de este tipo.

El IIUNAM elaboró un programa de pruebas de campo con el fin de determinar las propiedades estructurales en diferentes etapas constructivas en dos tramos de la vía elevada. En las diversas etapas se realizaron pruebas de vibración ambiental, de tracción lateral y de cargas vehiculares.

En las pruebas de vibración ambiental se midieron las aceleraciones generadas en los tramos seleccionados de la estructura por la actividad normal en su entorno. En cada tramo escogido se instalaron



Trasductor de desplazamiento para medir la deformación lateral de la columna durante las pruebas de tracción

arreglos de ocho acelerómetros ubicados en diferentes puntos estratégicos de la estructura. Los registros de las aceleraciones medidas en campo se analizaron para calcular las principales propiedades dinámicas y se



Figura 4 Posiciones de los camiones para las pruebas estáticas en el sitio 2

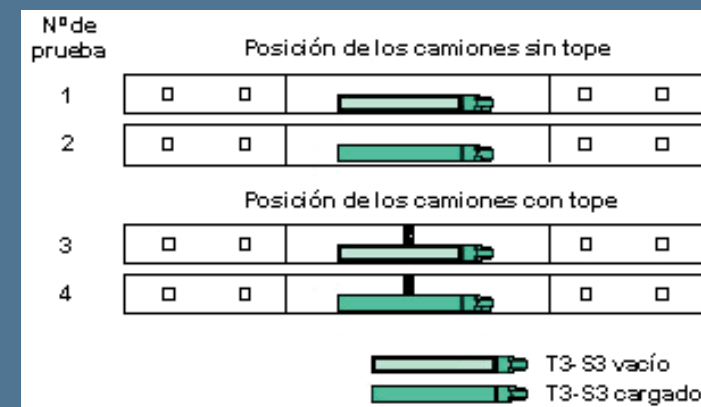
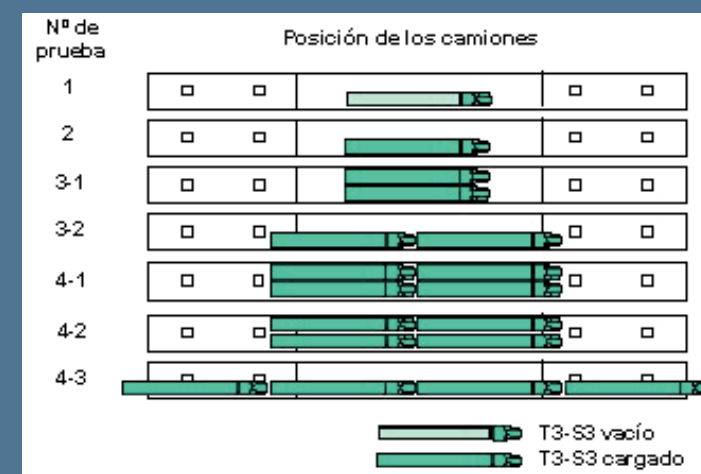


Figura 5 Configuración deformada de la estructura con la carga excéntrica en el sitio 2



vehiculares de magnitudes extremas. Para estas pruebas se emplearon cinco camiones de tipo T3-S3. Cuatro de ellos se cargaron con pesos entre 55 y 60 ton, y uno con 22 ton, y se colocaron en las posiciones más desfavorables sobre el puente, aumentando progresivamente el número de camiones hasta alcanzar una carga máxima de 227 ton (figura 4). La carga se colocó tanto en forma simétrica sobre los dos carriles, como asimétricamente, es decir, toda la carga sobre un solo carril. La carga máxima aplicada fue mayor que la prescrita para el diseño de la estructura según las normas empleadas para el proyecto; para considerar la condición extrema que pudiera llegar a presentarse. Se midieron las deformaciones de la estructura con los camiones parados sobre el tramo de vía en cuestión; después, se efectuaron mediciones con los cinco camiones circulando por el puente a diferentes velocidades (10 a 50 km/h) y colocando, en unos casos, topes de cinco cm de peralte (figura 5). La comparación de las deformaciones medidas ante cargas estáticas y dinámicas permitió evaluar los efectos dinámicos y de impacto que generan los camiones.



Puesto central de control y registro

compararon entre las distintas etapas constructivas para determinar las variaciones de las mismas.

Las pruebas de tracción lateral consistieron en aplicar una fuerza sensiblemente horizontal en el extremo superior de la columna seleccionada para deformarla lateralmente y en la dirección perpendicular al eje de la vía.

El propósito era verificar, entre otros aspectos, la contribución del collarín que se coloca como refuerzo entre la zapata y la columna prefabricada. Para aplicar la fuerza se usó una grúa de 500 ton con la que se aplicaron varias cargas monotónicas hasta alcanzar las 65 ton, aproximadamente. Con la instrumentación implementada y con ayuda de equipo topográfico se determinaron las deformaciones de la columna seleccionada y de las dos contiguas.
 En las pruebas vehiculares se emplearon cuatro camiones de 60 ton y uno de 20 ton, aproximadamente.

La configuración deformada lateral de la estructura se midió con transductores de desplazamiento del tipo LVDT y con ayuda de equipo topográfico.

RESULTADOS

Pruebas de vibración ambiental

Estas pruebas se realizaron con base en la metodología experimental desarrollada en el Instituto de Ingeniería (Murià Vila y González, 1995). El procesamiento de la información consistió en un análisis de señales aleatorias a través de la transformada rápida de Fourier, para obtener las densidades espectrales promedio, así como las correspondientes funciones de transferencia, en fase y amplitud, y de coherencia entre pares de señales.

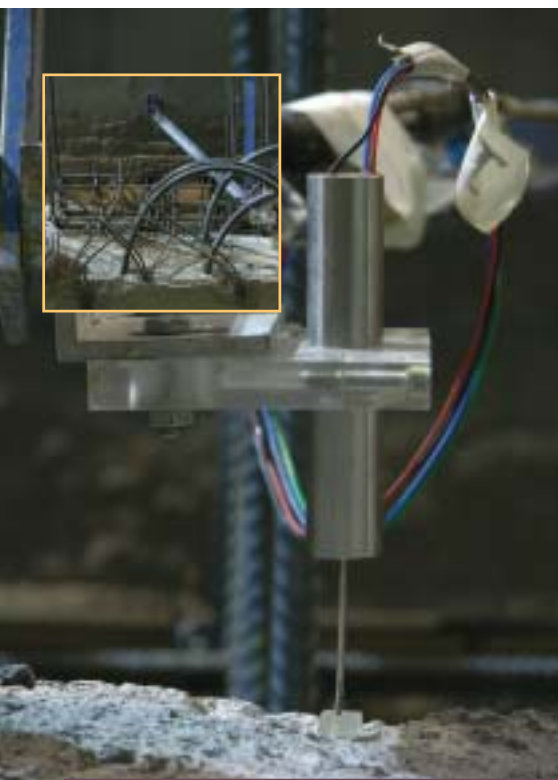
Para la dirección T se dispone de la información obtenida en los ejes de columnas A3, A5, A9, A15 y A24 con alturas de

Para la dirección T se dispone de la información obtenida en los ejes de columnas A3, A5, A9, A15 y A24 con alturas de columnas que varían entre 6.23 y 14.25 m.

columnas que varían entre 6.23 y 14.25 m. En la figura seis se muestran los espectros de densidades promedio de los puntos de medición de la parte superior de la estructura en los ejes A3 y A9. En ellas se observan varias ordenadas significativas comunes, lo cual indican que hay un acoplamiento modal entre los ejes de columna; esto se justifica debido a que estos ejes están acoplados a través de las trabes TA y TC y se destacan las correspondientes frecuencias predominantes de cada eje de columna.

Se compararon las frecuencias predominantes identificadas en la dirección T de los ejes A3, A5, A9, A15 y A24. Las frecuencias predominantes de cada eje de columna dependen de su altura.

Aunque el fin del estudio no fue la determinación de las frecuencias del suelo, se lograron detectar algunas de sus frecuencias dominantes de vibración. Estas varían entre 1.42 y 2.30 Hz.



Detalle que muestra uno de los transductores de desplazamiento para medir el giro relativo entre la zapata y la base de la columna



Dispositivos para medir el giro relativo entre la zapata y la base de la columna antes del collarín

Figura 6 Espectros promedio obtenidos simultáneamente entre los extremos superiores de las columnas ubicados en los ejes A3 y A9, con los sensores orientados en la dirección T

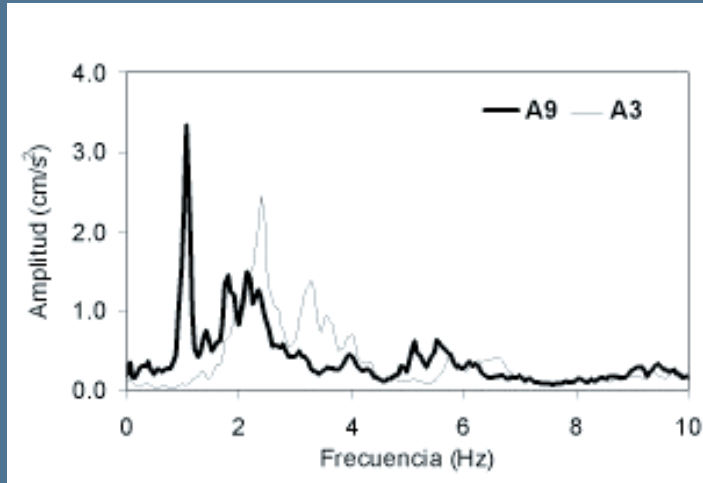


Tabla 1 Frecuencias o periodos fundamentales de vibración en la dirección T identificados con las pruebas de vibración ambiental de los ejes A1 a A24

Eje	A3	A5	A9	A15	A24
f(Hz)	2.39	1.81	1.07	0.80	0.88
T (s)	0.42	0.55	0.93	1.25	1.14
h (m)	6.2	8.1	11.6	14.3	13.4

En los entre ejes A14-A15 y A24-A25 se identificaron cuatro modos de vibrar en la dirección V del conjunto de traveses TA y TC (figura 7). Estos fueron: 1VS – primer modo simétrico, 1VAS – primer modo asimétrico, 1VSR – primer modo simétrico de torsión y 1VASR – primer modo asimétrico de torsión. También se detectaron dos modos de rotación del eje de la travesa TA de los ejes A15 y A24. En las tablas uno y dos aparecen los valores de las frecuencias.



Uno de los cuatro brazos de apoyo de la grúa de 500 ton sobre los carriles centrales de Periférico

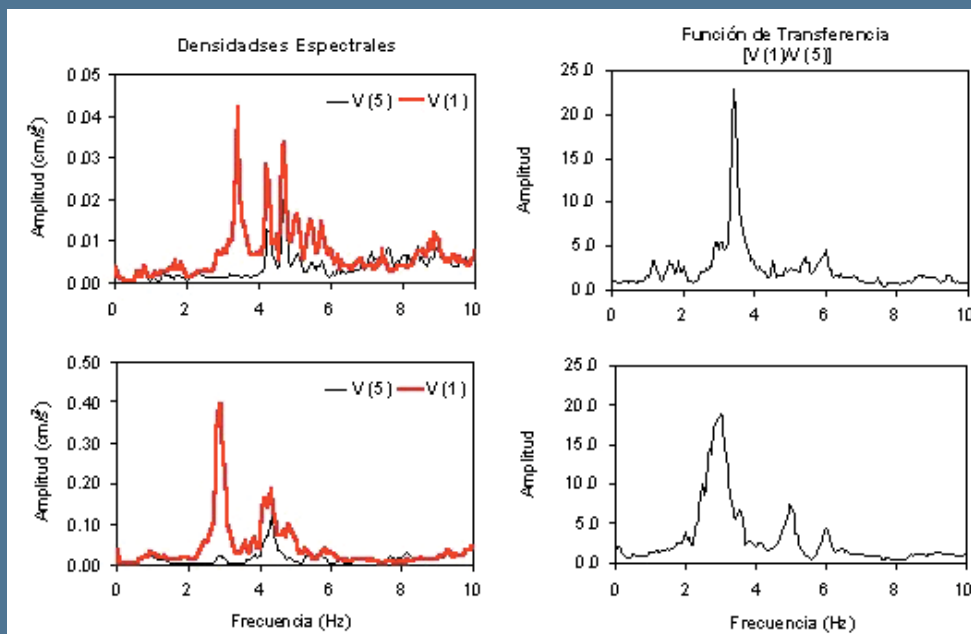


Colocación de la marcas de referencia topográfica en el fuste de la columna

Maniobras para colocar las eslingas que se emplearon para jalar con una grúa el extremo superior de la columna



Figura 7 Densidades espectrales y funciones de transferencia promedio obtenidos en los puntos 1 y 5 de los ejes A14-A15 y A24-A25



PRUEBAS DE TRACCIÓN

Para generar la vibración libre del “árbol” del eje de columna A15 (sitio dos) se realizaron dos pruebas de tracción. Las fuerzas de tracción medidas fueron 3.5 y 4.8 ton para la 1a y 2a prueba, respectivamente. Con los registros de aceleración se determinaron los porcentajes de amortiguamiento crítico por decremento logarítmico y las frecuencias que predominan en el eje A15 durante la

vibración libre generada al liberarse súbitamente la fuerza de tracción. En la tabla tres aparecen los datos obtenidos. Se puede observar que los valores de las frecuencias de vibración concuerdan con las estimadas con los registros de vibración ambiental.



Jalón de aproximadamente 65 ton en el extremo superior de la columna con una grúa de 500 ton



Se midieron las deformaciones de la estructura con los camiones parados (carga estática) distribuidos en diferentes formas sobre el tramo de vía seleccionado y, con posterioridad, se efectuaron mediciones con los cinco camiones circulando por el puente a diferentes velocidades (cargas dinámicas) y colocando, en unos casos, topes de cinco cm de altura para generar cargas de impacto.

La comparación de las deformaciones medidas ante cargas estáticas y dinámicas permitió evaluar los efectos dinámicos y de impacto que generan los camiones. Para registrar las aceleraciones y desplazamientos se emplearon servoacelerómetros y transductores de desplazamiento, los cuales se colocaron en puntos

estratégicos de la estructura.

Con el análisis de la información registrada se identificaron en los tramos seleccionados las frecuencias de vibrar más significativas y se obtuvieron las deflexiones de las vigas, así como los desplazamientos laterales y las deformaciones angulares de la base y el cabezal de las columnas instrumentadas. Las deflexiones obtenidas fueron inferiores a los valores permisibles por las normas de diseño.

Responsables del estudio: David Murià Vila y Roberto Sánchez Ramírez.

Tabla 2 Frecuencias de vibración, en Hz, más significativas en la dirección V que se identificaron con las pruebas de vibración ambiental de los sitios 2 y 3 que abarcan los ejes A14-A15 y A24-A25, respectivamente

N°	Modo	Ejes A14-A15	Ejes A24-A25
1	1VS	3.42	2.93
2	Cabeceo "arbol"	4.30	4.35
3	Cabeceo "arbol"	4.74	5.57-5.71
4	1VSR	5.08-5.52	5.96-6.06
6	1VSR	7.13-7.32	6.98
7	1VSR*	8.89-8.99	7.52-8-35

Tabla 3 Frecuencias de vibración y porcentajes de amortiguamiento crítico más significativos que se identificaron con las dos pruebas de tracción en el eje A15

Prueba	Dirección	Frecuencias, en Hz	Frecuencia VA*, en Hz	Porcentajes de amortiguamiento crítico	
				h1	h2
1	T	0.81	0.78-0.81	10.9	0.7
2		0.78		11.6	0.5
1	V	4.48-4.74	4.30-4.74	11.0	0.9-1.4
2		4.24		6.9	1.3-1.9

h1 - calculado con los 3 o 4 primeros ciclos de vibración.
h2 - calculado con todos los ciclos de vibración.
*VA - frecuencias determinadas en vibración ambiental

Tabla 4 Amplitudes de desplazamiento máximas obtenidas de cada prueba

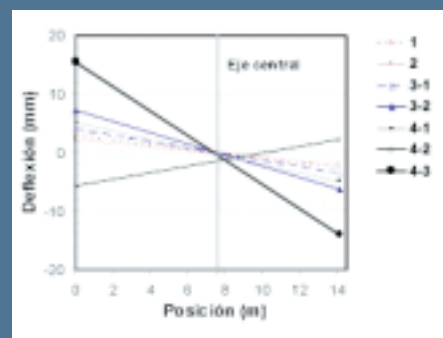
Prueba	Medidas (mm)		Medidas (mm)	
	D17=6	D19=1	D20=9	D22=5
1	1.3	-8.0	2.9	-2.6
2	-6.5	-17.5	2.1	-2.0
3-1	1.5	23.5	4.1	-3.5
3-2	-14.1	-36.0	7.2	-6.3
4-1	-1.7	-27.8	5.2	-5.0
4.2	-28.4	-35.0	-5.7	2.3
4-3	4.3	-39.1	15.5	-14.0

PRUEBAS CON CARGAS ESTÁTICAS

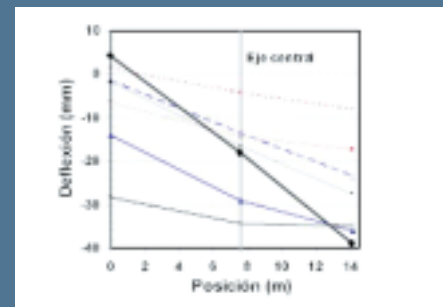
Un resumen de los desplazamientos verticales máximos obtenidos de las pruebas de carga estática en el sitio 2 (ejes A14 y A15) aparece en la tabla cuatro. Con estos datos se pueden trazar perfiles de deformación de las secciones transversales al eje de la columna A15 y al centro del claro entre los ejes A14 y A15 (figura 8).

La rotación de la superestructura prácticamente fue de cuerpo rígido, esto implica que dicho movimiento se origina en la columna y que las deflexiones de los voladizos laterales de las vigas TA y TC son poco significativas, lo cual sugiere una capacidad de rotación adecuada del sistema estructural. Una de las condiciones más desfavorables fue la prueba 4-3, con los cuatro camiones alineados sobre el carril del lado oriente (figura 4).

Figura 8 Desplazamientos de la superestructura medidos en el eje A15 y en el centro del claro entre los ejes A14 y A15

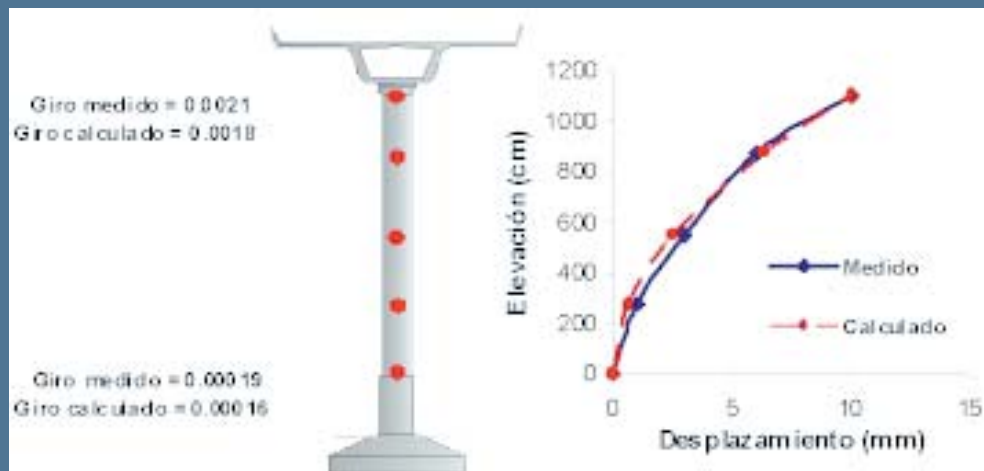


(a) Eje A15



(b) Centro del claro entre ejes A14-A15

Figura 9 Deformación medida y calculada en el eje A15



Durante el desarrollo de estas pruebas, además de la instrumentación electrónica, se contó con el apoyo de tres brigadas de topografía. Una de ellas se encargó de medir los desplazamientos laterales de las columnas de los ejes A14 y A15. Con base en esta información se determinaron los desplazamientos suponiendo una columna de sección transversal constante, empotrada en su base y sometida a un momento flexionante en su extremo superior. El momento es el producido por la excentricidad de la carga de los camiones.

Con la prueba 4-3 la estructura manifestó la mayor deformación en la dirección T. Los desplazamientos laterales del eje A15 calculados con el modelo analítico se comparan con los experimentales en la figura 9. Los desplazamientos teóricos coinciden razonablemente con los desplazamientos medidos. Asimismo, los giros calculados tanto en la base de la estructura como en su extremo superior son semejantes a los estimados experimentalmente.

Con el apoyo de las otras dos brigadas de topógrafo se midió la deformación vertical en un tramo de 76 m a lo largo del eje longitudinal de la superestructura. Las mediciones se realizaron antes y después de cada prueba con el fin de observar si la estructura recuperaba su

configuración inicial. De acuerdo con la primera y última nivelaciones puede decirse que al concluir el programa de pruebas la estructura no sufrió ninguna deformación permanente.

PRUEBAS CON CARGAS DINÁMICAS

Se efectuaron mediciones con los cuatro camiones circulando en convoy por el puente a diferentes velocidades y colocando, en unos casos, topes de cinco cm de peralte al centro del claro entre los ejes A14 y A15 (tabla 5). Las amplitudes de aceleración y desplazamiento obtenidos de las pruebas en el sitio dos se presentan en las tablas 6 y 7.

Tabla 5 Peso y velocidades de los camiones empleados en las cuatro pruebas dinámicas

Camión	Peso total (t)	Sin tope		Con tope	
		Dinámica 1 Camión km/h	Dinámica 2 Camión km/h	Dinámica 3 Camión km/h	Dinámica 4 Camión km/h
A	22	B 19	B 31	B 6	B 24
B	60		A 33	A 20	A 46
C	55		C 31	C 8	C 18
E	57		E 37	E 8	E 13

Tabla 6 Amplitudes de aceleración máximas, en cm^2 obtenidas de cada prueba

Punto	Dinámica 1	Dinámica 2	Dinámica 3	Dinámica 4
5T	3	10	9	17
1T	6	16	28	63
10T	1	2	2	5
5V	12	30	37	86
9V	21	109	35	104
1V	76	177	434	495
6V	94	171	432	450
3V	29	129	47	143

Tabla 7 Amplitudes de desplazamiento máximas obtenidas de cada prueba

Punto	Camión	Medidas (mm)			
		1	2	3	4
D17	B	7.5	7.8	20.9	20.4
	A		3.0	7.3	6.7
	C		7.2	9.9	12.3
	E		6.8	9.7	14.5
D20	B	18.5	16.7	26.9	25.9
	A		4.2	7.7	12.3
	E	14.2	20.0	22.2	25.3
D20	B	3.7	3.6	3.0	2.9
	A		1.6	1.2	2.3
	C		3.2	4.8	4.6
	E		4.1	4.3	4.4
D22	B	3.1	3.2	2.2	2.5
	A		1.3	0.9	2.1
	C		2.5	3.8	3.4
	E		2.9	3.6	3.3

FRECUENCIAS FUNDAMENTALES DE VIBRACIÓN VERTICAL

El análisis de la información registrada permitió identificar las frecuencias de vibrar más significativas del tramo de vía en estudio. Para cada prueba dinámicas se llevó a cabo la identificación de las fre-

cuencias de vibrar en la dirección V y T con el fin de analizar sus posibles variaciones respecto a las determinadas en las pruebas de vibración ambiental.

De un análisis espectral por ventanas de 20 de las pruebas dinámicas dos y tres se observa cómo los componentes frecuenciales correspondientes a las frecuencias de vibración del conjunto de traveses TA y TC varían significativamente, con el paso de los camiones más pesados. Se aprecia que los valores de las frecuencias de vibración del primer modo simétrico en la dirección V (1VS) disminuyeron durante las pruebas dinámicas.

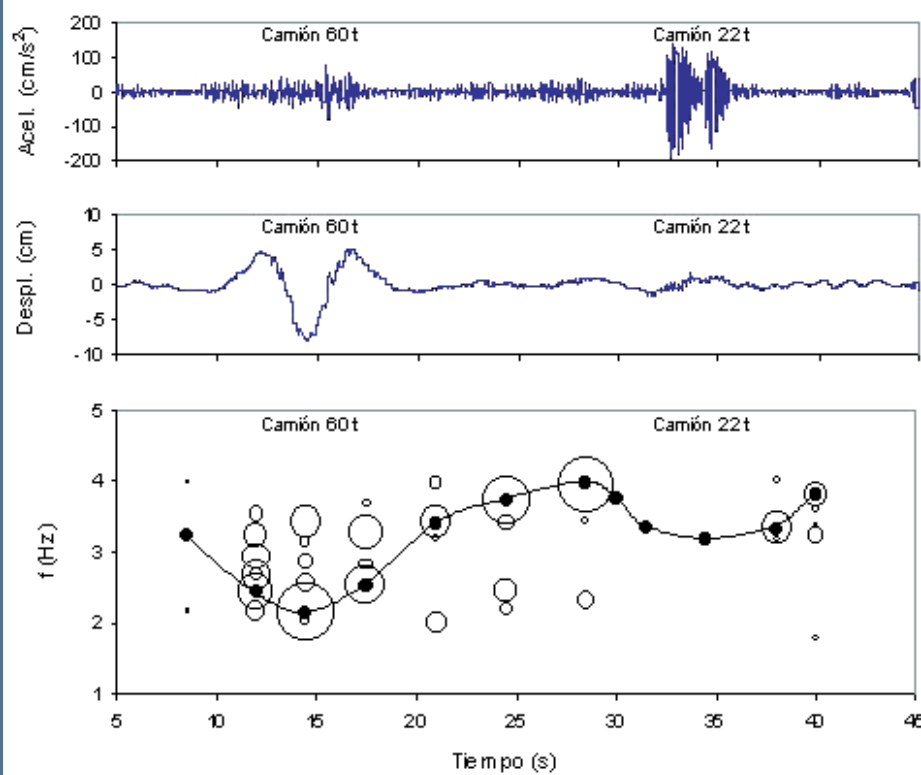
Dada la gran variación de estas frecuencias se optó por realizar un análisis detallado de la segunda prueba dinámica a fin de determinar con mayor precisión los valores de las frecuencias de vibración. Para ello, se aplicó una técnica paramétrica modal (Li, Yi y Mau ST, 1990).

Las frecuencias determinadas en cada ventana se muestran en la figura 10, sólo se exhiben los valores menores entre uno y cuatro Hz, por ser esta la banda de frecuencia donde se encuentra la frecuencia del modo 1VS. Cada círculo vacío de la tercera gráfica de la figura le corresponde a un valor de frecuencia identificada y su tamaño varía en función del porcentaje de participación modal. Para cada ventana de análisis aparece en el círculo mayor, un círculo lleno que representan el valor de la frecuencia con mayor participación en la respuesta. La línea que une estos círculos llenos muestra la variación de la frecuencia fundamental del modo 1VS con el paso de los camiones. Para el caso del camión más pesado (60 t) la frecuencia disminuye de 3.42 a 2.14 Hz. Esta disminución se recuperó totalmente cuando el camión salió del tramo instrumentado (ejes A14 y A15).

Las frecuencias fundamentales (modo 1VS) en la dirección V del conjunto de traveses TA y TC de los ejes A14-A15 y A24-A25 identificadas en las pruebas de vibración ambiental y de las pruebas dinámicas en los ejes A14-A15 concuerdan con datos determinados en puentes de estas características medidos en México o en otras partes del mundo (Paultre *et al.*, 1992).



Figura 10 Variación de las frecuencias de vibración en la dirección V obtenidas con el programa MIMO (Li, Yi y Mau ST, 1990) con un análisis paramétrico con ventanas de 4 a 10 s



EFFECTOS DINÁMICOS Y DE IMPACTO

También se estudió el paso de camiones a distintas velocidades y, sobre todo, el paso de éstos sobre el tope colocado para producir impacto. La comparación de las

deflexiones al centro del claro medidas ante cargas estáticas (camiones sin movimiento) y dinámicas (camiones en movimiento) indican que los efectos dinámicos y de impacto que generan los camiones se amplifican más de 10 veces.

También se estimaron las frecuencias dominantes del suelo en los tramos estudiados, y sus valores resultan del mismo orden que los medidos en otros sitios con suelos parecidos.

Gran parte de esta aparente amplificación corresponde a diferencias en la posición del camión. En las pruebas dinámicas los camiones circularon al centro de la vía mientras que las estáticas fueron colocados excéntricamente.

Por tanto, para estimar dichos efectos se recurrió a otro procedimiento, el cual consiste en filtrar los desplazamientos medidos, para eliminar los movimientos de los efectos dinámicos y calcular en el dominio del tiempo el cociente de las amplitudes para obtener los máximos factores de amplificación de cada punto de medición de las cuatro pruebas. Las mayores amplificaciones dinámicas y de impacto de los desplazamientos obtenidos al centro del claro (puntos uno y seis) fueron de 1.6 y 4.2 veces los estáticos, respectivamente. Para el caso del mayor desplazamiento (26.9 mm) las amplificaciones fueron 1.3 y 1.7 veces los estáticos, respectivamente. Estos factores no guardan una relación lineal con las amplitudes de los desplazamientos.

El análisis muestra que los incrementos de las deformaciones por el efecto de impacto están dentro de los límites permisibles por las normas de diseño y son congruentes con los encontrados en otros puentes de distintas partes del mundo.

CONCLUSIONES

El análisis de los registros de la vibración ambiental y de las pruebas de tracción indica que las frecuencias fundamentales de vibración vertical en los tramos estudiados son semejantes a las medidas en otros puentes con características geométricas similares.

También se estimaron las frecuencias dominantes del suelo en los tramos estudiados, y sus valores resultan del mismo orden que los medidos en otros sitios con suelos parecidos. Las diferencias encontradas entre las frecuencias dominantes del suelo y las frecuencias fundamentales de los tramos más altos de la estructura en la dirección transversal parecen indicar que no son de esperarse grandes amplificaciones de las ondas sísmicas de estos tramos.

Cuando se aplicó la carga máxima de camiones en los dos carriles de circulación, la deflexión máxima a la mitad de la longitud de la viga fue inferior a la permitida por el código. Además, esta deflexión se recuperó totalmente al remover la carga. Para esa condición se apreció la apertura de grietas existentes y la aparición de otras en el lecho inferior de la trabe TC, mismas que desaparecieron al eliminar dicha carga. El ancho máximo de grietas observado fue de 0.35 mm

Con la interpretación de las pruebas de carga se puede afirmar que cuando se aplicó la carga máxima de camiones en los dos carriles de circulación, la deflexión máxima a la mitad de la longitud de la viga fue inferior a la permitida por las normas de diseño; además, esta deflexión se recuperó totalmente al remover la carga.

El análisis del efecto del paso de camiones a distintas velocidades y, sobre todo, el paso de éstos sobre el tope colocado para producir impacto, muestra que los incrementos de las deformaciones están dentro de los límites permitidos por las normas de diseño y son congruentes con los encontrados en otros puentes de distintas partes del mundo.

Se debe destacar que la carga máxima vehicular aplicada en los tramos estudia-



dos fue mayor que la prescrita para el diseño de la estructura según las normas empleadas. Esto se acordó con el comité de vías elevadas del gobierno del Distrito Federal para considerar la condición extrema que se pudiera llegar a presentar. En el tramo donde se realizaron las pruebas, con cargas superiores a las que se consideraron en el diseño, las deflexiones fueron menores a las permitidas por las normas de diseño. Además, se verificó que al retirarse estas cargas vehiculares la estructura recuperara su estado inicial. Por lo anterior, se concluye que el tramo estudiado tuvo un comportamiento estructural satisfactorio ante las pruebas realizadas.

RECONOCIMIENTOS

El estudio fue patrocinado por el gobierno del Distrito Federal. Se agradece al Comité Técnico del proyecto del Distribuidor Vial por el apoyo brindado y por sus valiosos comentarios. A José María Rioboo quien, a través de Luis Cabrera y Javier Morales, proporcionó toda la información requerida y las facilidades necesarias para las inspecciones de la obra y el buen desarrollo de las actividades de campo.

También, se agradece a René Cervantes Ramírez todo el apoyo logístico para realizar las pruebas. Se reconoce la eficiente labor desempeñada por Concepción Hernández Rivera, Fernando Ramírez, David Muñoz Vizuet, Ricardo Vera, José Rosales Enriquez, Ponciano Trinidad, Alberto Fuentes González, Raúl Hernández y Salomón Trinidad, en la preparación del material y del equipo, así como en la ejecución de las pruebas de campo. A Verónica María Correa Giraldo, Fernando Ramírez y Ricardo Taborda Ríos por su colaboración en el procesamiento de la información. Se agradecen los comentarios y sugerencias de Roberto Meli Piralla. 🌐

Referencias

- Bendat, J.S. y Piersol, A.G. (1989), "Random Data. Analysis and Measurement Procedure", Wiley Interscience, New York.
- Li, Yi y Mau S.T. (1990), "A Computer Program for Multiple Input-Multiple Output System Identification Using Building Seismic Records". Research Report UHCEE 90-07, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Houston.
- Murià Vila, D y González, R. (1995). "Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México", Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS, núm. 51, pp 25- 45.
- Paultre, P, Chaallal O, y Proulx, J (1992). "Bridge dynamics and dynamic amplification factors—a review of analytical and experimental findings", Can J Civ Eng, vol 19, pp 260-278.
- Sánchez Ramírez, R (1991), "Disparador automático para pruebas de tracción en estructuras", proy 1730, Instituto de Ingeniería, UNAM.

*Participantes

- | | |
|---|--|
| Personal del Instituto de Ingeniería de la UNAM que participo en el estudio del segundo piso del periférico | Wilhelm Morales Aviles
José Enrique Blanco
Carlos Alonso Cruz Noguez
José Camargo Pérez |
| Responsables: David Murià Vila y Abraham Roberto Sánchez Ramírez | Daniel Baruo Aldama Sánchez
Jhave David Alvarez Torresvalle
Marcos Mauricio Chávez Cano
Ricardo Andrés Trujillo Henao
Felipe Bennetts Toledo
Edgar Castro Santiago
Verónica María Correa Giraldo |
| Académicos:
Gerardo Rodríguez Gutiérrez
Miguel Ángel Mendoza García
Roberto Gómez Martínez
José Alberto Escobar Sánchez
Alberto Fuentes González | Técnicos:
Concepción Hernández Rivera
Ponciano Trinidad
Raymundo Mondragón Colín
José Rosales Enriquez,
Salomón Trinidad
José Armando Barcenas
Gerardo Rivas Castillo |
| Estudiantes:
Jonathán Rodea Miranda
Carlos Terrones
Bernardo Orozco Rivas
Carlos Humberto Huerta Carpizo
Roberto Carlos Mendoza | |