



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ESTUDIO COMPARATIVO DE TRES ETAPAS DE
PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL EN UN
PUENTE EN CURVA”**

T E S I S

PRESENTADA POR:

Oscar Cortez Martínez

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

DIRECTOR: M.I. GERARDO RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ



México, D.F.

Agosto 2008

AGRADECIMIENTOS

A la UNAM, por darme la oportunidad de realizar mis estudios y proporcionarme los medios para concluirlos.

A la Facultad de Ingeniería por permitirme desarrollarme profesionalmente.

A todos mis profesores de la Facultad de Ingeniería que me formaron académica y humanamente.

Al M.I Gerardo Rodríguez Gutiérrez por la dirección de éste trabajo, y sobre todo el gran apoyo y por la tolerancia que tuvo durante éste proceso.

Al Instituto de Ingeniería UNAM, por proporcionarme los medios para desarrollar mi trabajo de tesis y también por darme la oportunidad de participaren proyectos.

A todos los profesores que se dieron a la tarea de revisar y corregir éste trabajo.

Al técnico académico, compañero y amigo Miguel Ángel Mendoza por el apoyo que me brindo.

DEDICATORIAS

*A mis padres **Ramona** y **J. Guadalupe**, por su gran amor, enseñanzas y tolerancia a cada instante.*

*A mis **hermanos**, por su incondicional y siempre oportuno apoyo para lograr mis metas.*

*A **Angélica Sanjuanita**, por ser la fuente de inspiración y apoyo en cada momento de mi vida.*

A mis compañeros de la Facultad de Ingeniería, por ser parte de éste trabajo.

Oscar Cortez Martínez

Jurado Asignado

Presidente: **M.I. AGUSTÍN DEMÉNEGHI COLINA**

Secretario: **M.I. GERARDO RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ**

Vocal: **M.I. RICARDO RUBÉN PADILLA VELÁSQUEZ**

1^{er} Suplente: **ING. HECTOR JAVIER GUZMÁN OLGUÍN**

2^{do} Suplente: **M.I. MARCO ANTONIO MACÍAS CASTILLO**

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

M.I. GERARDO RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ

Oscar Cortez Martínez

ESTUDIO COMPARATIVO DE TRES ETAPAS DE PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL EN UN PUENTE EN CURVA

	Página
ÍNDICE	1
INTRODUCCIÓN	2
Antecedentes	3
Objetivos y Alcances	4
1. DESCRIPCIÓN DEL PUENTE EN ESTUDIO	5
1.1 Localización	5
1.2 Proceso constructivo	7
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	11
2.1 El Método de vibración ambiental	11
2.2 Metodología de análisis	11
2.3 Aplicación en puentes	16
3. DESCRIPCIÓN DE LAS DIFERENTES ETAPAS DE PRUEBAS	18
3.1 Descripción y objetivos de la etapa 1 de vibración ambiental	18
3.2 Descripción y objetivos de la etapa 2 de vibración ambiental	24
3.3 Descripción y objetivos de la etapa 3 de vibración ambiental	29
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	32
Análisis de resultados etapa 1	32
4.1 Identificación de frecuencias y formas modales de la superestructura	32
Análisis de resultados etapa 2	46
4.2 Identificación de frecuencias y formas modales de la superestructura	46
Análisis de resultados etapa 3	60
4.3 Identificación de frecuencias y formas modales de la superestructura	60
4.4 Identificación de frecuencias representativas en las pilas	74
5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS TRES ETAPAS DE PRUEBAS	81
5.1 Comparación de frecuencias en las tres etapas de pruebas	81
5.2 Comparación de formas modales en las tres etapas de prueba	84
6. CONCLUSIONES	88
REFERENCIAS	90

Introducción

En la sociedad actual a los ciudadanos les interesa transportarse eficientemente, de manera cómoda y en el menor tiempo posible, de igual manera que sus bienes sean transportados de forma segura y rápida. Como parte de un sistema integral de comunicaciones, las estructuras, y en el caso particular los puentes, deben ser seguros y eficientes con el fin de conformar un sistema de vías de comunicación adecuado.

Un puente puede definirse como una estructura destinada a salvar obstáculos naturales, como ríos, valles, lagos o brazos de mar; y obstáculos artificiales, como vías férreas o carreteras, que se une a la infraestructura necesaria y conformar un sistema de comunicación terrestre.

En la actualidad, el sistema carretero nacional alcanza los 355 796 km de longitud, de los que destacan por su importancia 48 200 km., que conforman la Red Federal Carretera. Dentro de este sistema, se cuenta con 6 520 puentes, con más de 6m de altura como mínimo y que en total conforman aproximadamente 210 km. (*Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2005*)

De todo puente en servicio se puede realizar una doble lectura. Por un lado determinar que capacidad de carga tiene, lo que nos proporciona sus características resistentes actuales y previsibles en un futuro próximo y, por otro, cuales son sus características funcionales.

Debido a la gran importancia de estas estructuras, es conveniente revisar su integridad mediante un programa de mantenimiento periódico que permita tener un conocimiento completo y actualizado de su comportamiento estructural. De acuerdo al tipo de estructura y a partir de su inspección, se selecciona el método que permita evaluar su seguridad estructural. Por lo regular la aplicación de un método implica la realización de diferentes tipos de pruebas, el análisis de la información y en caso necesario la rehabilitación de la estructura.

El interés en dar seguimiento al estado físico de una estructura y detectar daño en un estado temprano de éste, es un tema que ha tomado un auge muy importante, algunos métodos son visuales y experimentales, tales como, métodos acústicos, métodos que se apoyan en campos magnéticos, radiográficos y térmicos (*Kobayashi, 1987*).

Referente a las pruebas experimentales, hay de diferentes tipos, entre ellas se encuentran las pruebas dinámicas, las cuales son utilizadas para identificar las propiedades dinámicas de la estructura. Dentro de este tipo de pruebas destacan las pruebas de vibración ambiental, las pruebas de tracción y el movimiento de registros sísmicos.

En este estudio, se pone especial interés en las pruebas de vibración ambiental que se llevaron a cabo en el puente San Cristóbal por medio de las cuales se determinan sus principales propiedades dinámicas.

Antecedentes

El tramo carretero de Tuxtla Gutiérrez a San Cristóbal de las Casas, es la vía que hoy enlaza a la capital del país con Chiapas, y con los principales puertos marítimos y fronterizos del país, que contribuyen a la promoción de inversiones productivas y turismo, así como a la comercialización de productos agrícolas manufacturados chiapanecos hacia otras regiones. (*Columnasur, 2005*)

Además, comunica a las dos poblaciones más importantes de Chiapas, con lo que se impulsará el corredor comercial entre Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal de las Casas, así como las actividades productivas, la creación de empleos en las zonas de influencia de estas dos poblaciones.

El tramo anterior entre Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal de las Casas comprendía una longitud 85 km siendo especialmente peligroso en tiempo de lluvias, por lo que se tomó la decisión de construir esta nueva vía que cuenta con 46.2 km de longitud y que atiende el tránsito estimado en 1 873 vehículos diarios y la demanda de uso de la carretera. (*Columnasur, 2005*)

En la realización de este camino se contempló el puente San Cristóbal que comenzó su construcción el día 8 de diciembre de 1999, iniciando en dicha fecha estos trabajos. El día 24 de octubre de 2004, dos semanas antes de concluir el puente, por la mañana sobrevino el colapso de la mitad derecha del puente, permaneciendo sin daño alguno la mitad izquierda. El colapso se debió a que al final de la etapa de construcción una de las pilas mostraba un desplazamiento horizontal de 20 centímetros que sería corregida una vez unido el puente. Principalmente la pérdida de horizontalidad de los patines de la superestructura y el desfase entre los extremos de los voladizos impidió conectar con exactitud la dovela de cierre; en esta zona habrían ocurrido previamente varios sismos, lo que ocasionó vibraciones en la estructura dañando aun más los apoyos, acelerando la caída. Después de los intensos trabajos de reconstrucción, finalmente el puente se inauguró el 15 de mayo de 2006. (*La Jornada, 2006*)

Ya el puente en operación, se le han efectuado mediciones de vibración ambiental en tres diferentes etapas, en un período comprendido entre agosto de 2006 y abril de 2007.

Las pruebas de vibración ambiental pueden resultar una herramienta muy útil, ya que a través de estas es posible comparar las propiedades dinámicas del sistema en las diversas etapas; también se utilizan para evaluar los daños causados a la estructura después de un evento sísmico por medio de la obtención de la frecuencia fundamental de vibrar de la estructura, o bien, estimar la rigidez de la estructura que ha sido reforzada estructuralmente.

Con la innovación tecnológica en instrumentos de vibración de alta sensibilidad, computadoras digitales, técnicas de captura, procesamiento, análisis e interpretación de datos, el método de vibración ambiental resulta de fácil aplicación y es posible obtener un estudio confiable de las frecuencias naturales de vibración de la estructura, útiles para identificar las diferentes formas modales y otras propiedades dinámicas.

Cabe mencionar que el puente en estudio es un puente en curva por lo que plantea una problemática diferente en el diseño, análisis y construcción en comparación con un puente horizontal recto. Debido a las restricciones geométricas y geofísicas de las vialidades plantean frecuentemente la necesidad de proyectar geoméricamente puentes con una configuración curva horizontal como es nuestro caso.

La experiencia en el diseño y en la construcción de este tipo de puentes nos alerta del cuidado que se debe tener en cada una de sus etapas, tanto de su fase de diseño (concepto, análisis, dimensionamiento y detalle) así como de su fase constructiva (fabricación, transporte y montaje). Actualmente en México no existe una normativa para el diseño de puentes curvos horizontales, por lo que convencionalmente se recurre al código de diseño AASTHO (*AASHTO, 2003*) y al código japonés (*Japan Road Association -JRA-, 1988*) para su dimensionamiento.

Objetivos y alcances

Los objetivos principales de este trabajo son:

- Obtener las propiedades dinámicas del puente San Cristóbal a través de una metodología experimental de vibración ambiental.
- Revisar y comparar los resultados de la vibración ambiental obtenida en cada una de las 3 etapas de monitoreo.
- Con base en los resultados obtenidos, establecer estrategias para futuras mediciones y revisiones de la estructura en estudio

Con el primer objetivo se pretende obtener, mediante la metodología experimental de vibración ambiental, las frecuencias naturales y formas modales más significativas de la superestructura y de las pilas del puente San Cristóbal.

El segundo objetivo consiste en el análisis de la información obtenida en cada una de las tres etapas a partir de la metodología experimental de vibración ambiental que se le han efectuado al puente San Cristóbal en un determinado periodo; y con esto detectar variaciones en sus propiedades dinámicas, sobre todo, su rigidez.

El tercer objetivo pretende establecer nuevas estrategias en el proceso de monitoreo de la estructura a partir de los resultados, y de esta manera tener mayor eficiencia en las pruebas que se le realicen al puente San Cristóbal.

1. DESCRIPCIÓN DEL PUENTE SAN CRISTÓBAL

1.1 Localización

El puente San Cristóbal se encuentra ubicado en el km 24 +921 de la autopista Tuxtla Gutiérrez – San Cristóbal en el Estado de Chiapas, el cual permite cruzar una cañada de 200 m de profundidad y 324 m de longitud (figura 1).

Este es el último de un total de cinco puentes construidos a lo largo de los 46.2 km de extensión de esta vía que reducirá a 40 minutos el tiempo total de recorrido entre la capital del estado y la colonial ciudad.



Fig. 1 Puente San Cristóbal

El puente San Cristóbal se encuentra en una curva horizontal, con una curvatura transversal de $2^{\circ} 45'$ y una pendiente longitudinal de 5 y 10 % respectivamente. La subestructura esta compuesta de dos estribos convencionales de concreto reforzado, y dos pilas de sección rectangular del mismo material, de aproximadamente 61 m de altura cada una. Sin embargo, la máxima profundidad, medida de la parte inferior de la superestructura al fondo de la barranca, es aproximadamente de 200 m. La superestructura consiste en una viga continua de acero ortotropico 50 y un cajón compuesto de altura constante comprendido en 3 tramos (72.53 m, 177.94 m, 72.53 m), con una longitud total de 324 m. En la parte superior, encontramos un ancho de calzada de 13.64 m de los dos carriles. En la figura 2 y 3 se presentan la elevación y la vista en planta respectivamente, del puente.

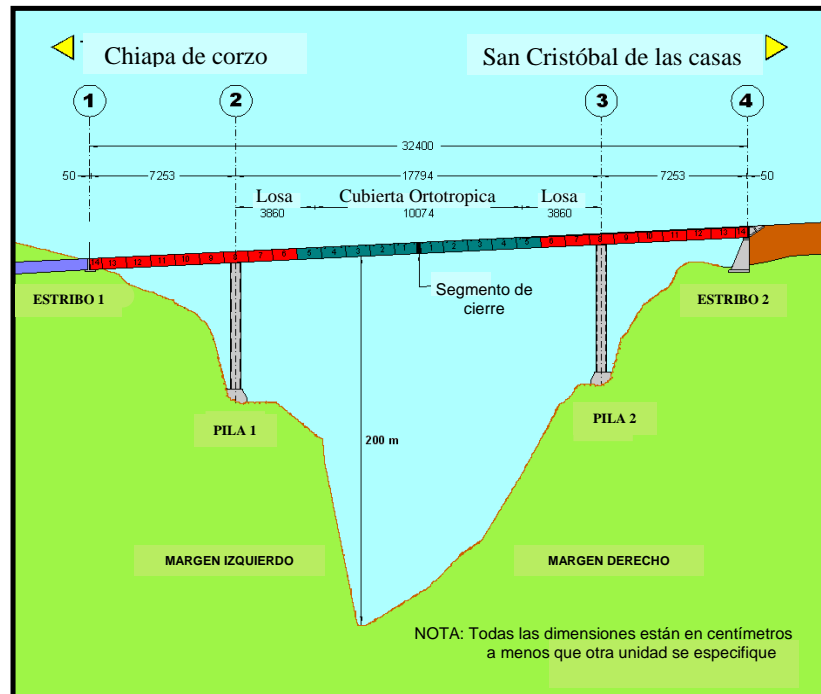


Fig. 2 Vista de la elevación del puente San Cristóbal

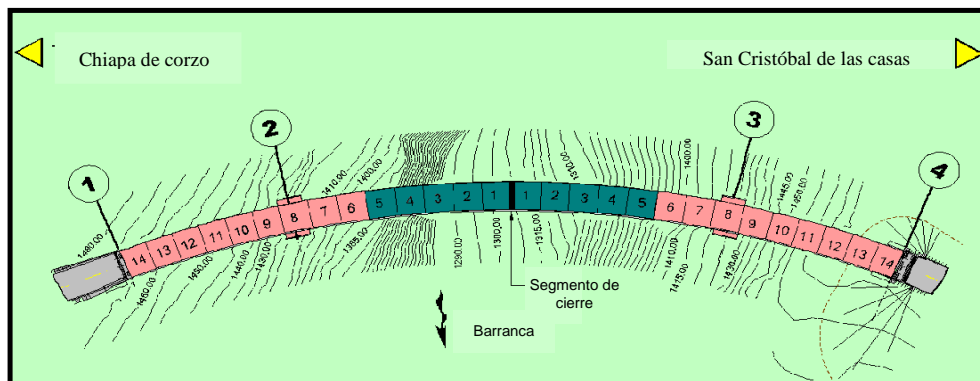


Fig. 3 Vista en planta del puente San Cristóbal

1.2 Proceso Constructivo

El método del levantamiento para la construcción de la superestructura es el método de lanzado o empujado para ambos lados de la barranca. La mitad de la superestructura está lanzada cuesta arriba y la otra mitad cuesta abajo. El lanzado de los segmentos esta realizado usando un gato hidráulico de una sola acción (figura 4) montado en una viga recta frenando y estirando (lanzado cuesta arriba) o empujando (lanzado cuesta abajo) sujetadas al reborde inferior. Los cajones especialmente diseñados que se lanzaron, fueron construidos en los patios de montaje y las guías laterales sobre las pilas. Este mecanismo garantiza un proceso de lanzado estable y el control de la alineación horizontal y vertical de los segmentos (*New Dimensions in Bridges, Flyovers, Overpasses and Elevated Structures, 2005*).



Fig. 4 Gato hidráulico

La superestructura

Cada cantiliver comprende 28 segmentos: los primeros cinco segmentos de cada cantiliver son ortotropicos, mientras que los segmentos restantes tienen arriba una losa de concreto postenzado de 0.30 m, formando una sección compuesta (figura 5). Los montantes proporcionan la interfase entre los rebordes superiores de la viga del cajón abierto y la losa de concreto (figura 6). De acuerdo a los planos del proyecto, la superestructura se divide en tres partes: dos segmentos laterales de 111.63 m de largo con la sección compuesta y un segmento intermedio de 100.74 m de largo con sección ortotrópica. La mayoría de la armadura y paneles fueron soldados y ensamblados en sitio conformándose la caja de segmentos de 12 m de largo cada uno. El montaje y la construcción de los segmentos fueron realizados sobre todo detrás de los estribos, en los patios especiales, construidos especialmente para este propósito.

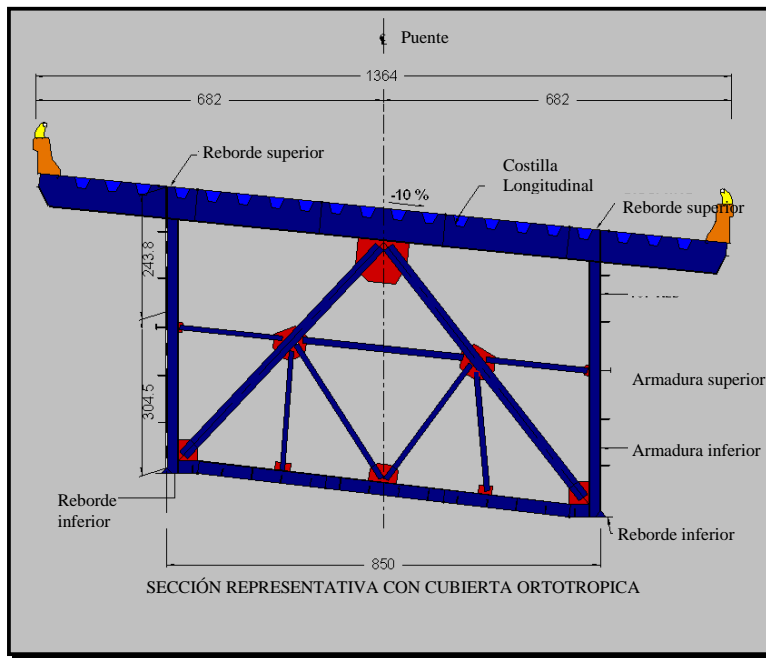


Fig. 5 Sección compuesta

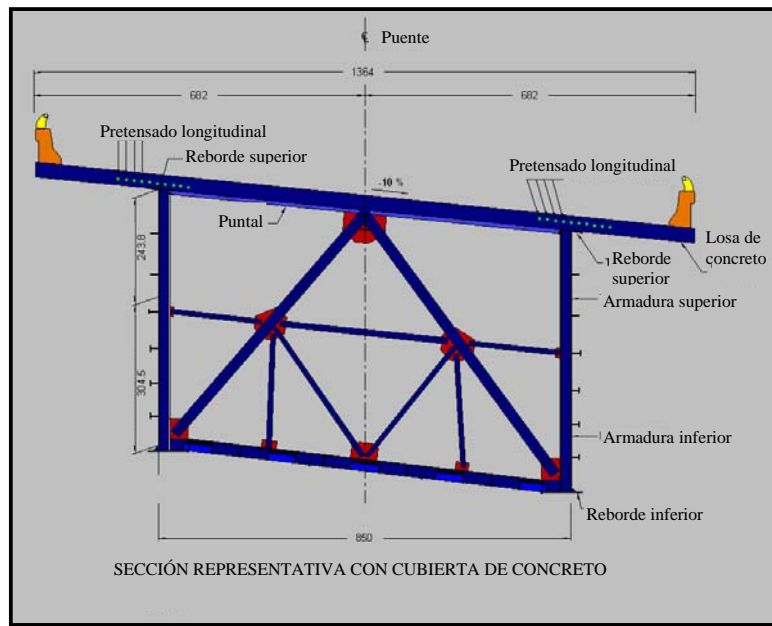


Fig. 6 Cajón abierto y losa de concreto

Vale la pena mencionar que el parapeto y la losa actúan como contrapesos durante el lanzamiento y a cada momento los cables se están tensando, parte de la deflexión vertical en la punta es recuperada.

De acuerdo con el proyecto, un contrapeso adicional de 436 t se encuentra dentro de los últimos segmentos del lado de los extrados. Debido a la posición del cantiliver y los alineamientos horizontal y vertical de la superestructura, es importante supervisar los desplazamientos verticales y laterales del segmento de la punta para poder emparejar las dos superestructuras.

Otro factor que vale la pena describir es el desplazamiento de los segmentos de la superestructura en los apoyos provisionales en las pilas. Estos apoyos se localizan en elementos de concreto reforzado que se construyen como extensiones de los dispositivos sísmicos para restringir los movimientos laterales. Por arriba de estos elementos, se vierte un mortero de alta resistencia y encima de este, se pone una placa de acero inoxidable de 1 mm de espesor.

Se lanzan, como relleno, aproximadamente de 8 a 10 filas de neopreno (0.60x0.20x0.02 cm) por encima de la placa de acero inoxidable antes de lanzar. Una de las caras de estos rellenos (la que está en contacto con la placa de acero inoxidable), tiene unido, un recubrimiento de teflón para disminuir la fuerza de fricción durante el lanzado. Cuando la superestructura es lanzada, los rellenos de neopreno deslizan sobre la placa de acero y después de un poco de distancia, el relleno es expulsado en la parte delantera y regresa a la parte de atrás a la fila de los rellenos. Operadores del campo realizan esta tarea, y el ciclo se repite tantas veces como, se logre una cierta longitud del cantiliver.

A pesar del teflón, la fricción está siempre presente y aumenta con la magnitud de la fuerza normal en el apoyo, alcanzando su máximo valor al final del lanzado, debido a lo largo del cantiliver y lo grande la reacción en relación a las pilas. Debido a la curvatura transversal del puente, estas reacciones en los apoyos provisionales de los lados de los intrados y extrados no son las mismas, siendo mayores en estos últimos. Además, por la pendiente longitudinal de la superestructura, cuando se lanza en forma ascendente la fuerza horizontal necesita un empuje de los gatos hidráulicos mayor que el necesario para el empuje de la estructura en forma descendente.

Para supervisar el comportamiento de la estructuras durante el proceso constructivo, se instrumentó para diversos fines, tales como evaluar la temperatura, medir los esfuerzos y monitorear los desplazamientos en las secciones se instalaron los siguientes tipos de sensores:

1.- Temperatura

Para evaluar los cambios de temperatura y predecir deformaciones de la superestructura de acero antes de que se soldara el segmento y se emparejara ambos lados, se instalaron sensores semiconductores de temperatura en la parte superior e inferior de los rebordes de los segmentos 4 y 8.

2.- Medir Esfuerzos

Muestra la posición de medidas de esfuerzos y sensores de temperatura dentro de la sección de la caja en los segmentos 4, y 8 (figura 7) que se seleccionó basada en los resultados de análisis numéricos. Esta serie de sensores, a lo largo de la superestructura, proporcionan una visión amplia de las variaciones de esfuerzos longitudinales del puente en cantiliver.

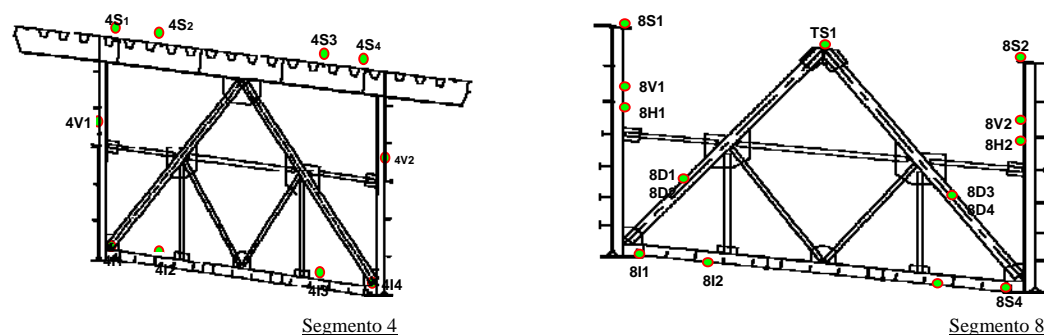


Fig. 7 Localización de puntos de medición de tensión

3.- Desplazamientos

Se realizó un estudio topográfico preciso en cada una de las etapas del lanzado, verificando constantemente los desplazamientos verticales y laterales en la punta del primer segmento, utilizando cuatro dispositivos prismáticos topográficos, tres a lo largo del reborde superior de la superestructura y uno en el reborde inferior del lado de los intrados. La supervisión topográfica fue apuntar y estudiar los movimientos de la estructura, asegurando un emparejado apropiado de ambos lados del puente. Además, durante el lanzado, la alineación vertical de la pila, se verifica utilizando marcas especiales en la pila, usando elementos que restringían los movimientos laterales de la superestructura.

Antes del lanzado, obligadamente se desarrolla un modelo geométrico electrónico en 3D, que genere en orden las coordenadas a lo largo de los intrados y extrados en curva del puente. Esta tarea involucro: a) Definición de las curvas (intrados y extrados) y pendientes; b) Determinación de la longitud de las curvas; c) Determinación de coordenadas de las curvas; d) Definición de las coordenadas iniciales y finales de cada segmento en su posición final; y e) Verificando y asegurando la posición final de la diagonal.

4.-Registros de Campo

La figura 8 muestra como ejemplo, los registros de micro-tensión que obtuvieron algunas medidas de tensión en el reborde superior e inferior y las armaduras del segmento 8 durante las diferentes fases del lanzamiento del lado de Tuxtla Gutiérrez.

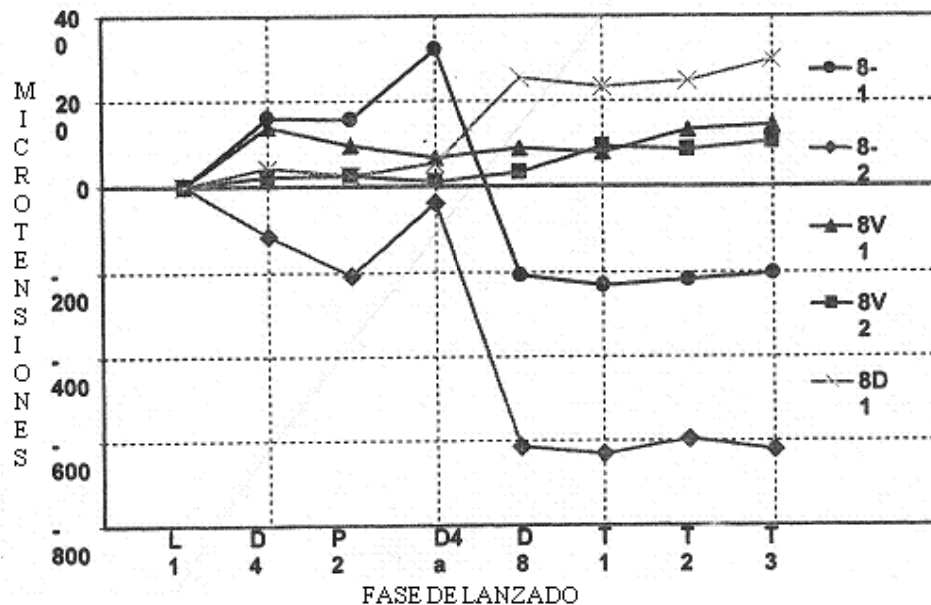


Fig. 8 Registros de micro-tensión del segmento 8

Se asocian sensores a las posiciones mostradas en la figura 7 considerando que en el lanzado las fases se identifican como sigue: L1 es la posición inicial de los segmentos en el patio de fabricación; D4 se asocia al momento cuando el segmento 4 se va al estribo 1 y el cantiliver tiene una longitud de 47 m; P2 corresponde a la llegada de segmento 1 a la pila 2; la posición D4a es similar a D4 pero el segmento 4 se va a la pila 2; la posición D8 se asocia cuando el segmento 8 se va a la pila 2 y se logra el cantiliver más largo; T1 significa que los últimos 24 cables pretensados están en el proceso de tensión; T2 y el T3 se asocian a etapas intermedias y finales de tensión, respectivamente.

Estos diagramas revelan una diversidad de comportamientos, no obstante los más lógicos son aquellos asociados a las medidas en el reborde inferior (4-1 y 4-2; 8-1 y 8-2) porque su comportamiento es similar y según lo esperado. Las deformaciones verticales en las armaduras de los segmentos 4 y 8 (sensores 4V1, 8V1 y 8V2) demuestran un comportamiento previsto que logra los valores máximos para los cantilivers máximos. Si la conversión de esfuerzos a tensiones se realiza, los resultados demostrarán que los valores de la tensión están debajo de los valores permisibles para el diseño (*New Dimensions in Bridges, Flyovers, Overpasses and Elevated Structures, 2005*).

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Método de Vibración Ambiental

En los estudios de vibración ambiental se registran las vibraciones causadas por la actividad humana, el tráfico de vehículos, la maquinaria industrial y factores ambientales como el clima; que abarca la temperatura del sitio, el viento, grado de humedad, etc. Este tipo de vibraciones son de muy baja magnitud, es decir, muy pequeñas, muchas de las veces imperceptibles para el ser humano, de allí la importancia que ha tenido el desarrollo de la tecnología para captar y medir esta clase de vibraciones.

Se sabe que las primeras pruebas de vibración ambiental se realizaron en el año de 1936, en los Estados Unidos por la Comisión de Investigación de Costas y Geodesia que realizó estudios de vibración ambiental para determinar algunas propiedades dinámicas en edificios (*Ivanovic, 1995*).

El inicio de los estudios de vibración ambiental se debe principalmente a la innovación tecnológica en instrumentos de vibración de alta sensibilidad, computadoras digitales, técnicas de captura, procesamiento, análisis e interpretación de datos. Gracias a la gran ayuda que proporcionan todas estas herramientas, es posible tener un estudio preciso y confiable de las frecuencias naturales, útiles para identificar los diferentes modos de vibración y otras propiedades dinámicas como el amortiguamiento y el comportamiento no lineal de las estructuras.

El conocimiento de estas propiedades es esencial para entender e interpretar con seguridad, la respuesta de puentes de este tipo a factores ambientales como viento, tráfico vehicular y movimientos sísmicos.

2.2 Metodología de Análisis

Para realizar estudios de vibración ambiental, para cualquier estructura, son necesarios dispositivos y equipo de captura y procesamiento de la información, de modo que las señales registradas en campo sean procesadas para su posterior análisis.

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM (IINGEN), se han desarrollado sistemas de obtención de datos y programas que agilizan el procesamiento y definen los resultados del análisis con mayor precisión. (*Mendoza M., 2005*)

La información de campo es registrada a través de un sistema de adquisición de datos (figura 9) formado por acelerómetros, filtros y amplificadores, acondicionador de señales, analizador de espectros y una computadora personal; este sistema tiene la capacidad de almacenar la información de hasta 16 acelerómetros simultáneamente funcionando. Para nuestro caso se utilizaron solamente 8 canales para realizar las pruebas.

La vibración ambiental de la estructura es captada por los servoacelerómetros o sensores uniaxiales en unidades de aceleración (amplitud de aproximadamente $10^{-5}g$), posicionados en la estructura sobre bases metálicas para asegurar la inmovilidad de los sensores (figura 10), estas señales se transmiten a unos acondicionadores para amplificarlas, tomando en cuenta, que las frecuencias superiores a los 30 Hz se filtran para eliminar ruidos de alta frecuencia.



Fig. 9 Sistema de adquisición de datos



Fig. 10 Acelerómetros en base metálica

Una vez filtrada la señal, se envía a una computadora personal para almacenar la información (que será analizada) y a un espectrómetro donde es posible visualizar en campo (figura 11) el registro de la vibración en unidades de aceleración y en tiempo real para obtener algunos resultados preliminares de las frecuencias fundamentales de vibración de la estructura.

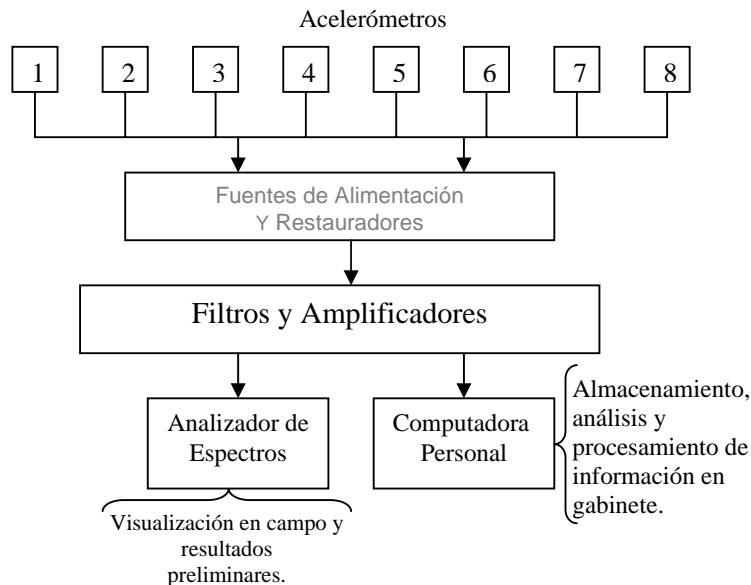


Fig.11 Esquema de flujo de adquisición de datos

Para las tres etapas se midieron las aceleraciones generadas en los tramos seleccionados de la estructura por la actividad normal de su entorno. Se instalaron varios arreglos de acelerómetros, dependiendo de la etapa a la que se refirió fue el arreglo de los dispositivos para medir las vibraciones ambientales, estos se ubicaron en diversos puntos sobre la estructura y en el suelo.

Una vez capturadas las señales de aceleración, es necesario procesarlas mediante un análisis espectral convencional. Este análisis espectral, nos permite cambiar del dominio del tiempo al de la frecuencia para analizar una señal y está basado en la aplicación de la transformada de Fourier a un proceso de origen aleatorio (*Bendat y Piersol, 1989*).

Sea $x(t)$ una señal de aceleración, su transformada de Fourier se encuentra dada por la expresión:

$$X(f) = \int_0^T x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

La transformada de Fourier es una función compleja, pues si se aplica la identidad de Euler a la expresión anterior, la ecuación (1) puede escribirse de la siguiente manera:

$$X(f) = \int_0^T x(t) \cos(2\pi f t) dt + i \int_0^T x(t) \sen(2\pi f t) dt$$

Una de las formas para expresar una señal $x(t)$ en el dominio de la frecuencia consiste en calcular su función de densidad espectral, también conocida como espectro de potencia (G_{xx}), que es una función que representa la distribución de potencia de la señal con respecto de la frecuencia. Esta función se define como:

$$S_{xx}(f) = X^*(f) \cdot X(f)$$

donde:

$X(f)$ transformada de Fourier de la señal de aceleración

$X^*(f)$ conjugado de la transformada de Fourier de la señal de aceleración

La información de las frecuencias negativas y positivas de la función de densidad espectral es la misma, debido a que dicha función es simétrica. Esto hace que sea más conveniente realizar el análisis de un solo lado del espectro, así se tiene:

$$G_{xx}(f) = 2S_{xx}(f)$$

Y se define la función $G_{xx}(f)$ como:

$$G_{xx}(f) = \begin{cases} 2S_{xx}(f) & \text{si } f > 0 \\ S_{xx}(f) & \text{si } f = 0 \\ 0 & \text{si } f < 0 \end{cases}$$

Si se tienen dos señales de aceleración correspondientes a dos puntos de la estructura, $x(t)$ y $y(t)$, sus transformadas de Fourier están dadas por:

$$X(f) = \int_0^T x(t)e^{-i2\pi ft} dt$$

$$Y(f) = \int_0^T y(t)e^{-i2\pi ft} dt$$

Se define el espectro de potencia cruzado entre las dos señales $x(t)$ y $y(t)$ como:

$$S_{XY} = X^*(f) \cdot Y(f)$$

Y procediendo de igual manera que con el espectro de potencia:

$$G_{XY}(f) = 2S_{XY}(f)$$

Una vez que se han obtenido los espectros de potencia de cada señal y los espectros cruzados de potencia entre pares de señales de aceleración, se procede a obtener ciertas relaciones entre dichas funciones, que nos permitan estimar, junto con la información de los espectros de potencia y mediante las consideraciones adecuadas, las propiedades dinámicas del sistema.

La determinación de las propiedades dinámicas de un sistema requiere de la obtención de la información en el dominio de la frecuencia propia de dicho sistema. Para lograr esto se estiman las funciones de transferencia en amplitud y ángulos de fase, así como las funciones de coherencia entre dos señales.

Las funciones de transferencia se pueden obtener si se tienen dos señales de aceleración, sean $x(t)$ y $y(t)$, y sus correspondientes transformadas de Fourier $X(f)$ y $Y(f)$, la función de transferencia entre esas dos señales se define como:

$$FT = \frac{Y(f)}{X(f)}$$

Evidentemente la función de transferencia puede obtenerse también a partir de los espectros de potencia de las señales:

$$FT = \frac{|S_{YY}(f)|^{\frac{1}{2}}}{|S_{XX}(f)|^{\frac{1}{2}}} = \frac{|G_{YY}(f)|^{\frac{1}{2}}}{|G_{XX}(f)|^{\frac{1}{2}}}$$

La función de transferencia nos sirve para encontrar la relación de amplitudes que tienen dos señales.

La determinación de la correlación de cada componente frecuencial de dos señales es recurriendo a la relación que existe entre las funciones del espectro cruzado y los auto espectros de cada señal.

A partir de la siguiente desigualdad que se cumple para toda f ,

$$|G_{XY}(f)|^2 \leq G_{XX}(f)G_{YY}(f)$$

Tenemos asimismo que

$$|S_{XY}(f)|^2 \leq S_{XX}(f)S_{YY}(f)$$

Y la función de coherencia se define como

$$\gamma_{XY}^2 = \frac{|S_{XY}(f)|^2}{S_{XX}(f)S_{YY}(f)} = \frac{|G_{XY}(f)|^2}{G_{XX}(f)G_{YY}(f)}$$

Se tiene entonces que

$$0 \leq \gamma_{XY}^2 \leq 1$$

La función de coherencia permite estimar en función de la frecuencia, el grado de linealidad entre dos señales de aceleración $x(t)$ y $y(t)$. La escala para medir la linealidad varía de 0 a 1; los efectos de coherencia inferiores a uno pueden deberse a: ruido en las señales $x(t)$ y $y(t)$ o que no están correlacionadas; a efectos no lineales; a errores por falta de resolución numérica, o a desfases introducidos por el dispositivo experimental. En cambio, un valor de coherencia de uno significa que la relación entre las señales es completamente lineal.

Para la obtención del ángulo fase se retoma que el espectro cruzado de potencia entre dos señales de aceleración $x(t)$ y $y(t)$ se definió anteriormente como:

$$G_{XY}(f) = 2S_{XY}(f); S_{XY} = X^*(f)Y(f)$$

Ya que el espectro cruzado de potencia es resultado de la multiplicación de dos números complejos, $G_{XY}(f) \in \mathbb{C}$ y puede ser expresado en forma polar de la manera siguiente:

$$G_{XY}(f) = |G_{XY}(f)|e^{-i\theta_{XY}(f)}$$

Donde el valor absoluto y el ángulo de fase están determinados por las relaciones:

$$\begin{aligned} |G_{XY}(f)| &= \sqrt{C_{XY}^2 + Q_{XY}^2} && \text{valor absoluto} \\ \theta(f) &= \tan^{-1} \frac{Q_{XY}(f)}{C_{XY}(f)} && \text{ángulo de fase, } 0^\circ \leq |\theta(f)| \leq 180^\circ \end{aligned}$$

donde:

C_{XY} parte real de $G_{XY}(f)$

Q_{XY} parte imaginaria de $G_{XY}(f)$

La fase entre dos señales de aceleración permite saber la polaridad del movimiento entre el par de puntos que se está analizando espectralmente. Un valor de ángulo de fase en valor absoluto mayor de 90° indica que las dos señales están “desfasadas” en su movimiento, y un valor absoluto de ángulo de fase menor a 90° nos señala que se encuentran “en fase”.

Es importante señalar que al realizar el promedio de los espectros de potencia, el ruido ajeno a las propiedades del sistema tiende a eliminarse y que entre mayor número de eventos sean utilizados en el análisis, más representativa será la señal.

El análisis descrito anteriormente se hizo por medio de un programa de cómputo para la captura y el procesamiento de la información, denominado IFCIIC (*Mendoza M. 2005*) desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM que toma como base el sistema de captura IFCIIA (*Guzmán et al, 1992*). Dicho programa está dividido en cinco módulos: configuración, captura, cambio de configuración, visualización y procesamiento. Con IFCIIC se capturan los datos para pruebas dinámicas y se procesan las señales de par en par; cuenta entre sus funciones, con varias rutinas de análisis de señales para calcular autoespectros, espectros cruzados, coherencias y ángulos de fase. Debido a que estas funciones (exceptuando el autoespectro) implican trabajar con dos señales a la vez, el número mínimo de señales que se pueden procesar en el programa es dos.

2.3 Aplicación en puentes

Para llevar a cabo un análisis de pruebas de vibración ambiental hay que tomar en cuenta varios aspectos. Primero hay que definir lo que se pretende identificar por medio de estas pruebas, es decir que frecuencias y modos de vibración se desea determinar.

Los estudios de vibración ambiental son de gran utilidad para la determinación de las propiedades dinámicas de una estructura en forma práctica, por lo cual, es posible realizar algunas comparaciones con la idealización de modelos teóricos.

Con la experiencia obtenida en pruebas pasadas en puentes (*Mendoza R. 2004*), ha sido posible establecer una serie de recomendaciones para llevar a cabo un buen estudio de vibración ambiental en los mismos, como la correcta ubicación de los acelerómetros en puntos estratégicos del puente y el tiempo adecuado para la captura de señales; de esta manera se obtienen resultados precisos y confiables, quedando en estrecha relación con algún modelo teórico que pudiera generarse.

Para identificar las principales formas modales de un puente en curva como es el caso, se deben obtener las frecuencias de vibración más significativas en la dirección vertical (V), transversal (T) y longitudinal (L) de la estructura. Con esto se pretende identificar las formas modales verticales y de torsión, así como transversales del tablero.

El análisis se realiza por pares de señales, para la identificación de frecuencias y modos de vibrar de la estructura se escogen, según el componente del sistema que se trate, ciertos puntos instrumentados como referencia, con los cuales se calculan las funciones de transferencia con respecto a los demás puntos instrumentados que contribuyen a definir el modo de vibrar por identificar.

En la identificación de las frecuencias de vibrar en los componentes V y T del tablero, se procede primero a seleccionar las frecuencias asociadas a ordenadas máximas del cociente espectral entre diferentes puntos instrumentados, los cuales corresponden en general a las frecuencias naturales de vibrar del sistema en dichos componentes.

Después, con los cocientes espectrales se revisan que las frecuencias identificadas sean aquellas que, además de estar asociadas a las amplitudes máximas del cociente espectral, tengan altas coherencias y correspondan a las diferentes formas modales del puente.

Las formas modales pueden clasificarse, a grandes rasgos, en modos de vibrar simétricos y modos asimétricos o antisimétricos como se les nombra en algunas ocasiones. Para diferenciar unos modos de otros es necesario observar el gráfico que representa la forma modal y trazar imaginariamente una línea perpendicular al eje de las abscisas tratando de situarla a la mitad del intervalo que comprenda la grafica; al hacer esta división imaginaria, si la parte izquierda es idéntica a la parte derecha de la gráfica en cuanto al signo de los valores se refiere, se le llama “modo simétrico”, por el contrario si la división nos refleja que un lado tiene signo positivo y la otra parte comienza en el nodo con valores negativos recibe el nombre de “modo asimétrico” como se muestra en la figura 12.

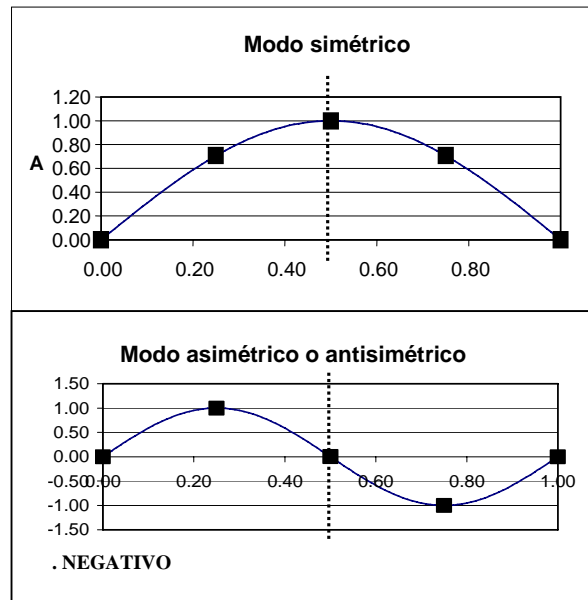


Fig. 12 Modos simétricos y asimétricos respectivamente.

Algunos puntos de medición, para ciertas formas modales resultan ser nodos. En estos puntos no existe movimiento relativo para dichos modos, por lo cual no servirían como punto de referencia para detectar la forma modal donde esto ocurra. Tal es el caso de comparar con respecto a un punto ubicado en el centro del claro, sólo se podrán identificar modos simétricos debido a que los asimétricos, lo son con respecto al centro del claro y ese punto para esos modos resulta ser un nodo.

3. DESCRIPCIÓN DE LAS DIFERENTES ETAPAS DE PRUEBAS

3.1 Descripción y objetivos de la etapa 1 de vibración ambiental

Esta primera etapa fue realizada en Agosto de 2006 con el objetivo de monitorear las propiedades dinámicas del puente.

Para la primera etapa se consideran los estudios de vibración ambiental para establecer un registro del desempeño estructural y eficiencia del puente San Cristóbal, durante el tiempo que lleva en servicio hasta la fecha en que las pruebas son realizadas, la metodología de adquisición de datos, el procesamiento y el análisis de la información fue la misma en las tres etapas.

En dicha etapa, las pruebas de vibración ambiental consistieron en la instalación de acelerómetros de alta resolución en diversos puntos de interés, estos dispositivos se colocaron en tres diferentes direcciones tanto vertical (V), longitudinal (L) y transversal (T). Con el objetivo de recorrer totalmente el tablero central y los tableros de ambos extremos, se estructuraron arreglos colocando los sensores en puntos representativos como fue en pilas, estribos y puntos céntricos en los claros de cada tablero.

El programa realizado constó de 7 pruebas que denota la bitácora 1. Estas pruebas se desarrollaron mediante 5 diferentes tipos de arreglos, tomando como referencia los puntos 11 y 12 en todos y cada uno de los arreglos como se muestra en la figura 13, se toman como referencia estos puntos antes mencionados debido a la configuración del tablero central, considerando que su ubicación es la adecuada para poder identificar los modos asimétricos, ya que si se colocan al centro del tablero fácilmente se identificarán porque es un punto de inflexión como se muestra en la figura 12.

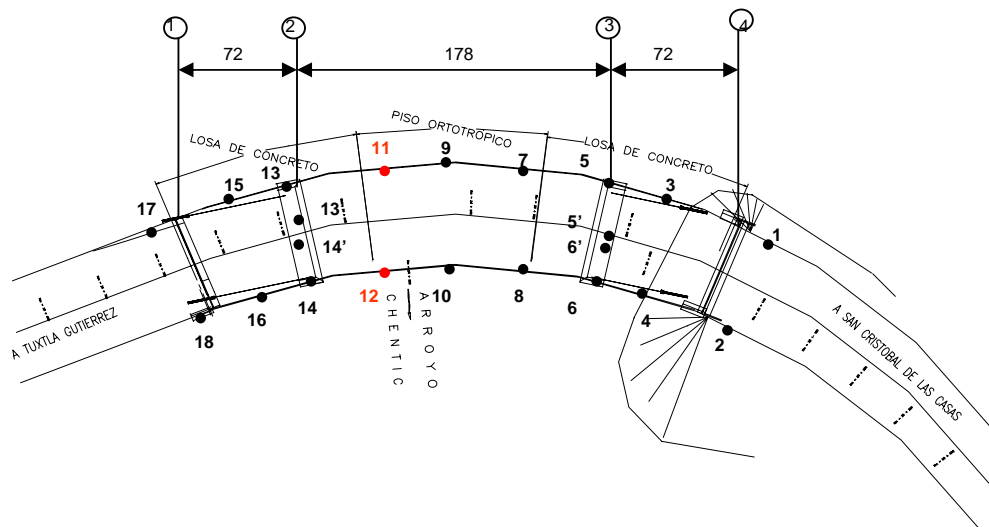


Fig. 13 Ubicación de todos los puntos colocados en el puente puntos 11 y 12 de referencia

En cada prueba se registraron historias de tiempo simultáneas para 8 canales asignados a 8 puntos con determinada configuración en la estructura.

Para este caso se capturaron registros con una duración promedio de 12.50 minutos para cada prueba.

El primer arreglo consta de una sola prueba (1). Se instrumentó el margen derecho del puente tomando como referencia los puntos 11 y 12 colocados en el tablero central, los demás sensores fueron colocados en la pila, al centro del tablero extremo y al estribo, todos estos correspondientes a dicho margen, tal como se muestra en la figura 14. En esta prueba los sensores se colocaron en dirección vertical.

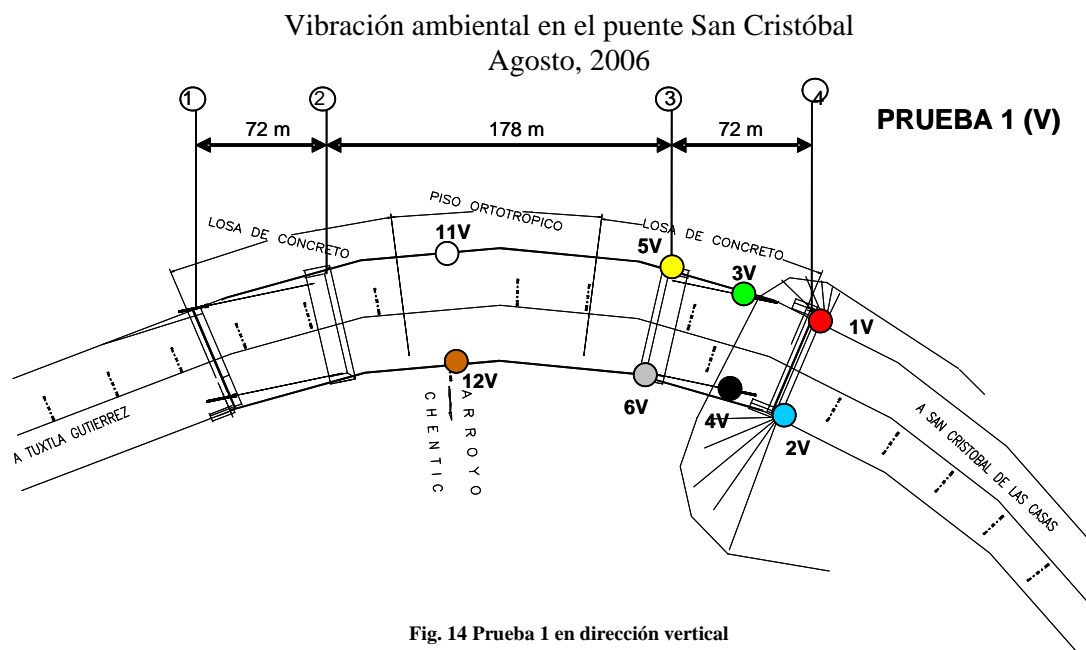


Fig. 14 Prueba 1 en dirección vertical

El segundo arreglo consta de una sola prueba (2). Tiene la instrumentación del mismo margen derecho que el arreglo anterior, la única variación fue que los sensores encontrados en la pila se corrieron al centro como se muestra en la figura 15. En esta prueba se colocaron los sensores en dirección transversal y longitudinal.

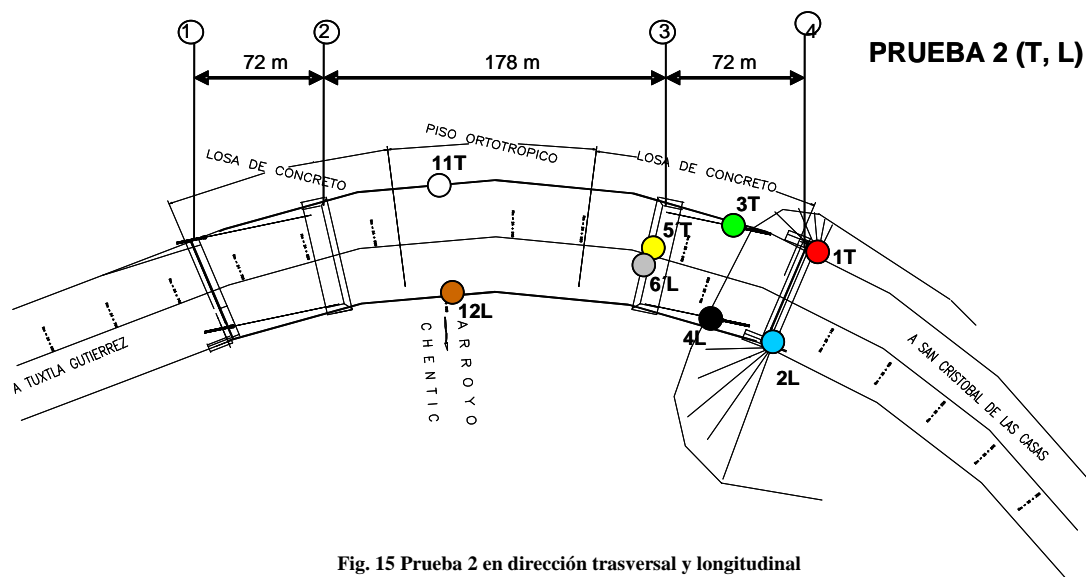


Fig. 15 Prueba 2 en dirección trasversal y longitudinal

El tercer arreglo consta de una sola prueba (3). Se instrumentó el tablero central colocando sensores en la pila del margen izquierdo del puente, del margen derecho hay sensores a la mitad y dos tercios del tablero tal y como se muestra en la figura 16. En esta prueba hay sensores colocados en dirección vertical.

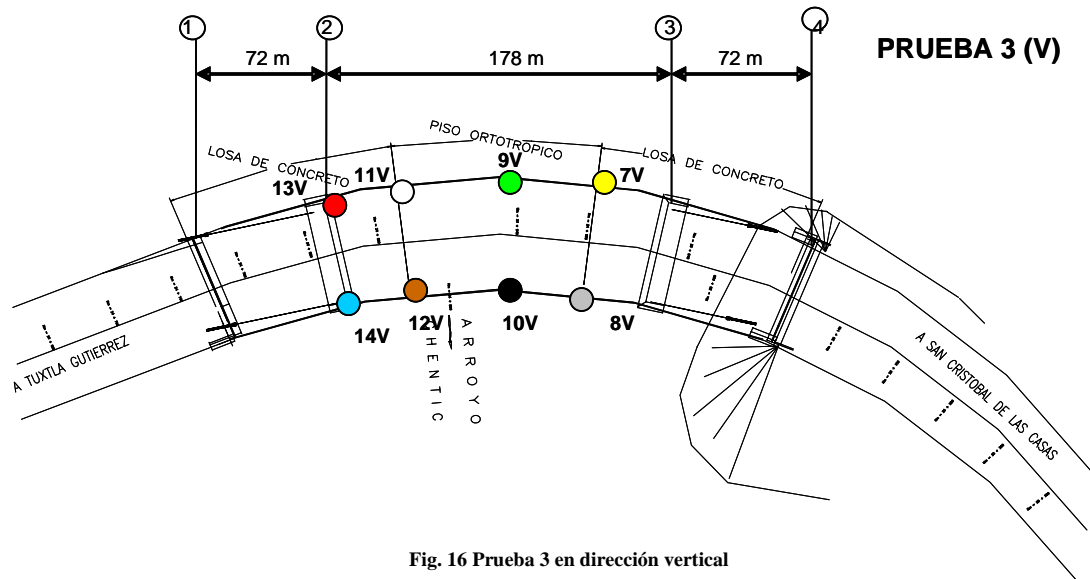


Fig. 16 Prueba 3 en dirección vertical

El cuarto arreglo consta de una sola prueba (4). Se instrumentó de igual manera que en el arreglo anterior sólo que los sensores ubicados en la pila se corrieron al centro como se muestra en la figura 17. En esta prueba los sensores se colocaron en dirección transversal y longitudinal.

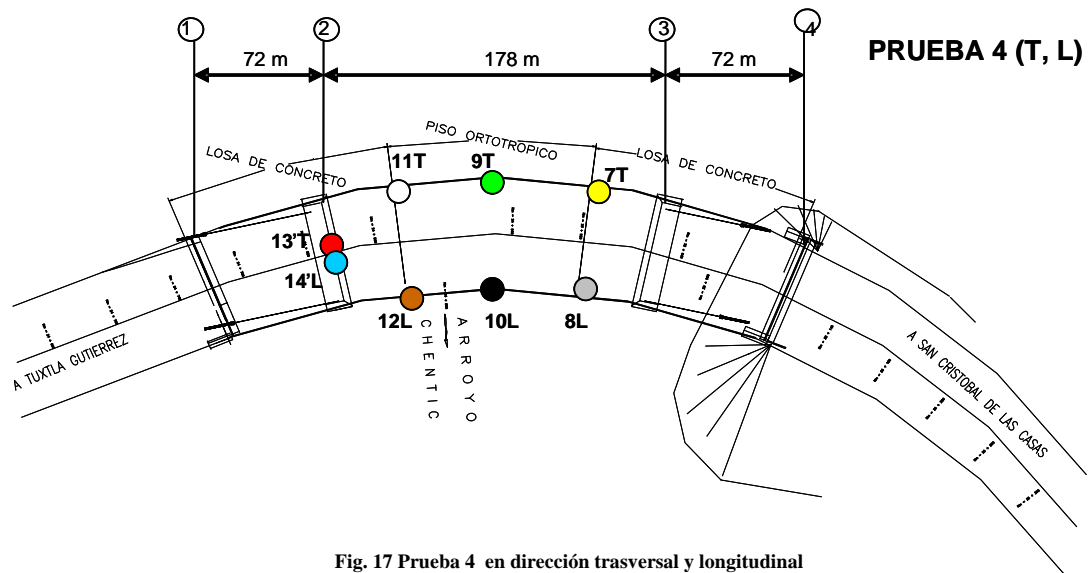


Fig. 17 Prueba 4 en dirección trasversal y longitudinal

El último arreglo consta de tres pruebas (5, 6 y 7). Se instrumentó el margen izquierdo del puente tomando como referencia los puntos 11 y 12 colocados en el tablero central, los demás sensores fueron colocados en la pila, a la mitad del tablero extremo y en el estribo, todos estos correspondientes a dicho margen. En esta prueba los sensores se colocaron en dirección vertical para la prueba 5 (figura 18). En dirección vertical y transversal para la prueba 6 (figura 19) y en la dirección vertical y longitudinal para la prueba 7 (figura 20).

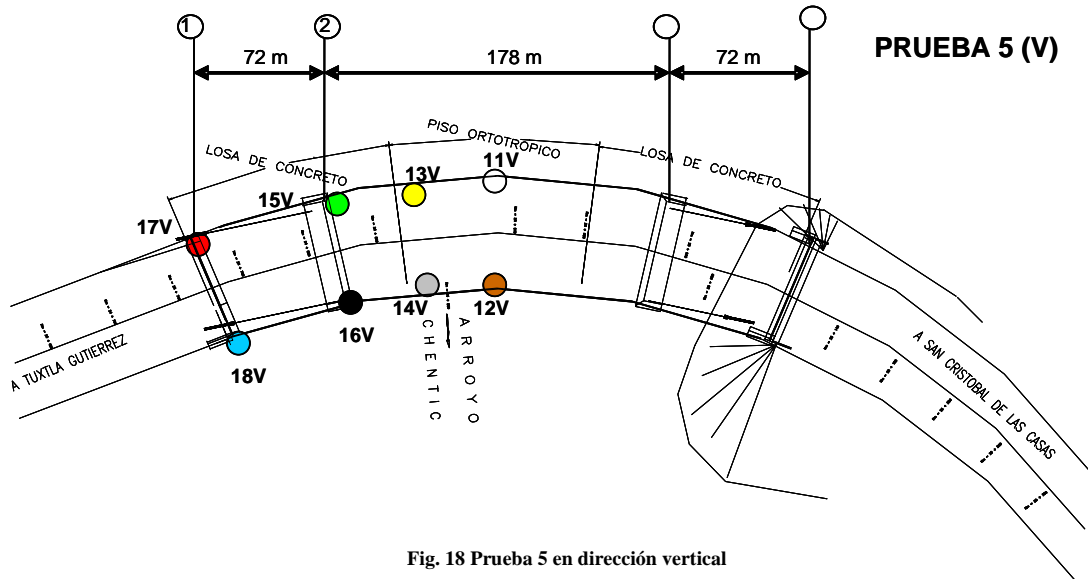


Fig. 18 Prueba 5 en dirección vertical

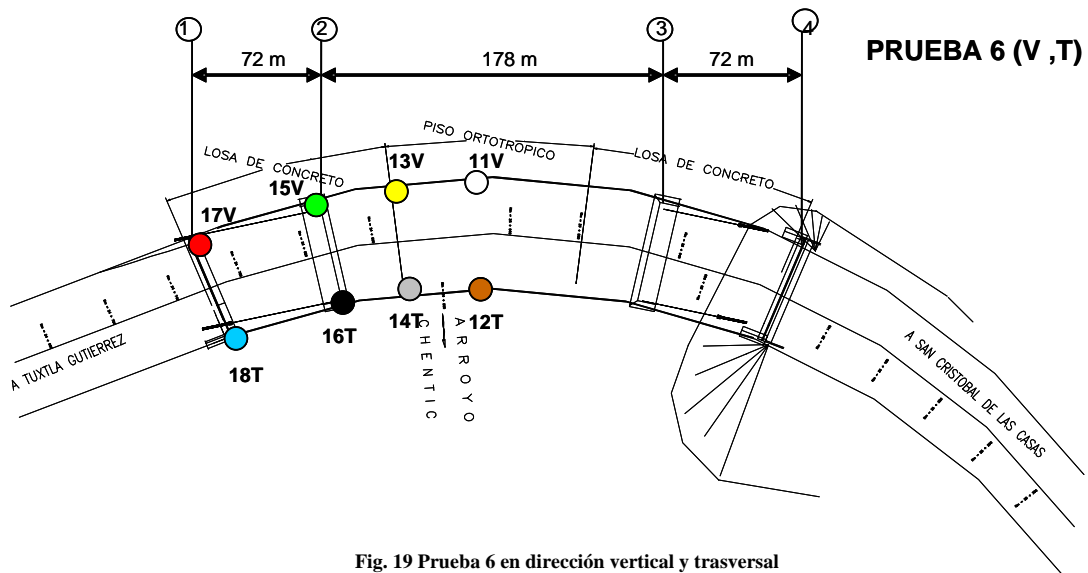


Fig. 19 Prueba 6 en dirección vertical y transversal

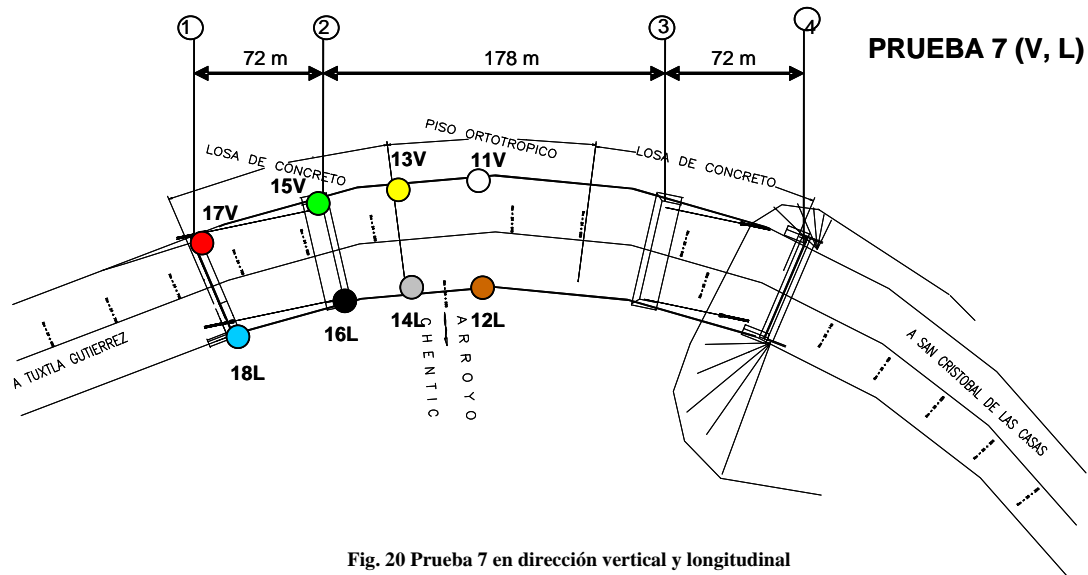


Fig. 20 Prueba 7 en dirección vertical y longitudinal

PROGRAMA DE PRUEBAS: PUENTE SAN CRISTÓBAL (PSC)

Vibración ambiental agosto 2006

PRUEBA	PUNTO	DIRECCIÓN	CANAL	F.A.	FILTROS		CONST. CALIBR.	OBSERVACIONES
					GAN.(dB)	fc(Hz)		
PSC01	1	V	15	10	10	30	1.485064	
	2	V	14		10		1.455629	
	3	V	13		10		4.834418	
	4	V	12		10		3.784009	
	5	V	11		10		1.532669	
	6	V	10		10		1.412903	
	11	V	9		10		3.655662	
12	V	8	10	4.477242				
PSC02	1	T	15	10	10	30	1.485064	
	2	L	14		10		1.455629	
	3	T	13		20		1.527676	
	4	L	12		20		1.195747	
	5	T	11		20		0.484323	
	6	L	10		20		0.446477	
	11	T	9		20		1.155189	
12	L	8	20	1.414809				
PSC03	13	V	15	1	20	30	4.692803	
	14	V	14		20		4.599787	
	9	V	13		20		15.276760	
	10	V	12		20		11.957470	
	7	V	11		20		4.843233	
	8	V	10		20		4.464774	
	11	V	9		20		11.551892	
12	V	8	20	14.148086				
PSC04	13'	T	15	1	30	30	1.485064	
	14'	L	14		30		1.455629	
	9	T	13		30		4.834418	
	10	L	12		30		3.784009	
	7	T	11		30		1.532669	
	8	L	10		30		1.412903	
	11	T	9		30		3.655662	
12	L	8	30	4.477242				
PSC05	17	V	15	1	20	30	4.692803	
	18	V	14		20		4.599787	
	15	V	13		20		15.276760	
	16	V	12		20		11.957470	
	13	V	11		20		4.843233	
	14	V	10		20		4.464774	
	11	V	9		20		11.551892	
12	V	8	20	14.148086				
PSC06	17	V	15	1	20	30	4.692803	
	18	T	14		30		1.455629	
	15	V	13		20		15.276760	
	16	T	12		30		3.784009	
	13	V	11		20		4.843233	
	14	T	10		30		1.412903	
	11	V	9		20		11.551892	
12	T	8	30	4.477242				
PSC07	17	V	15	1	20	30	4.692803	
	18	L	14		30		1.455629	
	15	V	13		20		15.276760	
	16	L	12		30		3.784009	
	13	V	11		20		4.843233	
	14	L	10		30		1.412903	
	11	V	9		20		11.551892	
12	L	8	30	4.477242				

Bitácora 1 (Vibración ambiental Agosto 2006)

3.2 Descripción y objetivos de la etapa 2 de vibración ambiental

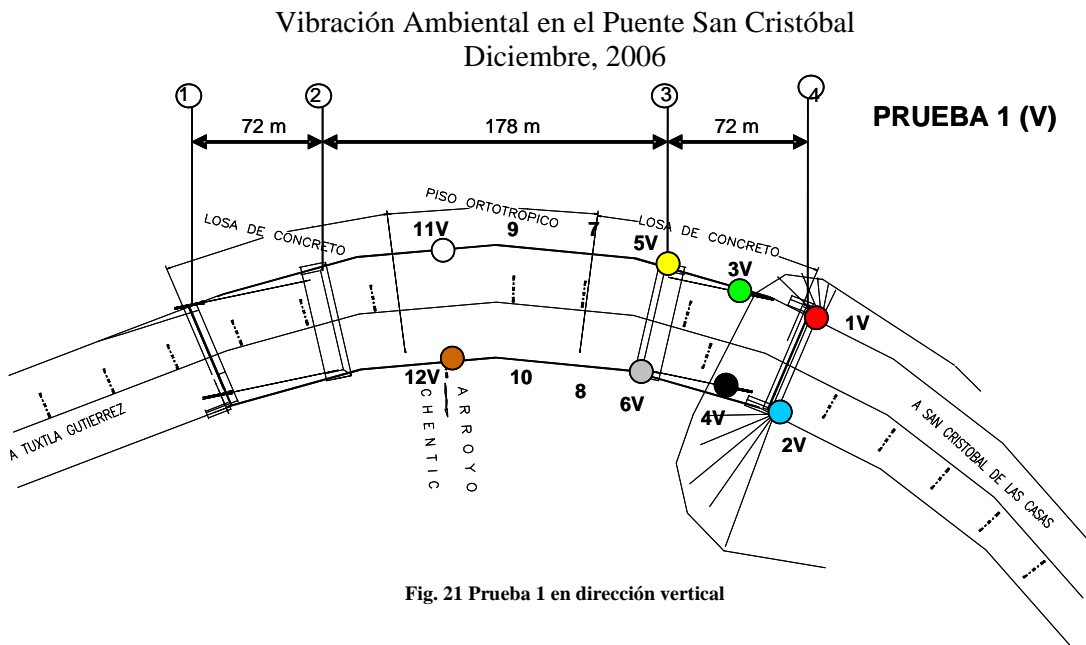
La segunda etapa fue realizada en Diciembre de 2006 con el objetivo principal de corroborar los resultados de la primera ya que en ésta se presentaron algunos errores en la captura de la información, sin embargo, esta segunda etapa se realizó de igual manera que la primera, tomando en cuenta los detalles que se presentaron con el fin de obtener las propiedades dinámicas de la estructura, y observar su comportamiento en el período comprendido entre las dos etapas.

En dicha etapa las pruebas de vibración ambiental consistieron en la instalación de acelerómetros de alta resolución en diversos puntos de interés, tal y como se hizo para la primera etapa, estos dispositivos se colocaron en tres diferentes direcciones tanto vertical (V), longitudinal (L) y transversal (T). Con el mismo objetivo de recorrer totalmente el tablero central y los tableros de ambos extremos se formularon arreglos colocando los sensores en puntos representativos como fue en pilas, estribos y puntos céntricos en los claros de cada tablero.

El programa realizado constó de 9 pruebas, estas pruebas se desarrollaron mediante 6 diferentes tipos de arreglos, muy parecidos a los arreglos de la primera etapa, sin embargo, para esta etapa hubo algunos cambios en la ubicación y dirección de los sensores dependiendo de la prueba a la que se refieren, estos cambios se muestran en las figuras correspondientes. En cada prueba se registraron historias de tiempo simultáneas para 8 canales asignados a 8 puntos con determinada configuración en la estructura.

Para este caso se capturaron registros con una duración promedio de 13.30 minutos para cada prueba.

El primer arreglo consta de una sola prueba (1). Se instrumentó el margen derecho del puente tomando como referencia los puntos 11 y 12 colocados en el tablero central, los demás sensores fueron colocados en la pila, al centro del tablero extremo y al estribo, todos estos correspondientes a dicho margen, tal como se muestra en la figura 21. En esta prueba los sensores se colocaron en dirección vertical.



El segundo arreglo consta de una sola prueba (2). Tiene la instrumentación del mismo margen derecho que el arreglo anterior, la única variación fue que los sensores colocados en la pila se corrieron al centro como se muestra en la figura 22. En esta prueba se colocaron los sensores en dirección trasversal y longitudinal.

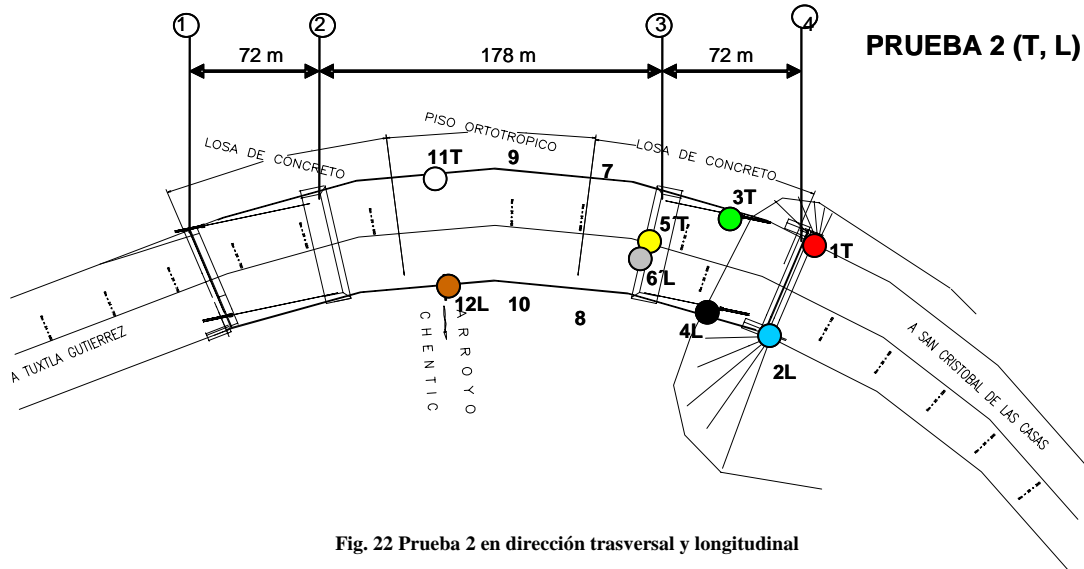


Fig. 22 Prueba 2 en dirección trasversal y longitudinal

El tercer arreglo consta de una sola prueba (3). Se instrumento del margen derecho, tomando como referencia los puntos 11 y 12, hay dos sensores a dos tercios del tablero central, mientras que los restantes se colocaron en la pila y a la mitad del claro del tablero extremo, todos estos corresponden a dicho margen como se muestra en la figura 23. En esta prueba se colocaron los sensores en dirección vertical.

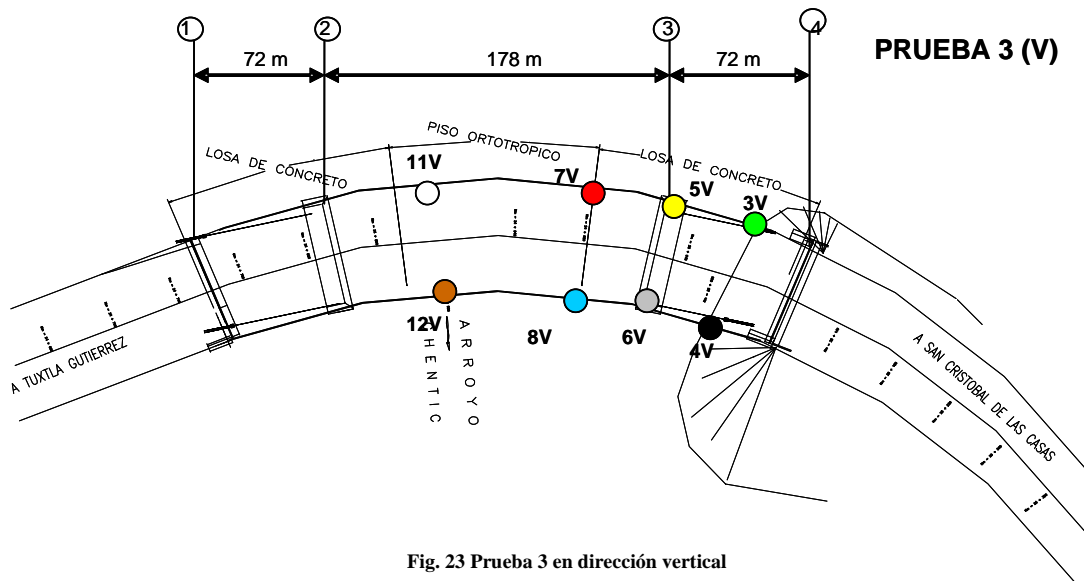


Fig. 23 Prueba 3 en dirección vertical

El cuarto arreglo consta de una sola prueba (4). Se instrumenta el tablero central colocando sensores en la pila del margen izquierdo del puente, en el margen derecho hay sensores a la mitad y dos tercios del tablero tal y como se muestra en la figura 24. En esta prueba hay sensores colocados en dirección vertical.

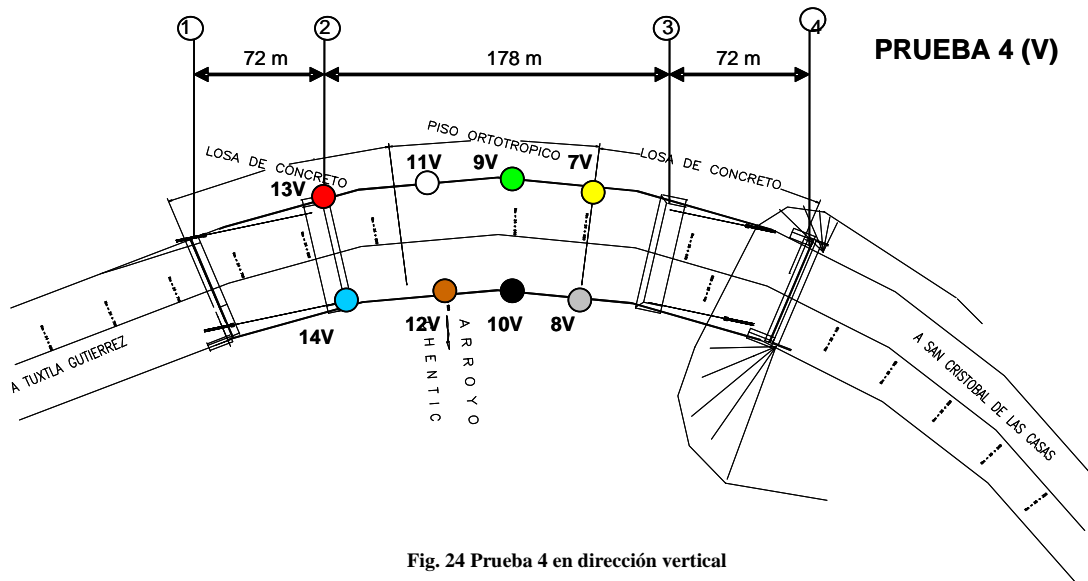


Fig. 24 Prueba 4 en dirección vertical

El quinto arreglo consta de una sola prueba (5). Se instrumenta de igual manera que en el arreglo anterior sólo que los sensores ubicados en la pila se corrieron al centro como se muestra en la figura 25. En esta prueba los sensores se colocaron en dirección trasversal y longitudinal.

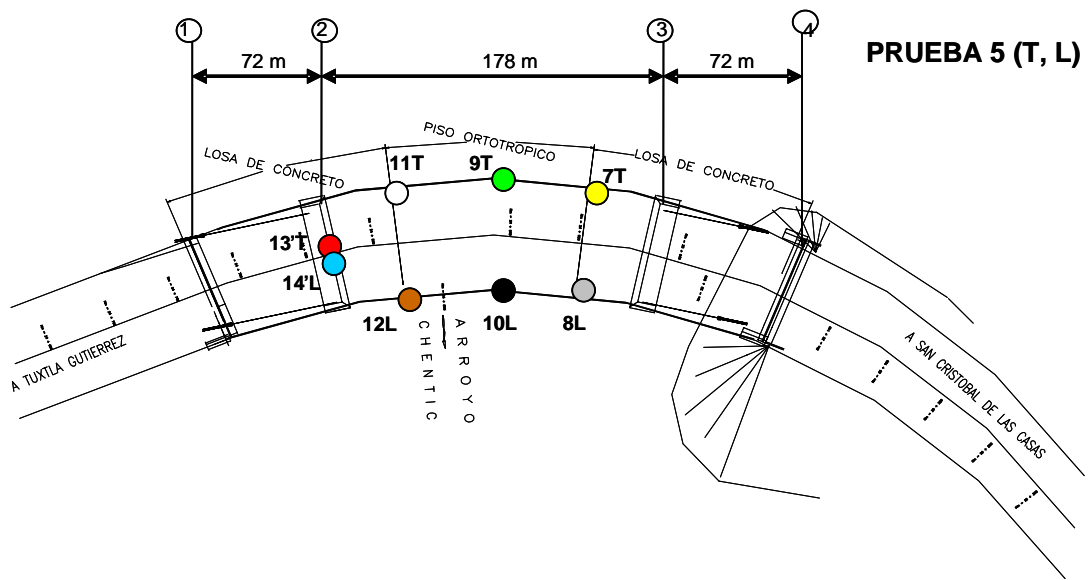


Fig. 25 Prueba 5 en dirección trasversal y longitudinal

El último arreglo consta de cuatro pruebas (6, 7, 8 y 9). Se instrumentó el margen izquierdo del puente tomando como referencia los puntos 11 y 12 colocados en el tablero central, los demás sensores fueron colocados en la pila, a la mitad del tablero extremo y en el estribo, todos estos correspondientes a dicho margen. En esta prueba los sensores se colocaron en dirección vertical para la prueba 6 (figura 26). En dirección vertical y transversal para la prueba 7 (figura 27). En dirección vertical y longitudinal para la prueba 8 (figura 28) y transversal y longitudinal para la prueba 9 (figura 29).

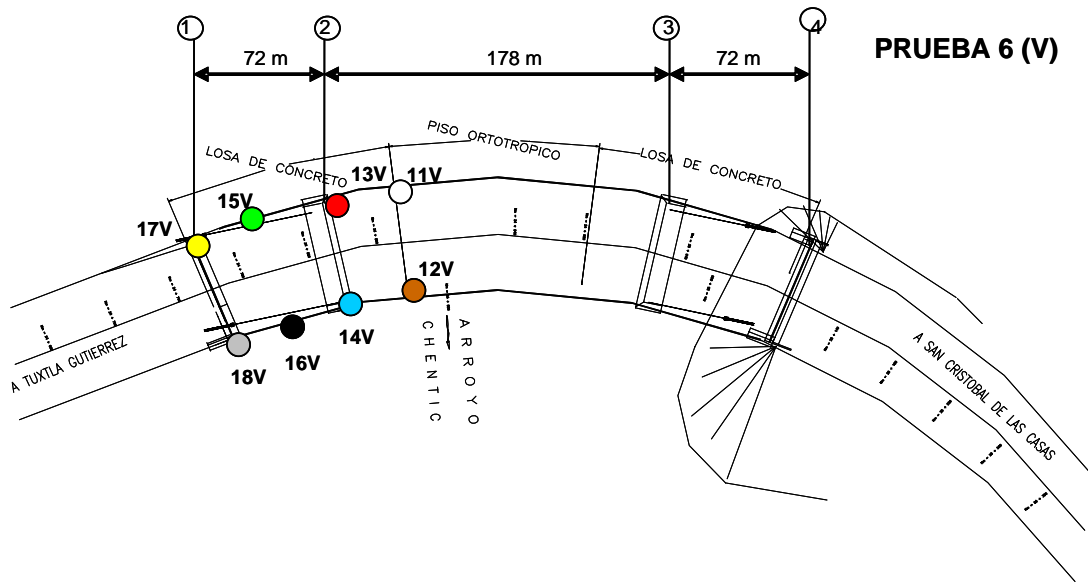


Fig. 26 Prueba 6 en dirección vertical

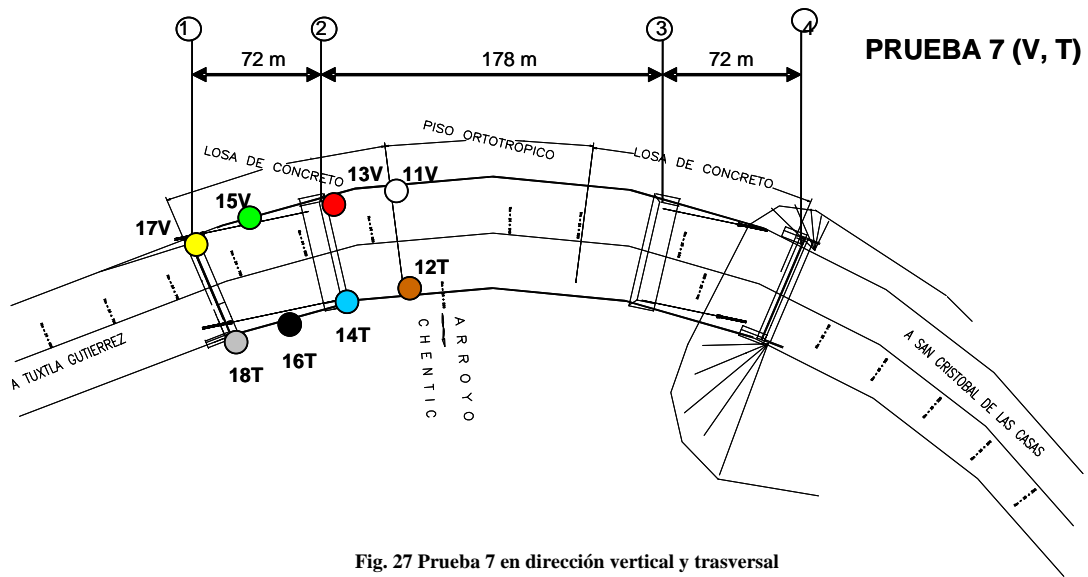


Fig. 27 Prueba 7 en dirección vertical y transversal

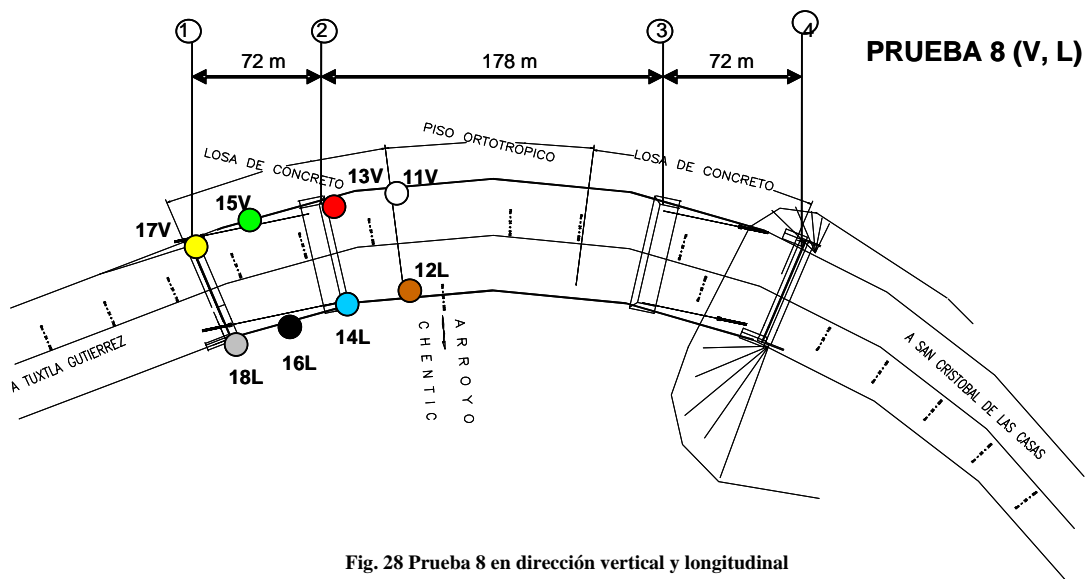


Fig. 28 Prueba 8 en dirección vertical y longitudinal

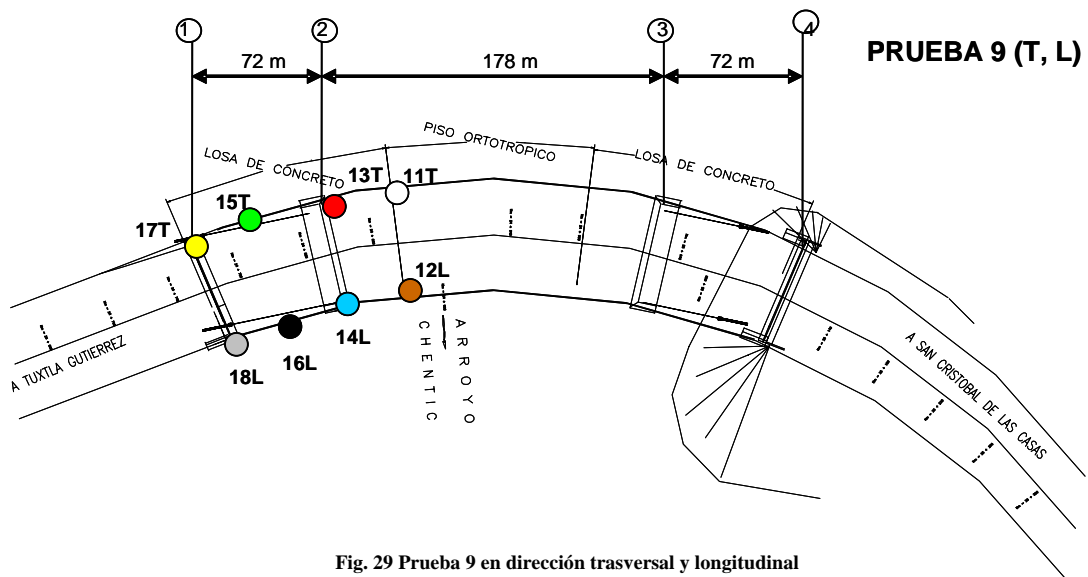


Fig. 29 Prueba 9 en dirección transversal y longitudinal

3.3 Descripción y objetivos de la etapa 3 de vibración ambiental

La tercera etapa fue realizada en Abril de 2007 con el objetivo de revisar el comportamiento de los estribos con la aplicación de cargas que actuaron simultáneamente en cada estribo, para ello se hizo pasar un camión en cada estribo cuidando que estos pasaran al mismo tiempo en su respectivo lado, de tal manera que se obtuviera información para el estudio las propiedades dinámicas de la estructura en estos puntos. Con el fin de obtener las propiedades dinámicas en ambos extremos y observar su comportamiento, paralelamente se verificaron estas propiedades para el total de la estructura, por lo que a partir del estudio de vibración ambiental en esta tercera etapa se pudo hacer una comparativa entre las dos etapas anteriores y ésta, que se realizaron en el período mencionado.

Debido al objetivo principal de esta etapa, se incremento el número de pruebas y los arreglos que se diseñaron para tal fin presentan algunos cambios a diferencia de las dos etapas anteriores, en las cuales los arreglos fueron muy parecidos. En esta etapa el programa realizado constó de 12 pruebas con cuatro diferentes arreglos, de igual manera en cada prueba se registraron historias de tiempo simultáneas para 8 canales asignados a 8 puntos con determinada configuración en la estructura. Para este caso se capturaron registros con una duración promedio de 15 minutos para cada prueba.

El primer arreglo consta de tres pruebas (1, 2 y 3). Se instrumento el tablero central tomando como referencia los puntos once y doce, hacia el margen derecho se colocaron los sensores a la mitad y dos terceras partes del tablero, hacia el margen izquierdo se ubicaron los sensores en la pila. En este arreglo la dirección de los sensores corresponde a un número de prueba, sin embargo, su ubicación es la misma para todas las pruebas. Para la prueba 1 los sensores tuvieron la dirección vertical, en la prueba 2 en dirección trasversal y en la prueba 3 en dirección longitudinal tal como se muestra en la figura 30.

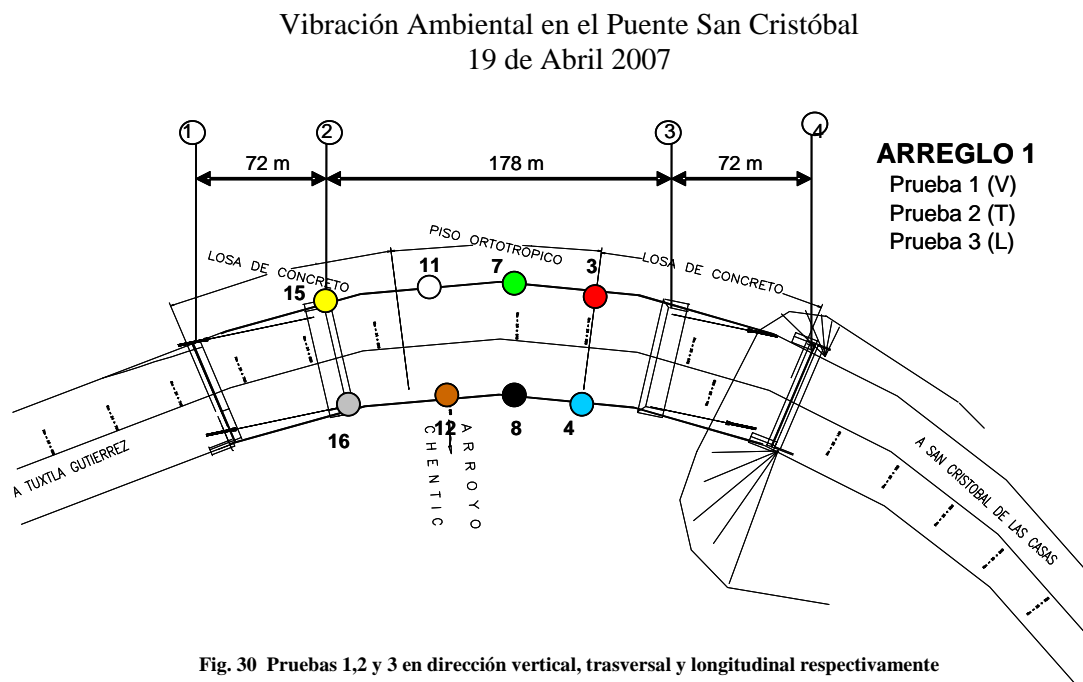


Fig. 30 Pruebas 1,2 y 3 en dirección vertical, trasversal y longitudinal respectivamente

El segundo arreglo consta de tres pruebas (4, 5 y 6). Se instrumentó el tablero extremo de la margen derecha, colocando sensores a la mitad de éste, en la pila y en el estribo correspondientes al mismo margen antes mencionado. La dirección de los sensores corresponde a determinada prueba, sin embargo, su ubicación es la misma para todas las pruebas. Para la prueba 4 la dirección que tuvieron fue vertical, para la prueba 5 en dirección transversal y para la prueba 6 en dirección longitudinal como lo muestra la figura 31.

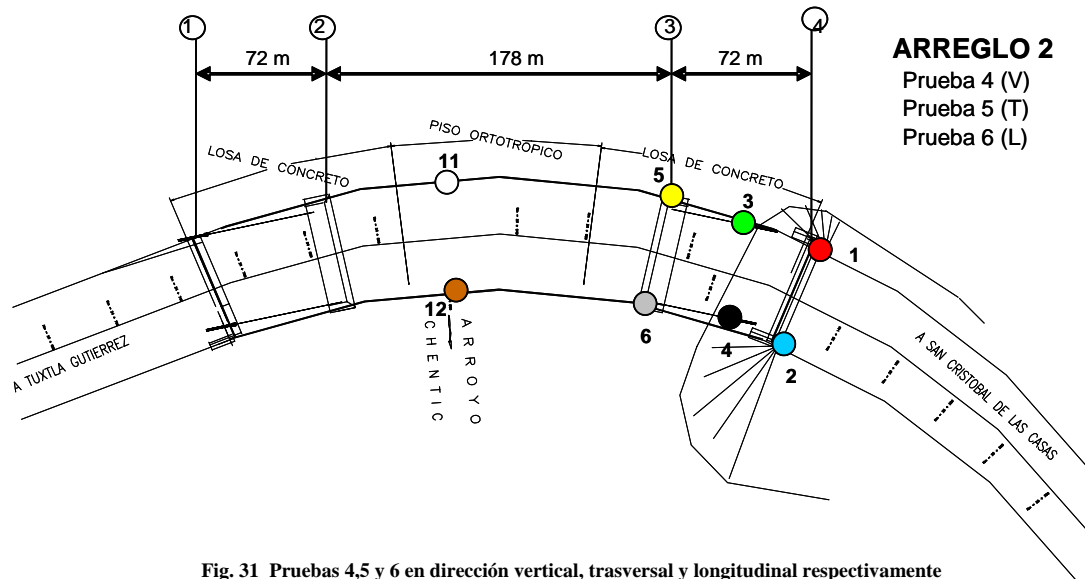


Fig. 31 Pruebas 4,5 y 6 en dirección vertical, transversal y longitudinal respectivamente

En el tercer arreglo se realizaron tres pruebas (7, 8 y 9). Se instrumentó el tablero extremo de la margen izquierda colocando sensores en la pila, a la mitad del tablero y en el estribo, todos estos correspondientes a dicha margen. En la prueba 7 los sensores se pusieron en dirección vertical, en la prueba 8 en dirección transversal y en la prueba 9 en dirección longitudinal. Como se muestra en la figura 32 la ubicación de los sensores no cambia entre prueba y prueba, solamente la dirección de los mismos es la que se modifica dependiendo del número de prueba.

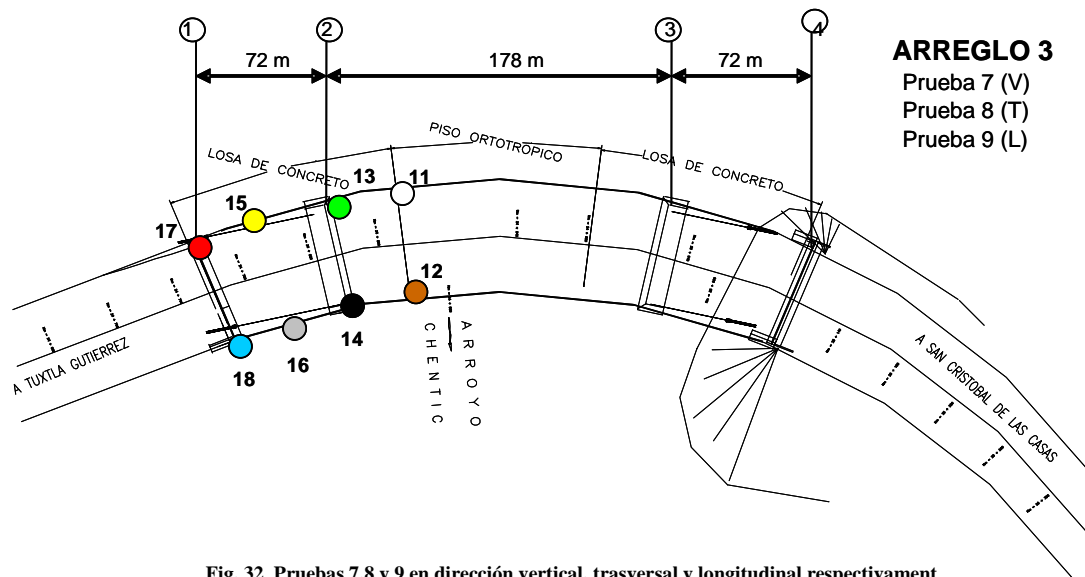


Fig. 32 Pruebas 7,8 y 9 en dirección vertical, transversal y longitudinal respectivamente

El cuarto y último arreglo consta de tres pruebas (10, 11 y 12). Se instrumentó en tablero central, el tablero extremo y el estribo, correspondientes a la margen izquierda, colocando sensores en el tablero central a la mitad de éste, a la mitad del tablero extremo y en el estribo. La ubicación de los sensores fue la misma para todas las pruebas incluidas en éste arreglo, solamente se cambiaron las direcciones en cada prueba. En la prueba 10 los sensores tuvieron dirección vertical, para la prueba 11 en dirección transversal y en la prueba 12 en dirección longitudinal como se muestra en la figura 33.

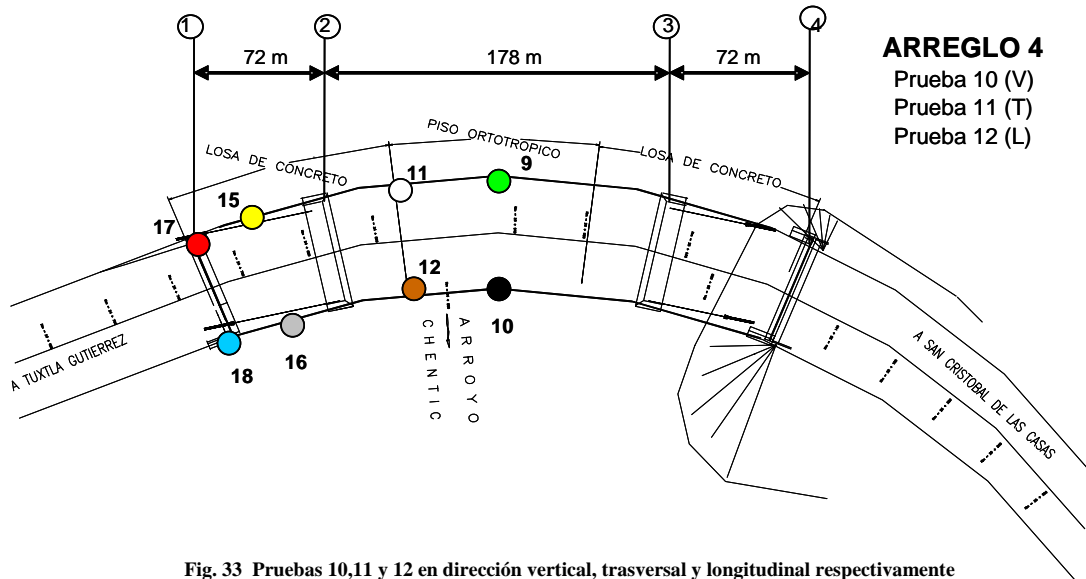


Fig. 33 Pruebas 10,11 y 12 en dirección vertical, transversal y longitudinal respectivamente

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Análisis de resultados etapa 1

4.1 Identificación de frecuencias y formas modales de la superestructura.

En esta primera etapa y en las dos siguientes, para la revisión e identificación de las principales frecuencias y formas modales del puente San Cristóbal, se hizo un análisis espectral de cocientes de puntos de medición, los cuales son elegidos para cada componente del sistema en estudio, algunos de estos puntos fueron elegidos como de referencia, para esto se obtuvo su respectiva función de transferencia con respecto al resto de los puntos que constituyen la configuración de la estructura.

Al relacionar los puntos de medición de una prueba en particular con su respectivo punto de referencia, se conoce como se mueven cada uno de esos puntos con respecto a éste, y para nuestro caso estos puntos de referencia establecen una continuidad con el resto de las pruebas y de igual manera con cada una de las etapas en estudio.

Los puntos que se han tomado como referencia son aquellos que aparecen en pruebas subsecuentes, dichos puntos sirven para relacionar una prueba con otra. Para el caso de la configuración modal del tablero en la dirección vertical y transversal, es necesario relacionar todos los puntos que participan en dicha configuración. Como se mencionó en el capítulo 3 en la descripción de la etapa 1 de esta tesis, los puntos 11 y 12 fueron elegidos como referencia debido a que aparecen en pruebas subsecuentes.

Para verificar que las frecuencias identificadas sean las frecuencias naturales de vibrar de la estructura, se deben revisar para cada una, las relaciones de amplitudes y ángulos de fase. Las frecuencias identificadas deben estar asociadas a amplitudes máximas en los cocientes espectrales de su respectivo componente y corresponder a una forma modal de la estructura, la coherencia puede auxiliar en esta identificación como un indicador. Entre mayor sea la coherencia, más confiable es la información.

Una de las características en esta etapa es que a pesar que se colocaron sensores en las tres direcciones, hay pruebas donde se tomaron muestras en una dirección de un lado y del otro lado se tomaron en otra dirección como se aclara en la descripción de las pruebas 2, 4, 6 y 7 de dicha etapa, estos arreglos limitan el procesamiento total de los puntos en las tres direcciones, por tal motivo solamente las pruebas en dirección vertical cubrieron el total del tablero.

Se selecciono el punto 11 como referencia para la dirección vertical, con respecto al cual se procesaron los cocientes 1/11, 3/11, 5/11, 7/11, 9/11, 11/9, 13/11, 15/11 y 17/11, todos estos puntos localizados de un lado del puente (aguas arriba). En el componente vertical también se identifican los modos de torsión, por lo que fue necesario procesar los cocientes 2/11, 4/11, 6/11, 8/11, 10/11, 12/11, 14/11, 16/11 y 18/11 que se encuentran del otro lado (aguas abajo) del puente.

En la dirección transversal los puntos de referencia y cocientes que se procesaron son los mismos que en la dirección vertical del lado de aguas arriba hasta la pila del lado de Tuxtla.

En el caso de las pilas se utilizaron los puntos 5, 6, 13 y 14 de referencia, con respecto a los cuales se procesaron los cocientes 5/1, 6/2, 14/18 y 13/17 en la dirección transversal (T) y la longitudinal (L).

Además de los cocientes espectrales mencionados, fue necesario procesar otros cocientes espectrales, con el propósito de verificar las configuraciones obtenidas para cada componente mediante la comparación de pares de puntos, estos cocientes fueron 9/13, 10/14, 9/14, 10/13, 11/13, 12/14, 11/14, 12/13, 11/5, 12/6, 11/6, 12/5, 7/13, 8/14, 7/14, 8/13, 3/1, 4/2, 3/2, 4/1, 15/13, 16/14, 3/5, 4/6, 16/13, 4/5, 11/12, 7/8 y 9/10, para la dirección vertical (V) y trasversal (T).

Para esta primera etapa se identificaron un total de 10 modos de vibrar del tablero de las pruebas de vibración ambiental, dentro de un intervalo de 0.732 y 9.912 Hz. De estos modos, 4 son verticales, 4 de torsión y 2 trasversales.

Los modos verticales de la superestructura fueron identificados de los cocientes 3/11, 7/11, 9/11, 11/9 y 15/11, mostrados en las figuras 34, 35 y 36.

Para poder evaluar los modos de la torsión, es necesario conocer los cocientes entre puntos opuestos de una misma sección trasversal del tablero, las frecuencias de torsión son aquellas que tienen altas coherencias y ángulos de fase opuestos. En estos cocientes se puede observar que para algunas frecuencias asociadas a las amplitudes máximas de los espectros se tienen valores de amplitud de la función de coherencia cercanos a 1.0, esto es un indicador de una probable frecuencia natural de vibración de la superestructura. Los cocientes seleccionados para los modos de torsión del tablero fueron 3/4, 7/8, 9/10, 11/12 y 15/16, mostrados en las figuras 37, 38 y 39

Las respectivas formas modales correspondientes a las frecuencias de vibración más significativas en la dirección vertical, incluyendo torsión, se muestran en la figura 40.

Los modos trasversales de la superestructura fueron identificados de los cocientes 3/11, 7/11, 9/11, 11/9 y 15/11, mostrados en las figuras 41, 42 y 43 Las respectivas formas modales corresponden a las frecuencias de vibración más significativas en la dirección trasversal se muestran en la figura 44.

En la tabla 1 se encuentran las frecuencias naturales de vibración más significativas que se dedujeron con base en el análisis espectral de todas las pruebas realizadas. Las literales V y T, están asociadas al modo vertical y trasversal, respectivamente, mientras que la letra S sirve para indicar los modos simétricos y la A los modos asimétricos, los modos de torsión están indicados con una letra R al final.

Para el caso de esta primera etapa el modo fundamental del tablero del puente es vertical, pero existe un cierto grado de acoplamiento con la dirección trasversal, con una frecuencia natural de 0.732 Hz. El primer modo vertical tiene una frecuencia asociada de 0.732 Hz, el primer modo trasversal de 0.732-0.879 Hz y el de torsión de 3.809 Hz.

Dirección V		Torsión		Dirección T	
MODO	FRECUENCIA	MODO	FRECUENCIA	MODO	FRECUENCIA
1VS	0.732-0.977	1VSR	3.809	1TS	0.732-0.879
1VA	2.002	1VAR	5.811-7.129	1TA	2.637-3.223
2VS	3.955	2VSR	7.568	2TS	-
2VA	4.889-5.180	2VAR	9.912	2TA	-

Tabla 1 Frecuencias identificadas en el componente vertical (incluyendo la torsión) y trasversal del puente San Cristóba

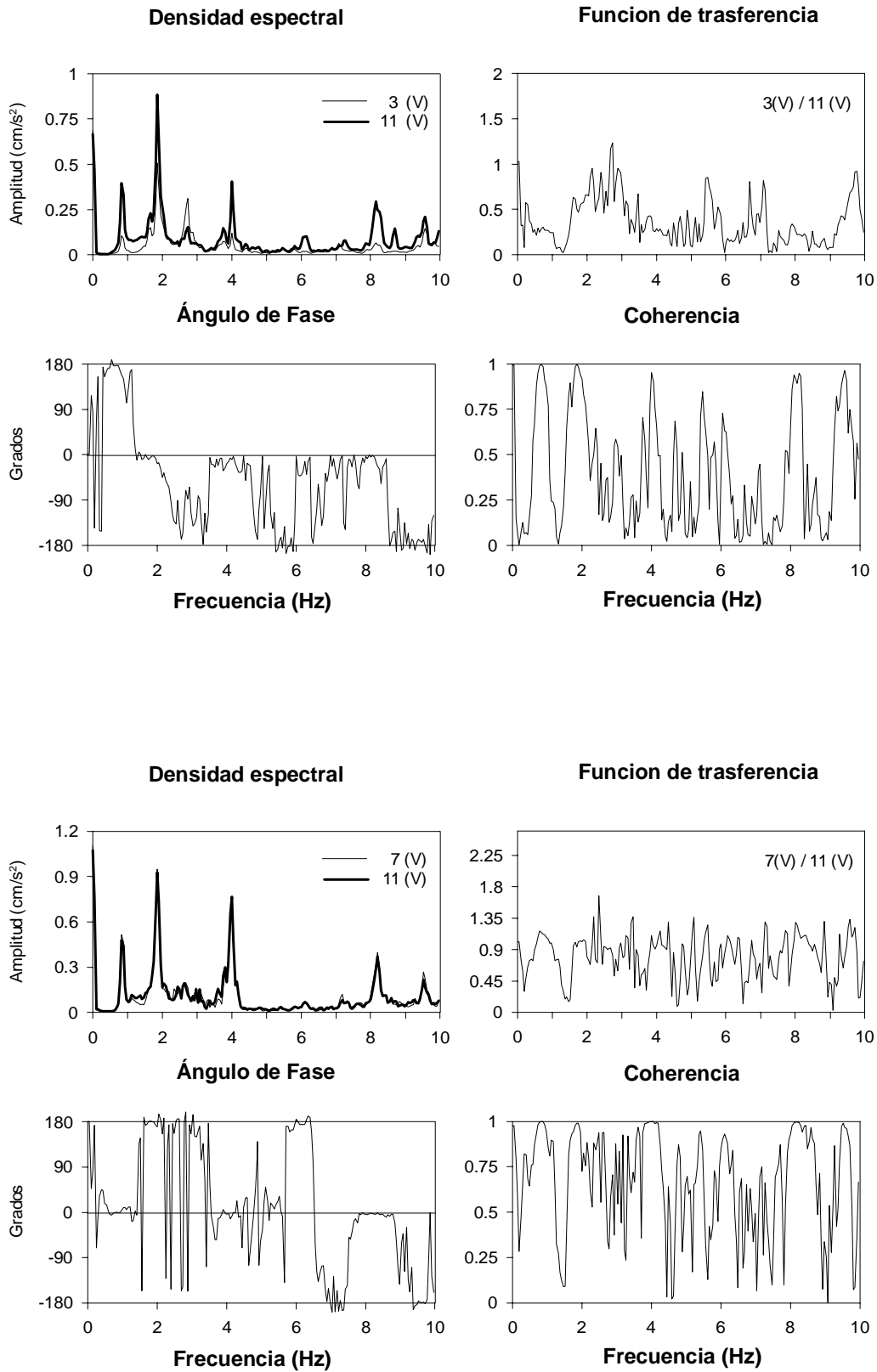


Fig. 34 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 3/11 y 7/11 en dirección vertical (etapa 1).

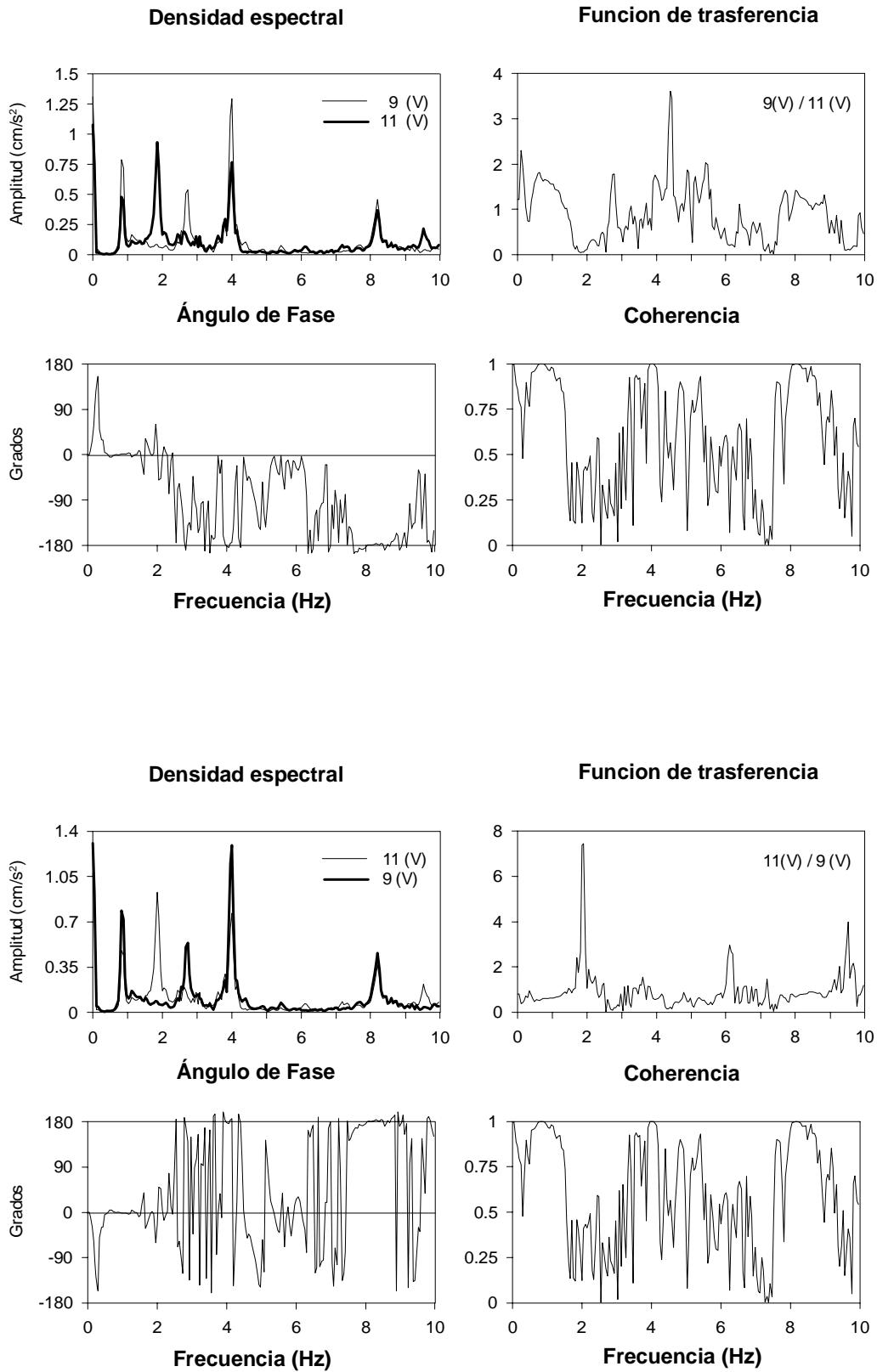


Fig. 35 Densidades espectrales, función de trasferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 9/11 y 11/9 en dirección vertical (etapa 1).

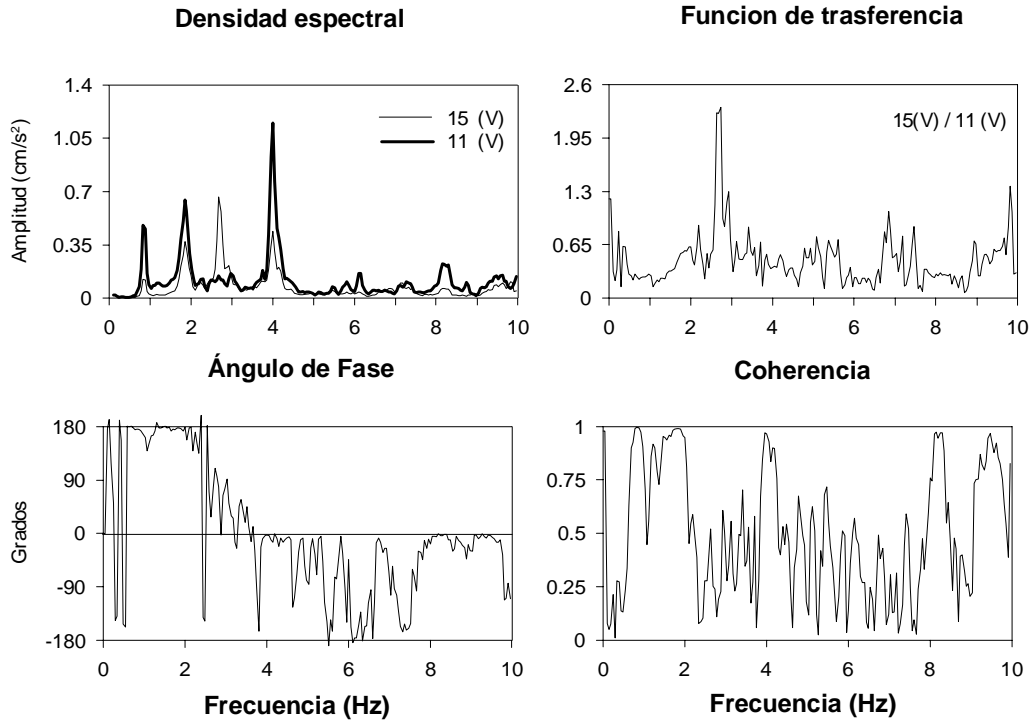


Fig. 36 Densidad espectral, función de trasferencia, ángulo fase y coherencia del cociente 15/11 en dirección vertical (etapa 1)

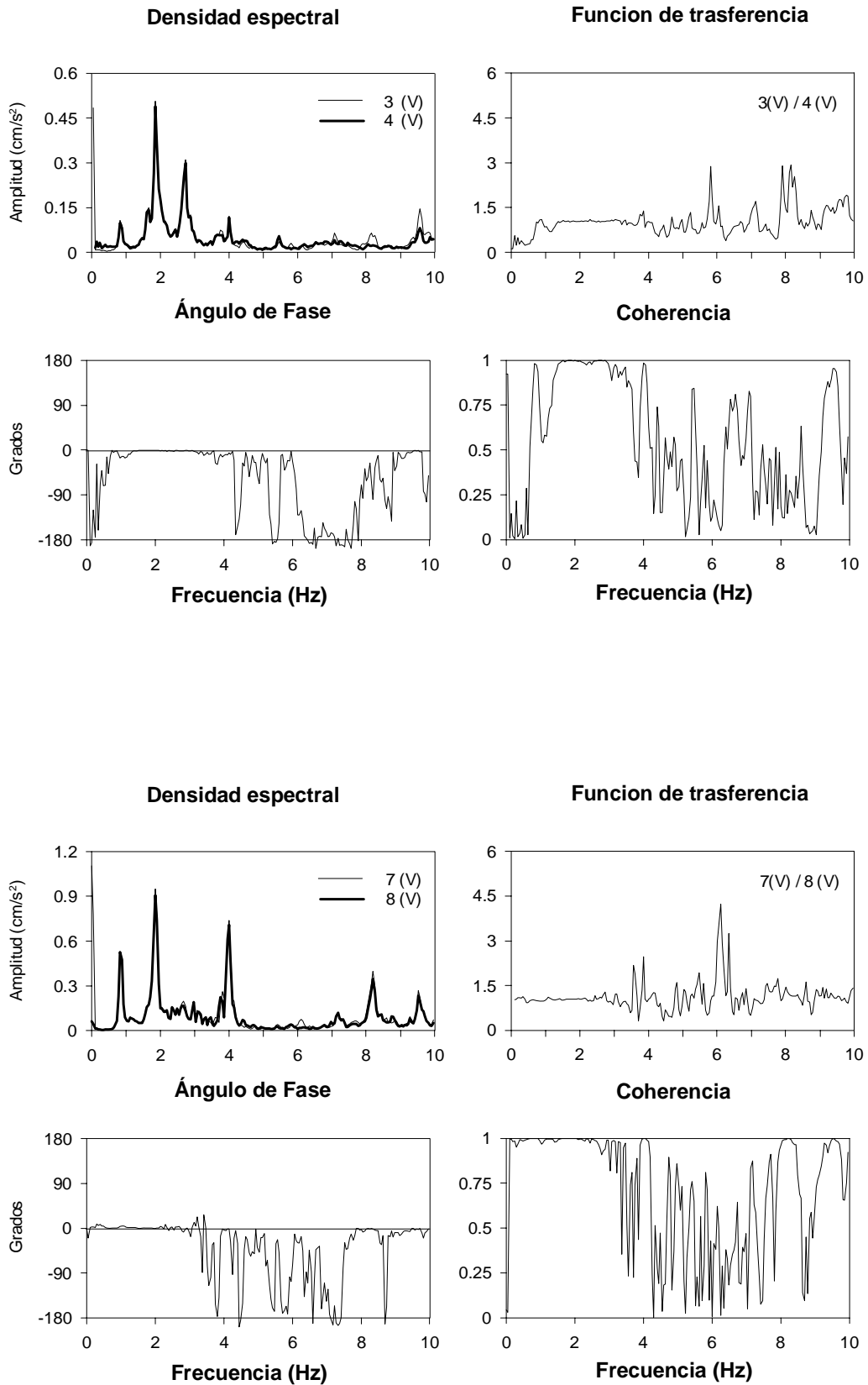


Fig. 37 Densidades espectrales, función de trasferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 3/4 y 7/8 en dirección vertical (etapa 1)

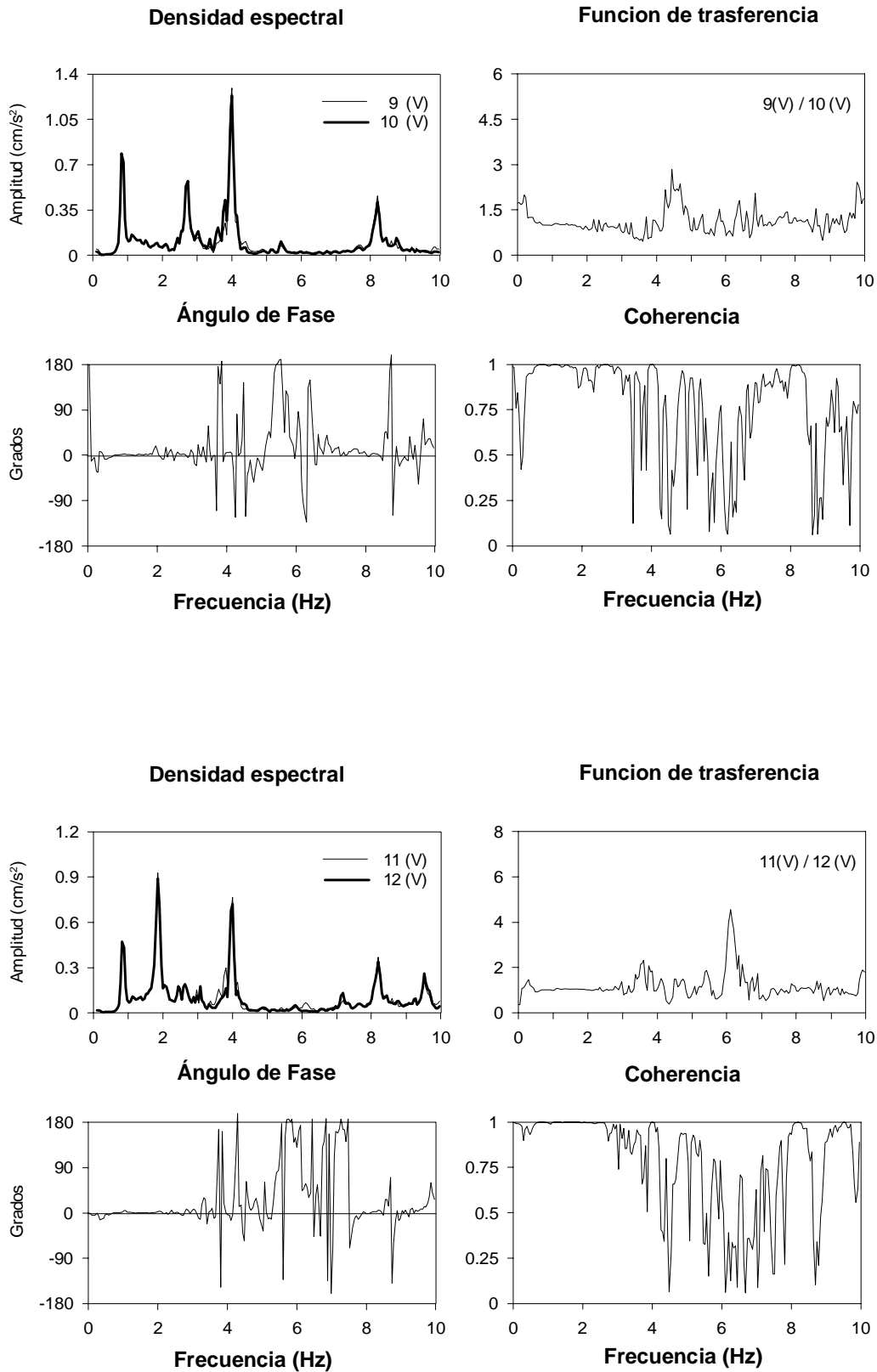


Fig. 38 Densidades espectrales, función de trasferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 9/10 y 11/12 en dirección vertical (etapa 1).

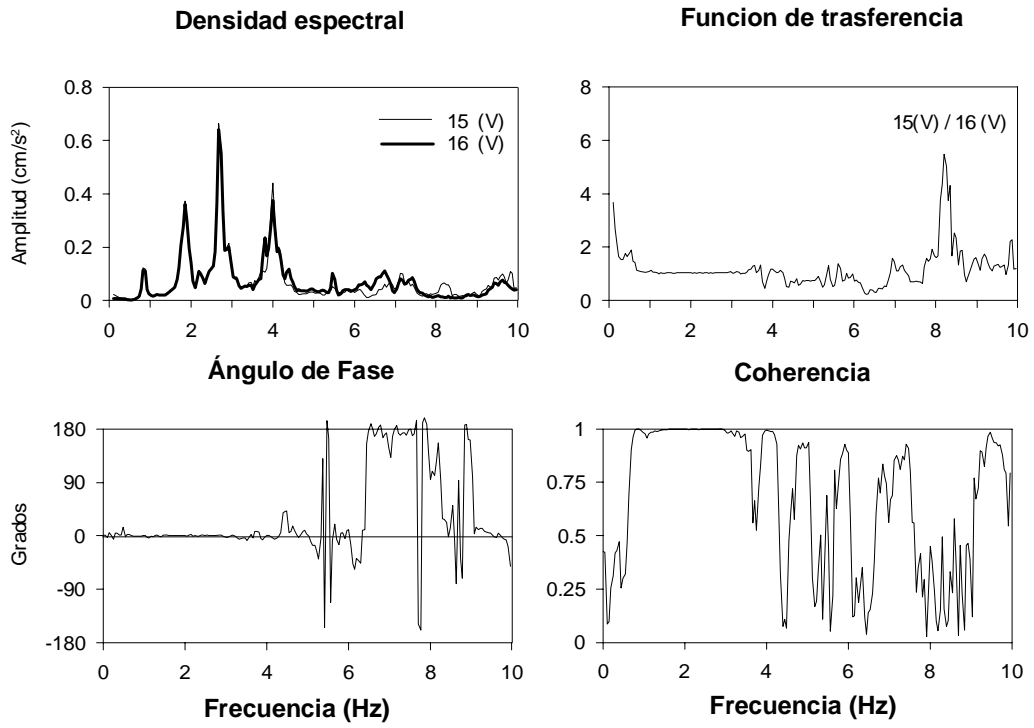


Fig. 39 Densidad espectral, función de trasferencia, ángulo fase y coherencia del cociente 15/16 en dirección vertical (etapa 1).

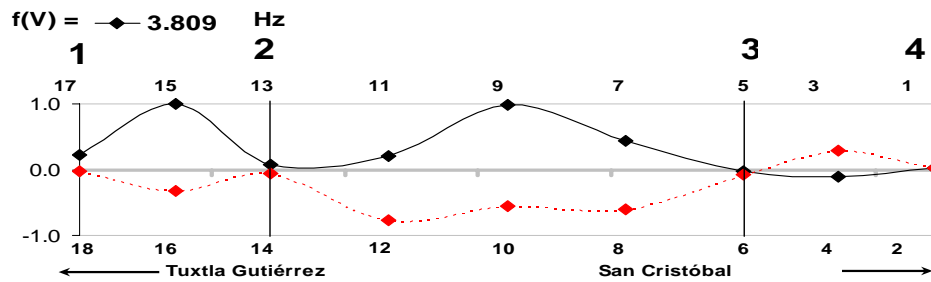
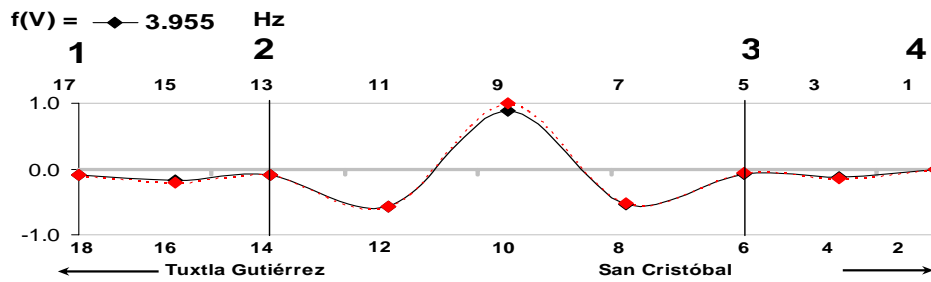
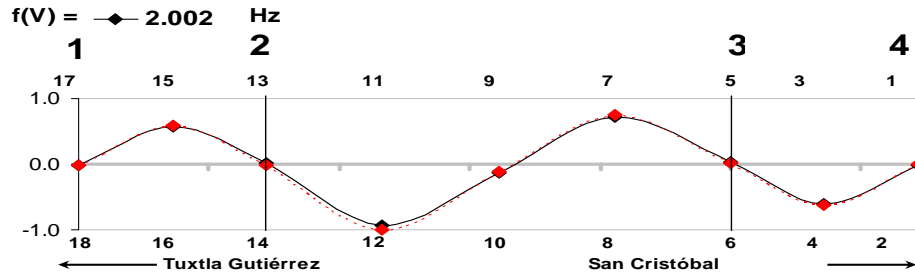
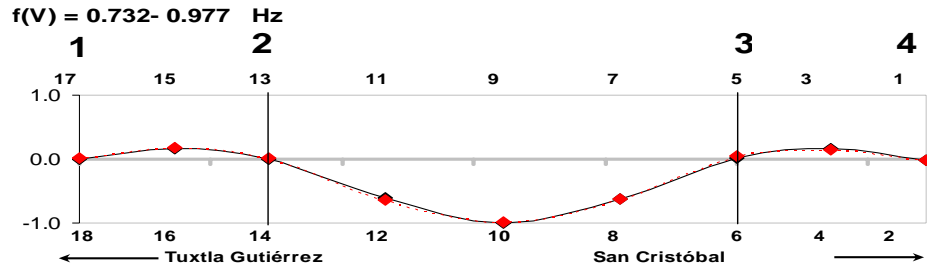


Fig. 40 Formas modales verticales y de torsión del puente San Cristóbal (etapa 1).

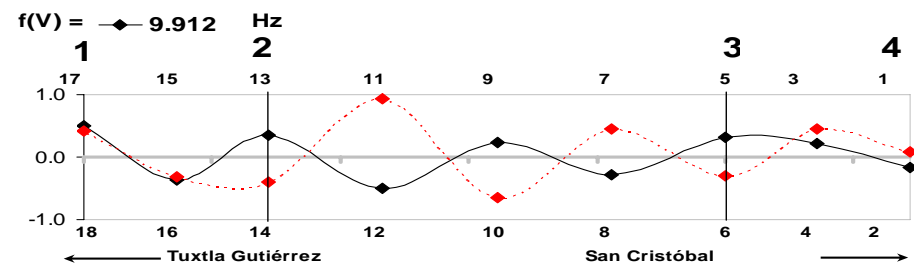
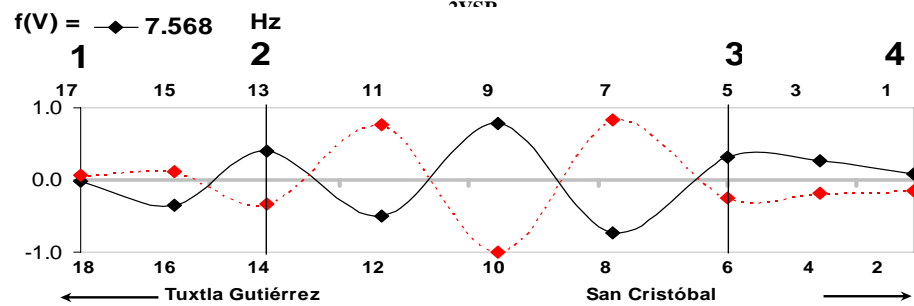
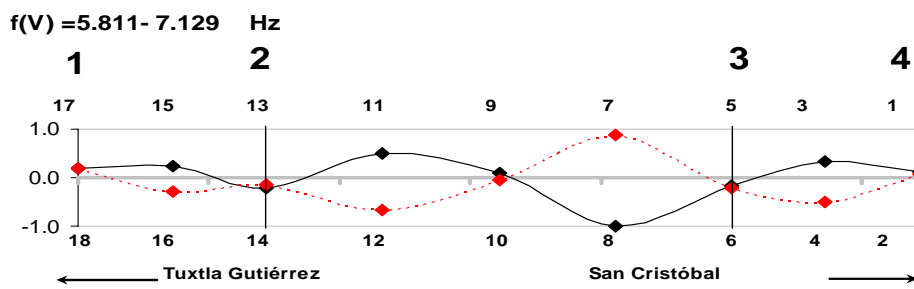
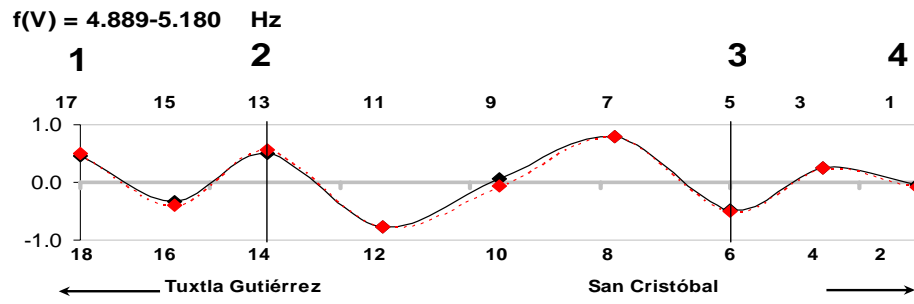


Fig. 40 Formas modales verticales y de torsión del puente San Cristóbal (etapa 1).

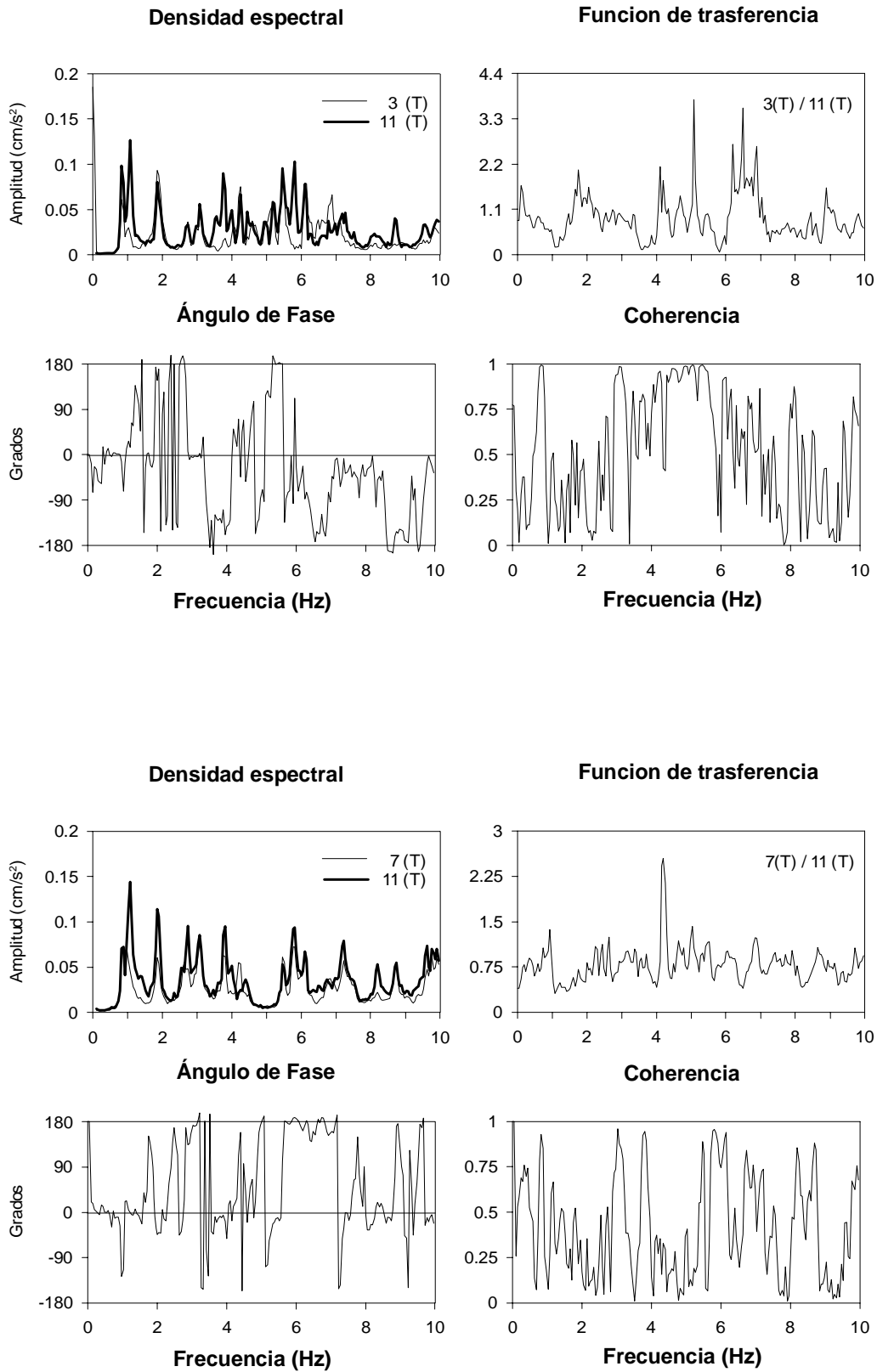


Fig. 41 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 3/11 y 7/11 en dirección transversal (etapa 1).

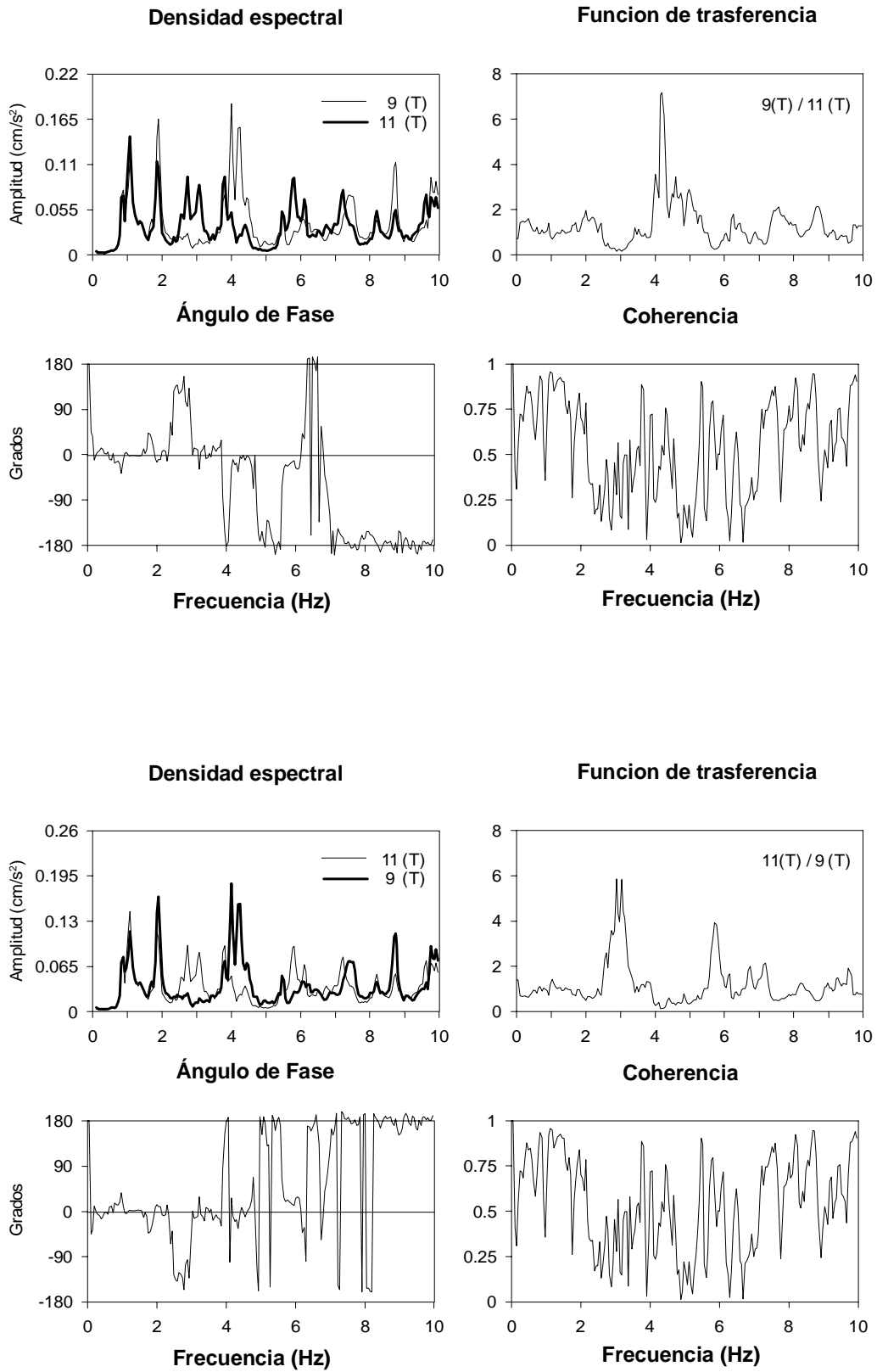


Fig. 42 Densidades espectrales, función de trasferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 9/11 y 11/9 en dirección trasversal (etapa 1).

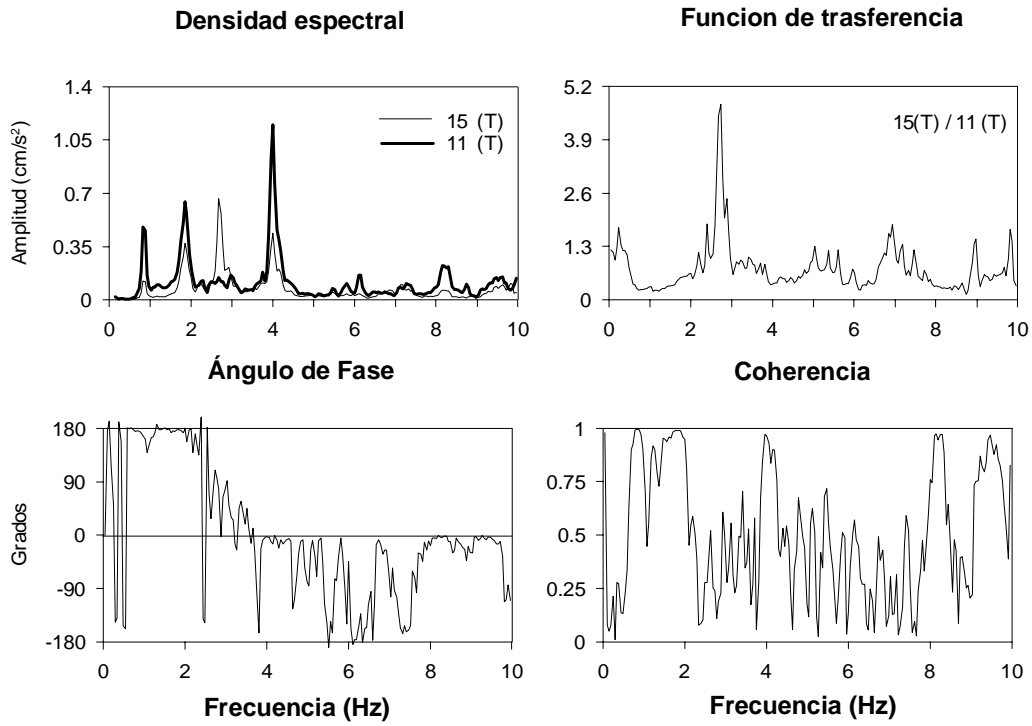


Fig. 43 Densidad espectral, función de transferencia, ángulo fase y coherencia del cociente 15/11 en dirección transversal (etapa 1).

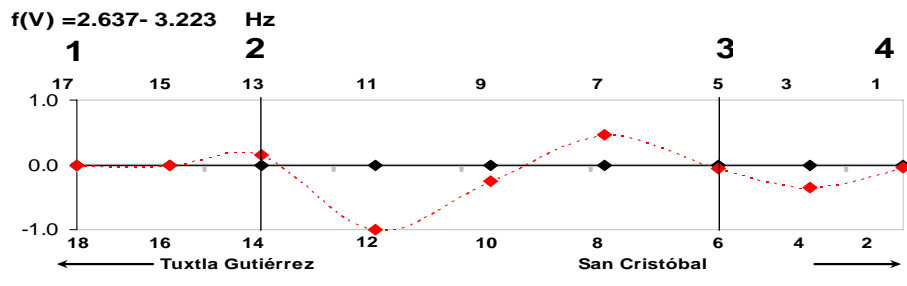
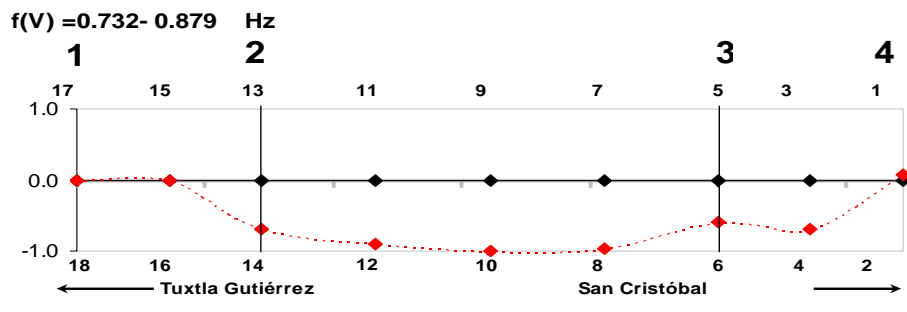


Fig. 44 Formas modales transversales del puente San Cristóbal (etapa 1)

Análisis de resultados etapa 2

4.2 Identificación de frecuencias y formas modales de la superestructura.

De la misma manera que en la etapa anterior en esta segunda etapa, se hizo la revisión e identificación de las principales frecuencias y formas modales del puente San Cristóbal, por lo cual otra vez, se hizo el análisis espectral de cocientes de puntos de medición.

El punto 11 es la referencia en todas las pruebas realizadas en esta etapa para el tablero central del puente.

A diferencia de la primera etapa, en esta etapa 2 si se llevaron a cabo pruebas que cubren por completo el lado de aguas arriba como se explica en las pruebas 2, 7 y 9 de dicha etapa.

Con el fin de tener una misma secuencia en el estudio y análisis de las pruebas realizadas en cada etapa y obtener resultados representativos para este estudio, en esta segunda etapa nuevamente el punto 11 se selecciono como referencia para la dirección vertical, con respecto al cual se procesaron los cocientes 1/11, 3/11, 5/11, 7/11, 9/11, 11/9, 13/11, 15/11 y 17/11, todos estos puntos localizados de un lado del puente (aguas arriba). En el componente vertical también se identifican los modos de torsión, por lo que fue necesario procesar los cocientes 2/11, 4/11, 6/11, 8/11, 10/11, 12/11, 14/11, 16/11 y 18/11 que se encuentran del otro lado (aguas abajo) del puente.

En la dirección transversal los puntos de referencia y cocientes que se procesaron son los mismos que en la dirección vertical del lado de aguas arriba.

En el caso de las pilas se utilizaron los puntos 5, 6, 13 y 14 de referencia, con respecto a los cuales se procesaron los cocientes 5/1, 6/2, 14/18 y 13/17 en la dirección transversal (T) y la longitudinal (L).

Además de los cocientes espectrales mencionados, fue necesario procesar otros cocientes espectrales en la dirección vertical y transversal, con el propósito de verificar las configuraciones obtenidas para cada componente mediante la comparación de pares de puntos como en la primera etapa.

En esta segunda etapa se identificaron un total de 11 modos de vibrar del tablero de las pruebas de vibración ambiental, dentro de un intervalo de 0.781 y 9.717 Hz. De estos modos, 4 son verticales, 4 de torsión y 3 transversales.

Los modos verticales de la superestructura fueron identificados de los cocientes 3/11, 7/11, 9/11, 11/9 y 15/11, mostrados en las figuras 45, 46 y 47

Los cocientes seleccionados para los modos de torsión del tablero fueron 3/4, 7/8, 9/10, 11/12 y 15/16, mostrados en las figuras 48, 49 y 50

Las respectivas formas modales correspondientes a las frecuencias de vibración más significativas en la dirección vertical, incluyendo torsión, se muestran en la figura 51.

Los modos transversales de la superestructura fueron identificados de los cocientes 3/11, 7/11, 9/11, 11/9 y 15/11, mostrados en las figuras 52, 53, y 54 Las respectivas formas modales

corresponden a las frecuencias de vibración más significativas en la dirección transversal se muestran en la figura 55.

En la tabla 2 se encuentran las frecuencias naturales de vibración más significativas que se dedujeron con base en el análisis espectral de todas las pruebas realizadas.

Para este caso también el modo fundamental del tablero del puente es vertical, sin embargo, existe un acoplamiento con la dirección transversal, con una frecuencia natural de 0.781 Hz. El primer modo vertical tiene una frecuencia asociada de 0.781-1.270 Hz, el primer modo transversal de 0.781-0.879 Hz y el de torsión de 3.76 Hz.

Dirección V		Torsión		Dirección T	
MODO	FRECUENCIA	MODO	FRECUENCIA	MODO	FRECUENCIA
1VS	0.781-1.270	1VSR	3.760-3.809	1TS	0.781-0.879
1VA	2.002-2.344	1VAR	5.811	1TA	3.076-3.223
2VS	3.857-4.150	2VSR	7.617	2TS	5.130
2VA	4.785-5.176	2VAR	9.717	2TA	-

Tabla 2 Frecuencias identificadas en el componente vertical (incluyendo la torsión) y transversal del puente San Cristóbal

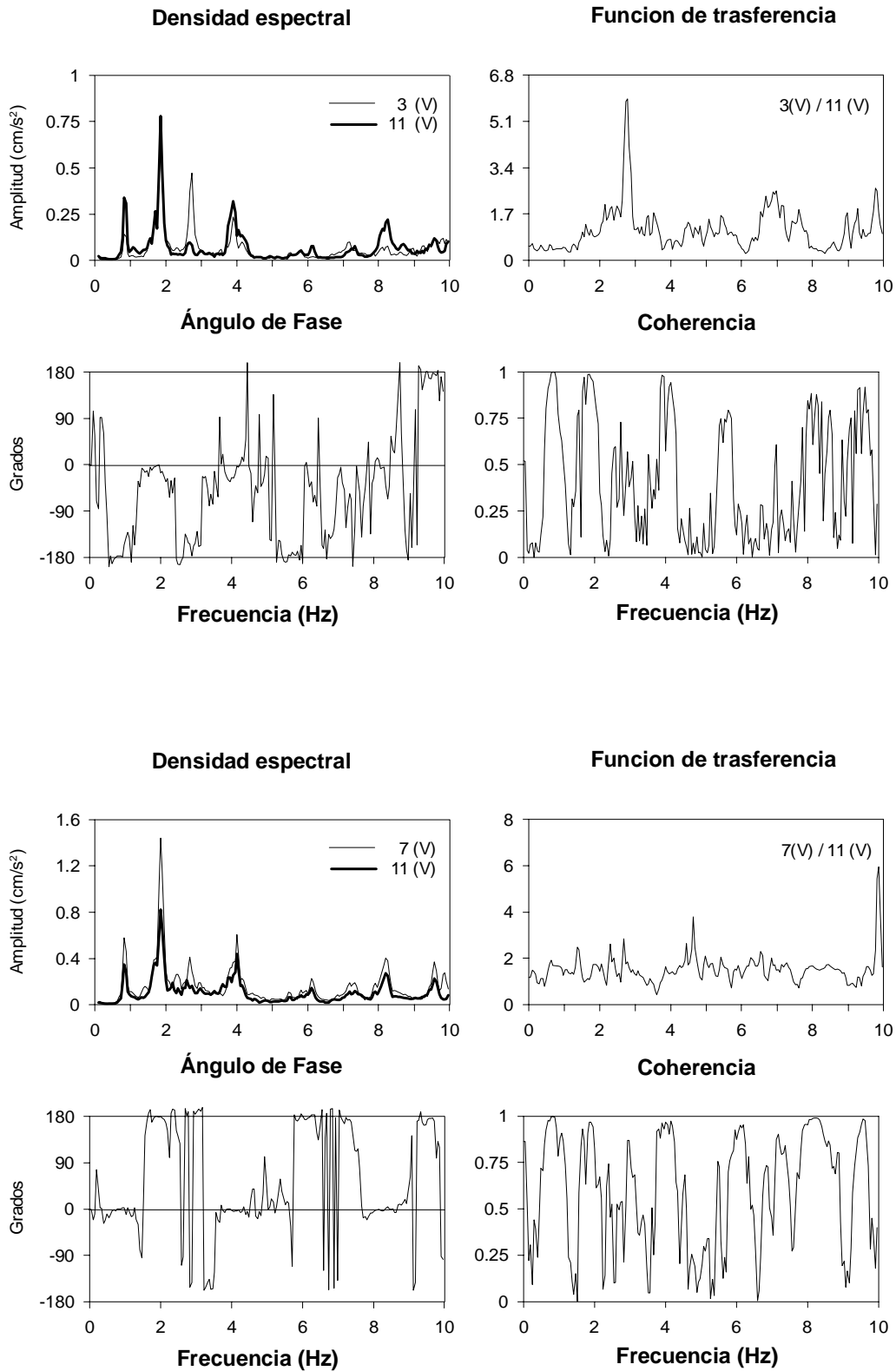


Fig. 45 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 3/11 y 7/11 en dirección vertical (etapa 2).

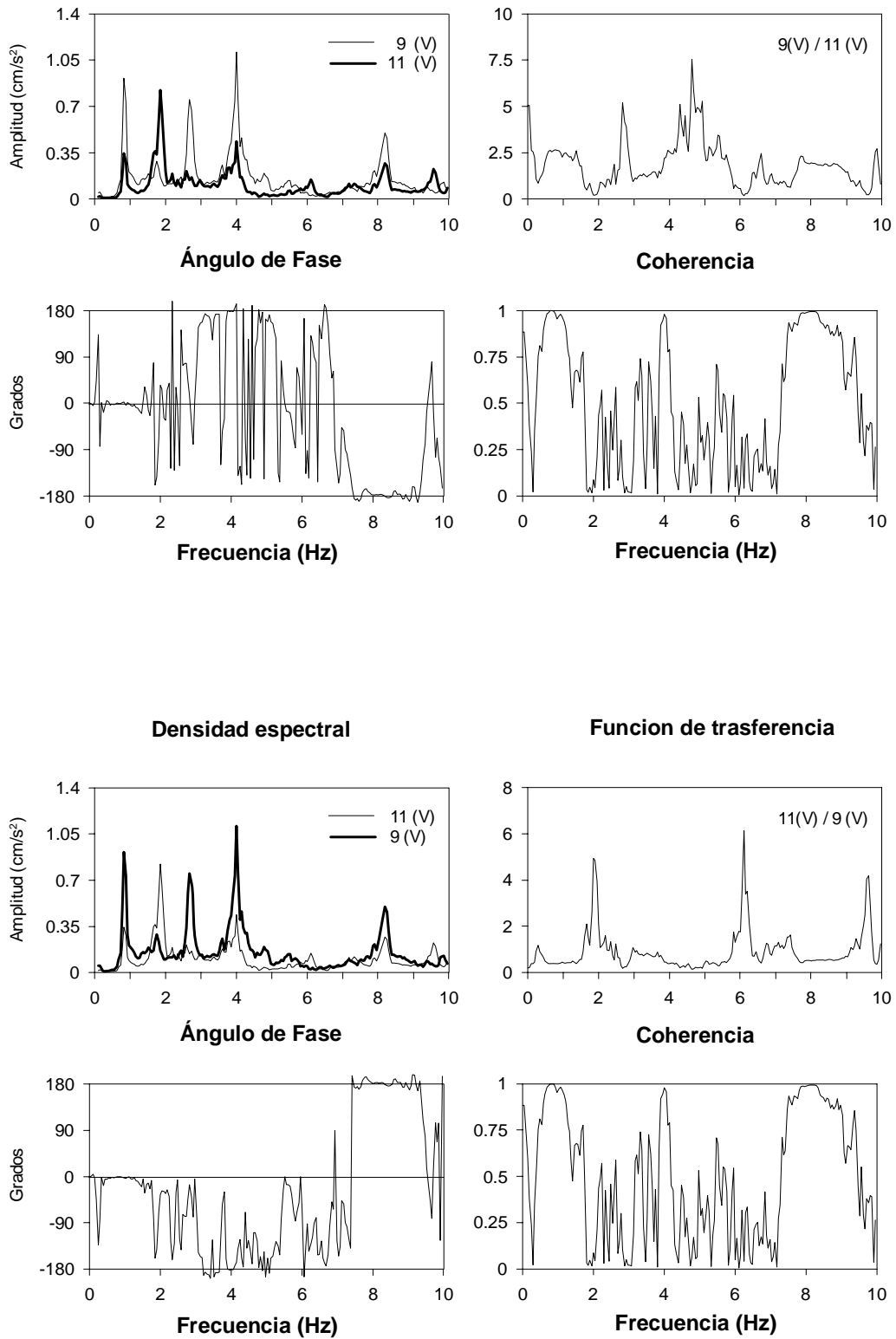


Fig. 46 Densidades espectrales, función de trasferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 9/11 y 11/9 en dirección vertical (etapa 2).

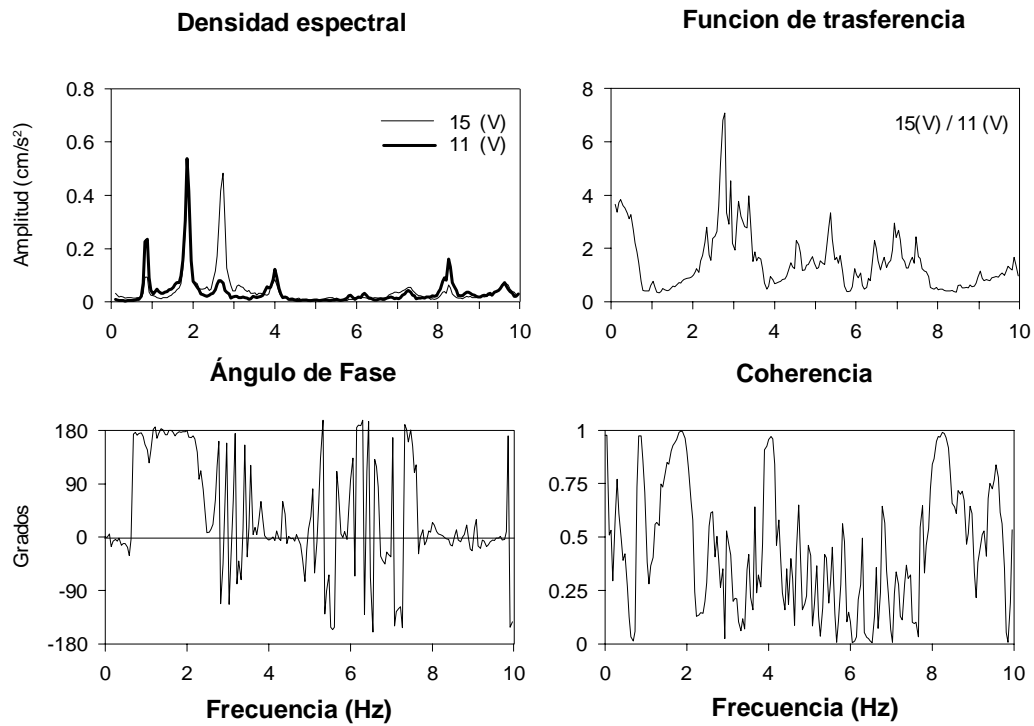


Fig. 47 Densidad espectral, función de transferencia, ángulo fase y coherencia del cociente 15/11 en dirección vertical (etapa 2).

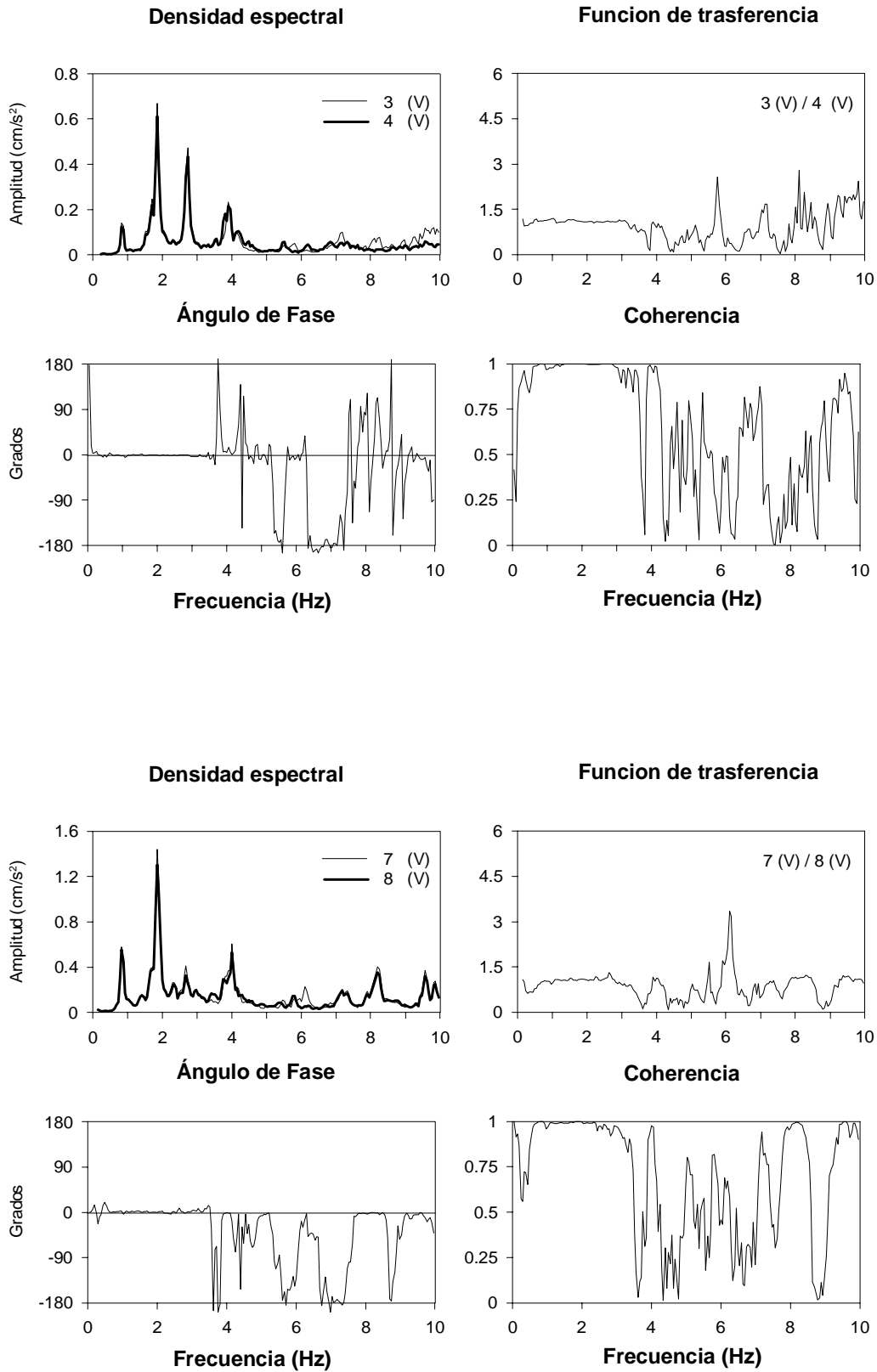


Fig. 48 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 3/4 y 7/8 en dirección vertical (etapa 2).

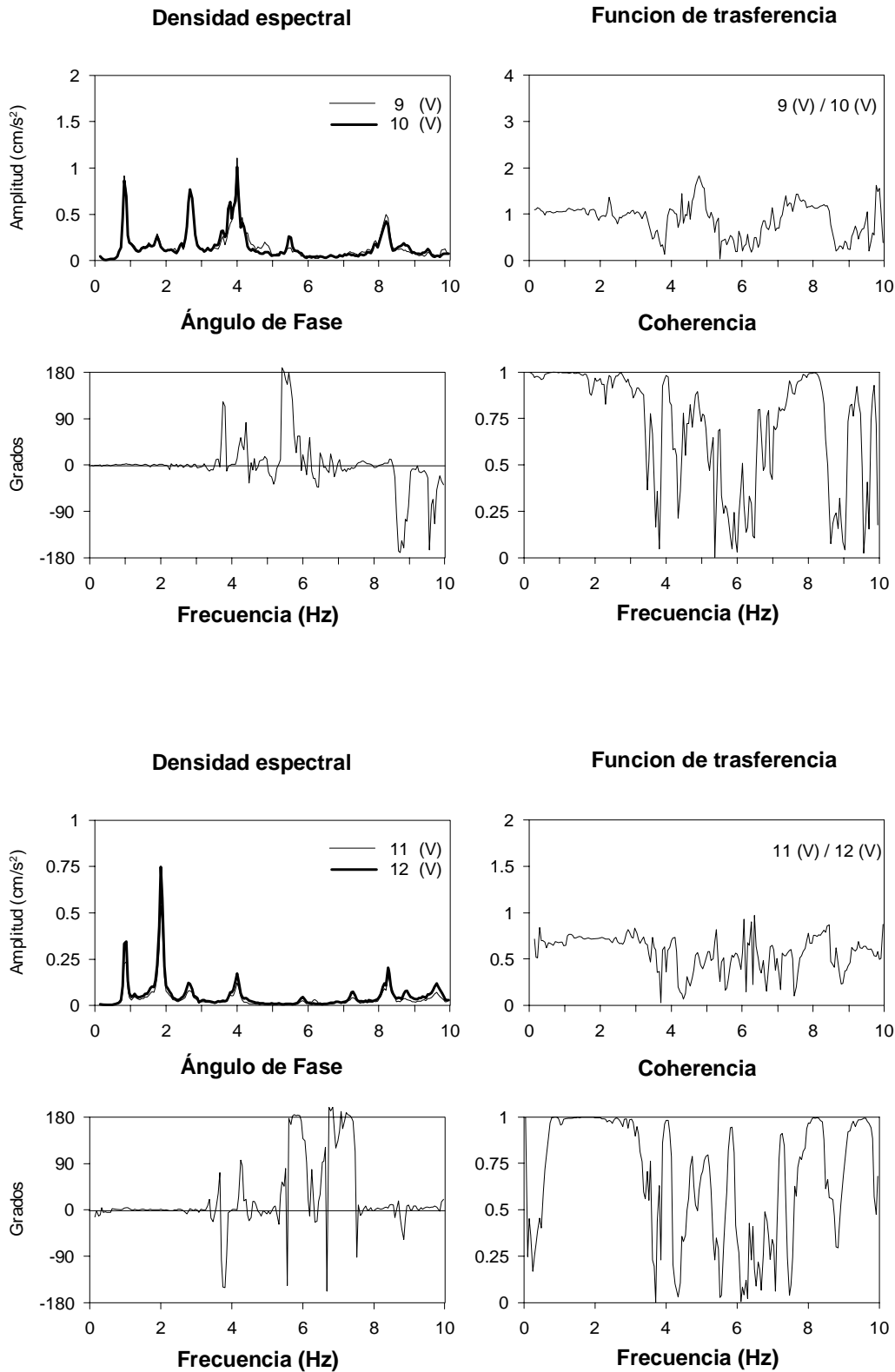


Fig. 49 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 9/10 y 11/12 en dirección vertical (etapa 2).

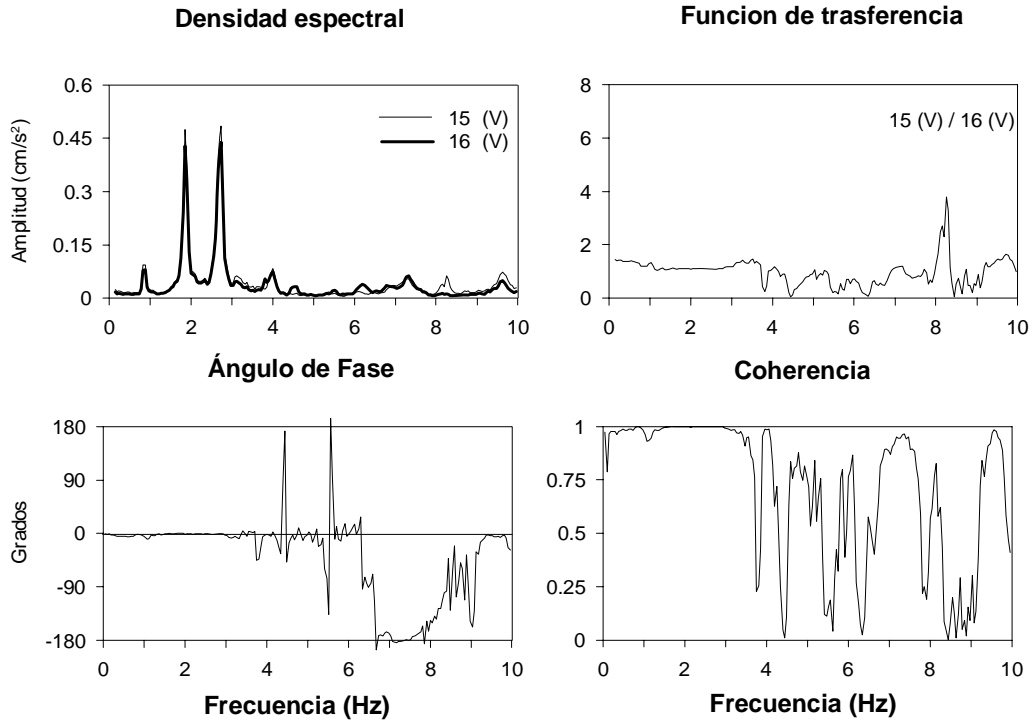


Fig. 50 Densidad espectral, función de trasferencia, ángulo fase y coherencia del cociente 15/16 en dirección vertical (etapa 2).

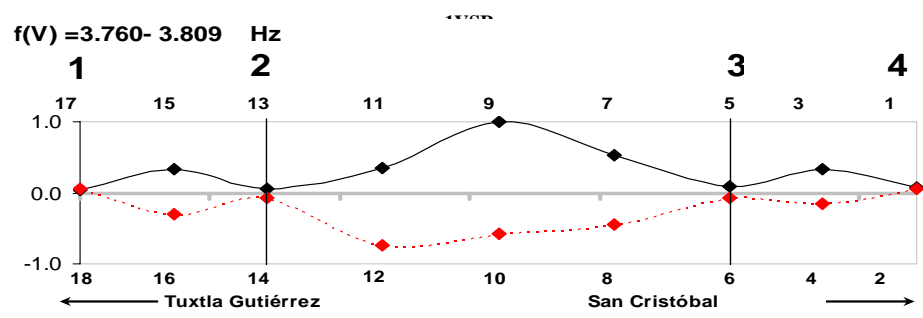
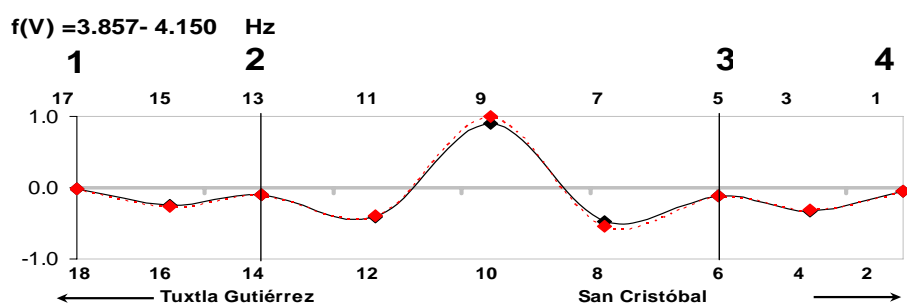
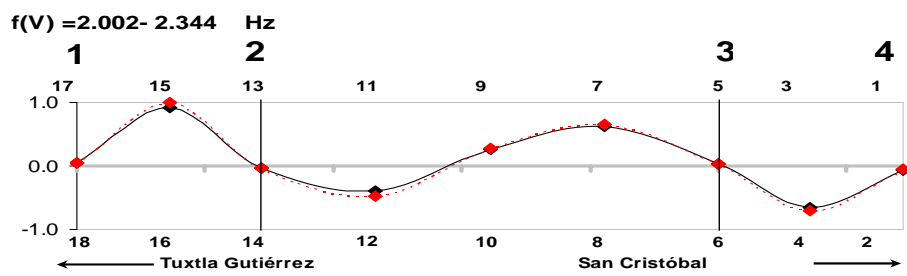
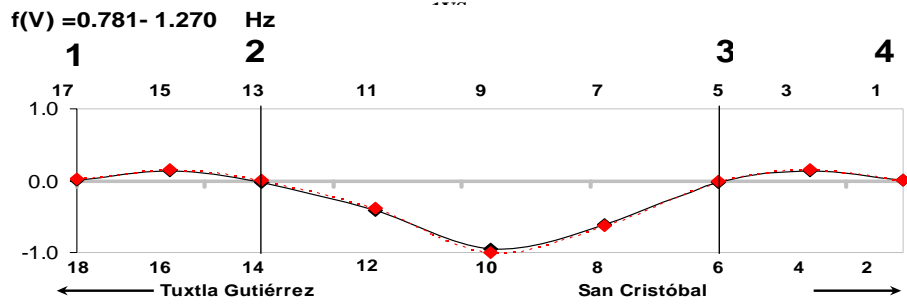


Fig. 51 Formas modales verticales y de torsión del puente San Cristóbal (etapa 2).

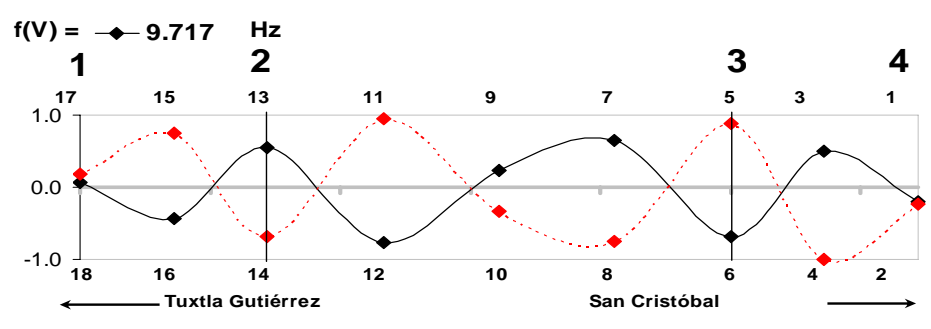
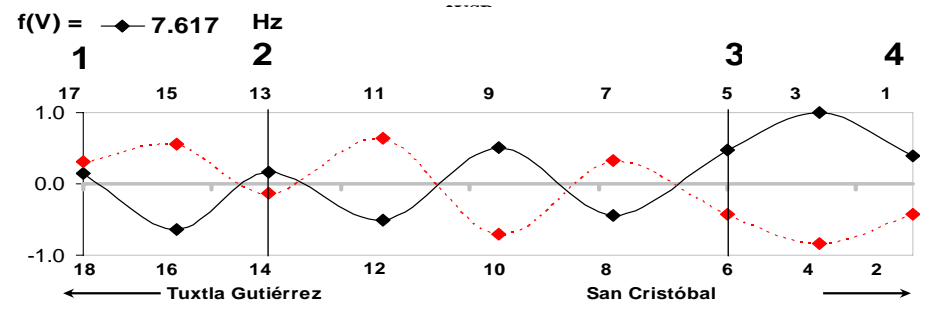
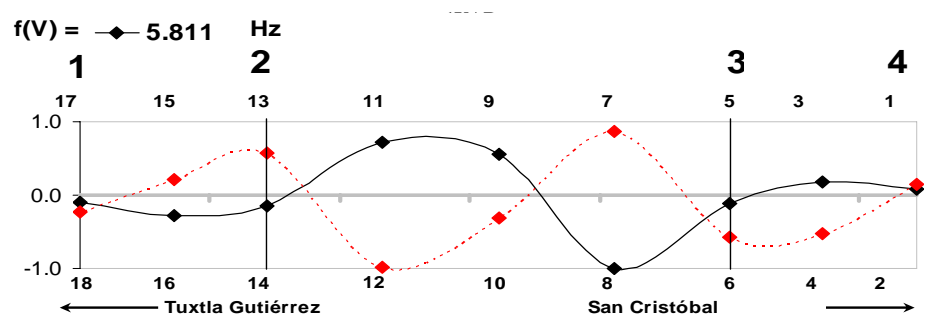
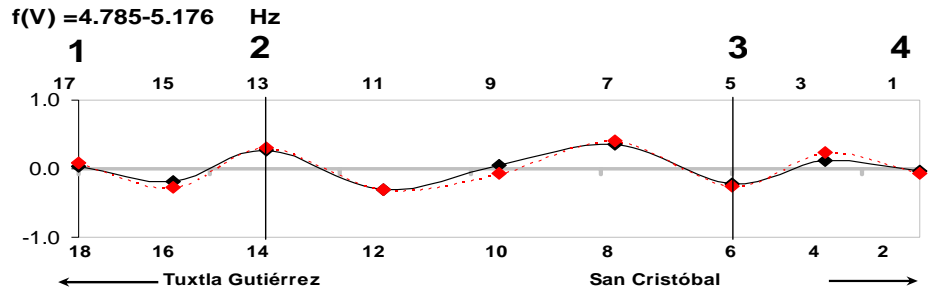


Fig. 51 Formas modales verticales y de torsión del puente San Cristóbal (etapa 2).

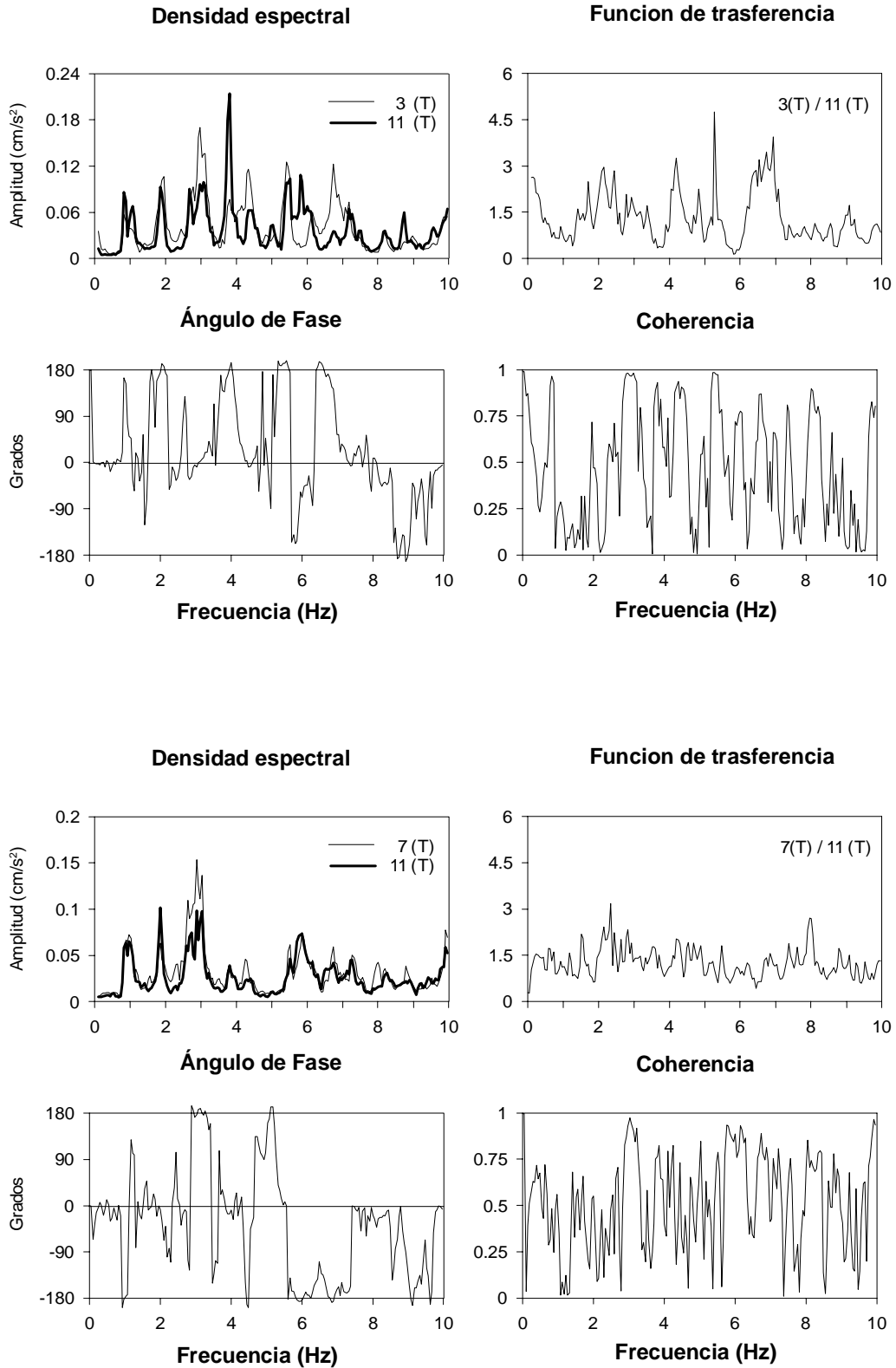


Fig. 52 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 3/11 y 7/11 en dirección trasversal (etapa 2).

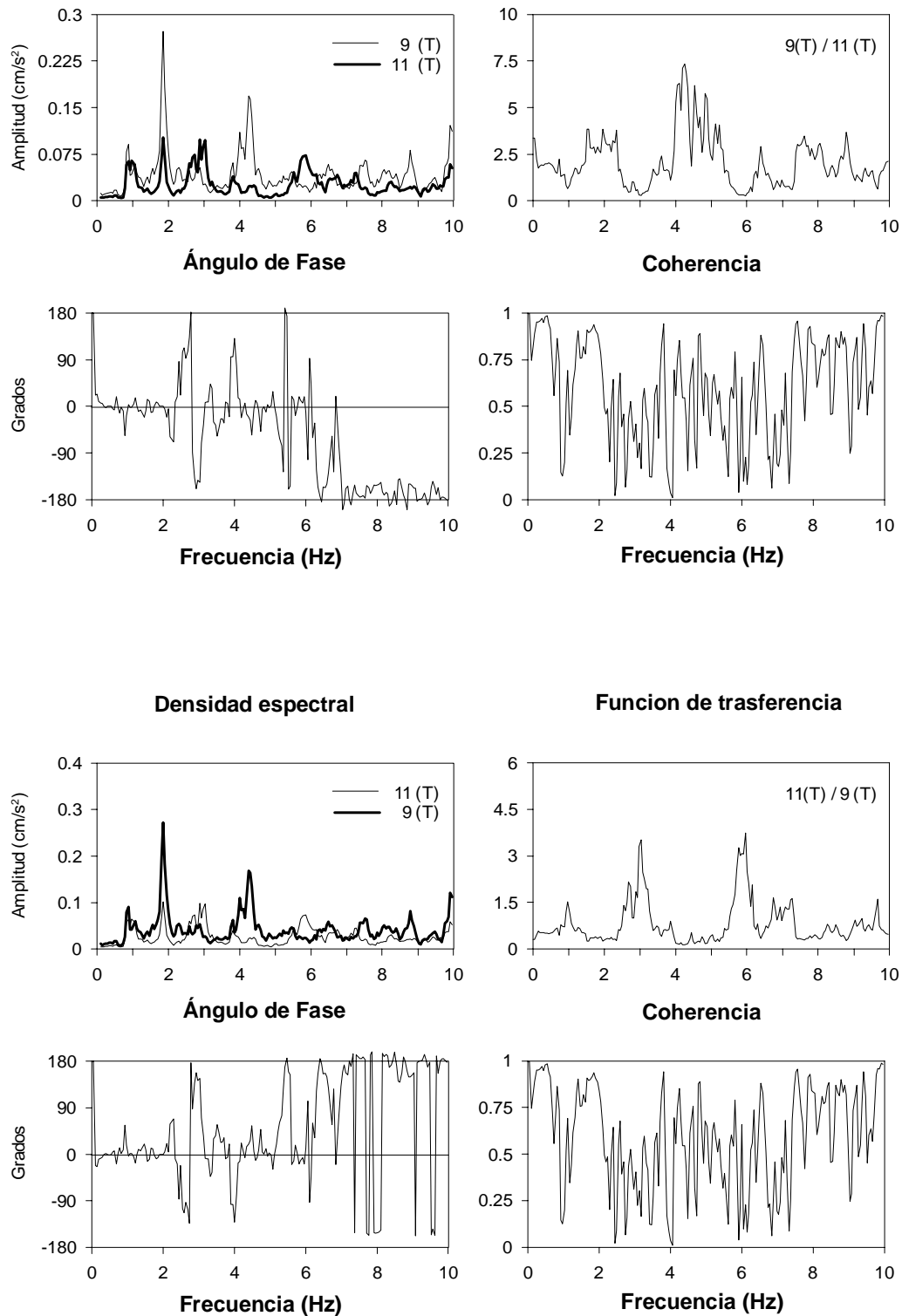


Fig. 53 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 9/11 y 11/9 en dirección trasversal (etapa 2)

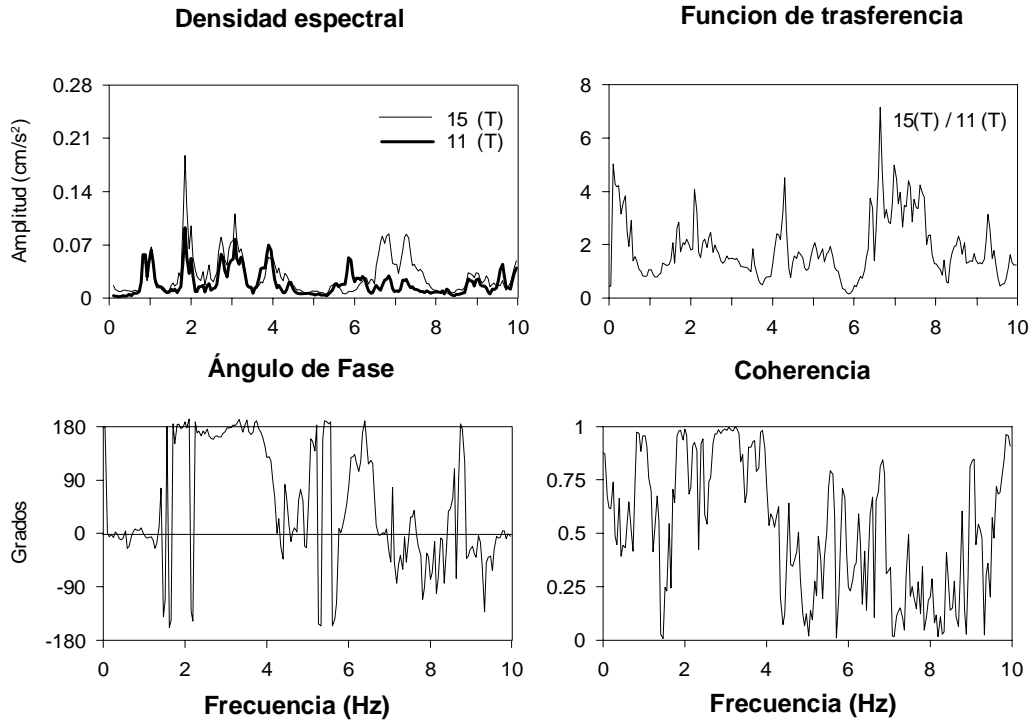


Fig. 54 Densidad espectral, función de trasferencia, ángulo fase y coherencia del cociente 15/11 en dirección trasversal (etapa 2).

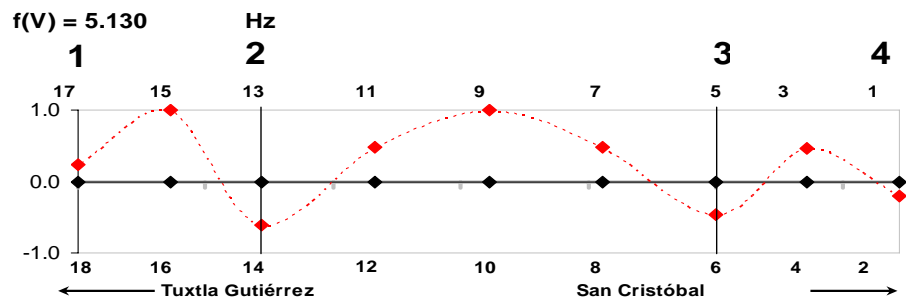
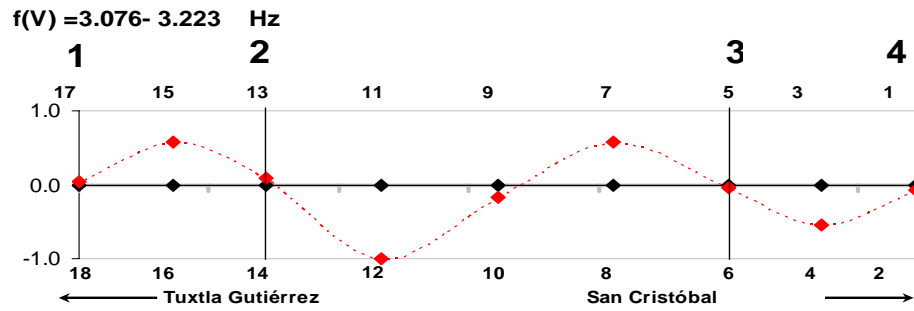
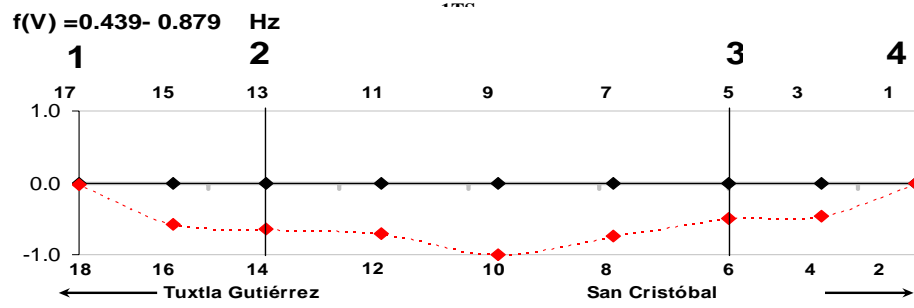


Fig. 55 Formas modales transversales del puente San Cristóbal (etapa 2).

Análisis de resultados etapa 3

4.3 Identificación de frecuencias y formas modales de la superestructura.

La tercera etapa es la última de la serie de etapas donde se realizaron pruebas de vibración ambiental en el puente San Cristóbal, como en las dos anteriores en esta etapa, se realizó una revisión e identificación de las frecuencias principales y formas modales del puente, de tal manera que se hizo el análisis espectral de cocientes de puntos de medición de mencionada etapa.

Para cubrir con la secuencia del estudio, el punto 11 es el punto de referencia para todas las pruebas que se llevaron a cabo.

Cabe mencionar que esta tercera etapa, es la más completa de las tres ya que se realizaron pruebas en las tres direcciones vertical, transversal y longitudinal en los dos lados del puente tanto aguas arriba como aguas abajo y cubriendo la longitud total.

A pesar de tener información para el procesamiento de los cocientes en las tres direcciones para los dos lados del puente, solamente se utilizará la que concuerde con la información que se tiene en las dos etapas anteriores, esto para hacer la comparativa de resultados correspondientes entre etapa y etapa.

Como se menciona antes, con el fin de tener una misma secuencia en el estudio y análisis de las pruebas realizadas en cada etapa, el punto 11 se selecciono como referencia para la dirección vertical, con respecto al cual se procesaron los cocientes 1/11, 3/11, 5/11, 7/11, 9/11, 11/9, 13/11, 15/11 y 17/11, todos estos puntos localizados de un lado del puente (aguas arriba). En el componente vertical también se identifican los modos de torsión, por lo que fue necesario procesar los cocientes 2/11, 4/11, 6/11, 8/11, 10/11, 12/11, 14/11, 16/11 y 18/11 que se encuentran del otro lado (aguas abajo) del puente.

En la dirección transversal los puntos de referencia y cocientes que se procesaron son los mismos que en la dirección vertical del lado de aguas arriba.

En el caso de las pilas se utilizaron los puntos 5, 6, 13 y 14 de referencia, con respecto a los cuales se procesaron los cocientes 5/1, 6/2, 14/18 y 13/17 en la dirección transversal (T) y la longitudinal (L).

Fue necesario procesar otros cocientes espectrales en la dirección vertical y transversal, con el propósito de verificar las configuraciones obtenidas para cada componente mediante la comparación de pares de puntos.

En la tercera etapa se identificaron un total de 10 modos de vibrar del tablero de las pruebas de vibración ambiental, dentro de un intervalo de 0.732 y 9.814 Hz. De estos modos, 4 son verticales, 3 de torsión y 3 transversales.

Los modos verticales de la superestructura fueron identificados de los cocientes 3/11, 7/11, 9/11, 11/9 y 15/11, mostrados en las figuras 56, 57 y 58

Los cocientes seleccionados para los modos de torsión del tablero fueron 3/4, 7/8, 9/10, 11/12 y 15/16, mostrados en las figuras 59, 60 y 61.

Las respectivas formas modales correspondientes a las frecuencias de vibración más significativas en la dirección vertical, incluyendo torsión, se muestran en la figura 62.

Los modos trasversales de la superestructura fueron identificados de los cocientes 3/11, 7/11, 9/11, 11/9 y 15/11, mostrados en las figuras 63, 64 y 65 Las respectivas formas modales corresponden a las frecuencias de vibración más significativas en la dirección transversal se muestran en la figura 66.

En la tabla 3 se encuentran las frecuencias naturales de vibración más significativas que se dedujeron con base en el análisis espectral de todas las pruebas realizadas.

Para esta etapa también el modo fundamental del tablero del puente es vertical pero existe también un acoplamiento con la dirección transversal, con una frecuencia natural de 0.830 Hz. El primer modo vertical tiene una frecuencia asociada de 0.732-1.172 Hz, el primer modo transversal de 0.830-1.123 Hz y el de torsión de 3.711 Hz.

Dirección V		Torsión		Dirección T	
MODO	FRECUENCIA	MODO	FRECUENCIA	MODO	FRECUENCIA
1VS	0.732-1.172	1VSR	3.711	1TS	0.830-1.123
1VA	2.100-2.539	1VAR	5.029	1TA	3.076-3.125
2VS	3.857-4.150	2VSR	7.320	2TS	5.420
2VA	5.029	2VAR	-	2TA	-

Tabla 3 Frecuencias identificadas en el componente vertical (incluyendo la torsión) y transversal del puente San Cristóbal

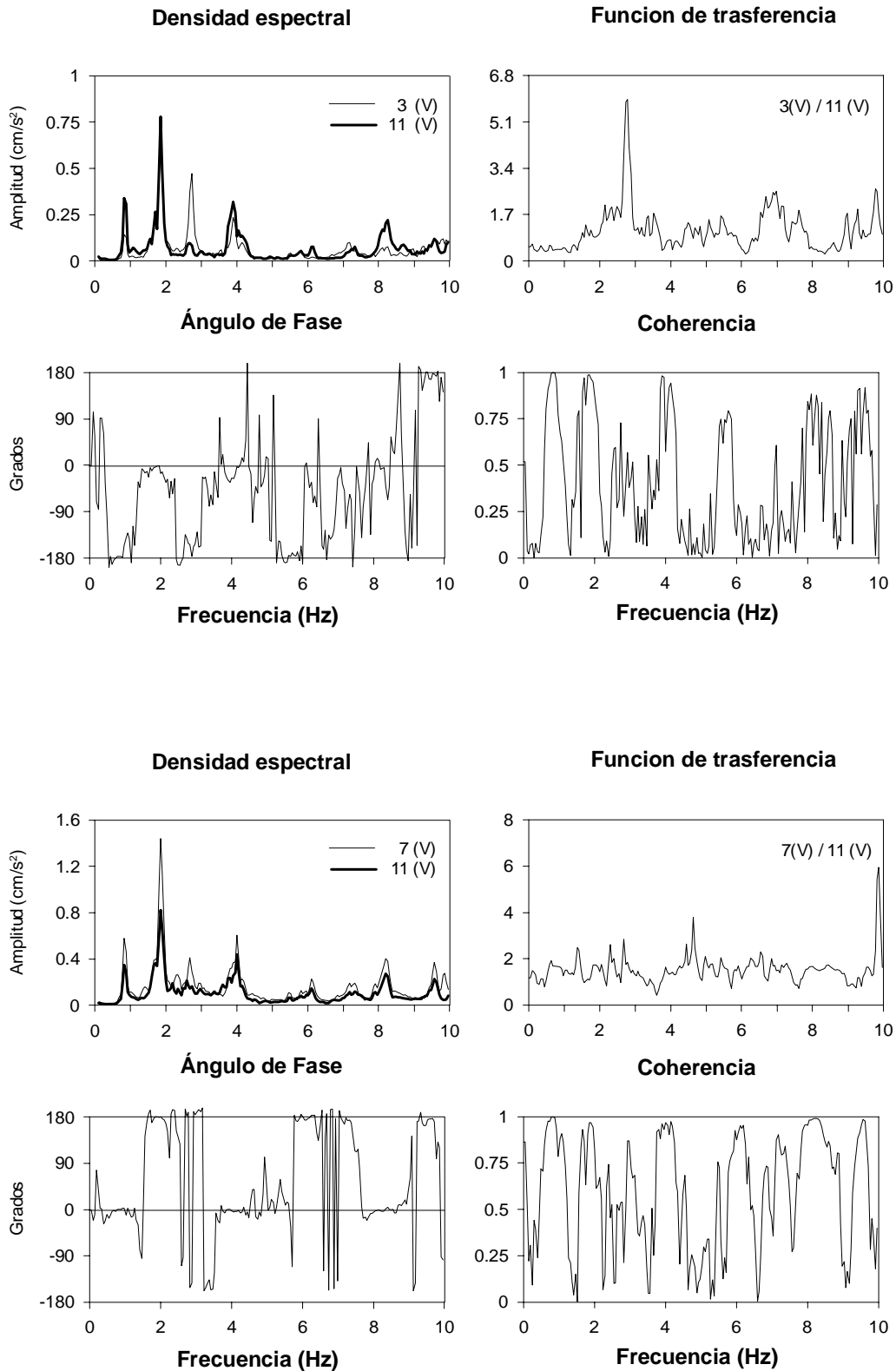


Fig. 56 Densidades espectrales, función de trasferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 3/11 y 7/11 en dirección vertical (etapa 3).

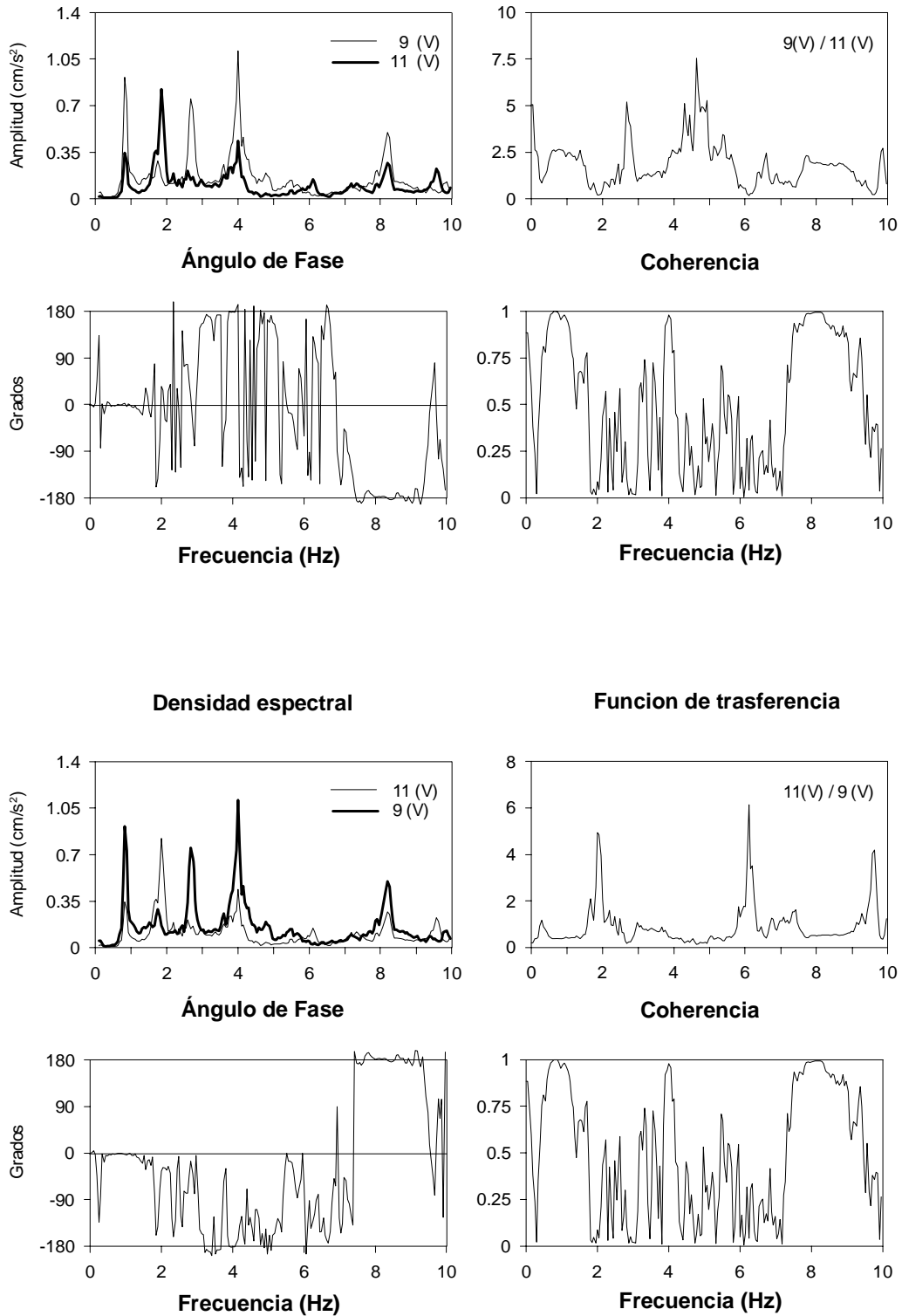


Fig. 57 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 9/11 y 11/9 en dirección vertical (etapa 3).

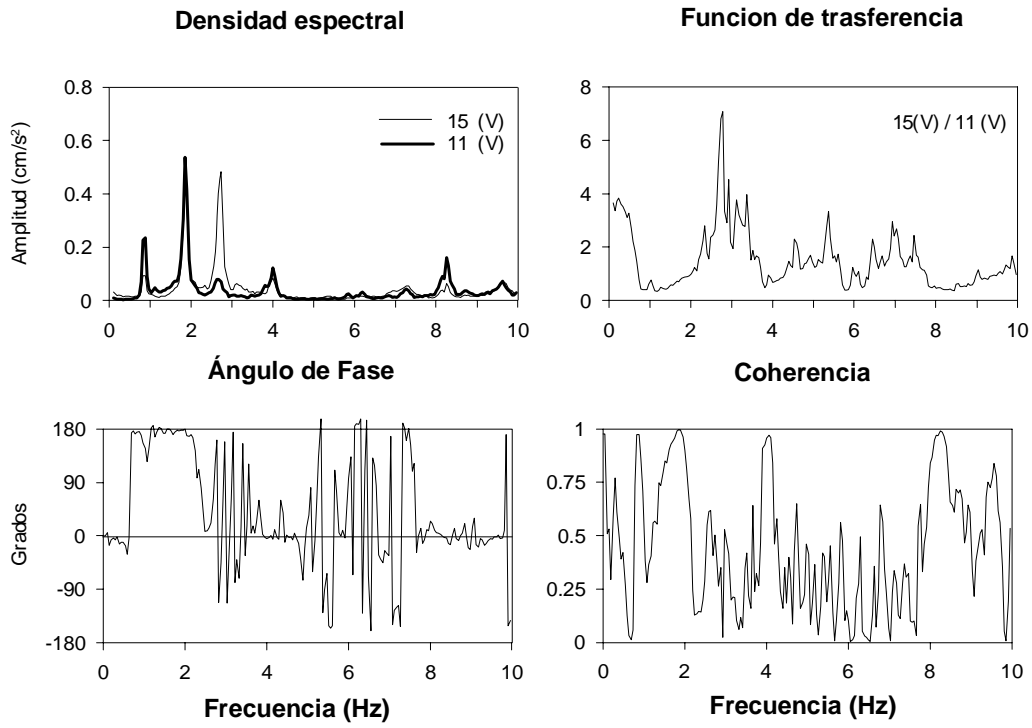


Fig. 58 Densidad espectral, función de trasferencia, ángulo fase y coherencia del cociente 15/11 en dirección vertical (etapa 3).

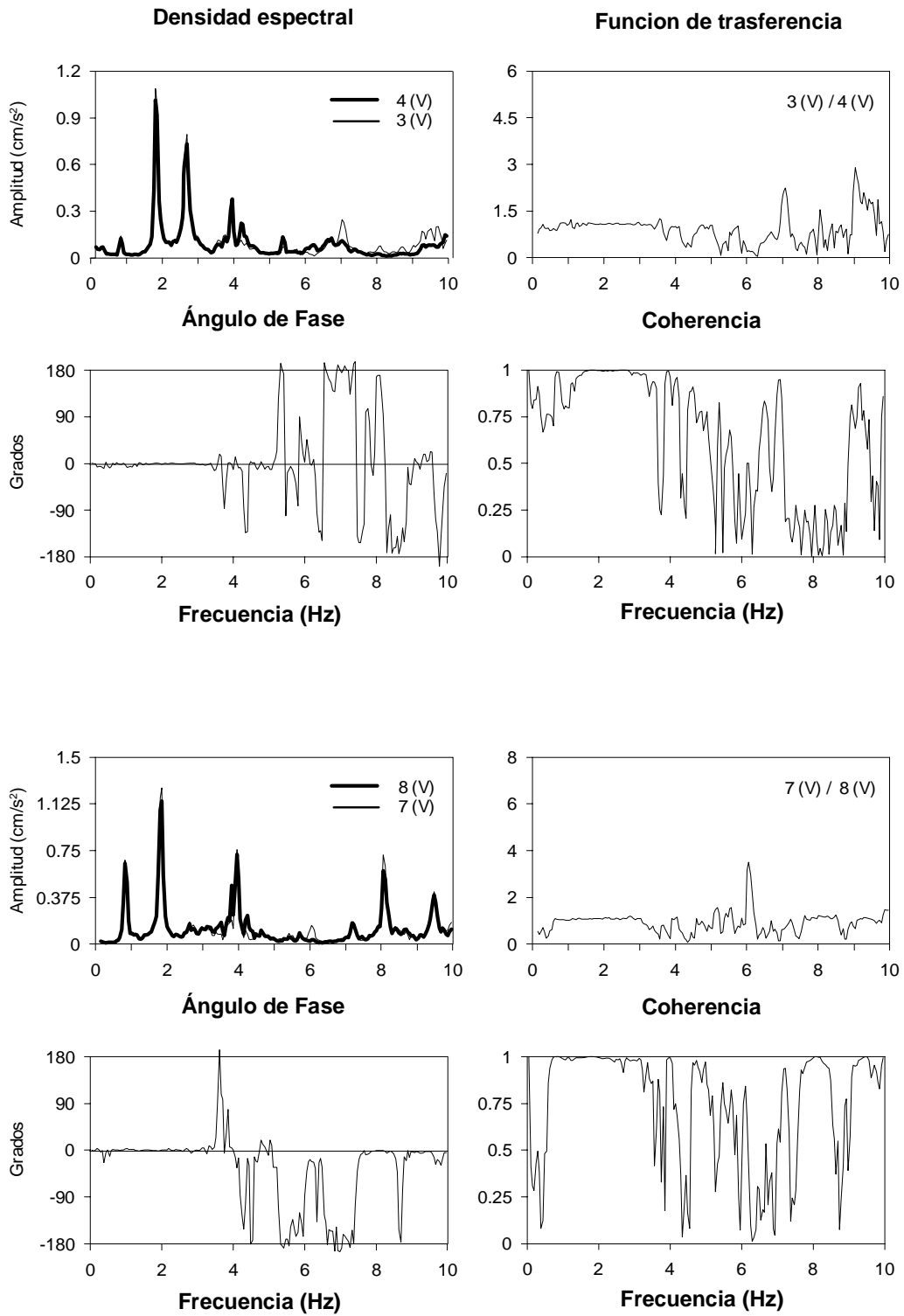


Fig. 59 Densidades espectrales, función de trasferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 3/4 y 7/8 en dirección vertical (etapa 3).

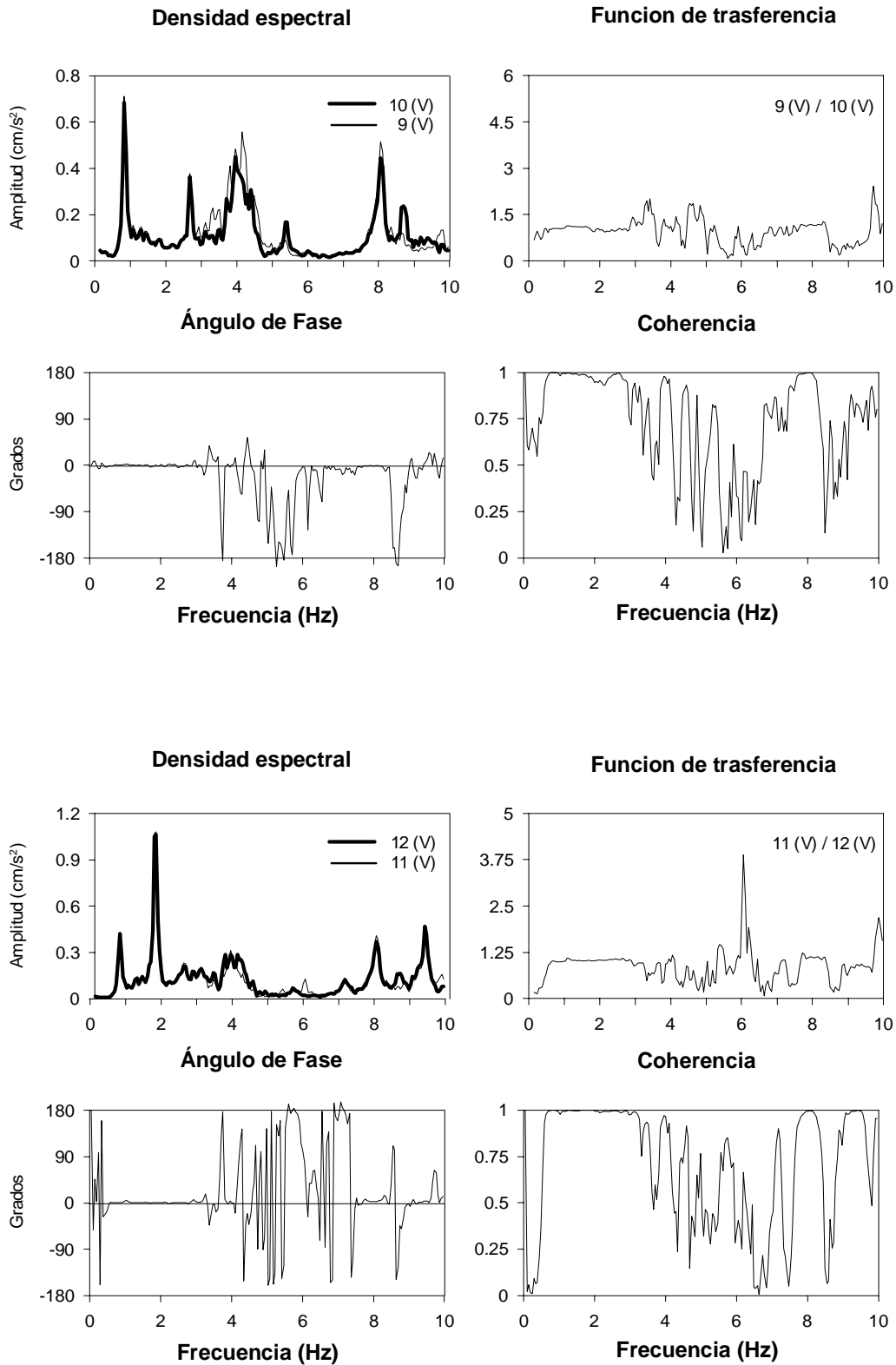


Fig. 60 Densidades espectrales, función de trasferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 9/10 y 11/12 en dirección vertical (etapa 3).

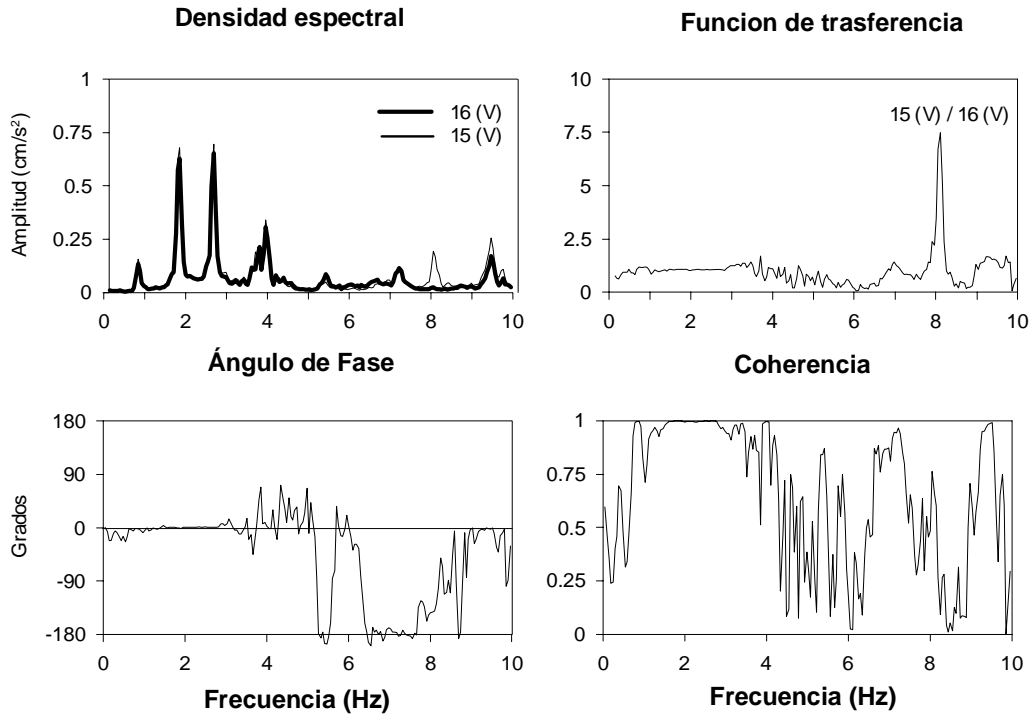


Fig. 61 Densidad espectral, función de trasferencia, ángulo fase y coherencia del cociente 15/16 en dirección vertical (etapa 3).

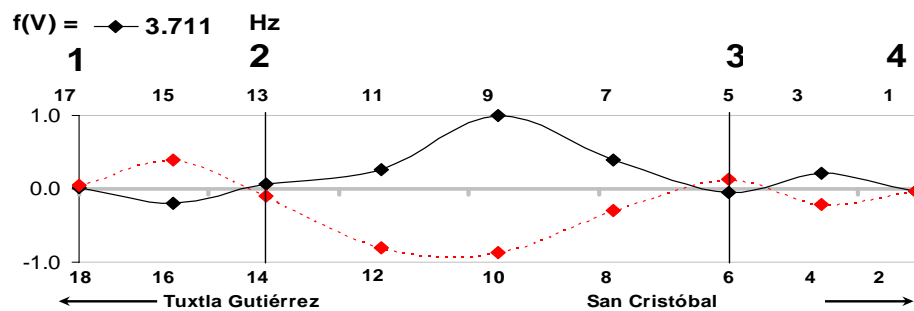
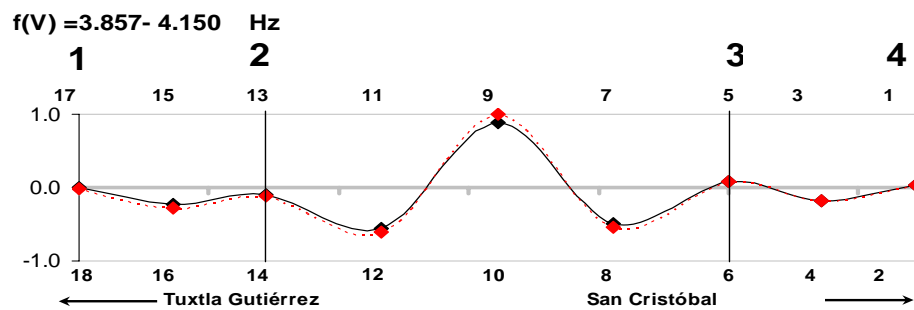
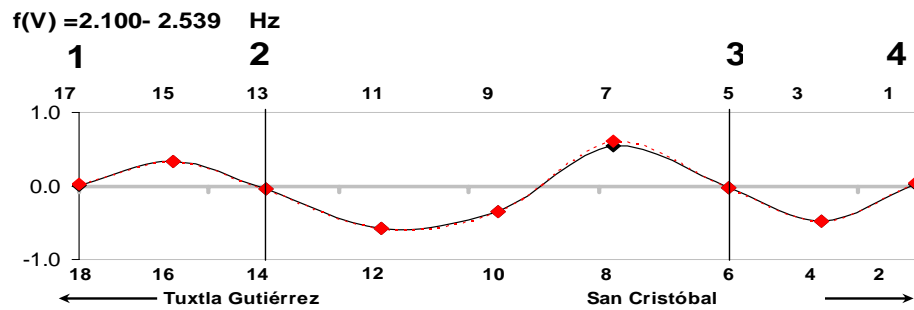
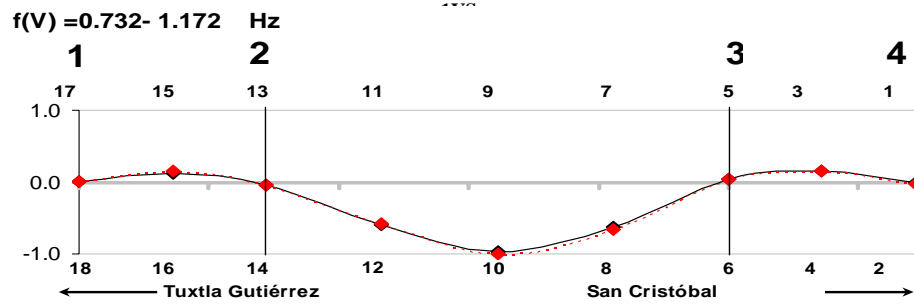


Fig. 62 Formas modales verticales y de torsión del puente San Cristóbal (etapa 3).

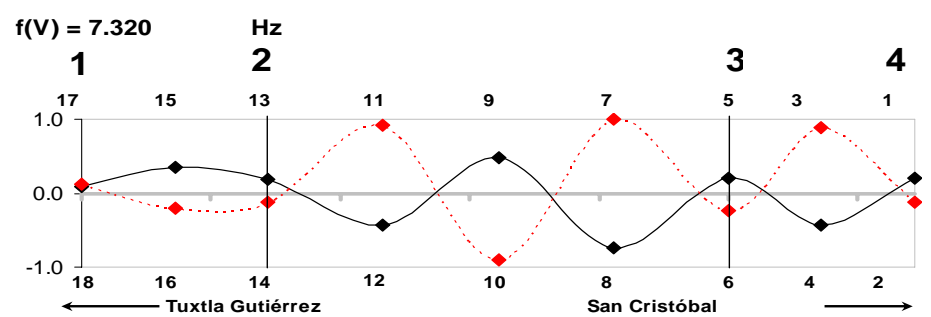
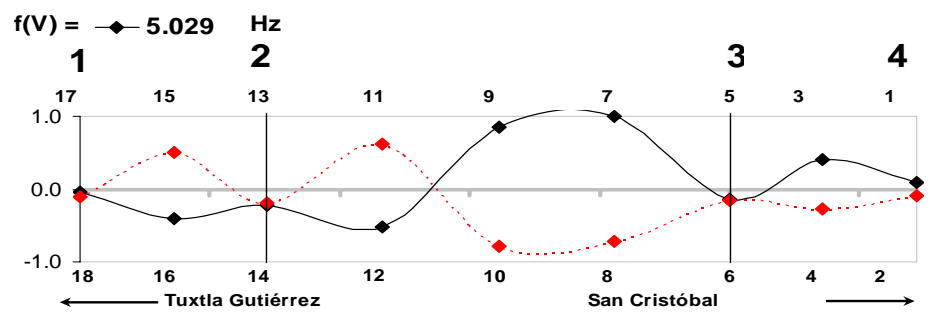
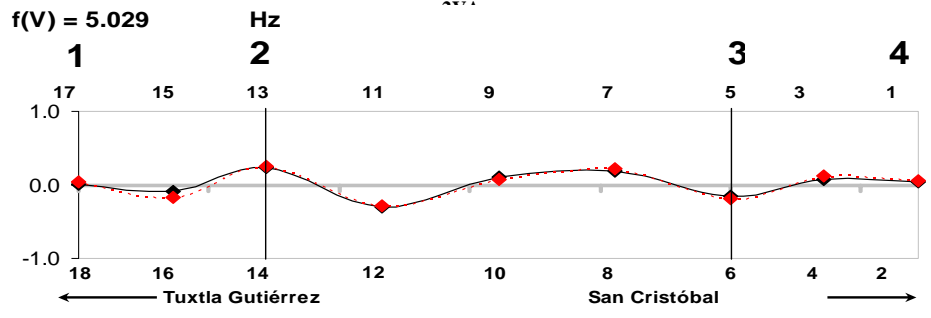


Fig. 62 Formas modales verticales y de torsión del puente San Cristóbal (etapa 3).

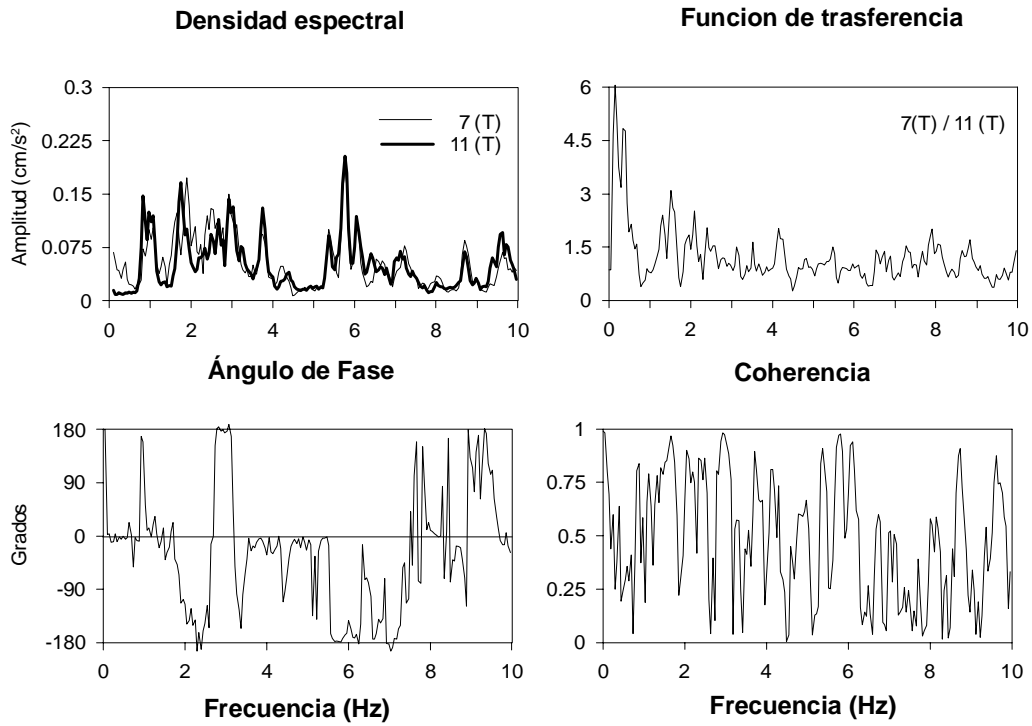
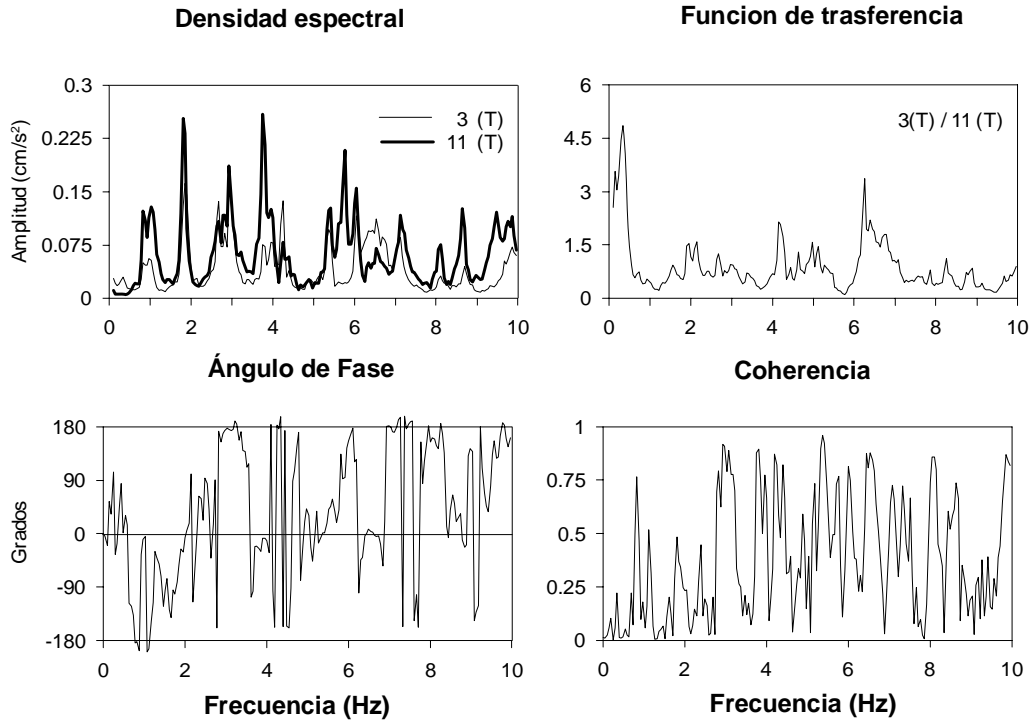


Fig. 63 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 3/11 y 7/11 en dirección trasversal (etapa 3).

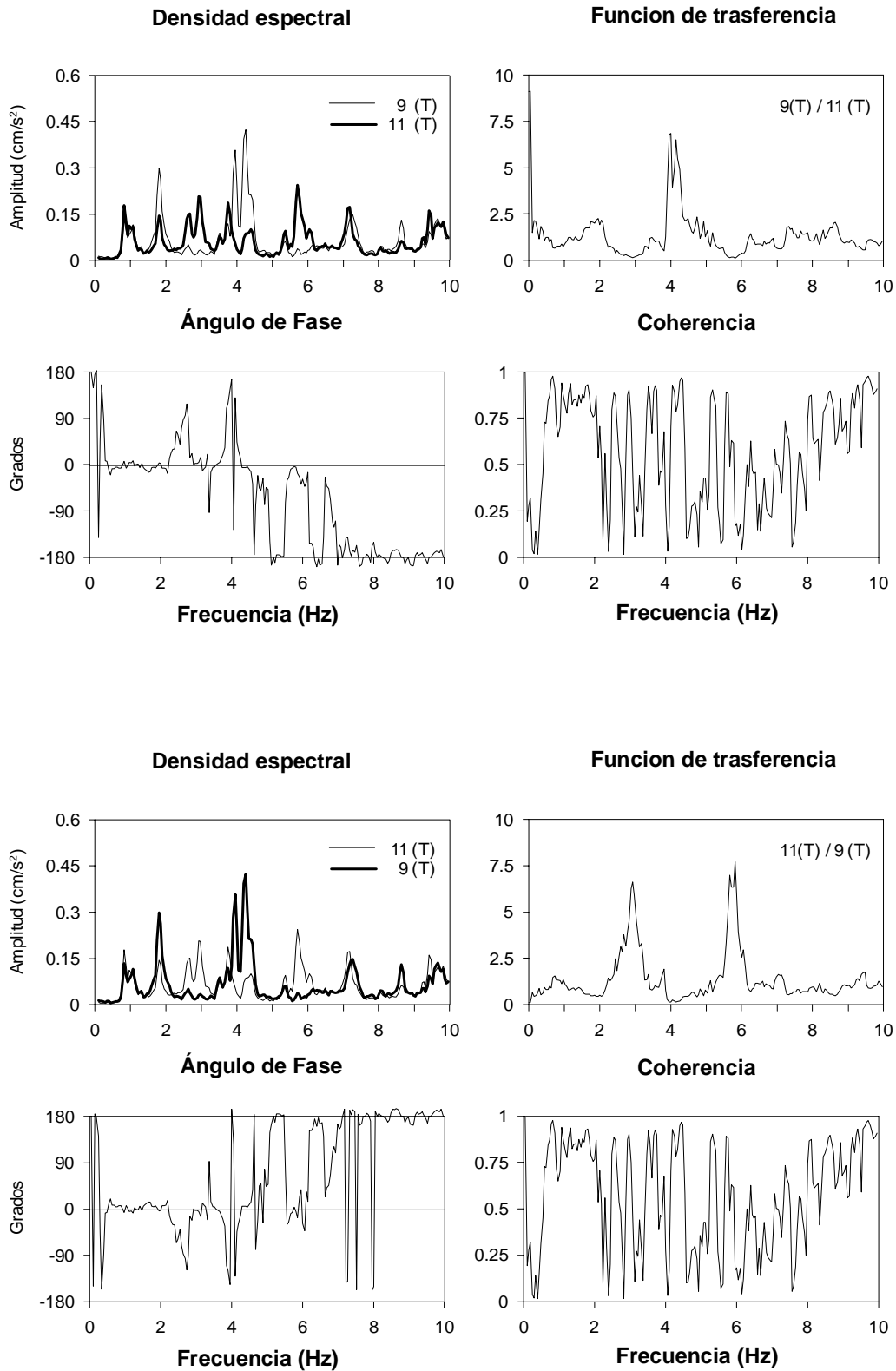


Fig. 64 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 9/11 y 11/9 en dirección trasversal (etapa 3).

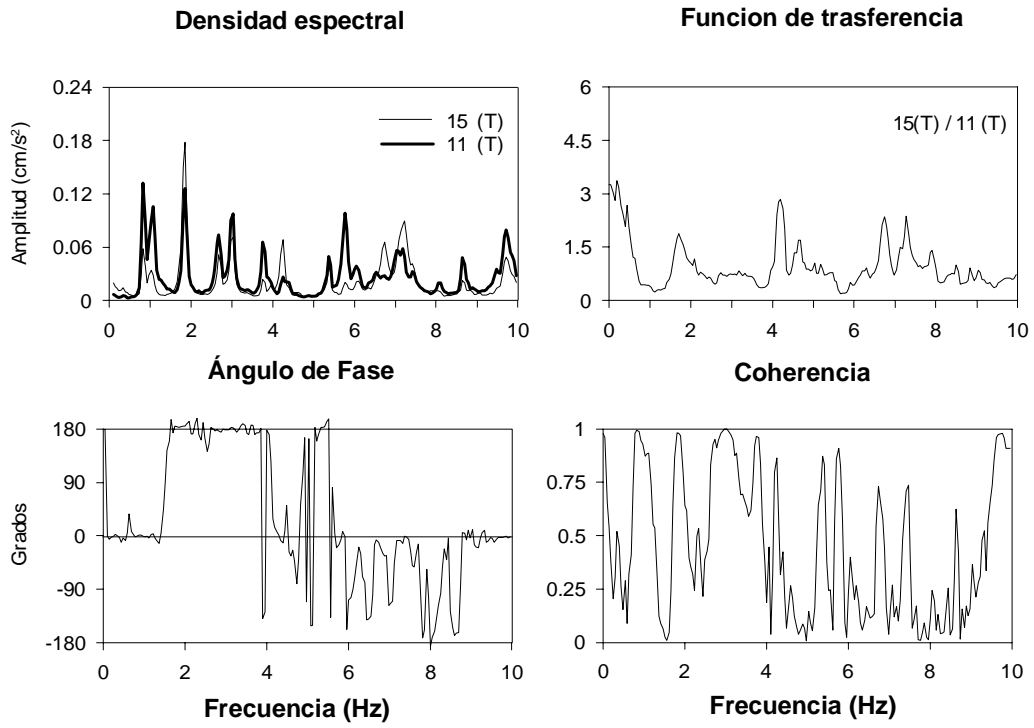


Fig. 65 Densidad espectral, función de trasferencia, ángulo fase y coherencia del cociente 15/11 en dirección trasversal (etapa 3).

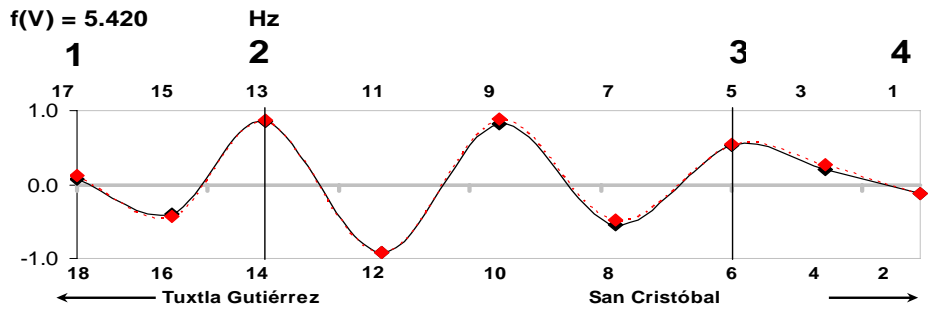
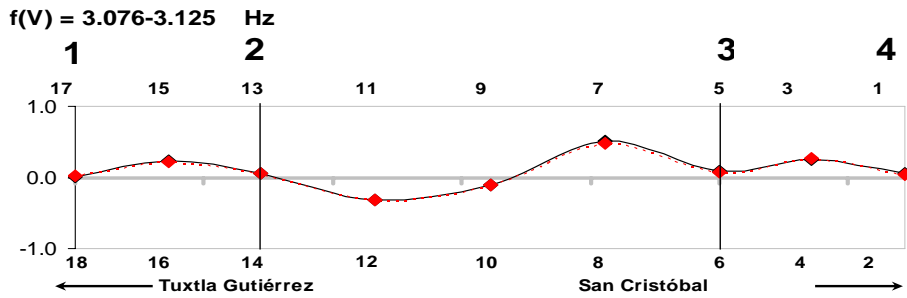
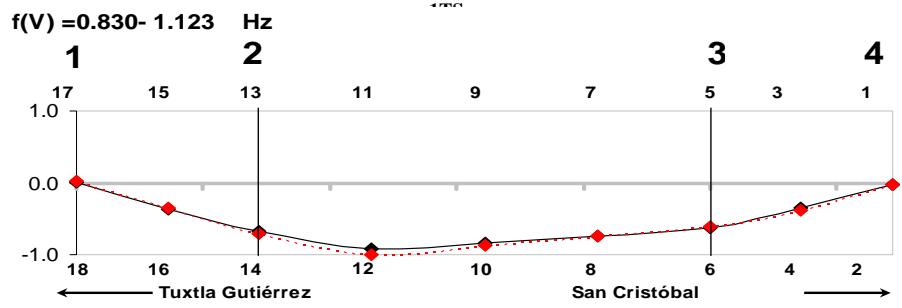


Fig. 66 Formas modales transversales del puente San Cristóbal (etapa 3).

4.4 Identificación de frecuencias representativas en las pilas

Para el caso de las pilas los puntos que se utilizaron para su monitoreo, fueron 5, 6, 13 y 14 que se encuentran ubicados en el tablero a la altura éstas. Las relaciones de puntos utilizados en las tres etapas de pruebas son: 5/1, 6/2 y 14/18 en la componente transversal y longitudinal. Con estos puntos podemos determinar el comportamiento de las pilas y su interacción con el tablero de la superestructura.

En las tres etapas para la pila uno, que se encuentra del lado Tuxtla Gutiérrez, se ubicaron los puntos 14 y 13 considerando el cociente 14/18 en dirección T y L, donde el punto 18 se encuentra posicionado en el apoyo de ese mismo lado hacia Tuxtla Gutiérrez como se mostró en la figura 13. La pila dos que se encuentra del lado de San Cristóbal de las Casas se posicionaron los puntos 5 y 6 considerando los cocientes 5/1 y 6/2 en dirección T y L, donde los puntos 1 y 2 están en el apoyo del mismo lado hacia San Cristóbal de las Casas, como se muestran también en la figura 13.

La figura 67 muestra las gráficas de densidad espectral, función de transferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 5/1 y 14/18 en dirección T, la figura 68 los cocientes 6/2 y 14/18 en dirección L, las dos figuras corresponden a la etapa 1, las tres etapas presentan la misma ubicación de puntos a la altura de la pila. Para la etapa 2 las figuras 69 y 70 en dirección T y L respectivamente, en la etapa 3 las figuras 71 y 72 en dirección T y L respectivamente, muestran las graficas de densidad espectral, función de transferencia, ángulo fase y coherencia.

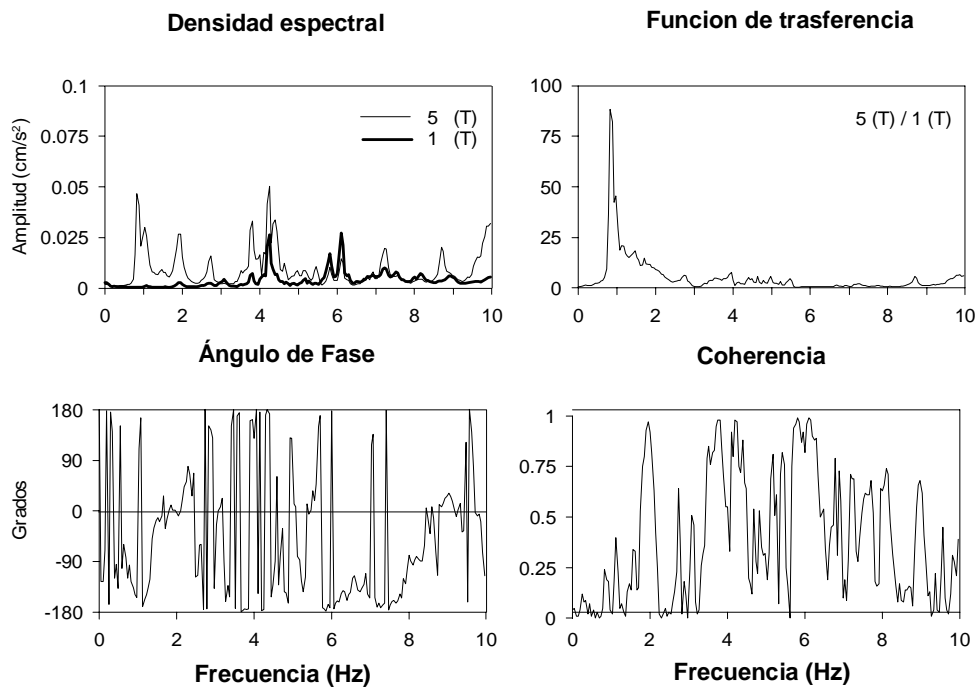
Los puntos que se utilizaron para el análisis de las pilas se colocaron sobre el tablero y no directamente en la columna, esto nos da una idea de su respuesta dinámica, sin embargo, no indica un resultado directo del elemento estructural. El resultado refleja un probable comportamiento de la pila. El no colocar suficientes sensores a lo largo de la pila hace que su estudio dinámico se limite únicamente a la identificación de frecuencias ya que la información es insuficiente para obtener sus formas modales.

En la tabla 4 se muestran las frecuencias más significativas y su equivalencia en periodo para el caso de las pilas en la componente transversal y longitudinal. Las frecuencias más representativas para las pilas en cada una de las etapas son: Etapa 1 en L (0.879, 1.904) y en T (1.123), Etapa 2 en L (0.879, 1.855), en T (1.074) y Etapa 3 en L (0.879, 1.807) y en T (1.807) Hz.

Dirección	FRECUENCIA (Hz)			PERIODO (s)		
	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Transversal	1.123	1.074	1.807	0.89	0.93	0.55
Longitudinal	0.879, 1.904	0.879, 1.855	0.879, 1.807	1.14, 0.53	1.14, 0.54	1.14, 0.55

Tabla 4. Intervalos de frecuencias identificadas en las pilas para las dirección transversal y longitudinal de la relación de puntos 5/1, 6/2 y 14/18.

DIRECCIÓN T



DIRECCIÓN T

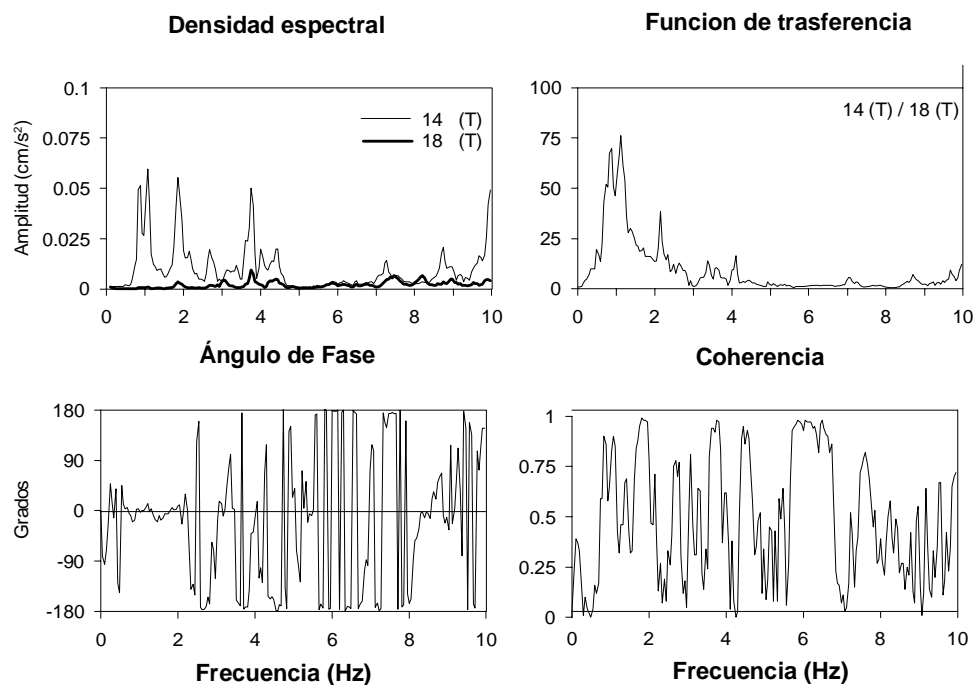
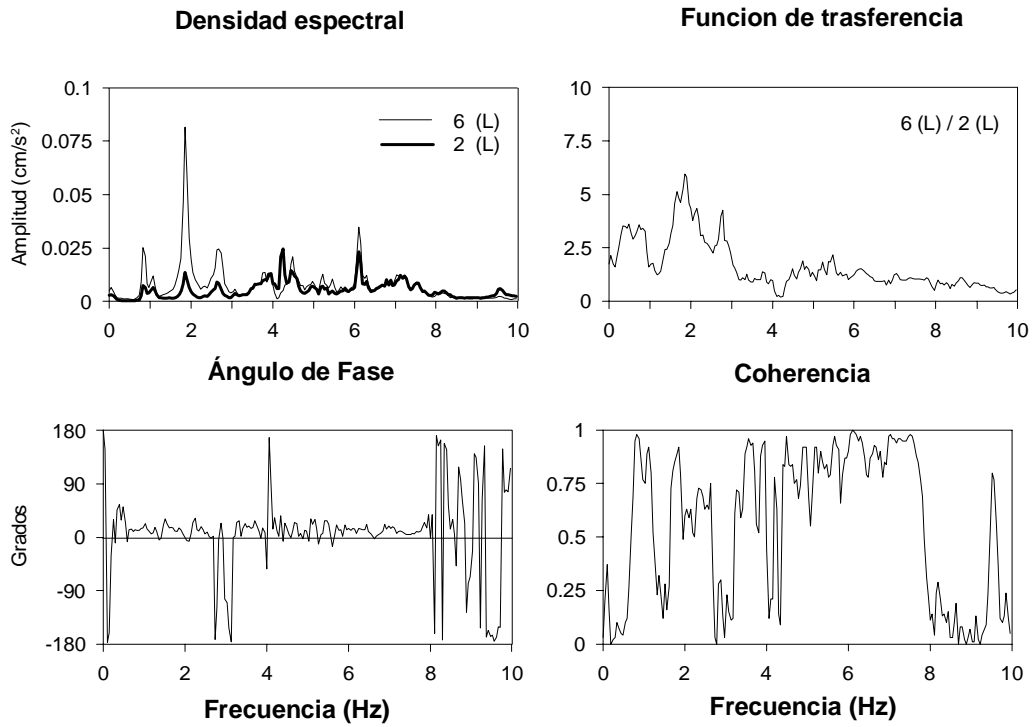


Fig. 67 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 5/1 y 14/18 en dirección trasversal de las pilas (etapa 1)

DIRECCIÓN L



DIRECCIÓN L

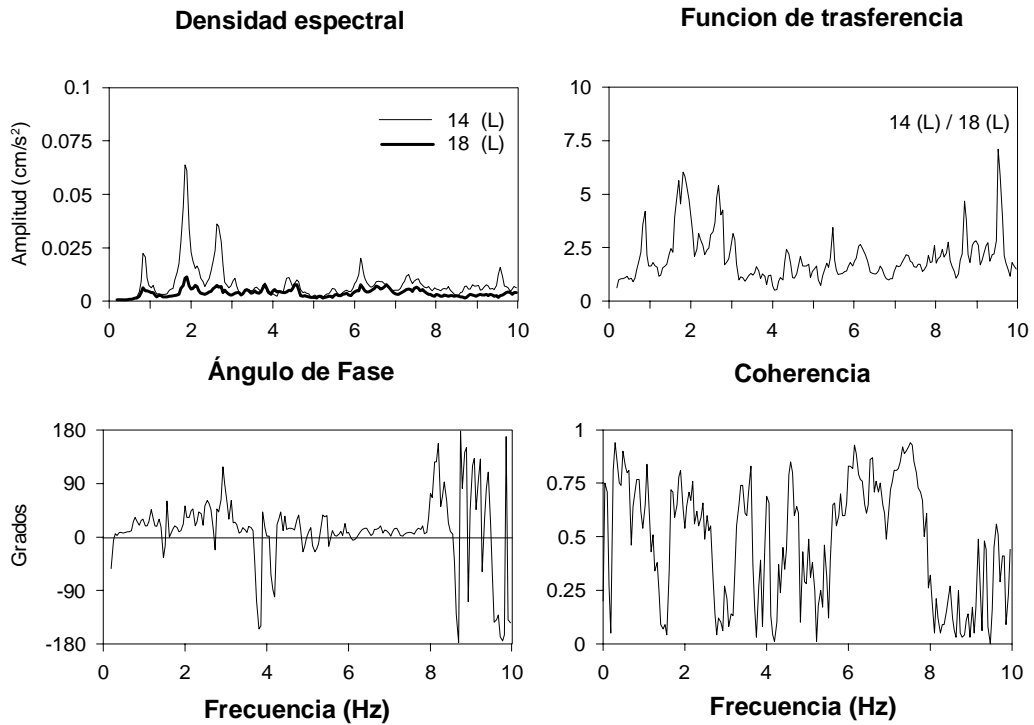
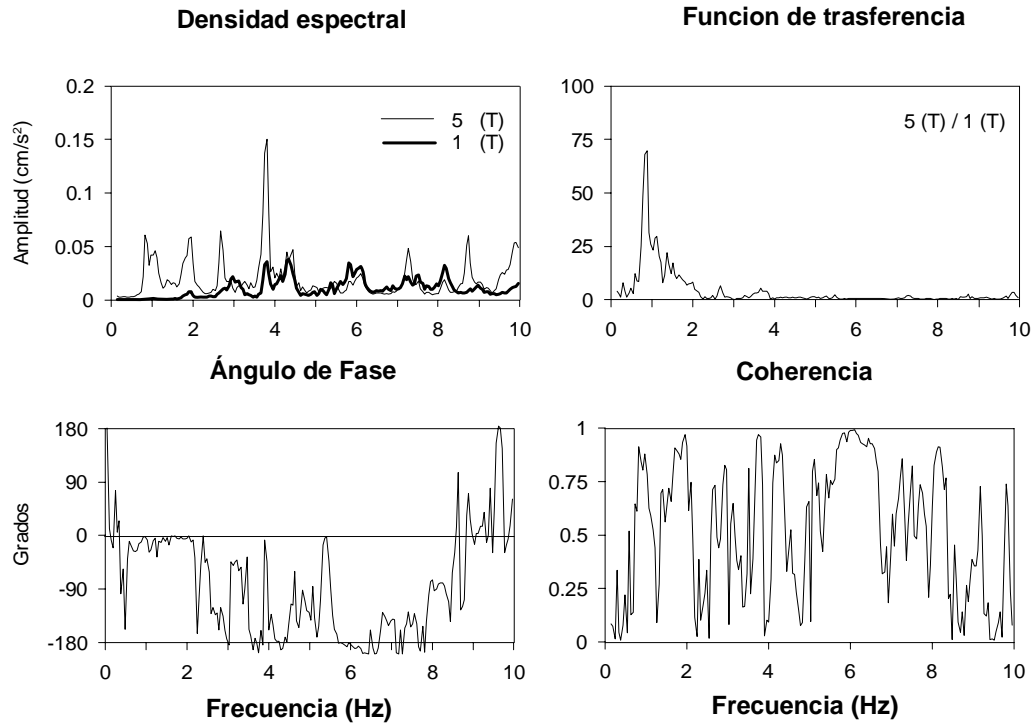


Fig. 68 Densidades espectrales, función de trasferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 6/2 y 14/18 en dirección longitudinal de las pilas (etapa 1)

DIRECCIÓN T



DIRECCIÓN T

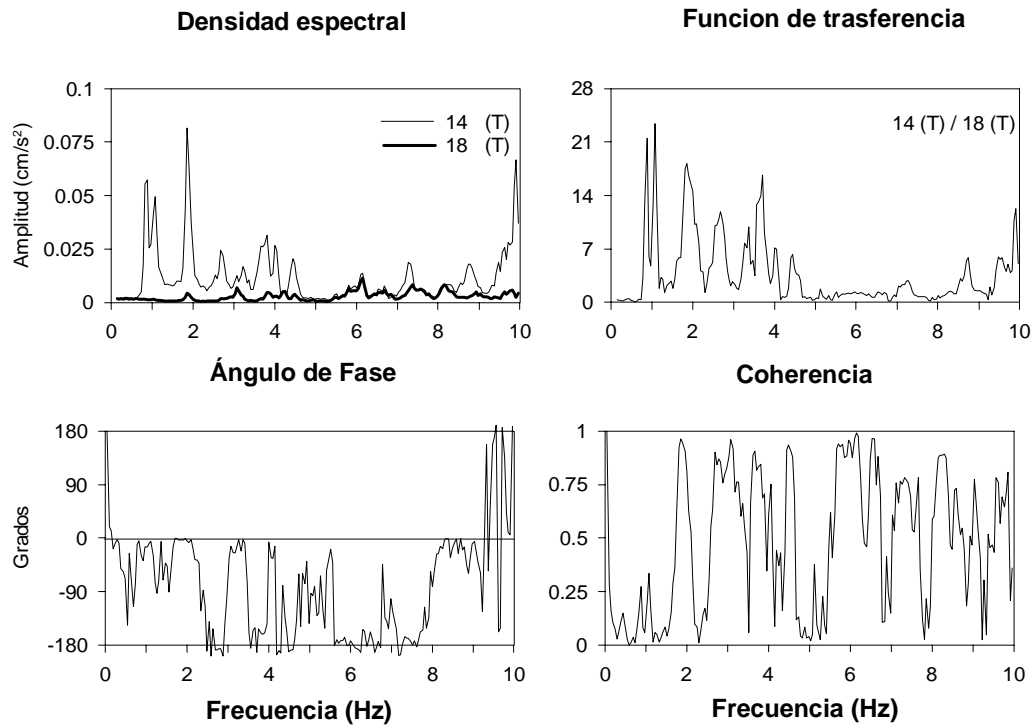
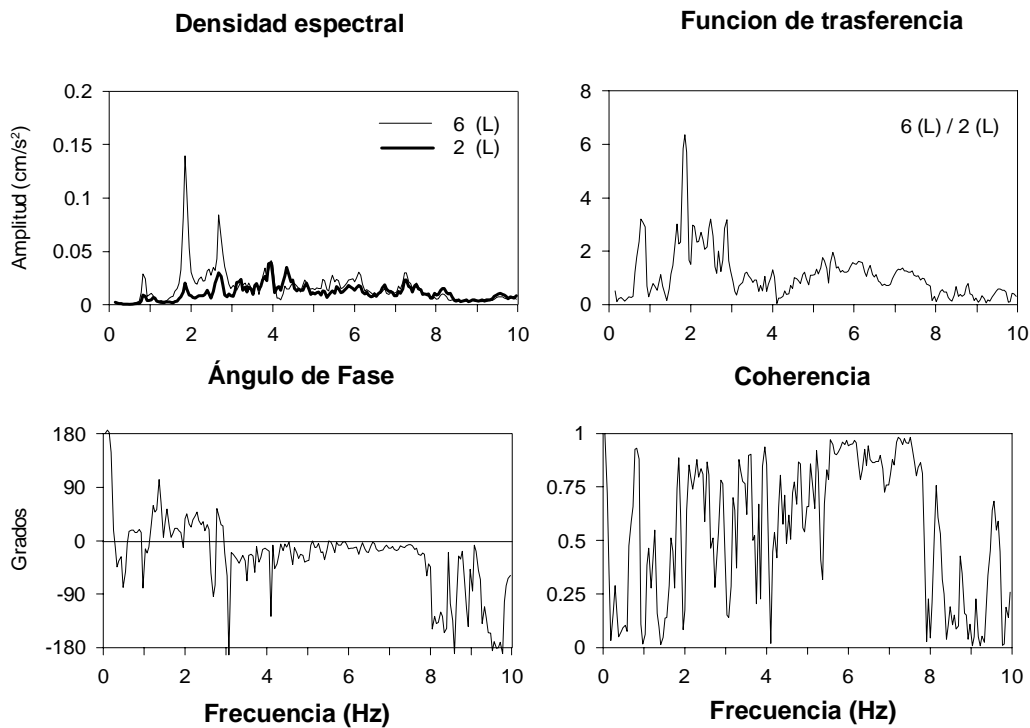


Fig. 69 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 5/1 y 14/18 en dirección trasversal de las pilas (etapa 2)

DIRECCIÓN L



DIRECCIÓN L

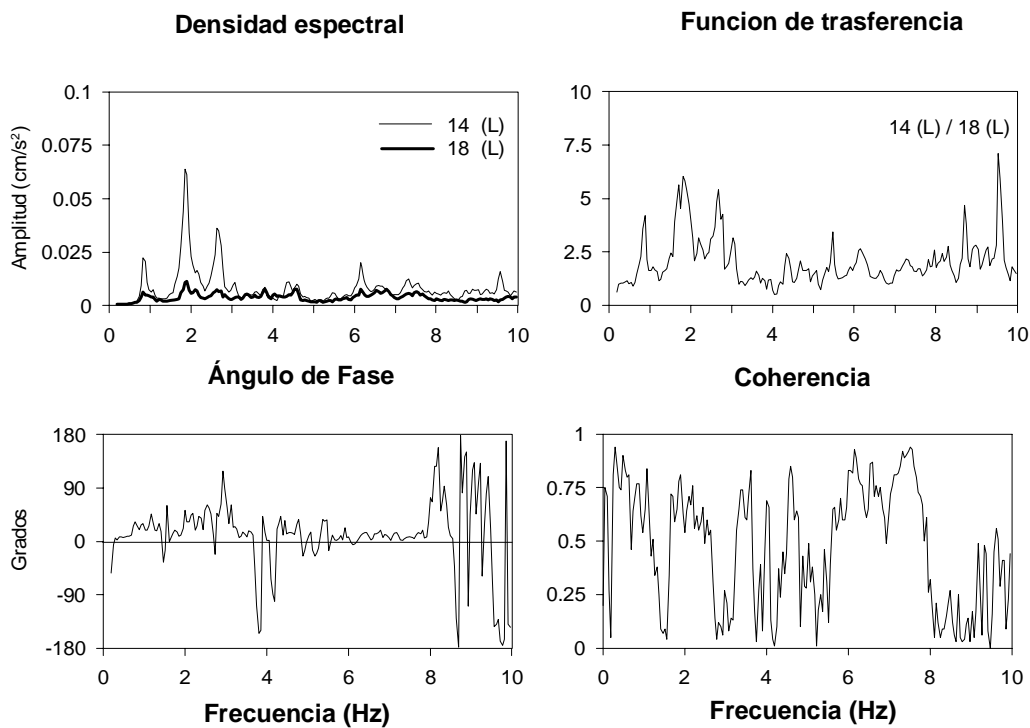
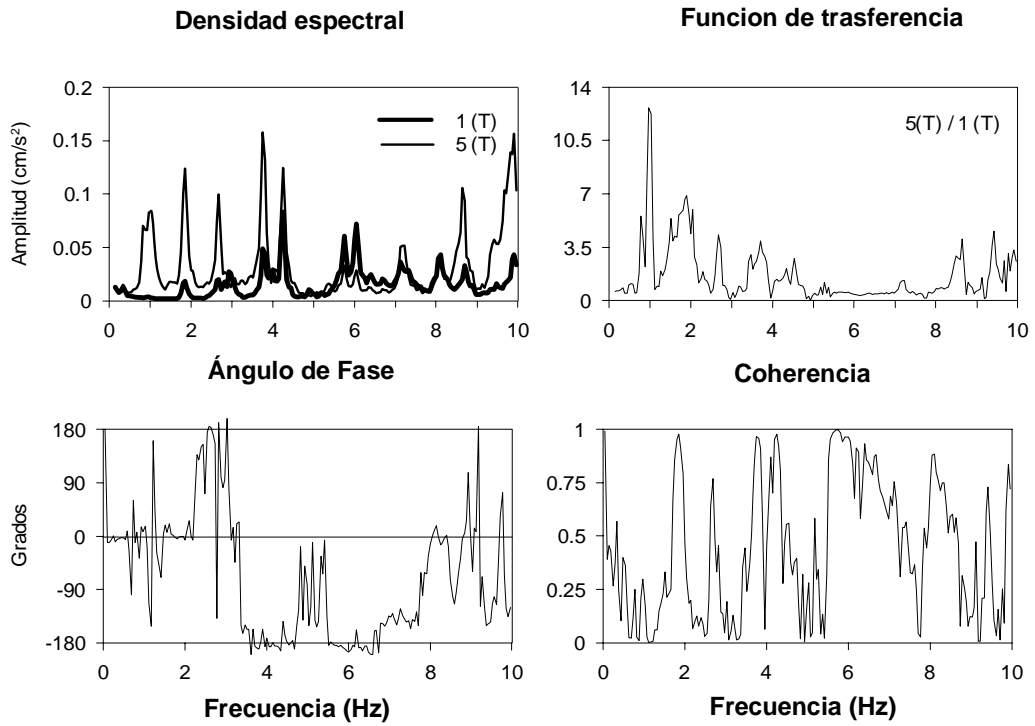


Fig. 70 Densidades espectrales, función de trasferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 6/2 y 14/18 en dirección longitudinal de las pilas (etapa 2)

Dirección T



Dirección T

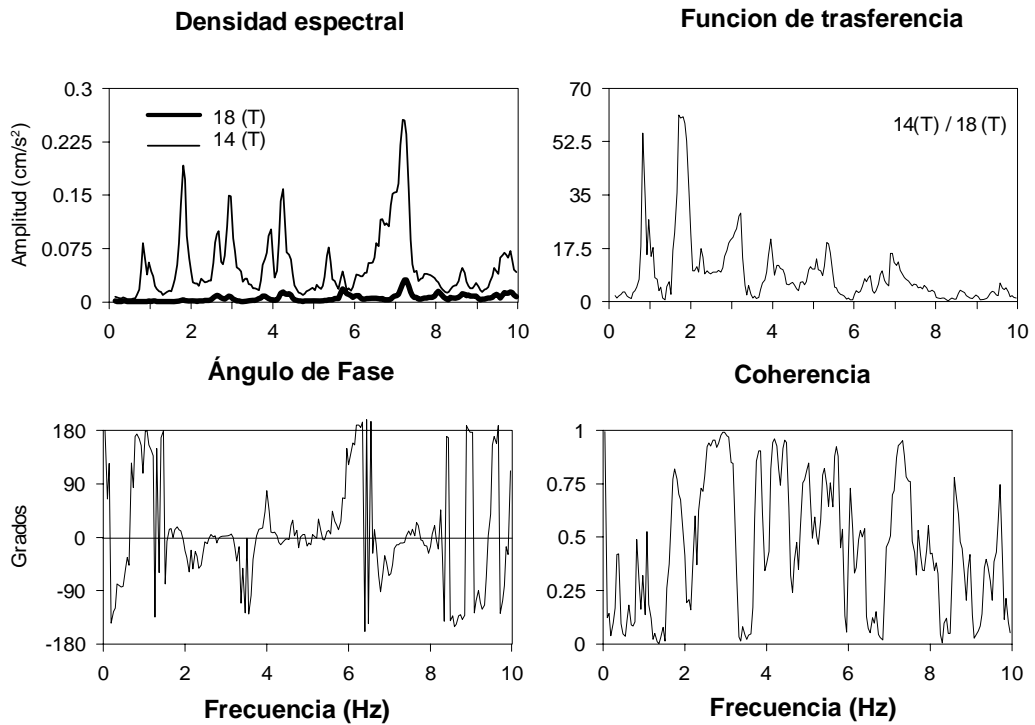
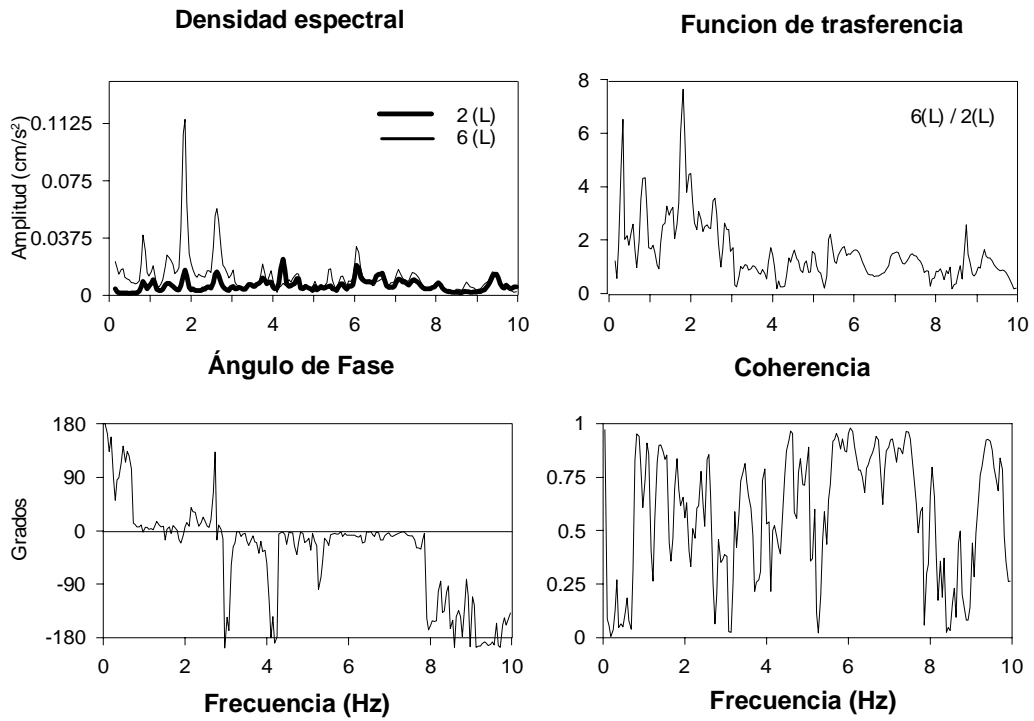


Fig. 71 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 5/1 y 14/18 en dirección trasversal de las pilas (etapa 3)

Dirección L



Dirección L

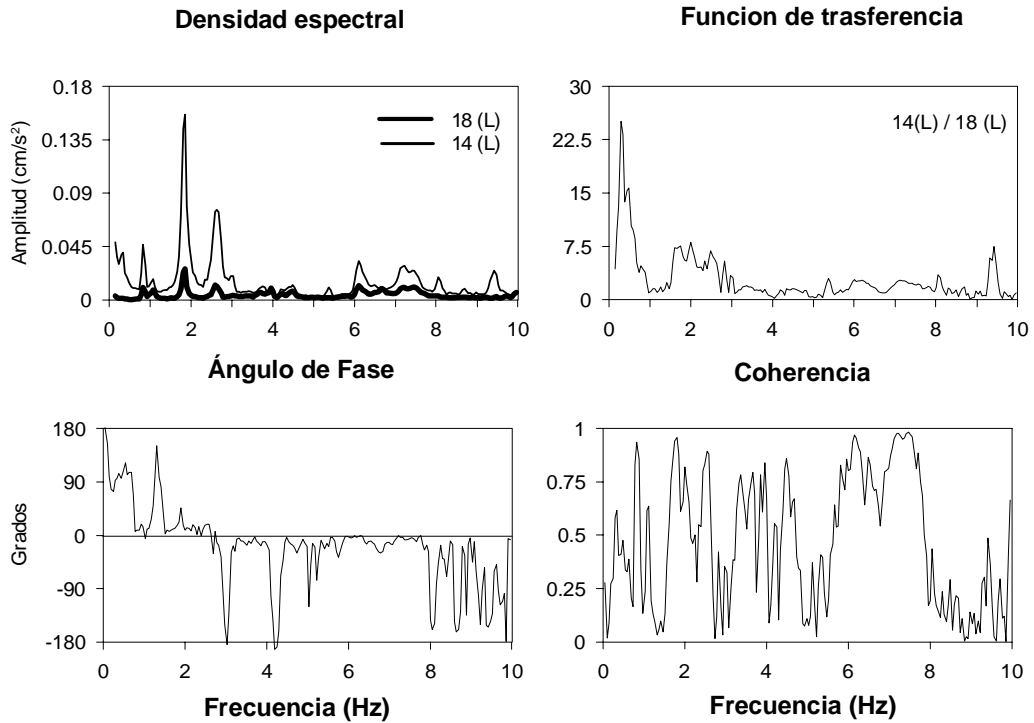


Fig. 72 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo fase y coherencia de los cocientes 6/2 y 14/18 en dirección longitudinal de las pilas (etapa 3)

5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS TRES ETAPAS DE PRUEBAS

5.1 Comparación de frecuencias en las tres etapas de pruebas

Debido a la similitud de las pruebas realizadas en las tres etapas y una vez obtenidas las frecuencias más representativas de cada una, es posible realizar la comparación entre los resultados de éstas, con objeto de observar el comportamiento del puente San Cristóbal ante las condiciones ambientales del lugar y las cargas muertas y de servicio a las que esta sometido desde el inicio de sus operaciones hasta la fecha en que se le han realizado las últimas pruebas de vibración ambiental (Abril de 2007).

Las frecuencias de la etapa 1, 2 y 3 que se muestran en las tablas 1, 2 y 3 respectivamente, son comparadas entre etapa y etapa, basándose en las formas modales obtenidas. Con el propósito de conocer sus variaciones se calcula el cociente entre las frecuencias asociadas a un mismo modo para las tres etapas, tomando como referencia la primera para realizar los cocientes con la segunda y la tercera. Estas comparaciones se muestran en la tabla 5 donde se pueden observar las similitudes que existe entre algunas frecuencias de cada etapa en la dirección vertical, trasversal y en la torsión.

En la etapa 1 y 2 el valor de las frecuencias para los modos verticales 1VA, 2VA, 1VSR y 1VAR y los trasversales 1TS, 1TA, coinciden entre ambas etapas, por lo que la relación entre dichas frecuencias es de uno. En la comparación entre la primera y tercera etapa es menor la coincidencia entre frecuencias que en la primera y la segunda, por lo que en estas dos primeras hay más modos donde la relación de las frecuencias da la unidad.

En la etapa 1 y 3 solamente coincide el modo vertical 1VS, sin embargo, en los otros modos se presentan valores muy cercanos a la unidad, los cuales resultan ser de igual manera considerables.

MODOS		FRECUENCIAS (Hz)			RELACIONES DE FRECUENCIAS	
		ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 2/ETAPA 1	ETAPA 3/ETAPA 1
DIRECCIÓN V	1VS	0.732-0.977	0.781-1.270	0.732-1.172	1.06-1.29	1.00-1.19
	1VA	2.002	2.002-2.344	2.100-2.539	1.00-1.17	1.04-1.26
	2VS	3.955	3.857-4.150	3.857-4.150	0.98-1.04	0.98-1.04
	2VA	4.889-5.180	4.785-5.176	5.029	0.98-0.99	1.03-0.97
DIRECCIÓN T	1TS	0.732-0.879	0.781-0.879	0.830-1.123	1.06-1.00	1.13-1.27
	1TA	2.637-3.223	3.076-3.223	3.076-3.125	1.16-1.00	1.16-0.97
	2TS	-	5.130	5.420	-	-
	2TA	-	-	-	-	-
TORSIÓN	1VSR	3.809	3.760-3.809	3.711	0.99-1.00	0.97
	1VAR	5.811-7.129	5.811	5.029	1.00-0.82	0.87-0.71
	2VSR	7.568	7.617	7.320	1.006	0.97
	2VAR	9.912	9.717	-	0.98	-

Tabla 5. Frecuencias asociadas a modos de las tres etapas, así como la relación existente entre dichas frecuencias, tomando como referencia la etapa 1.

A pesar de que el número de pruebas y arreglos de los puntos en cada una de las etapas fueron diferentes, existe relación entre pares de puntos que coinciden en posición en las tres etapas lo que nos da la posibilidad de hacer una comparación grafica por medio de sus respectivas densidades espectrales, funciones de trasferencia, ángulos de fase y coherencias como se muestra en el ejemplo de la figura 73.

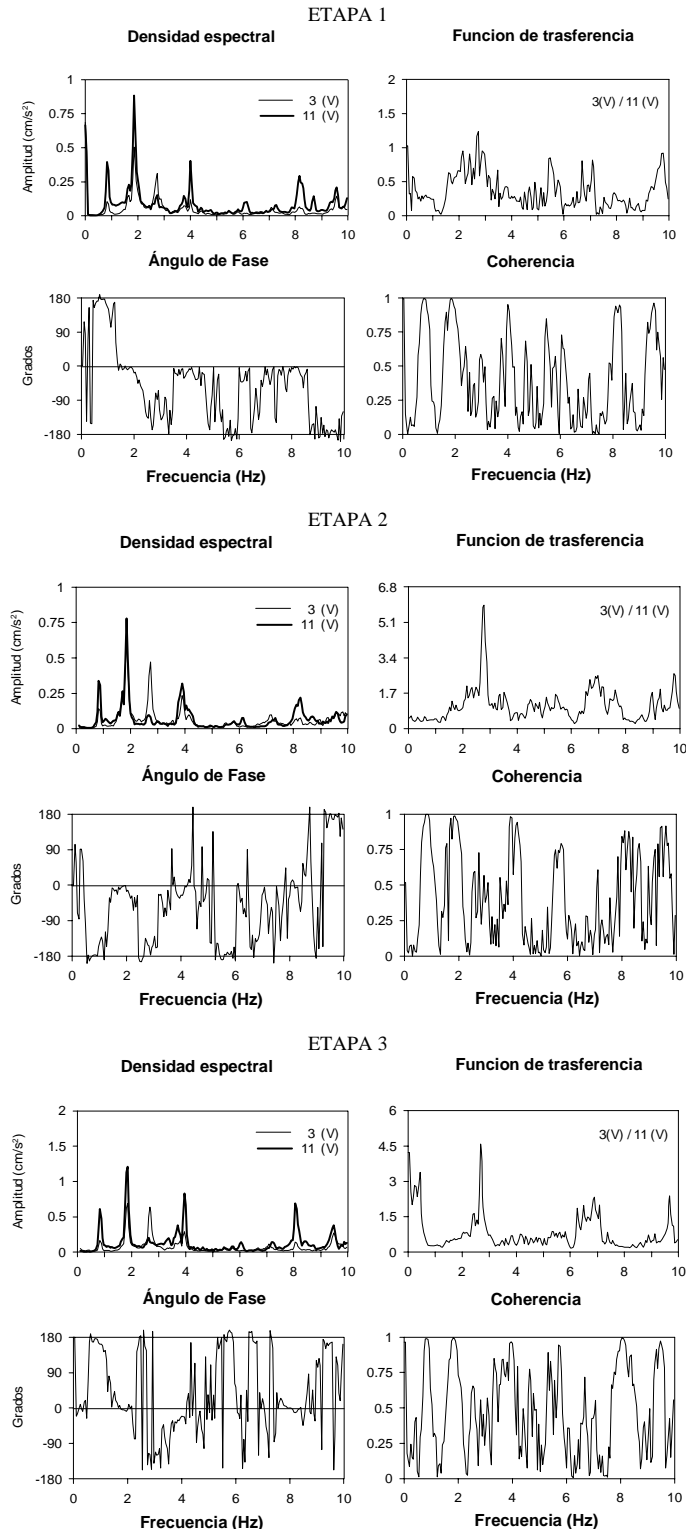


Fig. 73 Densidad espectral, función de trasferencia, ángulo de fase y coherencia para el cociente 3/11 en dirección vertical de la etapa 1, etapa 2 y etapa 3.

Las diferencias entre las frecuencias identificadas para cada una de las etapas, pueden visualizarse fácilmente por medio de las densidades espectrales y función de transferencia de los pares de puntos en común para las tres etapas. Estas diferencias entre las frecuencias identificadas son indicadores importantes del monitoreo realizado al puente, que nos ayudan a valorar cualitativa y cuantitativamente cuáles son los factores que influyen en su desempeño estructural del mismo.

A manera de ejemplificar la diferencia entre las frecuencias identificadas en cada etapa, en dirección vertical y transversal, tomando como referencia la primera, en la tabla 6 se muestra en valor absoluto.

Dirección	FRECUENCIAS (Hz)			Diferencia en valor absoluto	
	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	Etapa 1-Etapa 2	Etapa 1-Etapa 3
Vertical	0.732	0.781	0.732	0.049	0.00
	2.002	2.002	2.100	0.00	0.098
	3.955	3.857	3.857	0.098	0.098
	4.889	4.785	4.833	0.104	0.056
Trasversal	0.732	0.781	0.830	0.049	0.098
	2.637	3.076	3.076	0.44	0.44

Tabla 6. Frecuencias significativas de las tres etapas, así como la diferencia entre dichas frecuencias tomando como referencia la etapa 1.

De acuerdo a lo que se debería esperar por la variación de la respuesta del puente, que representa un valor de frecuencia relativamente bajo con respecto a otro, supondríamos que las frecuencias de la etapa 1 deberían ser mayores que las frecuencias de las dos etapas subsecuentes, indicando que el puente pierde rigidez pero el hecho de que los valores de frecuencia en alguna de las etapas sea diferente (mayor o menor) que en otra, es debido a las condiciones que se presentan al realizar las pruebas en cada etapa son distintas, y estas variaciones no reflejan el estado estructural del puente de manera precisa.

Cabe mencionar que las condiciones en las que se tomaron las pruebas fueron muy parecidas en las 3 etapas, sin embargo, en cada una se presentó una particularidad tal como una mayor circulación de vehículos sobre el puente, la temperatura ambiente fue característica de cada etapa ya que las pruebas correspondieron a diferentes estaciones del año, entre estos y otros factores como la lluvia, el viento y el aire determinaron, de cierta manera, los resultados en cada una de ellas. Estudios recientes demuestran que los factores antes mencionados influyen en los resultados experimentales obtenidos (*Clinton 2006*).

En general las frecuencias de cada etapa resultaron ser muy parecidas, esto nos indica que en el transcurso del tiempo que lleva en operación la estructura, no se ha presentado algún cambio significativo o considerable en la respuesta dinámica ante las sollicitaciones cotidianas, que para nuestro caso la pequeña variación entre las frecuencias de cada etapa, refleja el buen funcionamiento del puente.

5.2 Comparación de formas modales en las tres etapas de prueba

De igual manera que tratamos las frecuencias representativas de cada etapa, compararemos las formas modales y revisaremos qué forma se obtuvo en una frecuencia o rango de frecuencia determinado.

Con el propósito de visualizar más fácilmente las similitudes y diferencias entre las tres etapas a continuación en la figura 74 se muestran las formas modales identificadas en la componente vertical y de torsión en cada una de ellas. Para la elaboración de las gráficas del comportamiento de los puntos estudiados se utilizó el programa diseñado para el trazo de las formas modales de un puente (*Mendoza, 2004*).

Para el caso del puente San Cristóbal, se identificaron un total de 31 modos de vibrar del tablero central en las tres etapas de pruebas de vibración ambiental. De estos modos, 12 son verticales, 11 de torsión y 8 transversales. En la figura 74 antes mencionada, se muestran solamente las gráficas de las formas modales en la componente vertical y de torsión.

Considerando las limitantes que se presentan en cuanto a la cantidad de sensores que fueron colocados en el tablero central del puente, se pudo capturar hasta un segundo grado de la forma modal simétrica y asimétrica, en dirección vertical y en la torsión. Nos referimos al número de sensores como puntos, que para nuestras pruebas se colocó un número impar de ellos en el tablero central generando secciones de medición pares, es por esta razón que son más definidas y explícitas las formas modales hasta un segundo grado tal y como se muestra en el capítulo cuarto de esta tesis.

Fig. 74 Formas modales de la etapa 1, 2 y 3 en dirección vertical y torsión.

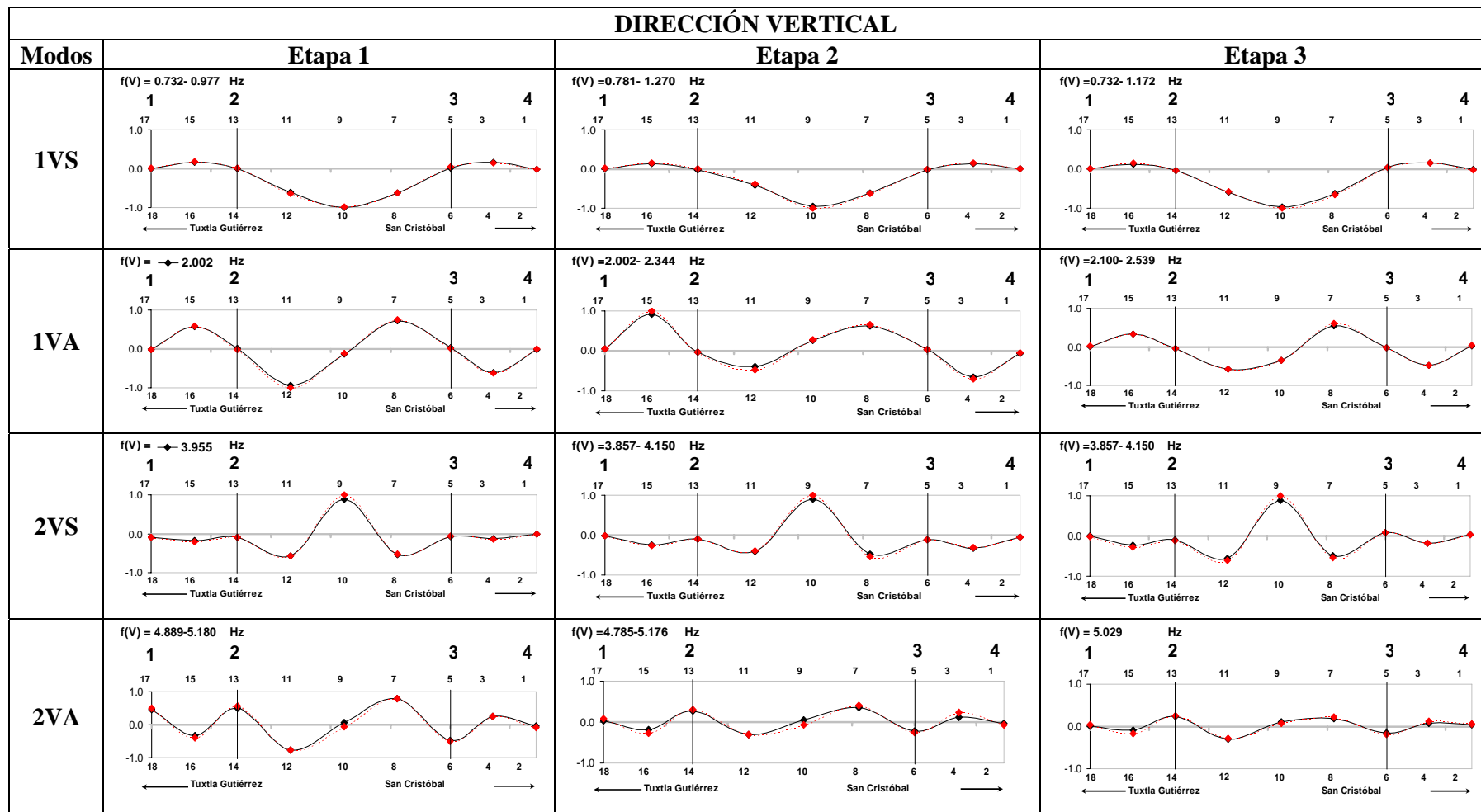
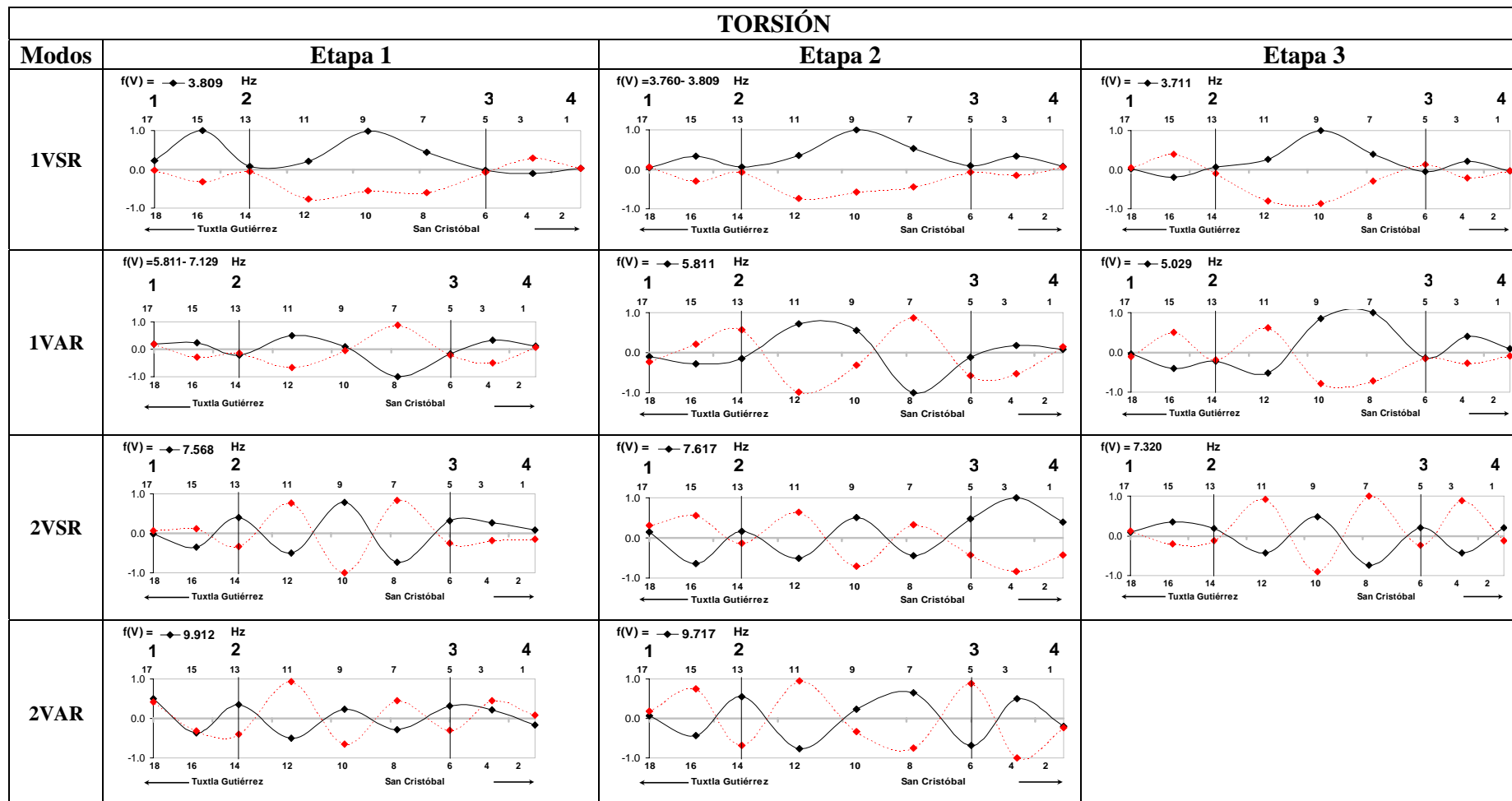


Fig. 74 Formas modales de la etapa 1, 2 y 3 en dirección vertical y torsión.



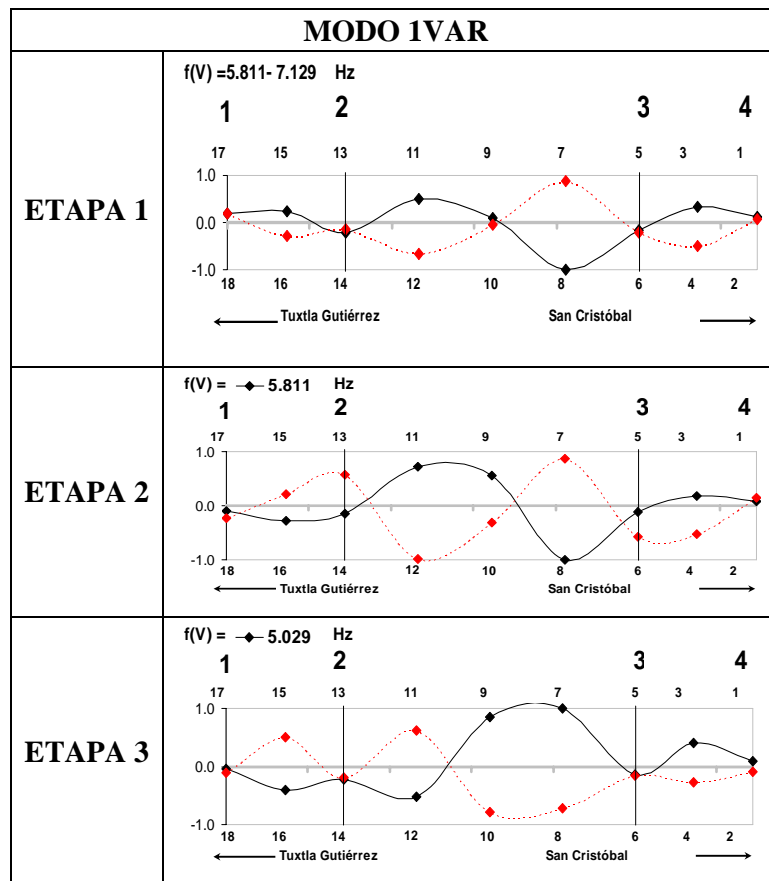
De acuerdo a las gráficas obtenidas podemos visualizar que las formas modales del puente son muy parecidas entre las tres etapas, como paso de igual manera con las frecuencias, existe correlación entre las frecuencias fundamentales y los modos de vibrar. El resultado de las formas de vibrar, era de esperarse, ya que en la comparación de las frecuencias se encontraron similitudes, por lo que las formas modales también coinciden entre etapa y etapa.

En general para las tres etapas, desde el primer modo de vibrar hasta el segundo simétrico y asimétrico son parecidos, lo que podemos resaltar, es que en algunos puntos correspondientes entre etapas, hay valores de la ordenada que varían en amplitud.

Estas diferencias en cuanto a los valores de ordenada se refieren, son más notorias en las formas modales de torsión que en las de la componente vertical, para ejemplificarlo podemos observar en la figura 75 como el modo 1VAR en cada etapa presenta valores de ordenada diferentes, y en algunos puntos signo contrario, esto debido al ángulo fase que se haya presentado en cada etapa en los puntos correspondientes.

Así se determinó que existe una gran similitud en los resultados que arrojaron cada una de las etapas y de esta manera corroborar, por medio de las pruebas de vibración ambiental, que el puente continua con el mismo desempeño estructural conservando sus propiedades dinámicas desde que iniciaron sus operaciones.

Fig. 75 Diferencia en magnitud y sentido de algunos puntos correspondientes entre las etapas 1, 2 y 3.



6. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en cada una de las tres etapas y en la comparación de ellas, podemos mencionar que se han cumplido los objetivos planteados en esta tesis.

La metodología de análisis utilizada arrojó resultados satisfactorios para el caso del puente San Cristóbal al permitir la obtención de sus propiedades dinámicas más representativas, considerando que esta metodología está diseñada para aplicarse a puentes y edificaciones de cualquier tipo, haciéndole simples modificaciones.

En la determinación de las propiedades dinámicas, formas modales de vibración y estimación de las frecuencias en las estructuras, las pruebas de vibración ambiental han resultado ser una alternativa eficiente. Una de las grandes ventajas que representan este tipo de pruebas experimentales es que pueden ser aplicadas en cualquier momento debido a que no interfieren con el uso de la estructura. Como cualquier otra metodología o procedimiento, las pruebas de vibración ambiental cuentan con sus limitantes, estas pruebas nos dan una idea del estado global de la estructura en cuanto a cinemática y dinámica estructural se refieren, pero no arrojan información con la que podemos evaluar problemas locales de la estructura como pueden ser agrietamientos en la losa, concentración de esfuerzos, pandeos de elementos estructurales, etc.

Como parte del programa de mantenimiento del puente San Cristóbal la evaluación de la estructura comparando los resultados de las diferentes etapas de pruebas que se le han realizado, tiene como fin evaluar periódicamente el comportamiento de la estructura.

Para el caso del puente San Cristóbal, las propiedades dinámicas identificadas a partir de las pruebas de vibración ambiental realizadas, fueron frecuencias y formas modales de vibración. Para las tres etapas, un total de 31 modos de vibrar fueron identificados en el tablero central. De estos modos, 12 son verticales, 11 de torsión y 8 trasversales, de los cuales podemos mencionar que para la primera etapa, 4 son verticales, 4 de torsión y 2 trasversales. Para la segunda etapa 4 modos son verticales, 4 de torsión y 3 trasversales. Por último la tercera etapa tiene 4 modos verticales, 3 de torsión y 3 trasversales.

Dentro de las frecuencias de vibración identificadas en cada etapa, en algunos casos existe acoplamiento entre los modos de vibración de la estructura, como se puede observar en la similitud que presentan las frecuencias identificadas en la componente vertical, de torsión, trasversal y longitudinal. Por otra parte como se esperaba existe un acoplamiento y similitud de las frecuencias que se identificaron entre etapa y etapa, esto representa, primero la eficiencia de la metodología experimental utilizada y segundo el funcionamiento y desempeño aceptable que se ha presentado el puente desde inicios de operación.

Cabe mencionar que para el caso de las pilas, la información no fue la suficiente para la determinación de sus formas modales, considerando que para obtener los modos de vibrar es necesario colocar puntos de medición a lo largo de la pila, por lo menos en la base, a la mitad de su altura y en el extremo superior de ella; a pesar de esto, las pruebas nos indicaron que hay una considerable interacción entre el tablero y dichas pilas. Podemos considerar esta interacción al interpretar las formas modales del tablero que contienen puntos ubicados a la altura de las pilas.

Nos damos cuenta que las condiciones que intervienen en las pruebas de vibración ambiental, tienen una influencia en los resultados, sin embargo, éstos tienen una gran congruencia y

similitud en las distintas etapas. Este estudio queda como una fuente de información para estudios posteriores del puente San Cristóbal tomando en consideración los factores mencionados para un adecuado desarrollo y análisis de las pruebas de vibración ambiental.

De acuerdo a la confiabilidad que nos deja la metodología experimental, se pueden confrontar las frecuencias y formas modales resultantes en el estudio, con las calculadas a partir de los criterios de diseño incluidos en las normas y textos especializados para este tipo de estructuras.

REFERENCIAS

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (2003), Guide Specifications for Horizontally Curve Highway Bridges, 3rd Edition, Washington, D:C:

Bendat J. S. y Piersol A. G. (1989). “Random data. análisis and measurement procedure”. Wiley Interscience, New York.

Clinton J., Bradford C., Heaton T. y Favela J. “The Observed Wander of the Natural Frequencies in a Structure”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 96, No. 1, pp. 237-257, February 2006, doi: 10.1785/0120050052

Columnasur, (2005)

<http://www.columnasur.org/36gustavo/2006/060605%20YA%20NI%20LA%20BURLA.htm>
CRÍTICA CONSTRUCTIVA, San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México 05 de junio de 2005, Miembro de Columnistas de la Frontera Sur

Columnasur, (2005)

<http://www.columnasur.org/36gustavo/2006/060605%20A%20TORO%20PASADO.htm>
CRÍTICA CONSTRUCTIVA, San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México 05 de junio de 2005, Miembro de Columnistas de la Frontera Sur

Gomez R., Murià D., Sanchez R., Escobar J. Alberto., Muños D. y Vera R., 4th International Conference on New Dimensions in Bridges, Flyovers, Overpasses and Elevated Structures (2005), “Launching and Matching two Postensioned Composite Superstructures”, 24 – 25 Octubre 2005, Fuzhou, China. UNAM, México.

Guzmán S., Guzmán I., Murià-Vila D., Fernández F., (1992), “Diseño e implementación de un sistema de captura y procesamiento de señales”, Instituto de Ingeniería, UNAM, proy 0707, México.

Ivanovic S.S., Trifunac M.D. (1995). “Ambient vibration surveys of full-scale structures using personal computers-examples for Kaprielian Hall”. Report No. CE 95 - 05, Los Angeles California.

Japan Road Association –JRA- (1988), “Specifications for highway bridges”, Japan.

Kobayashi, S. (1987). Elastodynamics, In: “Boundary Element Methods in Mechanics”, ed. Beskos, D.E., North-Holland, Amsterdam, Chap. 4, 192–255.

La Jornada, (2006)

<http://www.jornada.unam.mx/2006/04/12/038n1est.php>

Mendoza M. A. y D. Murià-Vila., (2005). “IFCIIC Programa de captura de datos para pruebas dinámicas”. Instituto de Ingeniería, UNAM, proy 4516, marzo, México.

Mendoza M. A. y D. Murià-Vila., (2005). “IFCIIP Programa de procesamiento de señales”. Instituto de Ingeniería, UNAM, proy 4516, marzo, México.

Mendoza R. (2004). “Propiedades dinámicas del puente Coatzacoalcos II”, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

S.C.T. Secretaría de Comunicación y Transportes (2005)
http://dgp.sct.gob.mx/fileadmin/user_upload/Estadistica/Infraestructura/Carretera/C1.pdf