

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



## FACULTAD DE INGENIERÍA



### “PROPIEDADES DINÁMICAS DEL PUENTE COATZACOALCOS II”

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO CIVIL**  
P R E S E N T A  
ROBERTO CARLOS MENDOZA CARVAJAL

**DIRECTOR DE TESIS: DR DAVID MURIA VILA**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

## AGRADECIMIENTOS

*A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme ser parte de ella.*

*A todos y cada uno de mis maestros por compartir su tiempo y conocimiento, además de darme grandes lecciones de vida.*

*Al Dr. David Murià Vila por darme la oportunidad de colaborar en proyectos del Instituto de ingeniería y por dirigir este trabajo.*

*Al M.I. Ricardo Taborda Ríos por facilitarme el macro inicial y por sus respuestas acertadas a mis dudas.*

*A mis sinodales por su colaboración al revisar este trabajo.*

*A la Facultad de Ingeniería por mi formación como profesionista.*

*Al Instituto de Ingeniería UNAM, que por medio de sus proyectos me apoyo económicamente.*

*Al M.I. Gerardo Gutiérrez Rodríguez por su absoluta disponibilidad y gran apoyo en este trabajo.*

*Al Dr. Roberto Gómez Martínez y su becario David Muñoz Vizuet por proporcionar información requerida con respecto al puente Coatzacoalcos II.*

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Roberto Carlos

Mendoza Carvajal

FECHA: 02/09/04

FIRMA: [Firma]

## **A MIS PADRES:**

*Por su infinito amor, comprensión y tolerancia.*

*Por respetar siempre mis ideales y  
encaminarme a una vida de lucha y sacrificio.*

*Por su desinteresado apoyo y desmedida confianza  
vitales para lograr alcanzar una de mis metas.*

*Por todo lo que me ha hecho verlos como ejemplo  
y por heredarme una profesión.*

*Lo que empezó con el único deseo de complacerlos  
hoy se ha convertido en una gran satisfacción.*

**Roberto Carlos Mendoza Carvajal**



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/054/03

Señor  
ROBERTO CARLOS MENDOZA CARVAJAL  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. DAVID MURIA VILA, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"PROPIEDADES DINÁMICAS DEL PUENTE COATZACOALCOS II"**

- INTRODUCCIÓN
- I. DESCRIPCIÓN DEL PUENTE
  - II. PRUEBAS DE CAMPO
  - III. ELABORACIÓN DE PROGRAMA DE IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS
  - IV. ANÁLISIS DE LOS REGISTROS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL
  - V. CONCLUSIONES
  - VI. REFERENCIAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria a 13 Mayo 2003.

EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
GFB/GMP/mstg.

# PROPIEDADES DINÁMICAS DEL PUENTE COATZACOALCOS II

## ÍNDICE

Introducción	1
Objetivos y alcances	2
I. Descripción del puente	
1.1 Antecedentes	3
1.2 Localización	4
1.3 Estructura	4
1.4 Cimentación	7
II. Pruebas de campo	
2.1 Pruebas de vibración ambiental	10
2.2 Metodología de análisis	10
2.3 Programa de pruebas	19
III. Elaboración de programa de identificación de propiedades dinámicas	
3.1 Estrategia de análisis	22
3.2 Programación	23
IV. Análisis de los registros de vibración ambiental	
4.1 Procesamiento de información	28
4.2 Identificación de frecuencias y formas modales de la superestructura	28
4.3 Identificación de las frecuencias y formas modales de las pilas	42
4.4 Comparaciones con respecto a otros estudios en puentes atirantados	49
4.5 Dos grandes puentes atirantados en México	56
V. Conclusiones	59
VI. Referencias	61

**Apéndices:**

- |   |          |
|---|----------|
| <b>A. Algoritmos para la identificación de las propiedades dinámicas</b>  | <b>A</b> |
| <b>B. Configuraciones modales en la dirección transversal (T) y longitudinal (L) de las pilas P4V y P5M, para todas las frecuencias identificadas en el tablero, en la dirección vertical (V) y transversal (T)</b>         | <b>B</b> |
| <b>C. Variación de frecuencias naturales de acuerdo a la longitud del claro central de diferentes grupos de puentes de acuerdo a sus características (tipo de viga, tipo de cables, configuración de cables y mástiles)</b> | <b>C</b> |
| <b>D. Densidades espectrales, funciones de transferencia, ángulos de fase y coherencias de puntos en común de los puentes Coatzacoalcos II y Tampico</b>  | <b>D</b> |



## Introducción

La transportación es una actividad indispensable para el funcionamiento de las sociedades, al comunicar a las personas con sus respectivos lugares de trabajo, residencia o recreación, a los productos con los mercados, y a las materias primas con los lugares de manufactura en el momento en que se necesitan. Esta actividad es determinante para la estructura socioeconómica y geográfica de los países y crítica para la economía.

Dentro de las vías de comunicación que hacen posible la transportación, las carreteras juegan un papel muy importante para llevarla a cabo. Se encuentran formadas por caminos de todos tipos, a veces su trayectoria se ve interrumpida por cuerpos de agua, abismos, depresiones, etc, cuando esto sucede la construcción de un puente es la solución, es por ello que los puentes son esenciales en todo sistema de transportación terrestre. En ciertas ocasiones las condiciones de pendiente, curvatura, y altura sobre los cauces, a lo cual se suman las condiciones topográficas y fluviales del lugar, hacen necesario el diseño y construcción de puentes de gran longitud, de los cuales resultan una buena alternativa los puentes colgantes, los puentes atirantados mediante cables, o los puentes de concreto presforzado en volados sucesivos.

Los puentes, así como otras estructuras, se ven expuestos a condiciones climáticas (viento, lluvia, nieve, humedad, cambios de temperatura), geológicas (sismo, desprendimientos de taludes, socavación por erosión), y propias de la zona (gases industriales y de vehículos, salitre, colisiones), entre otras, de acuerdo a su ubicación, provocando la presencia de factores como filtraciones, corrosión, agrietamientos, etc, los cuales participan en el deterioro de la estructura, disminuyendo su vida útil. Durante la vida útil de la estructura se puede presentar eventualmente el incremento en el tamaño y peso de los vehículos que transitan en las carreteras, cambiando así las solicitaciones iniciales para las cuales fue diseñada la estructura, todo lo anterior puede llegar a modificar su comportamiento estructural.

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.

En cuanto a las pruebas experimentales, hay de diversos 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 registro de movimientos sísmicos.

En este estudio, se pone especial interés en las pruebas de vibración ambiental que se llevaron a cabo en un puente atirantado al sureste de México,

en el estado de Veracruz conocido como Coatzacoalcos II y por medio de las cuales se determinan sus propiedades dinámicas.

### **Objetivos y alcances**

Los objetivos principales de este trabajo son:

- Establecer una metodología de análisis para la identificación de las propiedades dinámicas
- Determinar las propiedades dinámicas del puente Coatzacoalcos II.

El primer objetivo pretende la implementación de una metodología de análisis, que pueda ser aplicada al puente Coatzacoalcos II, así como de manera general para cualquier puente de este tipo.

El segundo objetivo consiste en determinar experimentalmente, mediante pruebas de vibración ambiental las frecuencias naturales y formas modales más significativas de la superestructura y de las pilas del puente Coatzacoalcos II, en diferentes direcciones, así como conocer la interacción existente entre ellas.

## **I. Descripción del puente**

### **1.1 Antecedentes**

La carretera litoral del golfo de México es una ruta de vital importancia que conecta el centro y el sureste de la República Mexicana. En el estado de Veracruz atraviesa las ciudades de Minatitlán y Coatzacoalcos así como el río Coatzacoalcos.

Debido a la actividad económica entre centro y sureste, así como entre las ciudades aledañas era necesario el cruce constante del río Coatzacoalcos, inicialmente esto era realizado mediante un chalán instalado en un lugar llamado Nanchital, dada la gran importancia económica de la zona y la creciente demanda de paso, el 18 de marzo de 1962 fue construido un puente en este mismo lugar, conocido como Coatzacoalcos I.

El puente Coatzacoalcos I cruza el río que lleva el mismo nombre, consta de dos carriles para la circulación de vehículos así como una vía de ferrocarril. La estructura tiene un kilómetro de largo y uno de sus tramos de 66 m es levadizo para permitir el paso marítimo.

Después de 10 años de operación del puente, un barco chocó contra una de sus pilas lo que provocó la suspensión del servicio durante 30 días y con ello la incomunicación con el sureste provocando daños a la economía nacional.

En esta zona existen grandes refinerías e importantes plantas petroquímicas las cuales incrementaron la producción de petróleo y sus derivados lo que hacía necesario que el puente fuese izado dos veces al día debido a la exportación vía marítima, con ello se provocaron grandes congestionamientos y pérdidas por más de 10 millones de pesos diarios. La demanda creció de 1700 vehículos por día en promedio el primer año a 17000 en 1980, es decir un vehículo cada cinco segundos.

Esta serie de situaciones puso en evidencia la necesidad de otro acceso fijo que permitiera cruzar simultáneamente el río Coatzacoalcos sin complicaciones a vehículos y embarcaciones. En aras del progreso y para satisfacer la creciente demanda de tráfico fue necesario buscar soluciones para resolver los problemas que implicaba el desarrollo. La solución fue un nuevo acceso hacia el sureste que librara las ciudades de Minatitlán y Coatzacoalcos, a este nuevo acceso pertenece el puente conocido como Coatzacoalcos II.

Debido a la gran importancia de este puente en la infraestructura del país, en el 2001 se llevó a cabo una evaluación experimental mediante pruebas dinámicas de vibración ambiental, pruebas bajo carga estática y dinámica con el objetivo de conocer sus propiedades dinámicas actuales, conocer su comportamiento y verificar que no existan factores que comprometan su seguridad estructural.

## 1.2 Localización

Para definir el proyecto del puente Coatzacoalcos II fueron necesarios múltiples estudios, mismos que fueron iniciados a partir de 1979 con los estudios de factibilidad, selección técnica y el anteproyecto.

Uno de los factores que participaron en la elección de la localización de la estructura fue el costo de los tramos carreteros de acceso, debido a la zona pantanosa existente y los altos costos de construcción en la misma, se buscó la menor longitud dentro de esta zona, esto ameritó la realización de estudios para la repartición de los tramos laterales, 16 km se extendieron a lo largo de cada margen.

La localización del puente se definió después de analizar las características de cuatro diferentes sitios para el nuevo cruce y sus accesos, desde las proximidades del puente existente hasta aguas arriba de la ciudad de Minatitlán, se eligió el de Pueblo Nuevo, por presentar las mejores condiciones geológicas para los apoyos, así como topográficas para la longitud de la estructura (fig 1.1)



Fig 1.1 Localización del puente Coatzacoalcos.

## 1.3 Estructura

Existieron múltiples factores a considerar para la elección del tipo de estructura, algunos de ellos fueron el mejor comportamiento estático y dinámico de las estructuras, la facilidad de ejecución, conforme a la evolución de la técnica y el aspecto arquitectónico.

Los estudios de ingeniería de tránsito determinaron que la estructura debería constar con cuatro carriles de circulación (dos en cada sentido) y que la carga

móvil fuera del tipo HS-20 de las Normas AASHTO (fig 1.2), la cual también satisfacía lo establecido en el Reglamento de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de ese entonces.

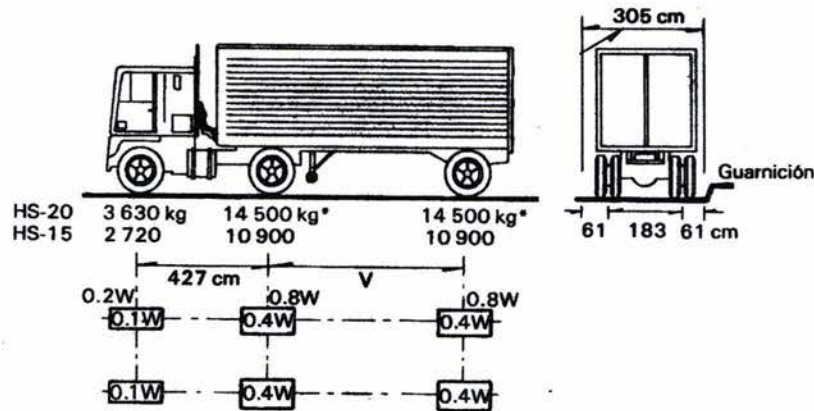


Fig 1.2 Carga móvil tipo HS-20 y HS-15.

La estructura debería permitir el paso simultáneo de la navegación y vehículos carreteros. Por la zona geográfica en la que se encuentra, se diseñó para soportar los efectos de la actividad sísmica y de ciclones con una velocidad de viento de hasta 200 km/h. Debido a la salinidad ambiental y emanaciones propias de las industrias petroquímicas que generan un ambiente altamente corrosivo, se eligió una estructura de concreto. No tiene apoyos en el cauce para evitar eventuales impactos de embarcaciones. Así mismo, de acuerdo con las características de las embarcaciones que navegan en esta zona del río, se decidió fijar un espacio libre vertical mínimo de 35 m, dejando así libre el acceso a la navegación (fig 1.3).

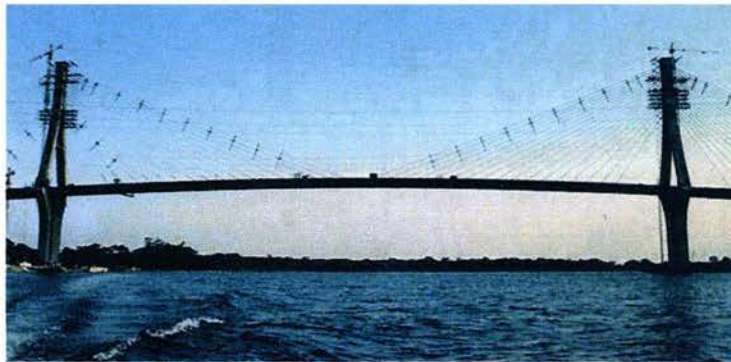


Fig 1.3 Vista del claro principal del puente Coatzacoalcos II.

De dos opciones de anteproyectos analizadas se seleccionó como la más ventajosa y económica la de un puente tipo atirantado con una longitud total de 1170 m, de los cuales 472 m corresponden al viaducto de acceso de la margen izquierda, que consta de siete tramos en doble voladizo y simétricos a partir de los apoyos, el mayor claro es de 288 m. El tablero es de sección cajón de concreto presforzado de 3 m de altura, con almas inclinadas y ancho total de 18.10 m, para alojar dos calzadas de circulación de 7 m de cada una, separadas por un camellón de 1.50 m y banquetas laterales de 1.30 m (fig 1.5). El tramo principal tiene una longitud de 698 m y está formado por siete tramos atirantados en forma axial del tipo medio abanico, sus claros son

aproximadamente de 30, 49, 112, 288, 112, 60 y 46 m, respectivamente (fig 1.4). El atirantamiento está compuesto por 17 tirantes constituidos con un mínimo de 37 tonones y un máximo de 61, anclados en el tablero y curvados dentro de los mástiles al atravesarlos. Los mástiles que sostienen los tirantes tienen forma de Y invertida, con una altura total de 97 m desde el nivel del río. Se encuentran apoyados en pilas típicas de concreto reforzado y sección rectangular. Las pilas 3 y 6 que corresponden al tramo principal tienen un preesfuerzo vertical y están construidas en continuidad con el tablero y el mástil (fig 1.6).

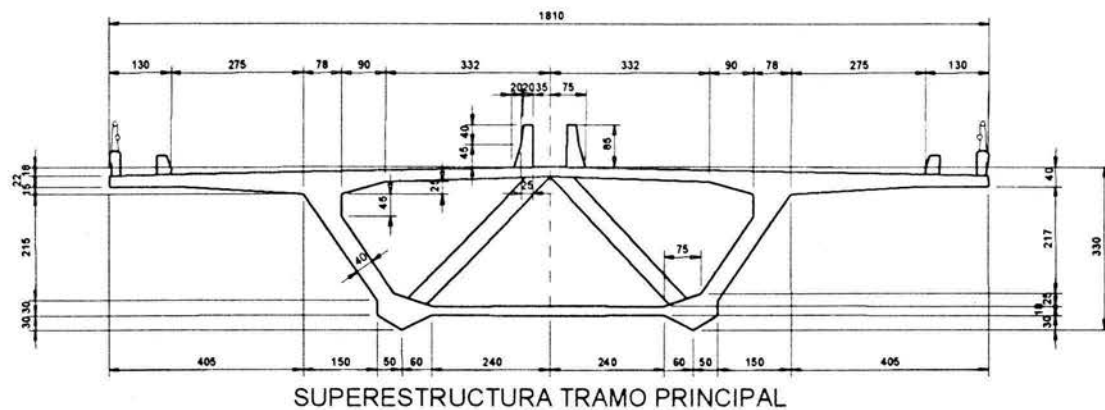


Fig 1.5 Geometría de la sección transversal del tablero.

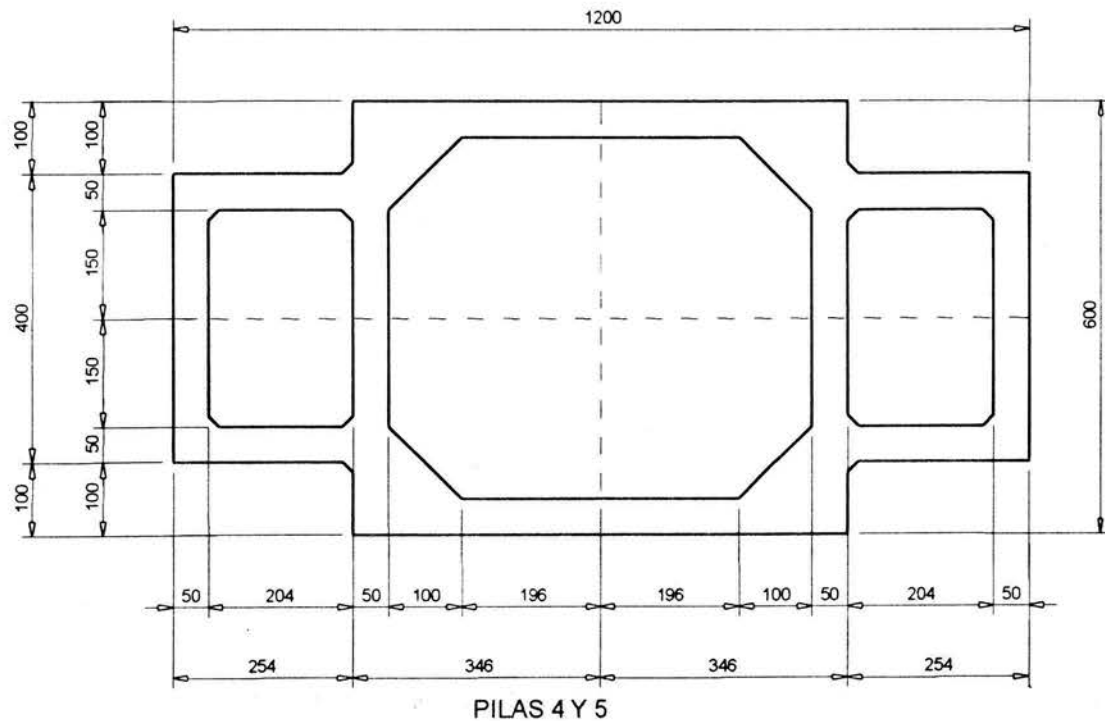


Fig 1.6 Geometría de mástiles y pilas.

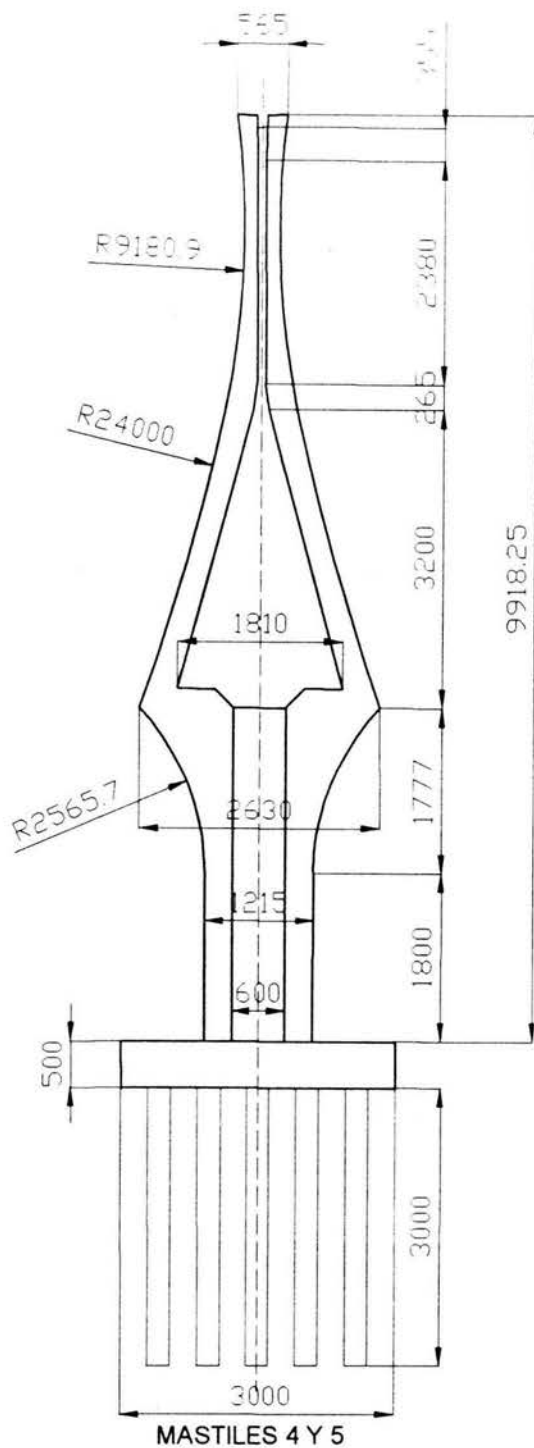


Fig 1.6 Geometría de mástiles y pilas

El puente Coatzacoalcos II hoy en día es uno de los puentes más grandes del país, para la elección de la estructura fueron necesarios algunos estudios especiales, como el estudio de los efectos de sismo según dos tipos de espectro, incluyendo combinaciones en las tres direcciones: vertical, longitudinal y transversal. Además como complemento el Instituto de Ingeniería de la UNAM realizó un modelo esquemático de la estructura en el cual se

determinó la influencia de la respuesta sísmica del puente ante las diferencias de fase en los movimientos de sus apoyos. El estudio para la estabilidad aeroelástica del tablero los cuales fueron evaluados en la ONERA, sobre un modelo reducido en el túnel aerodinámico. Ya terminada la estructura, por elementos finitos se estudió la distribución de esfuerzos en la zona en donde convergen el cuerpo de las pilas principales, el mástil y el tablero; además, en la zona de anclaje de los tirantes con el tablero y las tornapuntas (F. Vargas Gómez, 1982).

Con respecto a los tirantes también se realizaron estudios en todos sus componentes. Se hicieron pruebas para la elección del tipo de acero mediante pruebas estáticas y de fatiga y susceptibilidad a la corrosión bajo tensión. Elegido la clase de acero se realizaron otras pruebas en la se que se fabricaron 2 tirantes de prueba de 5 m de longitud y 37 torones, para dos tipos de anclaje, los cuales se probaron a la fatiga en tres etapas. Se analizaron los anclajes de tipo cruzado y el de desviación con continuidad del cable, dado que no se contaba con experiencia en este ámbito y para conocer los efectos de la fatiga en los torones al paso por el mástil se realizaron pruebas de fatiga, primeras de su especie en el mundo realizadas en el laboratorio ENPA (Suiza).

#### **1.4 Cimentación**

Para verificar el comportamiento general de la estructura, se realizaron análisis estáticos y dinámicos, principalmente para los efectos sísmicos, considerando la interacción suelo-estructura.

Para definir la capacidad de carga de los pilotes de cimentación, se consideraron los resultados de una prueba de carga en un pilote de 90 cm de diámetro, construido especialmente para ese propósito. La prueba consistió en aplicar tres ciclos de carga-descarga, obteniéndose una capacidad de carga del estrato arcilloso de 508 t/m<sup>2</sup>, considerando un factor de seguridad de 2 (sin incluir la fricción lateral). La carga admisible para el pilote de 2.50 m de diámetro (considerando únicamente la contribución de la punta, e incluyendo también un factor de seguridad de 2) resultó por extrapolación de 1250 t. Estos resultados contribuyeron a definir las características definitivas de la cimentación.

En el estribo 1, y en las pilas estructurales 2 y 3, la cimentación es superficial mediante zapatas de concreto reforzado; mientras que para los apoyos 4, 5, 6 y 7, que corresponden al tramo principal, la cimentación es de tipo profundo a base de pilotes colados en el lugar, de 2.50 m de diámetro y longitudes hasta de 30 m, y cilindros de 6 m de diámetro exterior para los apoyos del viaducto con profundidades de hincado del orden de 35 m. Para los apoyos 4 y 5 se requirieron 18 pilotes que se ligaron en su extremo superior mediante una zapata de 5 m de peralte. El apoyo 5 queda alojado en la ribera, en este apoyo los pilotes se acampanaron en su punta hasta 3.2 m de diámetro. La separación entre los pilotes se fijó en 5 m centro a centro y su distribución se hizo de manera que la zapata de liga resultara con dimensiones mínimas. En el resto de los apoyos se utilizaron cilindros de concreto reforzado.



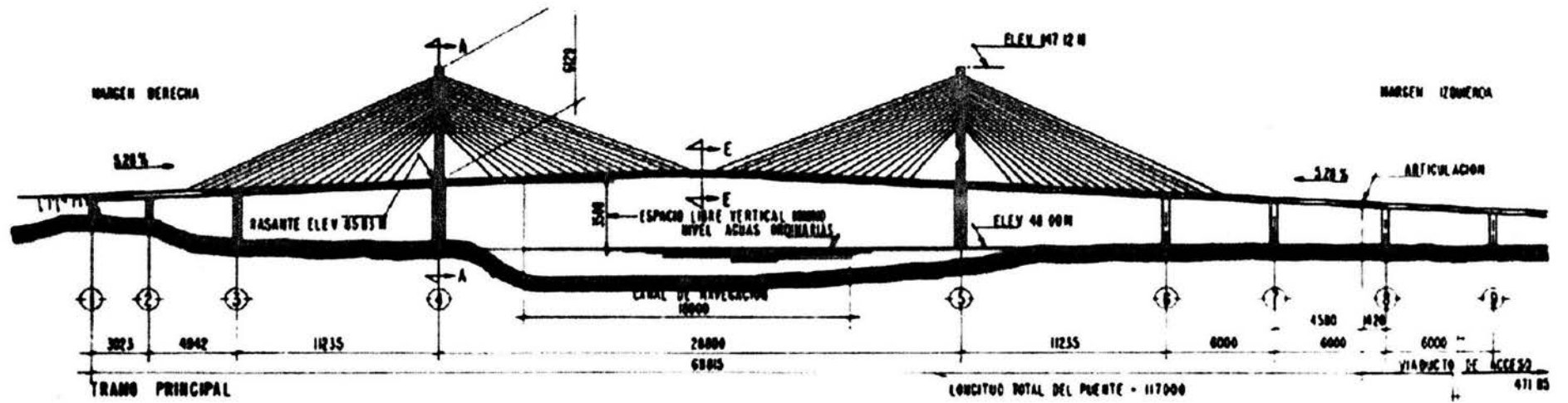


Fig 1.4 Geometría del puente Coatzacoalcos II.

## **II. Pruebas de campo**

### **2.1 Pruebas de vibración ambiental**

Las pruebas de vibración ambiental es un método experimental que consiste en medir las vibraciones en las estructuras producidas por excitaciones de carácter ambiental, como lo son las producidas por el tránsito de vehículos y el viento, por lo que es una prueba simple y rápida de realizar, además con la ventaja de no interferir en las actividades normales que se realizan en las estructuras. Las pruebas de vibración ambiental se emplean para determinar los parámetros dinámicos más relevantes de la estructura, como frecuencias naturales, formas modales y amortiguamientos.

### **2.2 Metodología de análisis**

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. También es necesario considerar las características y configuración de la estructura, de lo anterior dependerá en gran parte el número de puntos de medición necesarios, el lugar, la dirección en que estos deberán colocarse, etc.

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

El análisis se realiza por pares de señales, para la identificación de las frecuencias y modos de vibrar de la estructura se escogen, según el componente del sistema que se trató, 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.

Para identificar las frecuencias de vibración de 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 en el tablero, 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 de la estructura.

Por ejemplo, tratándose de un primer modo, las amplitudes de los movimientos de todos los puntos instrumentados sobre el tablero deben estar en fase

(ángulos de fase nulos) y para un segundo modo, las amplitudes de los movimientos de los puntos instrumentados de la mitad del claro central del puente hacia un extremo deben estar en fase opuesta (ángulos de fase de  $180^\circ$ ), con respecto a las amplitudes de los puntos instrumentados de la otra mitad del tablero. Algunas ordenadas espectrales de menor amplitud pueden deberse a frecuencias de modos superiores de vibrar, pero si las coherencias son muy bajas se descartan.

En cuanto a la torsión, el procedimiento es similar pero en el análisis se consideran ahora las funciones de transferencia del componente V y T entre los puntos instrumentados a cada lado de la calzada. Posteriormente, para identificar las frecuencias de torsión, se revisan las relaciones de amplitudes, ángulos de fase y coherencias entre los puntos instrumentados de un lado de la calzada con respecto a los opuestos del otro lado de la calzada, y se verifica que los ángulos de fase entre los puntos instrumentados en un mismo nivel sean aproximadamente de  $180^\circ$ .

En algunos casos, al no identificarse una frecuencia claramente, se presentan intervalos de valores, lo cual indica que la frecuencia de vibrar varió durante un mismo evento por un comportamiento no lineal del sistema, y/o una deficiente resolución en amplitud del movimiento asociado a dichas frecuencias (Murià-Vila, *et al*, 2002).

La selección de los puntos de referencia es fundamental en el análisis, ya que de estos dependerá la identificación de las formas modales. Los puntos elegidos como referencia dependen de los arreglos de los puntos de medición durante las pruebas, por lo que no son siempre los mismos. En puentes se eligen varios puntos de referencia, estos puntos sirven para dar continuidad a los datos experimentales obtenidos en diferentes tramos, entre una prueba y otra, además de que ciertos puntos de referencia que sirven para detectar algunas formas modales, pueden no ayudar a detectar otras.

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 (fig 2.1).

En lo que respecta a la colocación de los puntos, se busca que la distancia entre ellos sea equidistante entre sí, esto también dependerá de las características de la estructura. Debe cuidarse que donde se coloquen los puntos de medición, no resulten ser nodos para alguna forma modal, o si lo hacen, que el número de puntos sea suficiente para definirla, de lo contrario su identificación puede dificultarse. Al colocar un número impar de puntos de medición (dividir el claro en secciones pares), se pueden encontrar dificultades al tratar de identificar alguna forma modal asimétrica, o bien al colocar un número par de puntos de medición (dividir el claro en secciones impares), se pueden encontrar dificultades al tratar de identificar alguna forma modal

simétrica, el grado de la forma modal simétrica o asimétrica para la cual pueden encontrarse dificultades en su identificación, depende del número de puntos.

Las gráficas de la fig 2.1 ilustran la importancia de la selección de los puntos de referencia, el número de puntos de medición y su colocación. Se puede observar que al colocar en el claro principal un número par de puntos de medición, para las formas modales simétricas, algunos puntos resultan ser nodos y no hay otros puntos que definan las crestas de las formas modales, tal es el caso de dividir el claro en tres secciones con tan sólo 4 puntos de medición, en este caso el 2° simétrico se pierde al quedar todos los puntos en nodos. Algo similar ocurre para las formas modales asimétricas cuando el número de puntos de medición es impar.

La división que se muestra en la fig 2.1 para las formas modales simétricas y asimétricas es la que se efectuó en el puente Coatzacoalcos II. Para esta división se puede observar que en el 5° modo asimétrico no hay puntos que definan las crestas de su configuración modal. El punto elegido como referencia (identificado con un diamante) no puede ser usado para identificar el 3° modo simétrico, debido a que para este modo resultó ser un nodo.

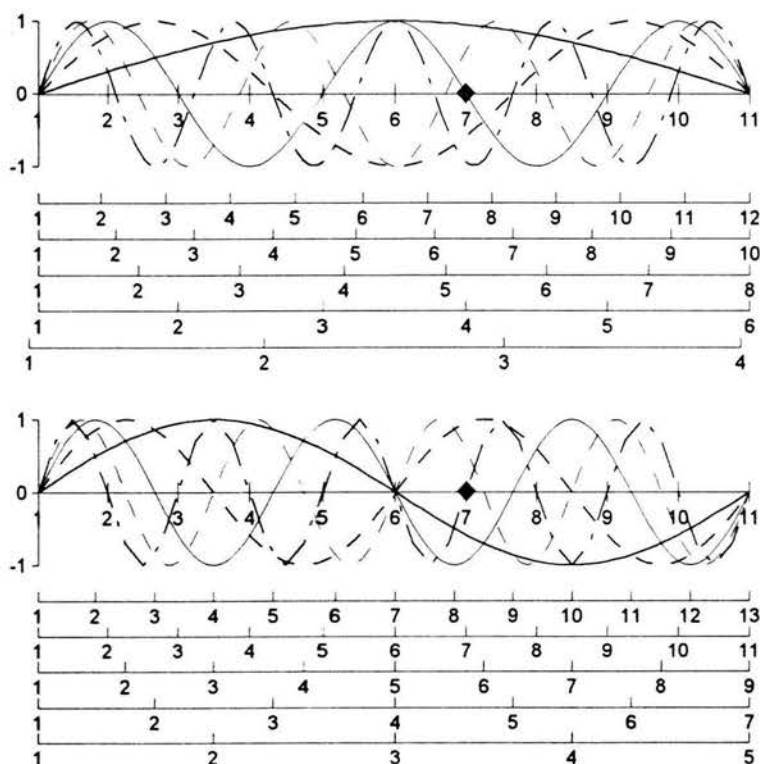


Fig 2.1 Selección de los puntos de referencia, número de puntos de medición y colocación en el claro central.

Debido a que no es posible registrar todos los puntos simultáneamente, es necesario realizar varias pruebas con diferentes arreglos de puntos de medición. En consecuencia, el programa de pruebas toma en cuenta la configuración de la estructura, la dirección en que los sensores deben ir

colocados y la facilidad y rapidez con que éstos son instalados. Entre prueba y prueba es necesario que cuando menos un punto de medición aparezcan en ambas, con el propósito de conocer la relación que hay entre los puntos de una prueba y la subsecuente.

Considerando la configuración del puente, la capacidad y confiabilidad de los instrumentos, el tiempo de medición y el número de modos que se pretenden identificar, se decidió dividir el claro principal del puente en 10 secciones con un intervalo aproximado de 29 m entre dos puntos de secciones adyacentes, mientras que el claro lateral se dividió en 3 secciones, con un primer intervalo de 56 m y 28 m los dos restantes. El claro lateral se instrumentó en ambos lados de la sección transversal, mientras que el claro principal se instrumentó de ambos lados de la sección transversal, solamente hasta la mitad del claro, el resto del claro principal sólo se instrumentó de un lado.

Para el caso particular de las pruebas realizadas en el puente Coatzacoalcos II, el equipo que se empleó fue un sistema de adquisición de datos que permite capturar simultáneamente las vibraciones en ocho puntos de la estructura. En cada punto de medición elegido se colocó un servo-acelerómetro de alta resolución para detectar y adquirir las señales de vibración ambiental. Estas señales son transmitidas, a través de cables blindados, a unos acondicionadores donde se amplifican; se filtran las frecuencias mayores de 30 Hz. Las señales acondicionadas se envían a una microcomputadora tipo PC en donde se almacena toda la información. Se cuenta con un analizador de espectros de dos canales, con el cual se monitorea la evolución de los espectros durante la prueba (fig 2.2).

Una vez almacenada la información experimental en la PC, es conveniente revisar todas y cada una de las señales capturadas, ya que de éstas dependerán los resultados. Mediante este procedimiento se pueden detectar con anticipación canales con problemas (ruido ambiental, saturación del canal o incluso el que éste no haya servido) y con ello saber, con que información se dispone realmente y cual es válida. Ésta revisión prevé errores o anomalías en los resultados, mismos que de existir, nos obligarían a retroceder o repetir varios pasos de la metodología.

En el caso en cuestión, la revisión se llevó a cabo por medio de un programa de análisis de estructuras, denominado "Puente", en el cual se puede visualizar las señales capturadas.

El procesamiento de la información consiste en un análisis de señales aleatorias estacionarias a través de la transformada rápida de Fourier, para obtener los espectros de potencia promedio, así como funciones en el dominio de la frecuencia tales como de transferencia, de ángulo de fase y de coherencia entre pares de señales. El procesamiento de la información se lleva a cabo mediante un análisis espectral convencional (Bendat y Piersol, 1989).

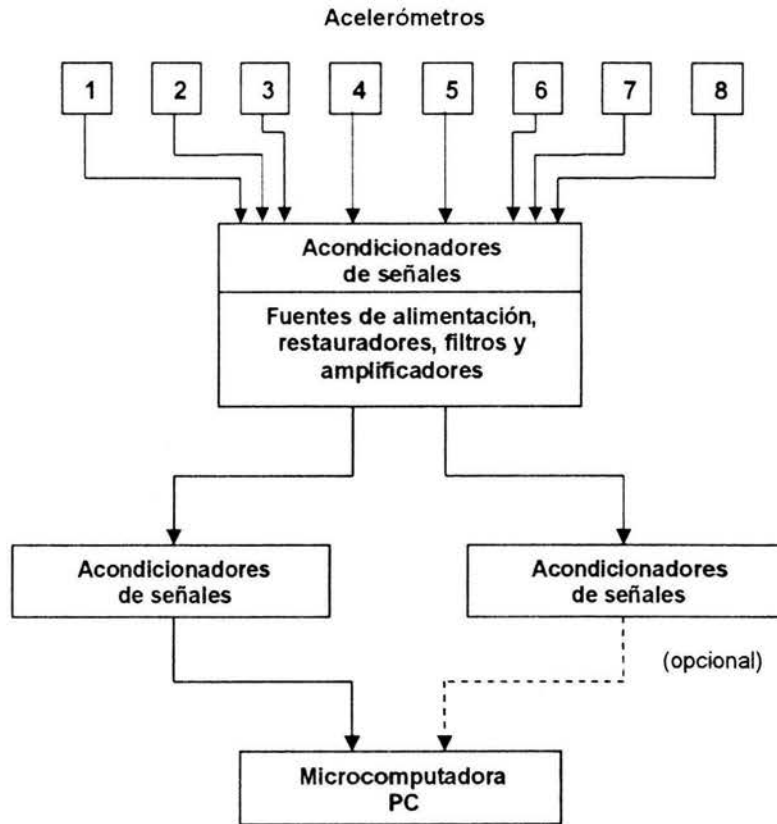


Fig 2.2 Dispositivo experimental para capturar las señales de los servo-acelerómetros.

El espectro de Fourier de una señal se define mediante la ecuación

$$\ddot{X}(f) = \int_0^T \ddot{x}(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad \dots(2.1)$$

La ec (2.1) también se puede escribir como

$$\ddot{X}(f) = \int_0^T \ddot{x}(t) \cos 2\pi ft dt - i \int_0^T \ddot{x}(t) \sin 2\pi ft dt \quad \dots(2.2)$$

Se puede observar que la ec. (2.2) está compuesta por una parte real y una parte imaginaria,

$$\ddot{X}(f) = \ddot{R}(f) + i\ddot{I}(f) \quad \dots(2.3)$$

y las amplitudes del espectro de Fourier son

$$\ddot{X}(f) = \left\{ \left[ \ddot{R}(f) \right]^2 + \left[ \ddot{I}(f) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad \dots(2.4)$$

El auto-espectro de potencia de una señal se calcula de acuerdo con

$$S_{\ddot{x}}(f) = \ddot{X}^*(f) \ddot{X}(f) \quad \dots(2.5)$$

Donde  $X^*(f)$  es el espectro conjugado de Fourier

$$X(-f) = X^*(f) \quad \dots(2.6)$$

Como el espectro de amplitud es una función de simetría, implica que

$$S_{xx}^*(f) = S_{xx}(-f) \quad \dots(2.7)$$

Dada esta propiedad, es conveniente definir al espectro de potencia de la forma siguiente

$$G_{xx}(f) = \begin{cases} 2S_{xx}(f); & f > 0 \\ S_{xx}(f) & ; f = 0 \\ 0 & ; f < 0 \end{cases} \quad \dots(2.8)$$

El espectro cruzado de potencia esta dado por

$$S_{xy}(f) = X^*(f)Y(f) \quad \dots(2.9)$$

Donde  $X(f)$  y  $Y(f)$  son funciones de dos señales diferentes

$$G_{xy}(f) = \begin{cases} 2S_{xy}(f); & f > 0 \\ S_{xy}(f) & ; f = 0 \\ 0 & ; f < 0 \end{cases} \quad \dots(2.10)$$

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:

- Con el cociente de los auto-espectros o de los espectros de Fourier de dos señales

$$FT = \left( \frac{G_{xx}(f)}{G_{yy}(f)} \right)^{1/2} = \frac{\ddot{X}(f)}{\ddot{Y}(f)} \quad \dots(2.11)$$

- Con el cociente del espectro cruzado de las dos señales consideradas y el auto-espectro de una de ellas:

$$FT_{xy} = \frac{G_{xy}}{G_{xx}} \quad \dots(2.12)$$

$$FT_{yx} = \frac{G_{yx}}{G_{yy}} \quad \dots(2.13)$$

Estas funciones de transferencia son iguales sólo si las dos señales están relacionadas linealmente y no están contaminadas con señales ajenas al sistema.

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

$$|G_{xy}(f)|^2 \leq G_{xx}(f)G_{yy}(f) \quad \dots(2.14)$$

y la función de coherencia:

$$C^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)} \quad \dots(2.15)$$

donde:

$$0 \leq C^2(f) \leq 1 \quad \dots(2.16)$$

Los valores de la coherencia varían de cero a uno. Cuando el valor de la coherencia es igual a uno significa que hay una relación lineal completa entre las dos señales, si es igual a cero dicha relación es nula.

La función de coherencia de cada par de señales analizadas se evalúa dividiendo estas en segmentos.

Respecto al ángulo de fase, éste se obtiene con base en el cociente de la parte real y la parte imaginaria de la función del espectro cruzado de potencia

$$G_{xy}(f) = A_{xy}(f) + iB_{xy}(f) \quad \dots(2.17)$$

$$\theta_{xy}(f) = \tan^{-1} \frac{B_{xy}(f)}{A_{xy}(f)} \quad \dots(2.18)$$

Cabe 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, tal y como se puede apreciar en la fig 2.3, donde se muestra el espectro de potencia del punto 19, que es uno de los puntos de referencia utilizado durante el análisis, procesado para diferente número de eventos.

El análisis descrito anteriormente se hizo por medio de un programa de cómputo desarrollado por el Instituto de Fisiología Celular y el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Guzmán *et al*, 1992), denominado IFCIIA11. Dicho programa se encarga de procesar la información por pares de señales, para ello, se tienen que seguir una serie de pasos. La elección de un grupo de trabajo es lo primero, en el cual se encuentran los datos experimentales a procesar, este grupo posee una configuración propia para el procesamiento. Enseguida se deben elegir el o los puntos de referencia, todos los puntos localizados a lo largo de la estructura deberán tener como referencia un mismo punto, de esta manera su movimiento es relativo a ese punto y puede compararse. A continuación debe de especificarse el número de eventos que deberán ser utilizados en el procesamiento de la información y por último



asignar las respectivas constantes de calibración para cada canal de acuerdo a las características de los sensores y su ganancia correspondiente en cada una de las pruebas.

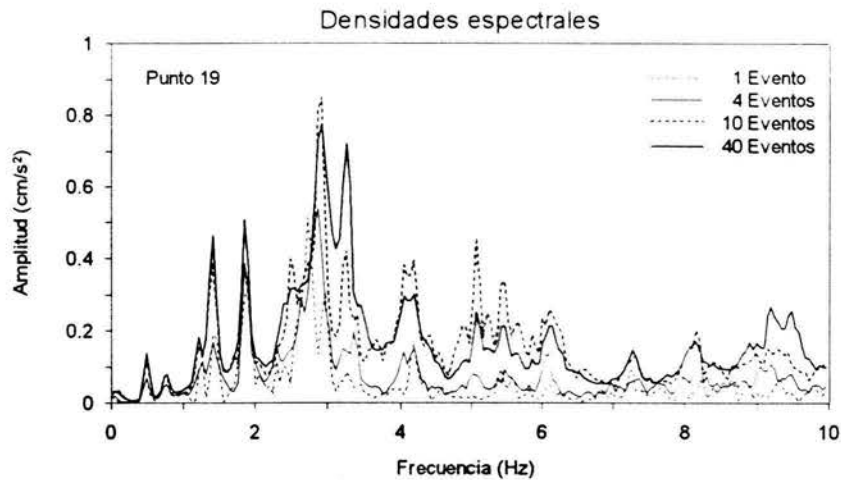


Fig 2.3 Espectros del punto 19 calculados con diferentes números de eventos.

Con los archivos que arroja como resultado el programa IFCIIA11, se pueden obtener gráficas como las que se muestran en la fig 2.4, las cuales corresponden a la relación existente entre los puntos 19 y 20.

En la fig 2.4 en la parte correspondiente a las densidades espectrales y función de transferencia, pueden visualizarse amplitudes máximas o crestas significativas que se distinguen del resto. Estas amplificaciones están asociadas a frecuencias que pueden ser parte del sistema, sólo hace falta ver su configuración.

En gráficas como las de la fig 2.4 se procede a una identificación en un intervalo de frecuencia de las amplificaciones del cociente espectral entre diferentes puntos instrumentados, como se muestra en la fig 2.5 para el cociente punto 19/punto 20. Esto se realiza para las relaciones de algunos puntos seleccionados con respecto a los de referencia previamente seleccionados de acuerdo a lo descrito anteriormente.

Las frecuencias asociadas a estas amplitudes máximas pueden resultar ser frecuencias naturales o formas modales para la estructura, para verificar esto, es necesario conocer la configuración modal para cada valor de frecuencia asociado a una amplitud máxima. Para obtener cada configuración es necesario graficar la amplitud de cada uno de los puntos de acuerdo a su posición en la estructura.

Las configuraciones obtenidas tendrán que ser revisadas para identificar las frecuencias naturales de vibrar, mediante la comparación por pares de puntos. Es importante utilizar las funciones de transferencia y coherencia para verificar que la dirección del movimiento de los puntos es la correcta, de lo contrario podrían cometerse errores si se analizan exclusivamente los espectros de

potencia, debido a la presencia de otras ordenadas espectrales que pueden ser significativas pero ajenas a las frecuencias naturales de la estructura.

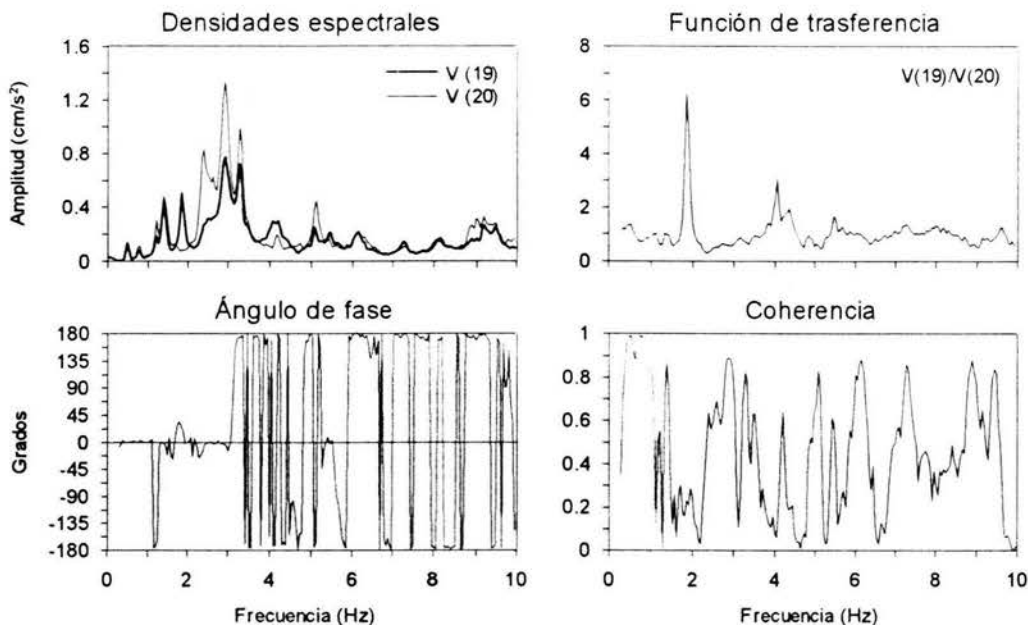


Fig 2.4 Gráficas que se obtienen a partir de los archivos generados por el programa IFCIIA11.

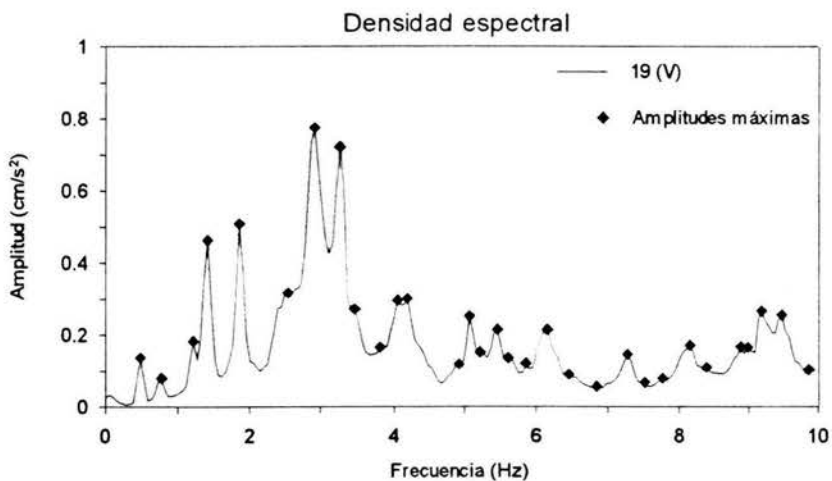


Fig 2.5 Identificación de crestas más significativas asociadas a sus respectivas frecuencias.

## 2.3 Programa de pruebas

El programa realizado constó de 12 pruebas. La configuración de la posición de los sensores en la estructura, así como la dirección en la que estos fueron colocados se muestra en la fig 2.6 y la tabla 2.1. En cada prueba se registran historias de tiempo simultáneas para 8 canales asignados a 8 puntos con determinada configuración en la estructura. El registro se llevó a cabo mediante el uso de sensores asociados a sus respectivos canales. Estos fueron colocados en tres diferentes direcciones: vertical (V), trasversal (T) y longitudinal (L).

Para este caso en particular se capturan registros con una duración de 819.2 s o 13.65 minutos.

Las pruebas se desarrollaron mediante 5 diferentes tipos de arreglos a lo largo del tramo principal de la estructura, así como en un tramo lateral al mismo, y las pilas P4V y P5M, sumando un total de 29 puntos de observación en la estructura. Por conveniencia los puntos 1 a 23 fueron ubicados en el tablero, mientras que los puntos 24 a 29 en ambas torres, (fig 2.6).

El primer arreglo consta de tres pruebas. Se instrumentó tanto una parte del tramo principal del tablero, así como la pila P5M, ambos correspondientes al tramo atirantado, (fig 2.6). En estas pruebas hay sensores colocados en las tres diferentes direcciones.

El segundo arreglo consta de tres pruebas. En éstas sólo se instrumentó el tramo principal del tablero, (fig 2.6). En las dos primeras pruebas todos los sensores fueron colocados en dirección trasversal, mientras que la última en dirección vertical.

El tercer arreglo consta de dos pruebas. De igual manera sólo se instrumentó el tramo principal del tablero, (fig 2.6). En la primer prueba todos los sensores fueron colocados en dirección vertical, mientras que en la segunda en dirección trasversal.

El cuarto arreglo consta de dos pruebas. Se instrumentó tanto el tablero como otras de las pilas principales correspondientes al tramo atirantado la pila P4V, (fig 2.6). En ambas pruebas hay sensores colocados en las tres diferentes direcciones.

El último arreglo consta de dos pruebas. Se instrumentó el tramo lateral del tablero comprendido entre las pilas P3V y P4V, (fig 2.6). En la primer prueba todos los sensores fueron colocados en dirección trasversal, mientras que en la segunda en dirección vertical.

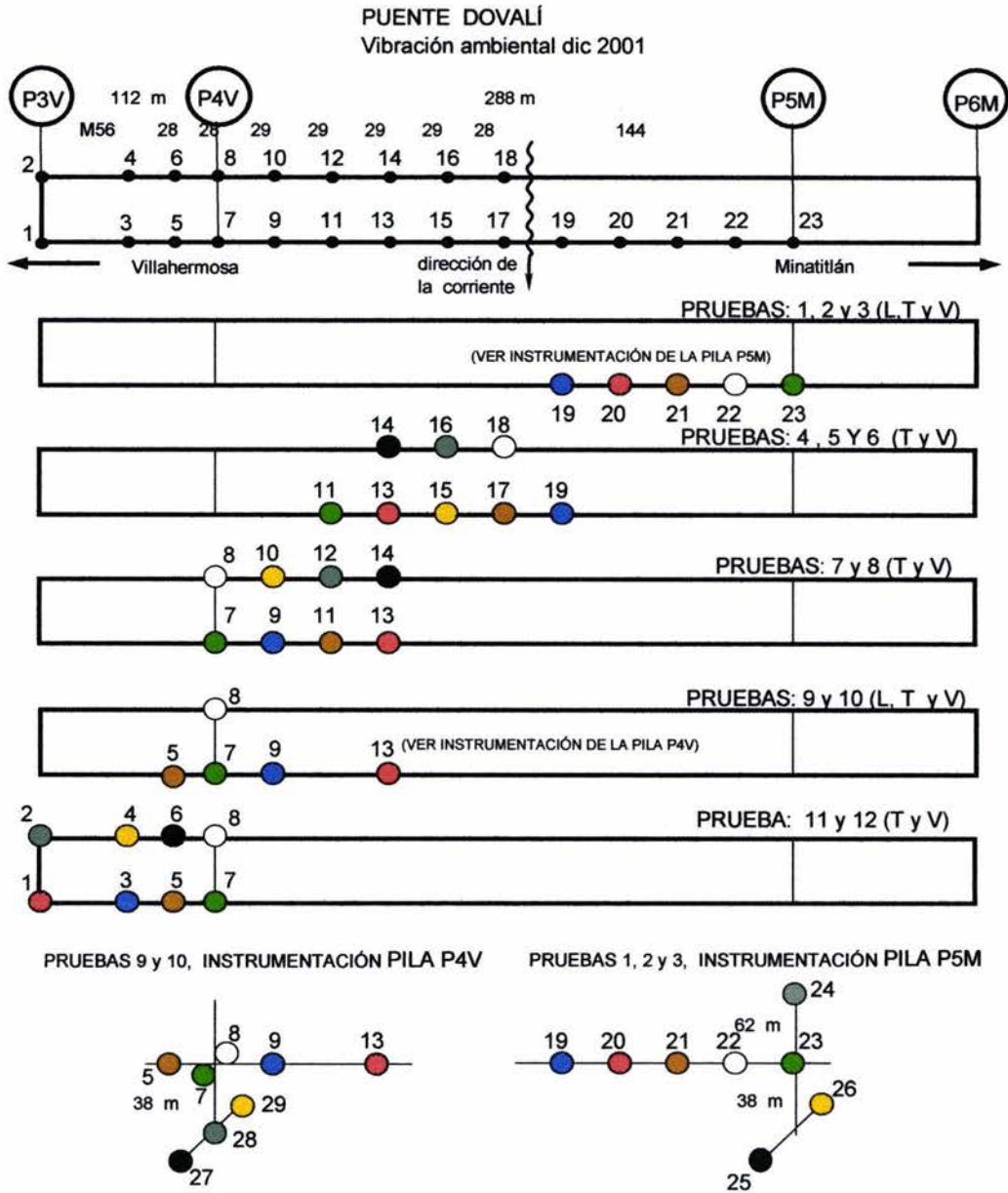


Fig 2.6 Programa de pruebas.

Tabla 2.1 Programa de pruebas.

PRUEBA	PUNTO	DIRECCIÓN	CANAL	F.A.	FILTROS		CONST. CALIBR.	SENSOR	OBSERVACIONES
					GAN.(dB)	fc(Hz)			
1	20	V	15	10	0	30	6.13670	24065	
	19	V	14		0		5.45300	24086	
	23	L	13		20		1.17460	24005	
	25	L	12		30		0.17030	24067	
	26	V	11		20		0.56390	24064	
	24	L	10		10		1.75910	24068	
	22	V	9		0		10.44990	24006	
	21	V	8		0		13.09440	316	
2	20	V	15	10	0	30	6.13670	24065	
	19	V	14		0		5.45300	24086	
	23	L	13		20		1.17460	24005	
	25	V	12		20		0.53810	24067	
	26	V	11		20		0.56390	24064	
	24	L	10		10		1.75910	24068	
	22	V	9		0		10.44990	24006	
	21	V	8		0		13.09440	316	
3	20	T	15	10	20	30	0.61370	24065	
	19	T	14		20		0.54530	24086	
	23	T	13		30		0.37170	24005	
	25	T	12		30		0.17030	24067	
	26	V	11		20		0.56390	24064	
	24	T	10		10		1.75910	24068	Saturado
	22	T	9		20		1.04500	24006	
	21	T	8		20		1.30940	316	
4	13	T	15	10	20	30	0.61370	24065	
	19	T	14		20		0.54530	24086	
	11	T	13		20		1.17460	24005	
	14	T	12		20		0.53810	24067	
	15	T	11		20		0.56390	24064	
	16	T	10		20		0.99710	302	
	18	T	9		20		1.04500	24006	
	17	T	8		20		1.30940	316	
5	13	T	15	10	10	30	1.94200	24065	
	19	T	14		10		1.72560	24086	
	11	T	13		20		1.17460	24005	
	14	T	12		20		0.53810	24067	
	15	T	11		10		1.78440	24064	
	16	T	10		20		0.99710	302	
	18	T	9		20		1.04500	24006	
	17	T	8		0		13.09440	316	
6	13	V	15	10	0	30	6.13670	24065	
	19	V	14		0		5.45300	24086	
	11	V	13		10		3.71700	24005	
	14	V	12		0		5.38050	24067	
	15	V	11		0		5.63880	24064	
	16	V	10		10		3.15530	302	
	18	V	9		10		3.30690	24006	
	17	V	8		10		4.14380	316	
7	13	V	15	10	0	30	6.13670	24065	
	9	V	14		0		5.45300	24086	
	7	V	13		30		0.37170	24005	No funciona
	14	V	12		0		5.38050	24067	
	10	V	11		0		5.63880	24064	
	12	V	10		10		3.15530	302	
	8	V	9		30		0.33070	24006	
	11	V	8		10		4.14380	316	
8	13	T	15	10	10	30	1.94200	24065	
	9	T	14		10		1.72560	24086	
	7	T	13		0		11.74570	24005	No funciona
	14	T	12		10		1.70270	24067	
	10	T	11		10		1.78440	24064	
	12	T	10		20		0.99710	302	
	8	T	9		20		1.04500	24006	
	11	T	8		20		1.30940	316	
9	13	T	15	10	10	30	1.94200	24065	
	9	T	14		10		1.72560	24086	
	7	T	13		0		11.74570	24005	No funciona
	27	V	12		30		0.17030	24067	
	29	V	11		30		0.17840	24064	
	28	T	10		30		0.17590	24068	
	8	T	9		20		1.04500	24006	
	5	T	8		20		1.30940	316	
10	13	V	15	10	0	30	6.13670	24065	
	9	V	14		0		5.45300	24086	
	7	-	13		-		-	24005	No funciona
	27	V	12		30		0.17030	24067	
	29	V	11		30		0.17840	24064	
	28	L	10		30		0.17590	24068	
	8	L	9		20		1.04500	24006	
	5	V	8		0		13.09440	316	
11	1	T	15	10	20	30	0.61370	24065	
	3	T	14		20		0.54530	24086	
	7	V	13		-		-	24005	No funciona
	6	V	12		-		-	24067	No funciona
	4	V	11		-		-	24064	No funciona
	2	V	10		-		-	24068	No funciona
	8	T	9		30		0.33070	24006	
	5	T	8		30		0.41440	316	
12	1	V	15	10	10	30	1.94200	24065	
	3	V	14		0		5.45300	24086	
	7	-	13		0		11.74570	24005	No funciona
	6	V	12		0		5.38050	24067	
	4	V	11		0		5.63880	24064	
	2	V	10		20		0.99710	302	
	8	V	9		30		0.33070	24006	
	5	V	8		10		4.14380	316	

### **III. Elaboración de programa de identificación de propiedades dinámicas**

#### **3.1 Estrategia de análisis**

Como se mencionó anteriormente en la metodología de análisis, hay puntos que aparecen en pruebas subsecuentes, dichos puntos sirven para relacionar los puntos de 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. Los puntos 8, 13 y 19 fueron elegidos como referencia debido a que aparecen en pruebas subsecuentes. El punto 8 une los puntos de las pruebas 11 y 12 con los de las pruebas 7 y 8, el punto 13, los puntos de las pruebas 7 y 8 con los de las pruebas 4, 5 y 6, por último el punto 19 une los puntos de las pruebas 4, 5 y 6 con los de las pruebas 1, 2 y 3.

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, pero es necesario establecer la continuidad con el resto de las pruebas, relacionándolas con respecto a un único punto. Esto se puede hacer mediante el producto de cocientes espectrales, es decir multiplicando por una relación de puntos que permita cambiar la referencia.

El punto 19 fue seleccionado como referencia global para la configuración del tablero, puesto que es el punto con respecto al cual se compara el resto, debe normalizarse, independientemente de con respecto a que punto de referencia haya sido procesado. Los puntos que ya se encuentran con respecto al punto 19 permanecen igual, los que tienen una referencia diferente, pueden hacer referencia al punto 19 mediante un producto de cocientes, tal es el caso de multiplicar el cociente existente  $\text{punto13}/\text{punto19}$  por los que tienen como referencia al punto 13. Al hacer este producto, el punto 19 queda como referencia. Siguiendo este mismo procedimiento se pueden cambiar de referencia el resto de los puntos. En algunos casos será necesario hacer varios productos de cocientes para lograr la referencia deseada.

Este procedimiento se puede observar en la tabla 3.1, donde los cocientes espectrales correspondientes a la prueba 08 tienen como referencia inicial al punto 8 y al ser multiplicados por el cociente  $\text{punto8}/\text{punto13}$ , cambian su referencia al punto 13, compartiéndola con los puntos de la prueba 07. Después, al cociente resultante se le multiplica por el cociente de referencia  $\text{punto13}/\text{punto19}$ , cambiando nuevamente su punto de referencia, pero ésta vez a la referencia global del sistema. Los cocientes de las pruebas 01 y 06 no fueron multiplicados por ningún cociente debido a que el punto 19, elegido como referencia global del sistema se encuentra en ambas pruebas y los puntos pueden ser relacionados directamente.

Tabla 3.1 Obtención de cocientes espectrales mediante el producto de otro cociente.

Prueba	Cociente inicial	Cociente a multiplicar	Cociente resultante	Cociente de referencia a multiplicar	Cociente resultante final
12	1/8	8/13	1/13	13/19	1/19
	2/8	8/13	2/13	13/19	2/19
	3/8	8/13	3/13	13/19	3/19
	4/8	8/13	4/13	13/19	4/19
	5/8	8/13	5/13	13/19	5/19
	6/8	8/13	6/13	13/19	6/19
	7/8	8/13	7/13	13/19	7/19
07	8/13			13/19	8/19
	9/13			13/19	9/19
	10/13			13/19	10/19
	11/13			13/19	11/19
	12/13			13/19	12/19
06	13/19				13/19
	14/19				14/19
	15/19				15/19
	16/19				16/19
	17/19				17/19
	18/19				18/19
01	19/20				19/19
	20/19				20/19
	21/19				21/19
	22/19				22/19
	23/19				23/19

Para el caso de las pilas, debido a que los puntos necesarios para su configuración se encuentran dentro de la misma prueba, no es necesario hacer producto de cocientes. Es solo cuestión de seleccionar con respecto a que punto se desea comparar. En este caso se compara con respecto a los puntos alojados en el tablero, para el caso de la pila P4V es el punto 8 y para la P5M es el punto 23.

### 3.2 Programación

Debido a la gran cantidad de registros para analizar, se decidió automatizar el procedimiento de análisis mediante un programa de cómputo denominado IFRCM, mismo que fue realizado en Microsoft Excel, aprovechando su lenguaje de macros y el control de los mismos a través de la programación en Visual Basic.

Cabe señalar que el procedimiento de análisis mediante el programa de cómputo realizado fue aplicado también a otro estudio realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Murià Vila *et al*, 2003). El programa IFRCM puede

ser aplicado en cualquier puente de similares características, por lo que su uso es general.

La macro consta de una serie de hojas de cálculo, cada una con una función en particular, la secuencia en la que la macro utiliza las hojas se muestra en la fig 3.1.

La primera hoja, denominada "Inicio" importa los archivos procedentes de las pruebas de vibración ambiental y vacía los datos en un formato que se encuentra alojado en la hoja denominada "Formato", el cual puede ser modificado. De igual manera se encarga de nombrar y asociar los puntos relacionados entre sí, recurriendo a otra hoja denominada "Bitácora" que es donde se encuentran los datos de la pruebas. Con la información capturada se trazan cuatro gráficas por pares de puntos teniendo como abscisa la frecuencia, estas gráficas son:

- Densidades espectrales de cada punto de medición
- Función de transferencia entre dos puntos de medición
- Ángulo de fase entre los dos puntos de medición
- Coherencia entre los dos puntos de medición

Mediante este proceso se generan las hojas de datos, de las cuales se tomará la información necesaria para graficar configuraciones modales. Se necesita generar tantas hojas de datos como puntos se encuentren involucrados en la configuración modal.

La tercer hoja, denominada "Picos" tiene como objetivo obtener las frecuencias asociadas a amplitudes máximas, dentro de un intervalo de frecuencias determinado, teniendo la opción de fijar también la amplitud mínima. Esta identificación se lleva a cabo para cuatro diferentes cocientes que se deben seleccionar a criterio. Los puntos máximos son detectados tanto para espectros como funciones de transferencia, estos a su vez son graficados para una fácil visualización. Esta hoja recurre a las hojas de datos previamente generadas, para llevar a acabo su tarea y almacena los datos.

La cuarta hoja, denominada "Modos" es la parte medular del programa, es en donde se eligen los puntos de referencia y se hace la organización de cada uno de los archivos que participan en la configuración de puntos de la estructura a revisar, o de la cual se pretende encontrar sus configuraciones modales y frecuencias naturales. Esta hoja puede modificarse para adecuar el programa a cualquier tipo de puente. La hoja consta de tres partes fundamentalmente, la primera de ellas importa de la hoja denominada "Picos" los puntos máximos (picos) asociados a una frecuencia en particular, eliminando las frecuencias repetidas y elaborando una lista tanto para espectros, como función de transferencia, en las cuales se pueden marcar o no, las frecuencias de las que se desea obtener la gráfica de su respectiva configuración modal.

Una vez elegidas las frecuencias, la segunda parte se encarga de graficar sus respectivas configuraciones modales, en una nueva hoja denominada



“Gráficas”, a la cual se le aplica un segundo formato alojado en la hoja “Formato1”. Esto lo hace recurriendo a cada una de las hojas de datos que se ven involucradas en la configuración modal, tantas veces como el número de frecuencias de las cuales se desea obtener su configuración. Las formas modales se presentan ordenadas ascendentemente en función del valor de la frecuencia.

En la hoja “Modos” también es posible visualizar de manera puntual cada una de las frecuencias de interés, obteniendo directamente su configuración.

La hoja “Gráficas” es donde se presentan las configuraciones modales que se han pedido que se tracen, junto con los datos por medio de los cuales fueron generadas. Los datos pueden ser modificados directamente y a su vez las configuraciones obtenidas. Esta hoja puede ser modificada, para obtener más comparaciones entre pares de puntos y corroborar o corregir la posición de unos puntos con respecto a otros en las configuraciones graficadas.

En la fig 3.2 se muestra el esquema de la metodología de análisis y la participación de la macro en la misma. Los primeros tres pasos corresponden al trabajo de campo, por medio de los cuales se obtiene la información con la cual se lleva a cabo el análisis. Los siguientes pasos corresponden al trabajo de escritorio, la mayoría de ellos se lleva a cabo mediante programas de cómputo que permiten agilizar el manejo de la información, como en el caso del programa IFRCM.

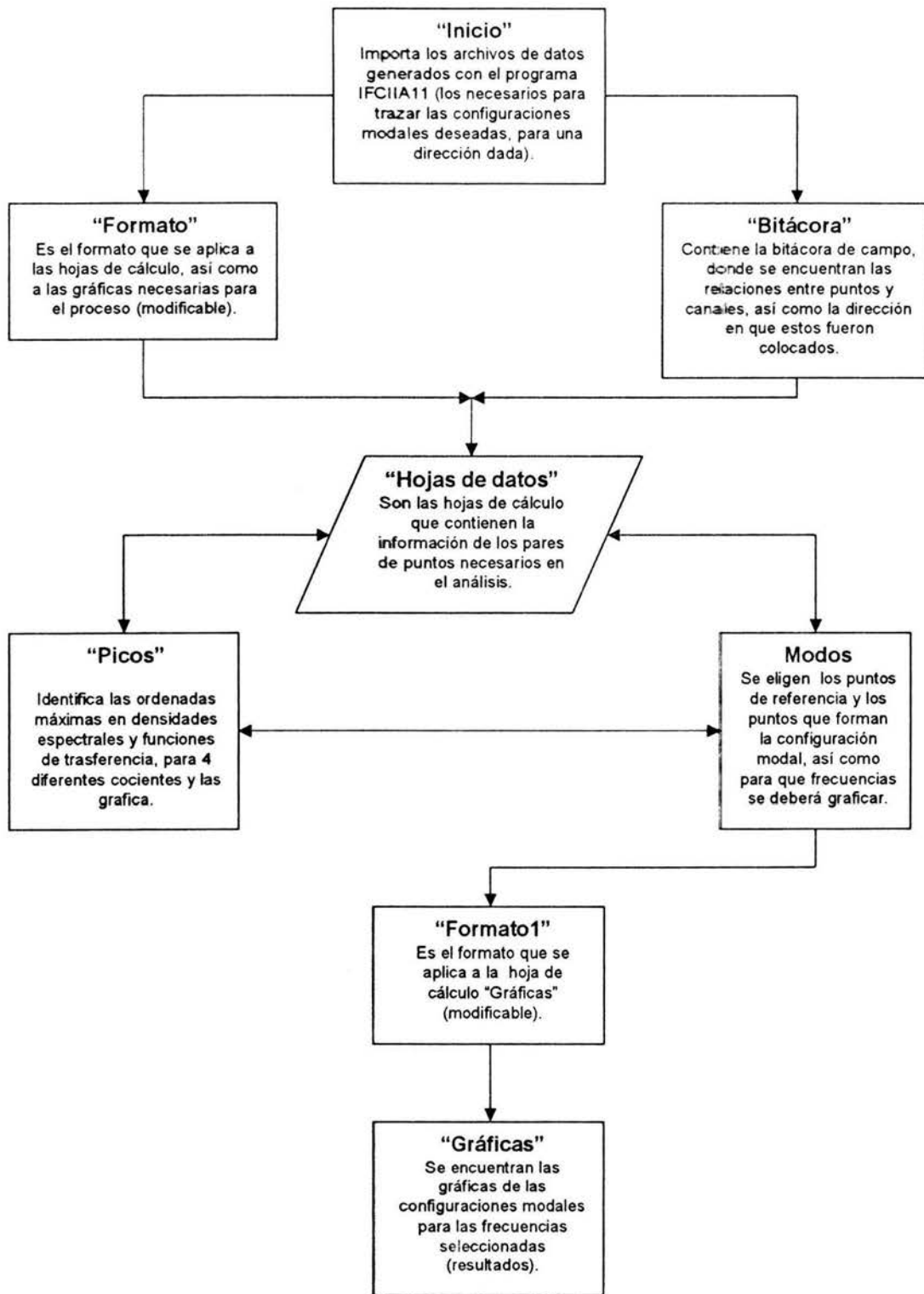


Fig 3.1 Esquema general de la macro.

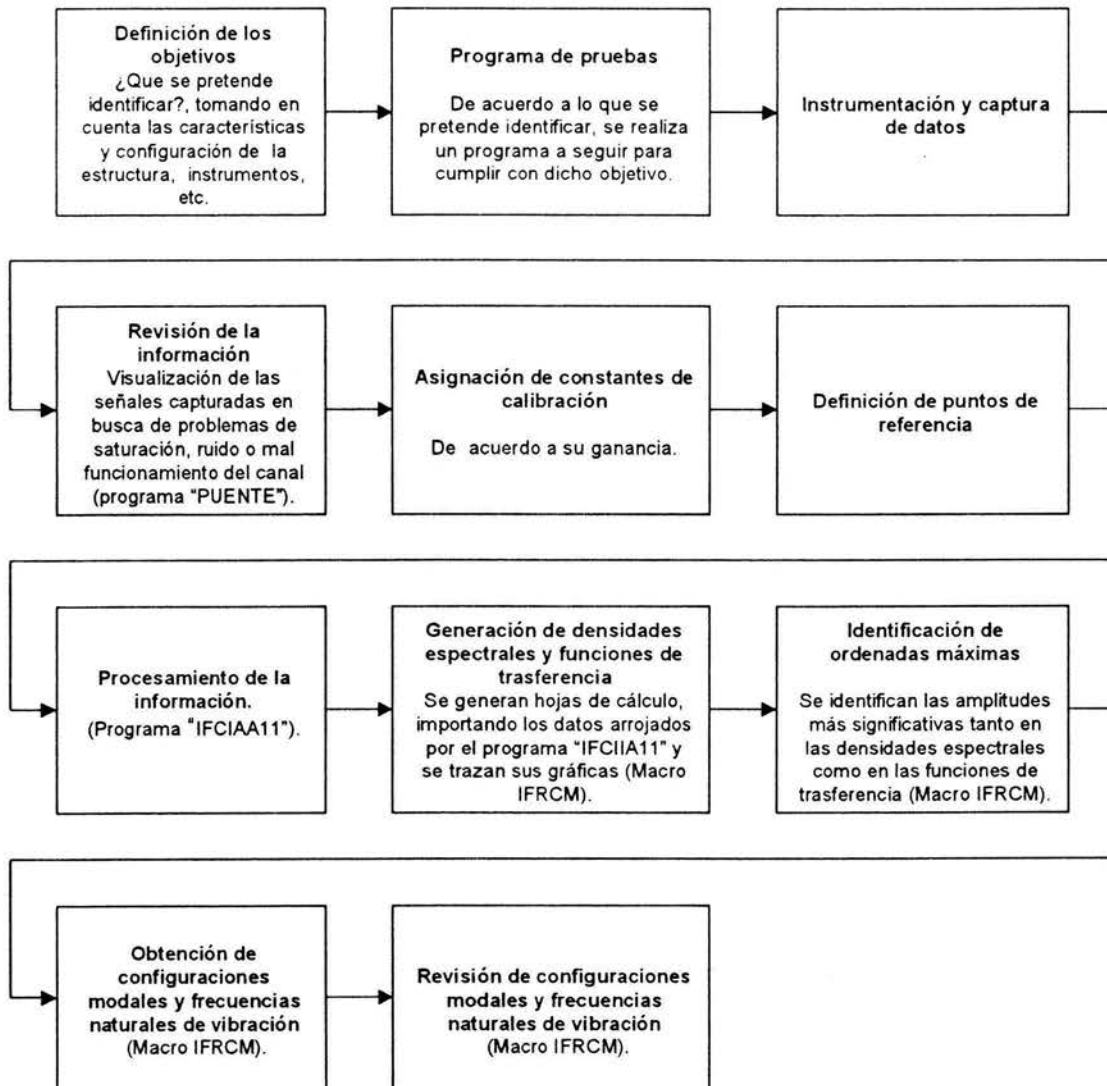


Fig 3.2 Esquema de la metodología de análisis.

## **IV. Análisis de los registros de vibración ambiental**

### **4.1 Procesamiento de información**

La identificación de las frecuencias y modos de vibrar de una estructura, se hace a partir de 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 éstos se obtuvo su respectiva función de transferencia con respecto al resto de los puntos que constituyen la configuración de la estructura.

Para la identificación de las frecuencias y modos de vibrar del puente Coatzacoalcos II, fue necesario procesar los cocientes indicados en la tabla 3.1 en la columna "Cociente inicial" y algunos otros cocientes en el caso de las pilas.

Los puntos de referencia seleccionados en el componente vertical para el caso del tablero fueron el 8, 13 y 19, con respecto a los cuales se procesaron los cocientes 1/8, 3/8, 5/8, 7/8, 9/13, 11/13, 13/19, 15/19, 17/19, 19/20, 20/19, 21/19 y 22/19, todos los puntos localizados de un lado de la calzada. En el componente vertical también se identifican los modos de torsión, para lo que fue necesario procesar los cocientes 2/8, 4/8, 6/8, 8/13, 10/13, 12/13, 14/19, 16/19 y 18/19, ubicados en el otro lado de la calzada y que sólo cubren hasta la mitad del claro central del tablero.

En la dirección transversal, los puntos de referencia son los mismos que en la dirección vertical, así como los cocientes, sumándose a ellos el cociente 23/19.

En el caso de las pilas, los puntos de referencia fueron el 8, 28, 23, 24 y 25, con respecto a los cuales se procesaron los cocientes 8/28, 23/25, 24/23 y 25/23 en dos direcciones, en la dirección transversal (T) y la dirección 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: 1/3, 3/5, 8/9, 9/11, 13/15, 15/17, 20/21, 21/22, 2/4, 4/6, 8/10, 10/12, 12/14, 14/16, 16/18, 16/19, 1/2, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10, 10/11, 11/12, 13/14, 14/15, 15/16, 16/17, 17/18, 22/20, 11/9, 12/9, 13/9, 14/9, 13/10, 14/10, 8/11, 13/11, 14/11, 8/12, 8/14, 11/15, 18/15, 19/15, 11/16, 13/16, 11/17, 13/17, 14/17 y 18/17, para la dirección vertical (V) y la transversal (T).

### **4.2 Identificación de frecuencias y formas modales de la superestructura**

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, deberán 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.

En el caso del tablero, la identificación de las frecuencias asociadas a amplitudes máximas se hace en dos direcciones, en la dirección vertical (V), donde también se identifican las frecuencias asociadas a la torsión (R) y en la dirección transversal (T).

Un total de 27 modos de vibrar del tablero fueron identificados de las pruebas de vibración ambiental, dentro de un intervalo de 0.43 y 8.15 Hz. De estos modos, 9 son verticales, 9 de torsión y 8 transversales.

Los modos verticales de la superestructura (tablero), fueron identificados de los cocientes 13/19, 15/19, 17/19 y 19/20, mostrados en las figs 4.1 y 4.2.

Para poder evaluar los modos de torsión, es necesario conocer los cocientes entre puntos opuestos de una misma sección transversal del tablero (lados opuestos de la calzada), las frecuencias de torsión son aquellas que tienen altas coherencias y ángulos de fase opuestos. Al comparar funciones de la frecuencia en puntos como los mencionados anteriormente, 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 identificar los modos de torsión del tablero fueron: 4/3, 6/5, 14/13 y 18/17, mostrados en las figs 4.3 y 4.4.

Las respectivas formas modales correspondientes a las frecuencias de vibración más significativas en la dirección vertical, incluyendo torsión, se muestran en la fig 4.5. La configuración modal indicada con círculos rellenos y línea continua, es la que comprende los puntos (impares) instrumentados del lado derecho de la calzada en dirección Villahermosa - Minatitlán, mientras que los círculos vacíos y con línea discontinua los puntos (pares) instrumentados del lado opuesto de la calzada, los cuales son usados para indicar los modos de torsión.

Los modos transversales de la superestructura (tablero), fueron identificados de los cocientes 13/19, 15/19, 17/19 y 19/20, mostrados en las figs 4.6 y 4.7. Las respectivas formas modales correspondientes a las frecuencias de vibración más significativas en la dirección transversal, se muestran en la fig 4.8.

En la tabla 4.1 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 a los modos vertical y transversal, 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.

El modo fundamental del tablero del puente es vertical, pero existe un cierto grado de acoplamiento con la dirección transversal, con una frecuencia natural de 0.488 Hz. El primer modo vertical tiene una frecuencia asociada de 0.488 Hz, el primer modo transversal de 0.439-0.488 Hz y el de torsión de 1.416-1.465 Hz.

Tabla 4.1 Frecuencias identificadas para el tablero en el componente vertical (incluyendo torsión) y transversal del puente Coatzacoalcos II.

DIRECCIÓN V		TORSIÓN		DIRECCIÓN T	
MODO	FRECUENCIA	MODO	FRECUENCIA	MODO	FRECUENCIA
1VS	0.488	1VSR	1.416-1.465	1TS	0.439-0.488
1VA	0.781	1VAR	2.930	1TS	0.830-1.07
2VS	1.221	2VSR	4.150-4.199	1TA	1.221-1.270
2VA	1.855	2VAR	5.420	2TS	3.320-3.760
3VS	2.393	3VSR	5.615	2TA	4.395-4.590
3VA	3.271	3VAR	6.104-6.592	3TS	5.420-5.615
4VS	3.613	4VSR	7.275	3TA	6.104
4VA	4.736	4VAR	7.617	4TS	8.105
5VS	5.029	5VSR	8.105-8.154	5TS	-

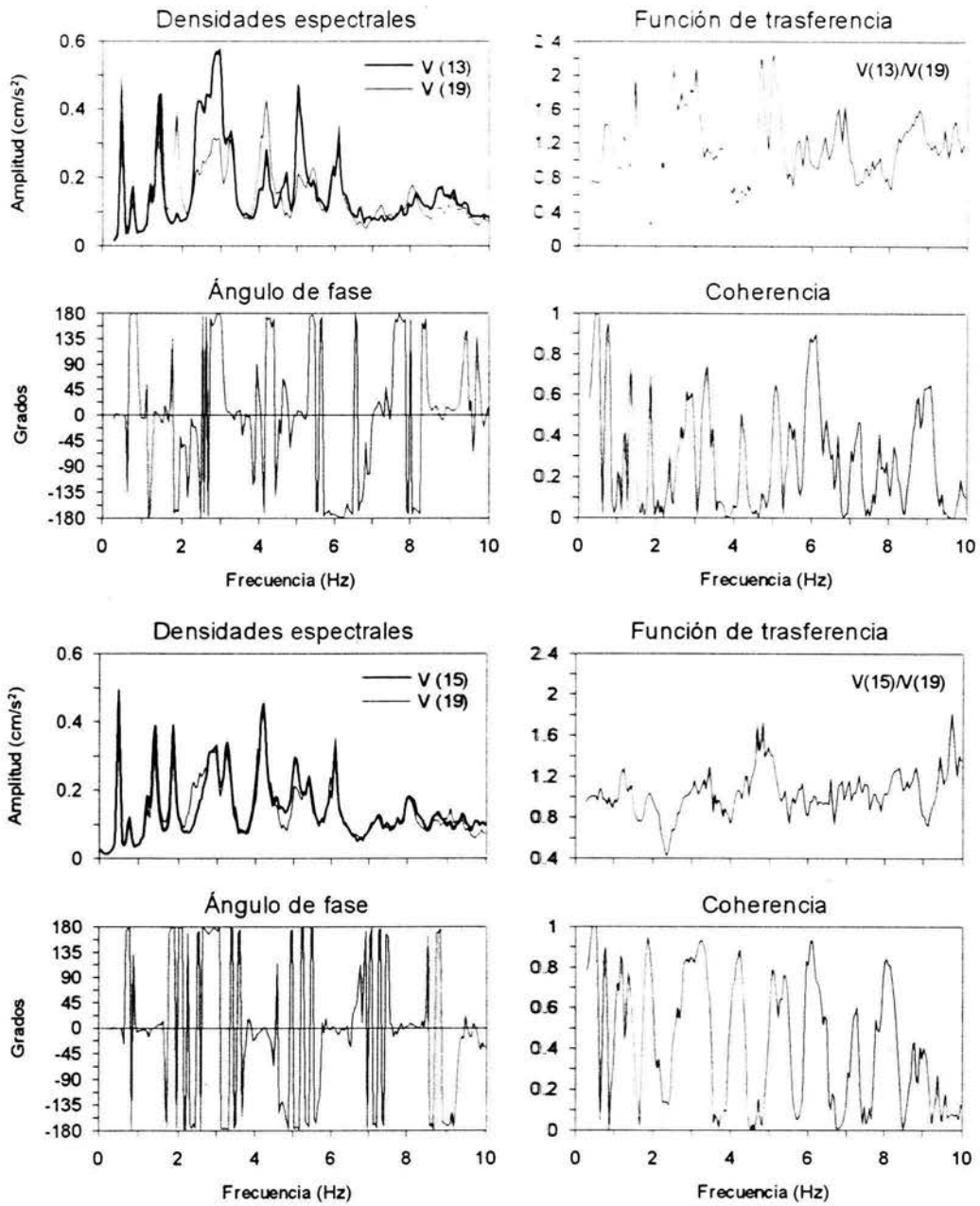


Fig 4.1 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo de fase y coherencia de los puntos 19, 15, 13 y 15/19, 13/19 respectivamente en la dirección V, correspondientes al tramo central del puente Coatzacoalcos II.

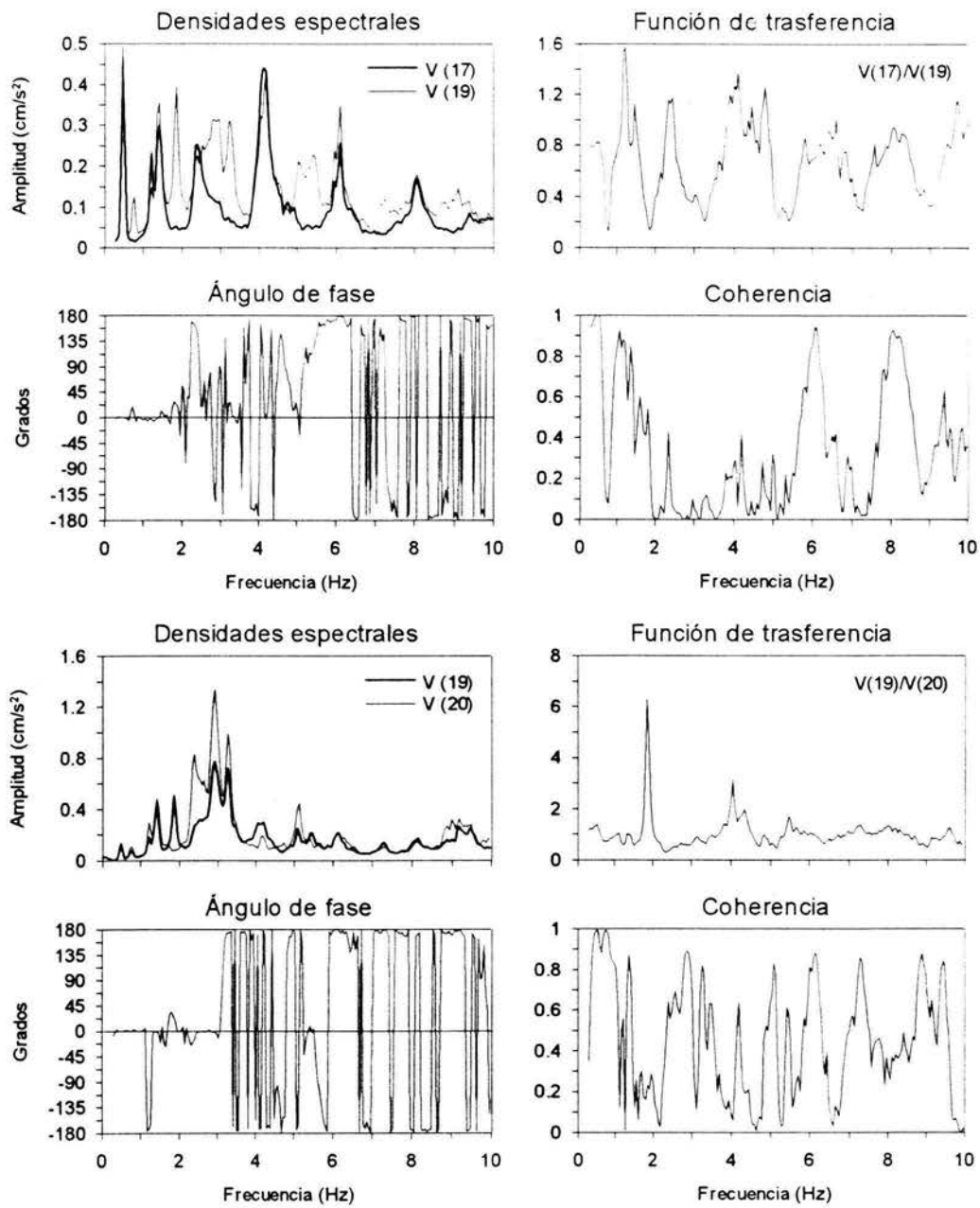


Fig 4.2 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo de fase y coherencia de los puntos 20, 19, 17, y 19/20, 17/19 respectivamente en la dirección V, correspondientes al tramo central del puente Coatzacoalcos II.



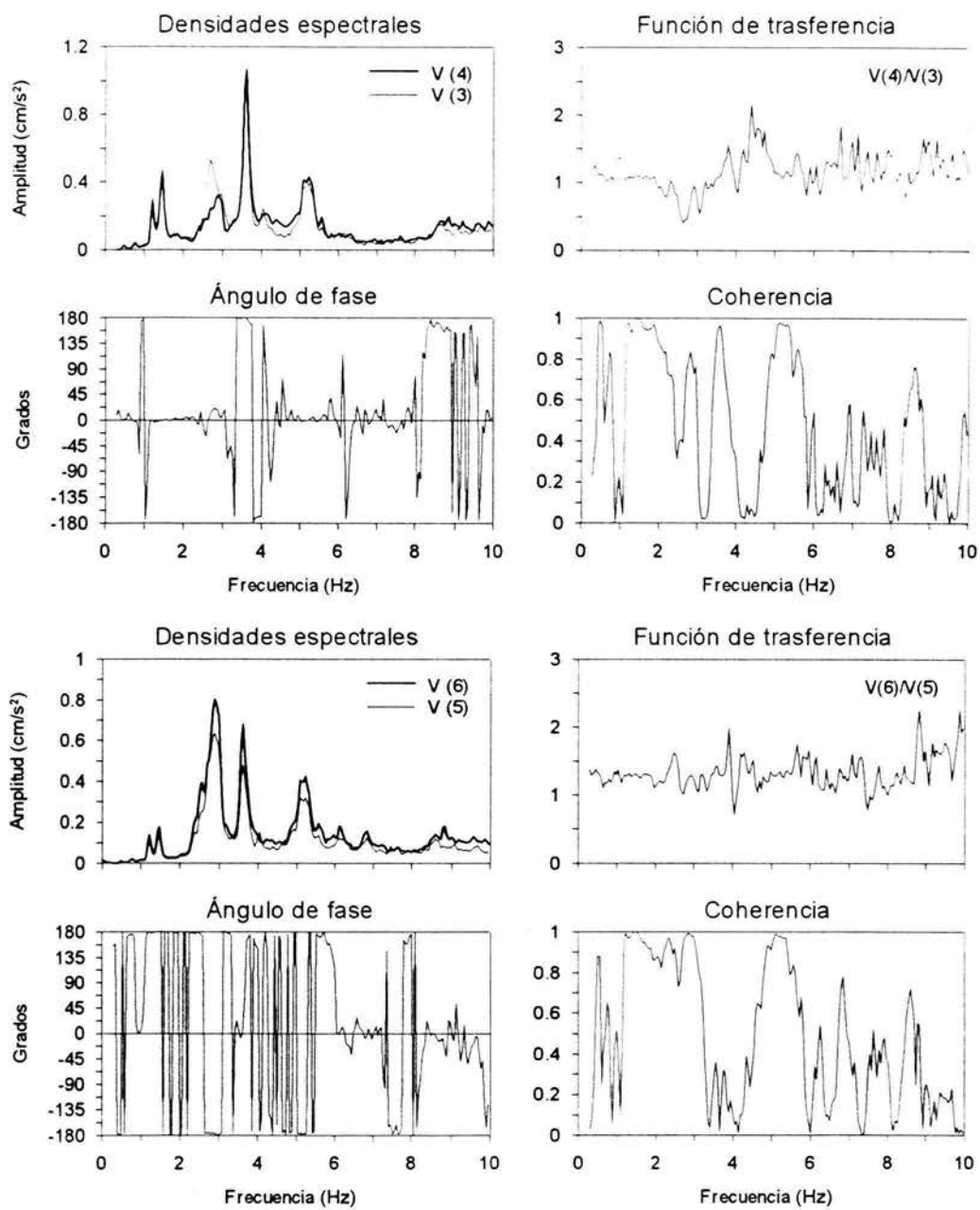


Fig 4.3 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo de fase y coherencia de los puntos 3, 4, 5, 6 y 4/3, 6/5 respectivamente en la dirección V, correspondientes al tramo lateral del puente Coatzacoalcos II.

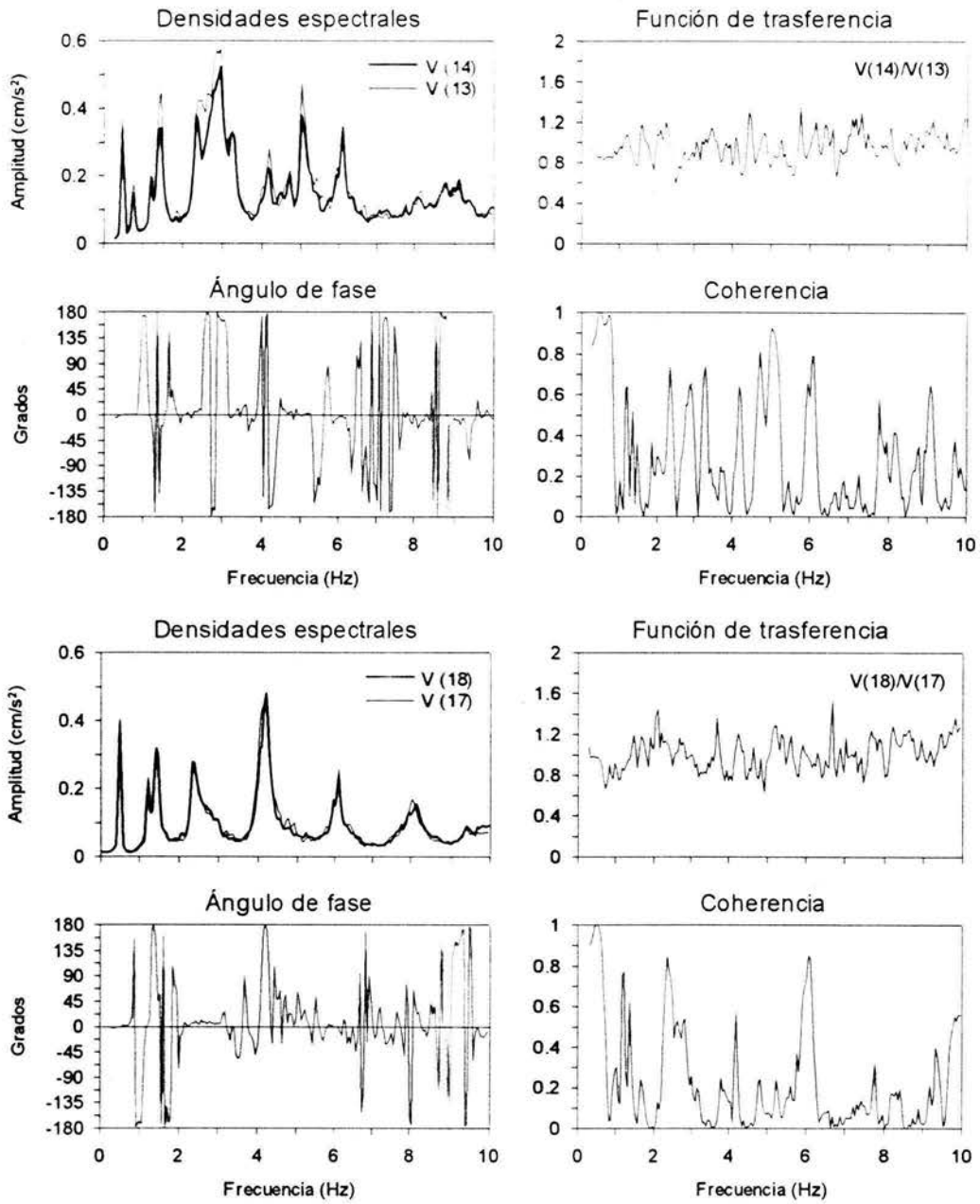


Fig 4.4 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo de fase y coherencia de los puntos 13, 14, 17, 18 y 14/13, 18/17 respectivamente en la dirección V, correspondientes al tramo central del puente Coatzacoalcos II.

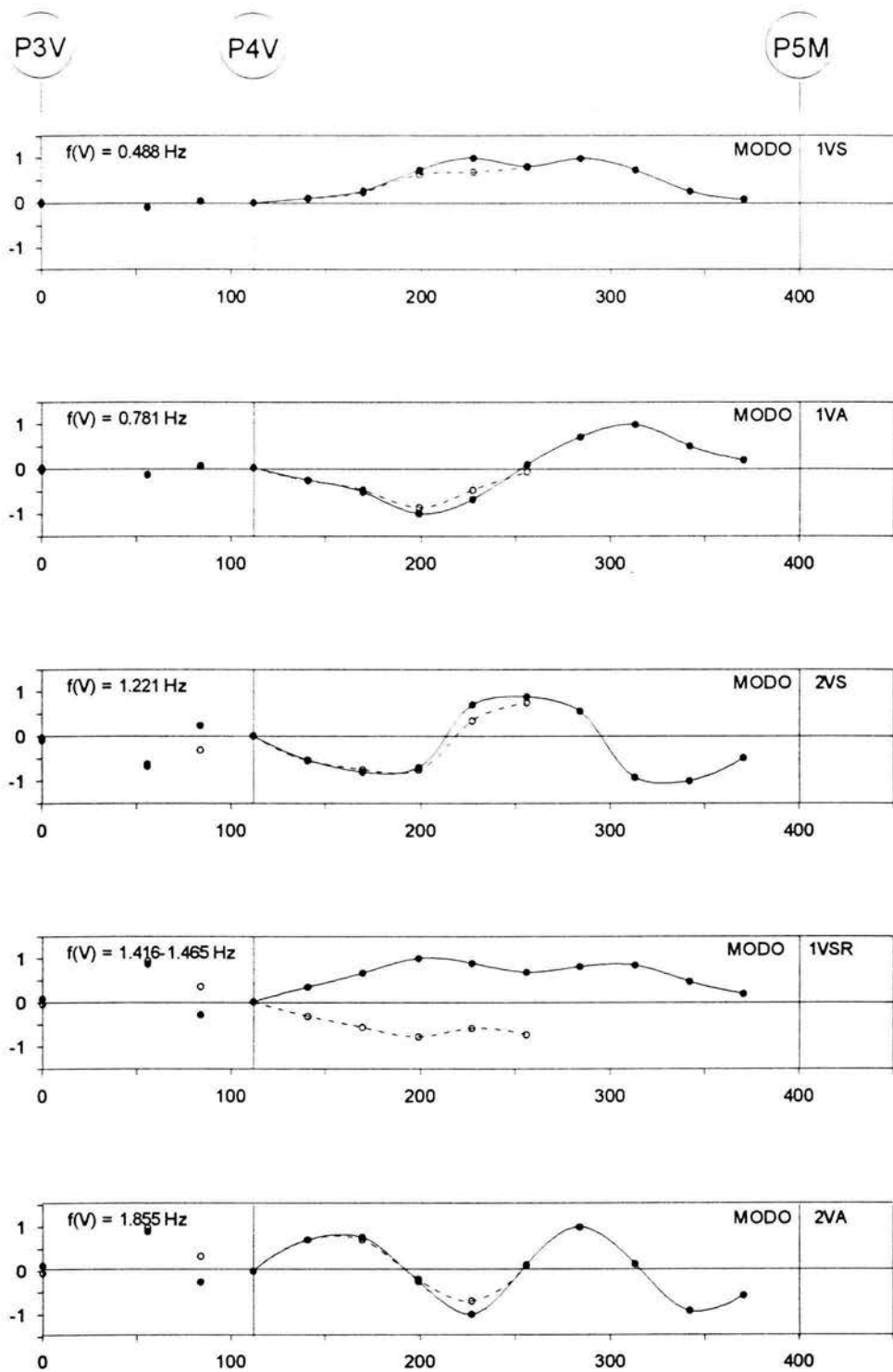


Fig 4.5 Formas modales verticales y de torsión del tablero del puente Coatzacoalcos II

- puntos instrumentados sobre el tablero aguas abajo de la calzada
- puntos instrumentados sobre el tablero aguas arriba de la calzada).

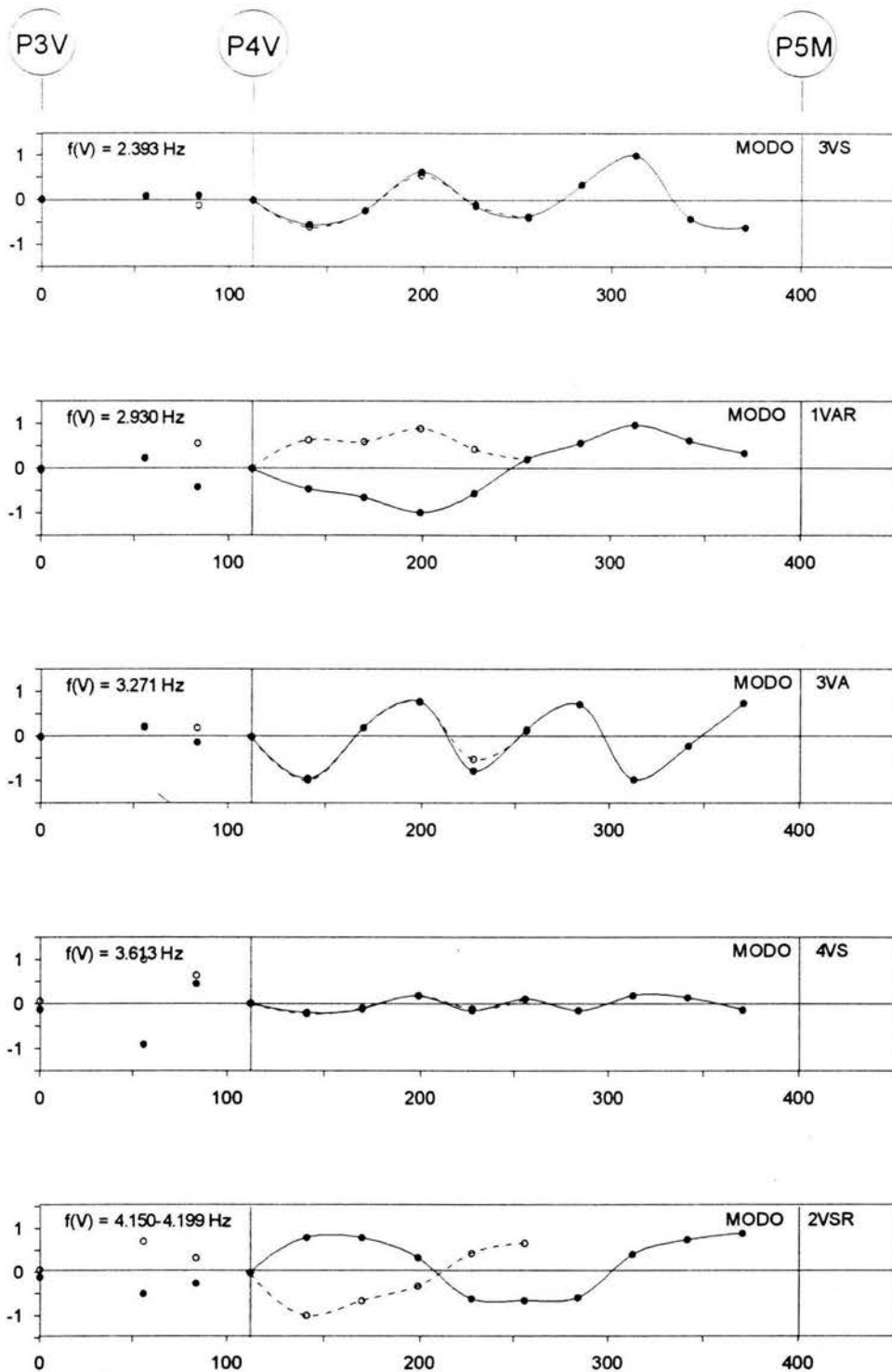


Fig 4.5 Formas modales verticales y de torsión del tablero del puente Coatzacoalcos II

(● puntos instrumentados sobre el tablero aguas abajo de la calzada  
○ puntos instrumentados sobre el tablero aguas arriba de la calzada).

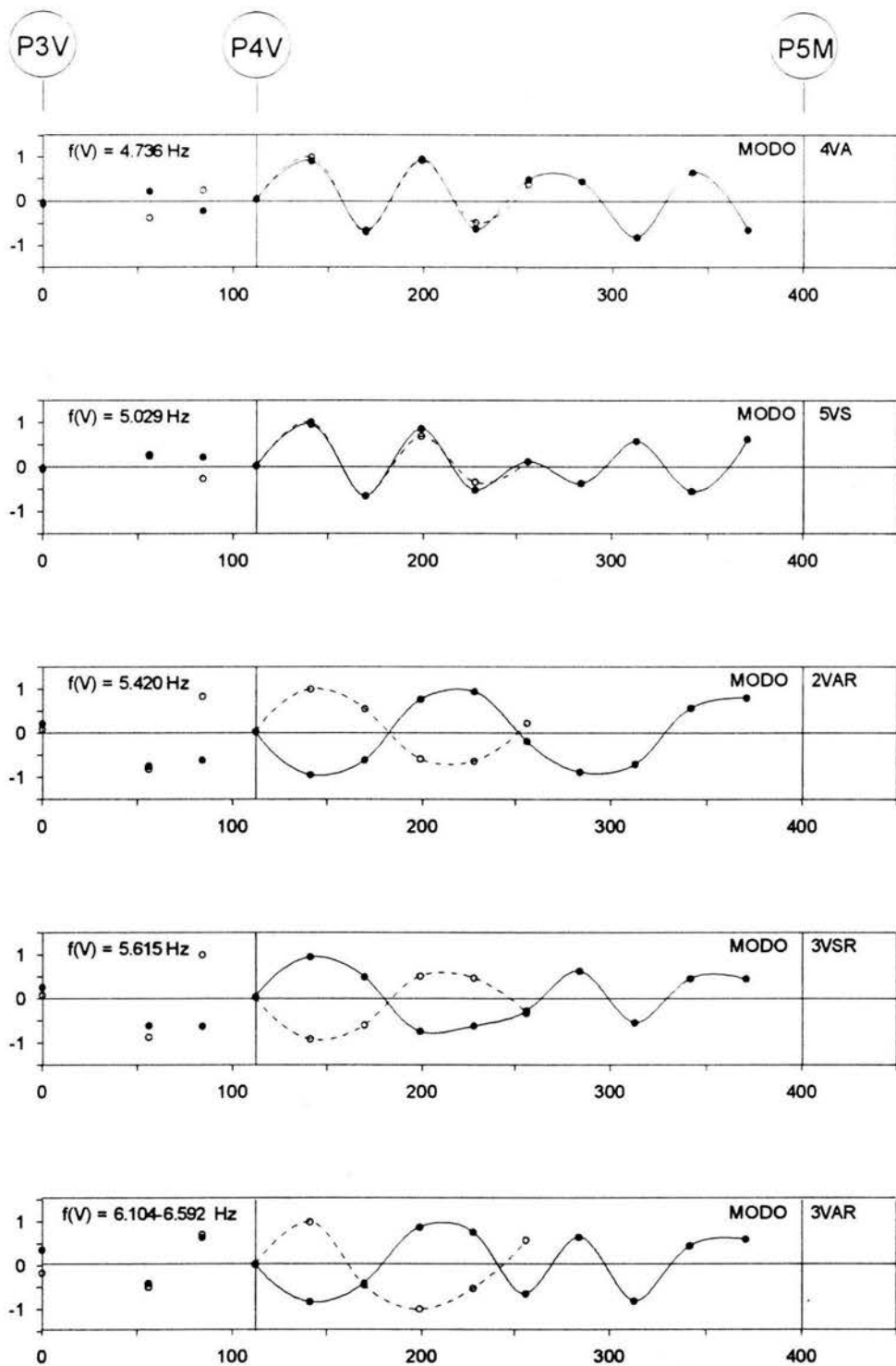


Fig 4.5 Formas modales verticales y de torsión del tablero del puente Coatzacoalcos II

(● puntos instrumentados sobre el tablero aguas abajo de la calzada  
○ puntos instrumentados sobre el tablero aguas arriba de la calzada).

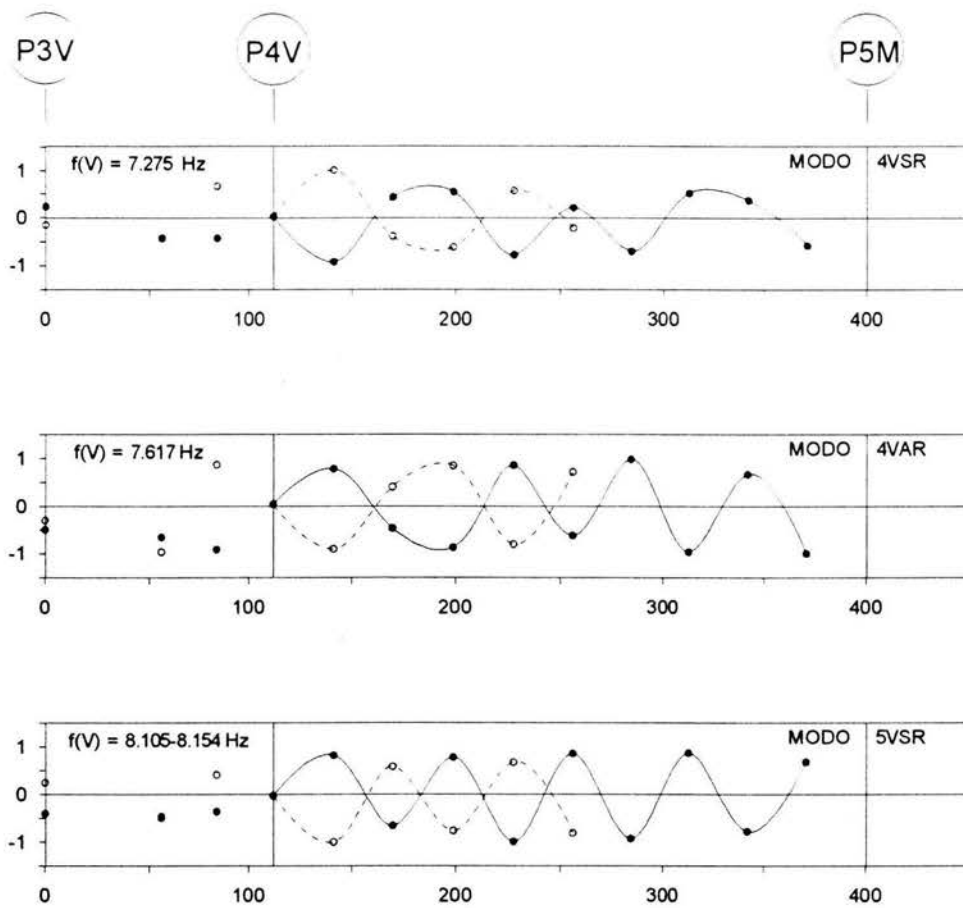


Fig 4.5 Formas modales verticales y de torsión del tablero del puente Coatzacoalcos II

(● puntos instrumentados sobre el tablero aguas abajo de la calzada  
○ puntos instrumentados sobre el tablero aguas arriba de la calzada).

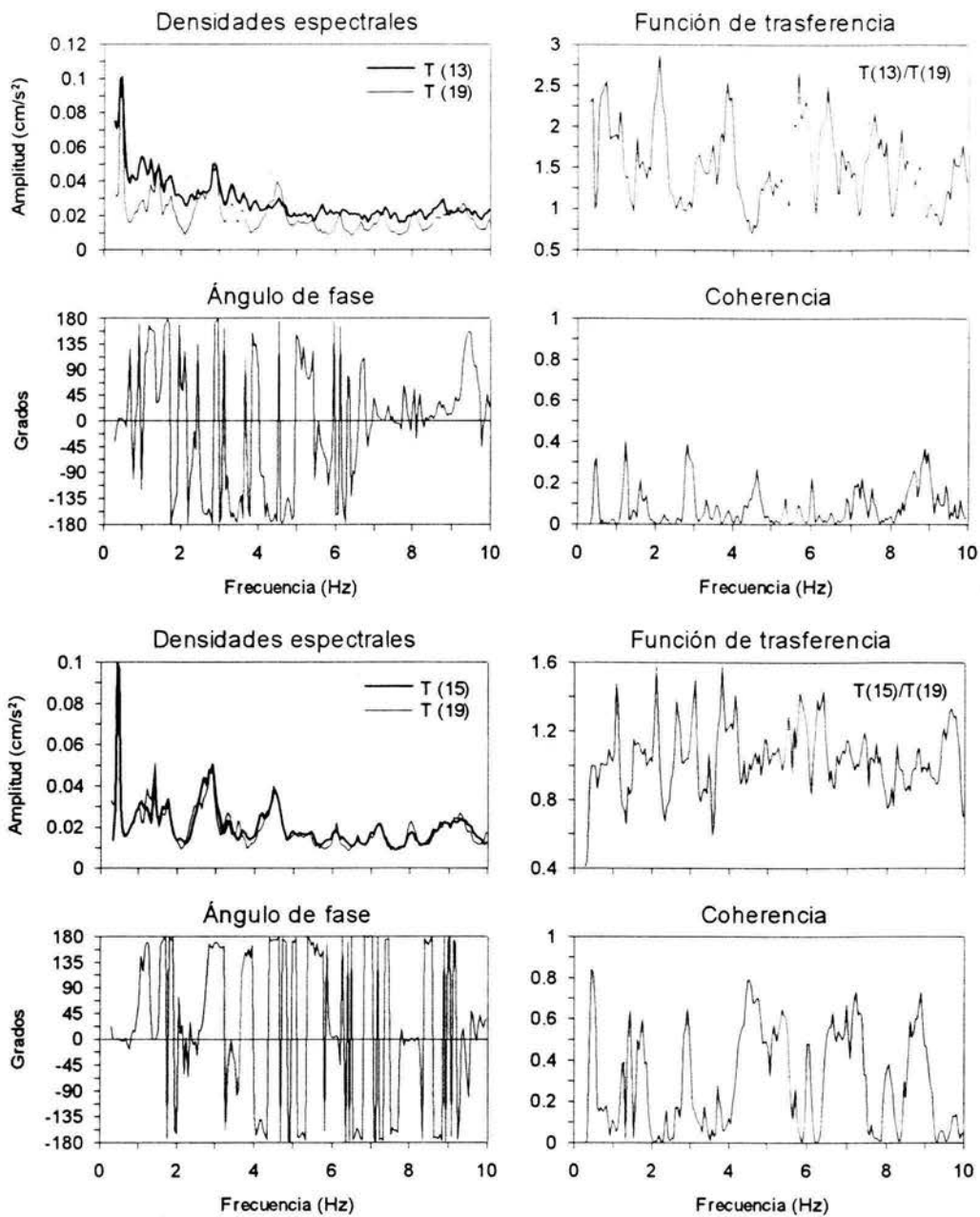


Fig 4.6 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo de fase y coherencia de los puntos 19, 15, 13 y 15/19, 13/19 respectivamente en la dirección T, correspondientes al tramo central del puente Coatzacoalcos II.

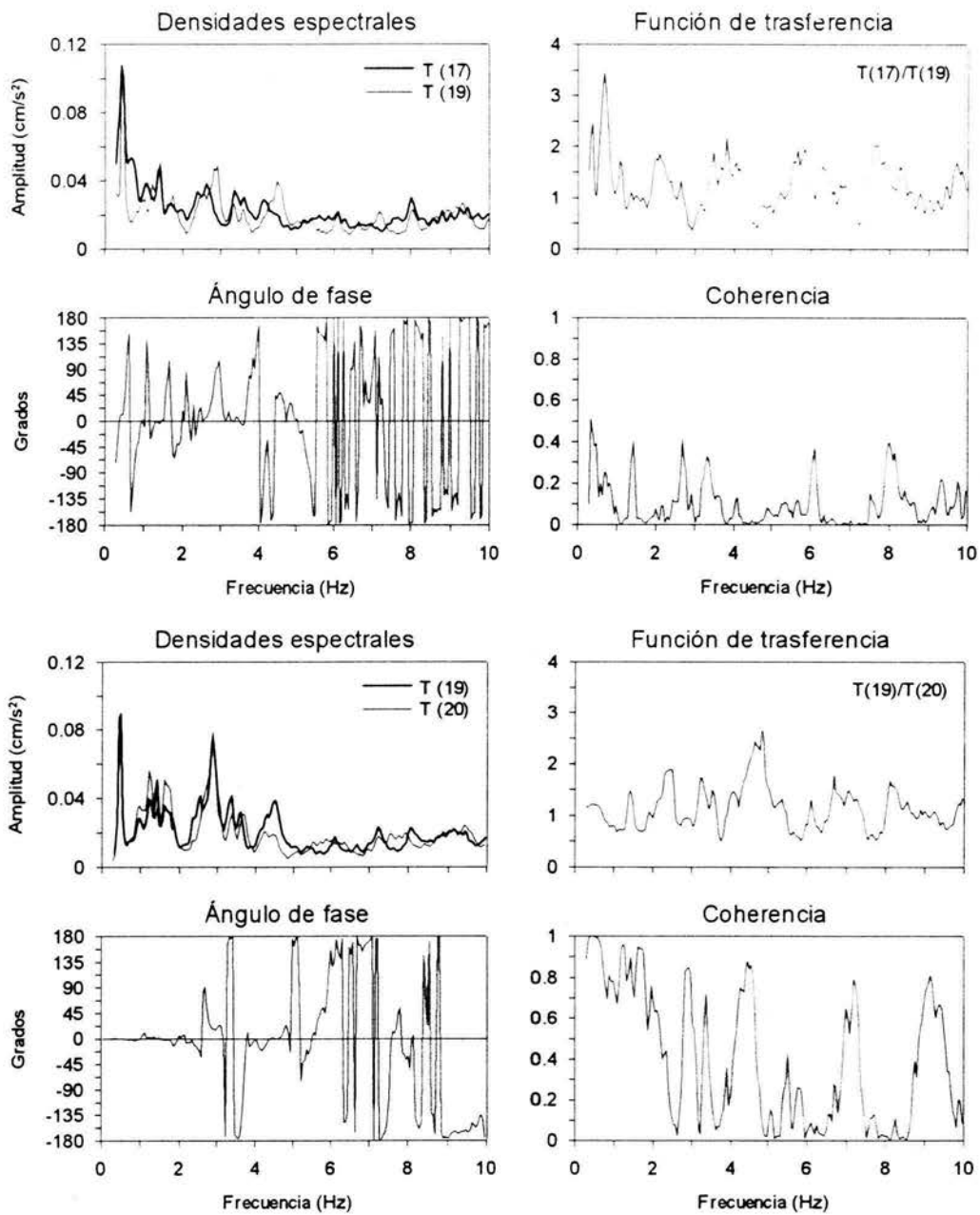


Fig 4.7 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo de fase y coherencia de los puntos 20, 19, 17, y 19/20, 17/19 respectivamente en la dirección T, correspondientes al tramo central del puente Coatzacoalcos II.



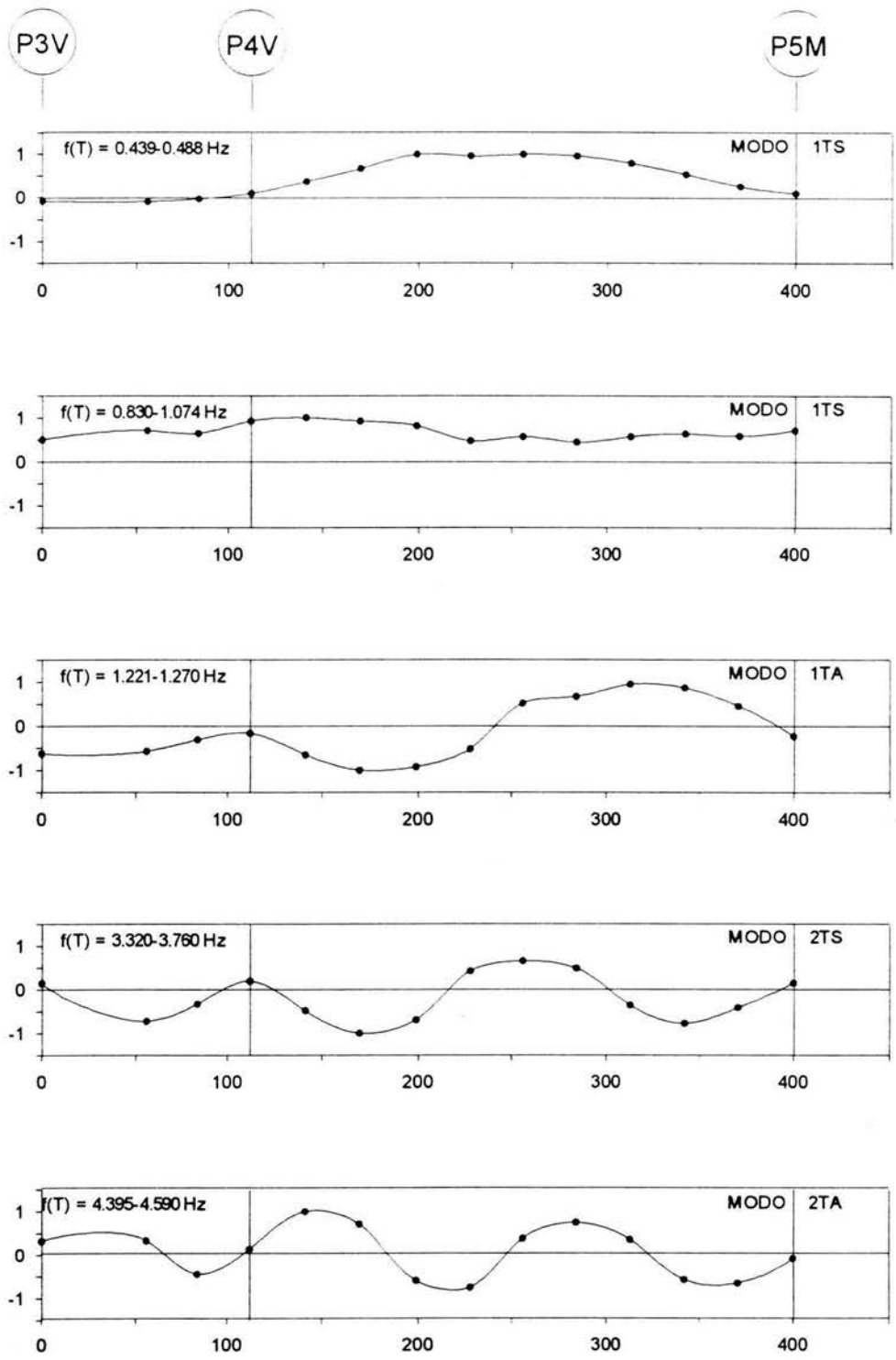


Fig 4.8 Formas modales transversales del tablero del puente Coatzacoalcos II (• puntos instrumentados sobre el tablero aguas abajo de la calzada).

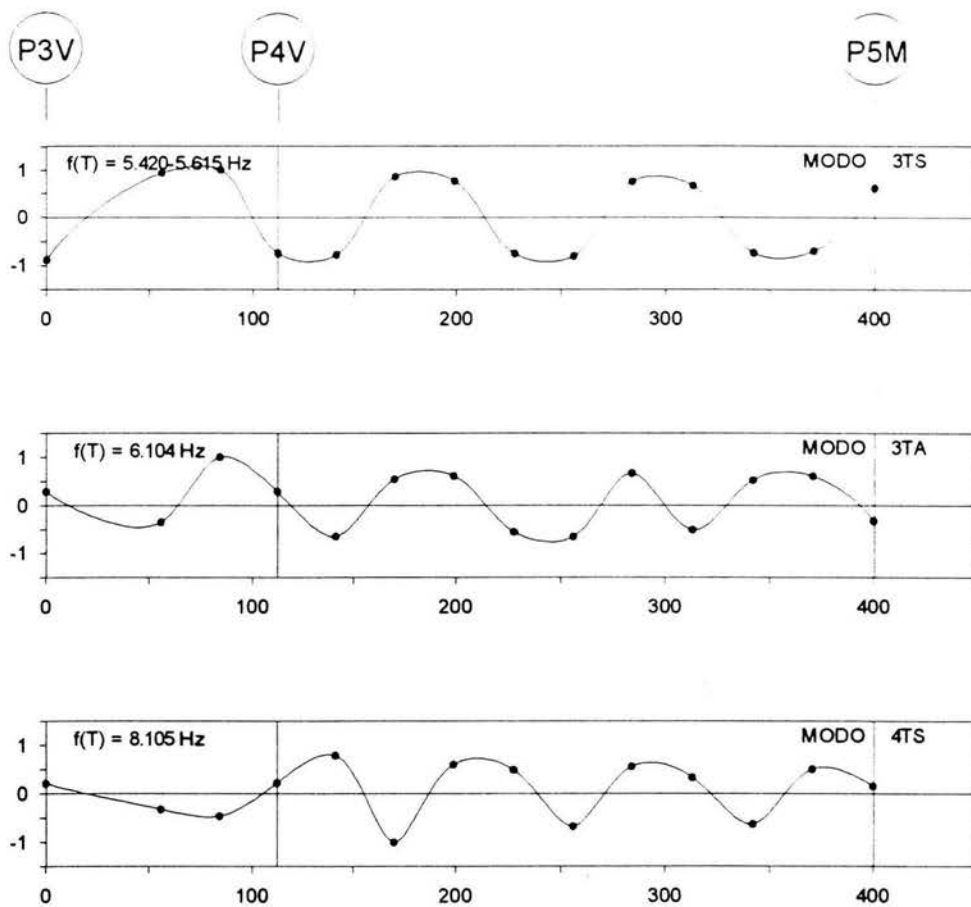


Fig 4.8 Formas modales transversales del tablero del puente Coatzacoalcos II (• puntos instrumentados sobre el tablero aguas abajo de la calzada).

### 4.3 Identificación de las frecuencias y formas modales de las pilas

En el caso de las pilas la identificación de las frecuencias asociadas a amplitudes máximas, se hace en dos direcciones, en la dirección transversal (T) y en la dirección longitudinal (L), para las pilas P4V y P5M.

Los puntos de referencia en la dirección transversal (T) fueron el 8, 28 para la pila P4V y 23, 24 y 25 para la pila P5M, con respecto a los cuales se calcularon los cocientes espectrales 8/28, 23/25, 24/23 y 25/23 (figs 4.9 y 4.10), en los cuales se identificaron las frecuencias propias de las pilas asociadas a amplitudes máximas en el componente transversal.

En el caso del componente longitudinal (L) de las pilas, se eligieron los mismos puntos de referencia y se procesaron los mismos cocientes en su respectiva dirección. Los cocientes de la dirección longitudinal (L) son mostrados en las figs 4.11 y 4.12.

Las amplitudes modales relativas a la base de los puntos de medición se presentan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Frecuencias en Hz, más significativas identificadas en las pilas P4V y P5M del puente Coatzacoalcos II, en el componente transversal y longitudinal.

DIRECCIÓN T	DIRECCIÓN L
0.928	4.834
2.344	5.078
2.686	
2.881	
3.027	

Algunas de las frecuencias identificadas en las pilas coinciden con las frecuencias identificadas en el tablero, esto pone en evidencia la interacción entre ambos elementos trabajando como una estructura. En la tabla 4.2 se muestran las frecuencias más significativas de las pilas P4V y P5M en sus dos componentes, transversal (T) y longitudinal (L). Éstas fueron identificadas de tres intervalos de frecuencia, las correspondientes al componente transversal (T) se encuentran dentro de los intervalos 0.78-1.76 y 2.34-3.37 (fig 4.9), las correspondientes al componente longitudinal (L) en el intervalo 4.7-5.10 (fig 4.12). Sus respectivas configuraciones se muestran en la fig 4.13.

Las configuraciones de las pilas para las frecuencias identificadas en el tablero, tanto en la dirección vertical como en la transversal son mostradas en el Apéndice B.

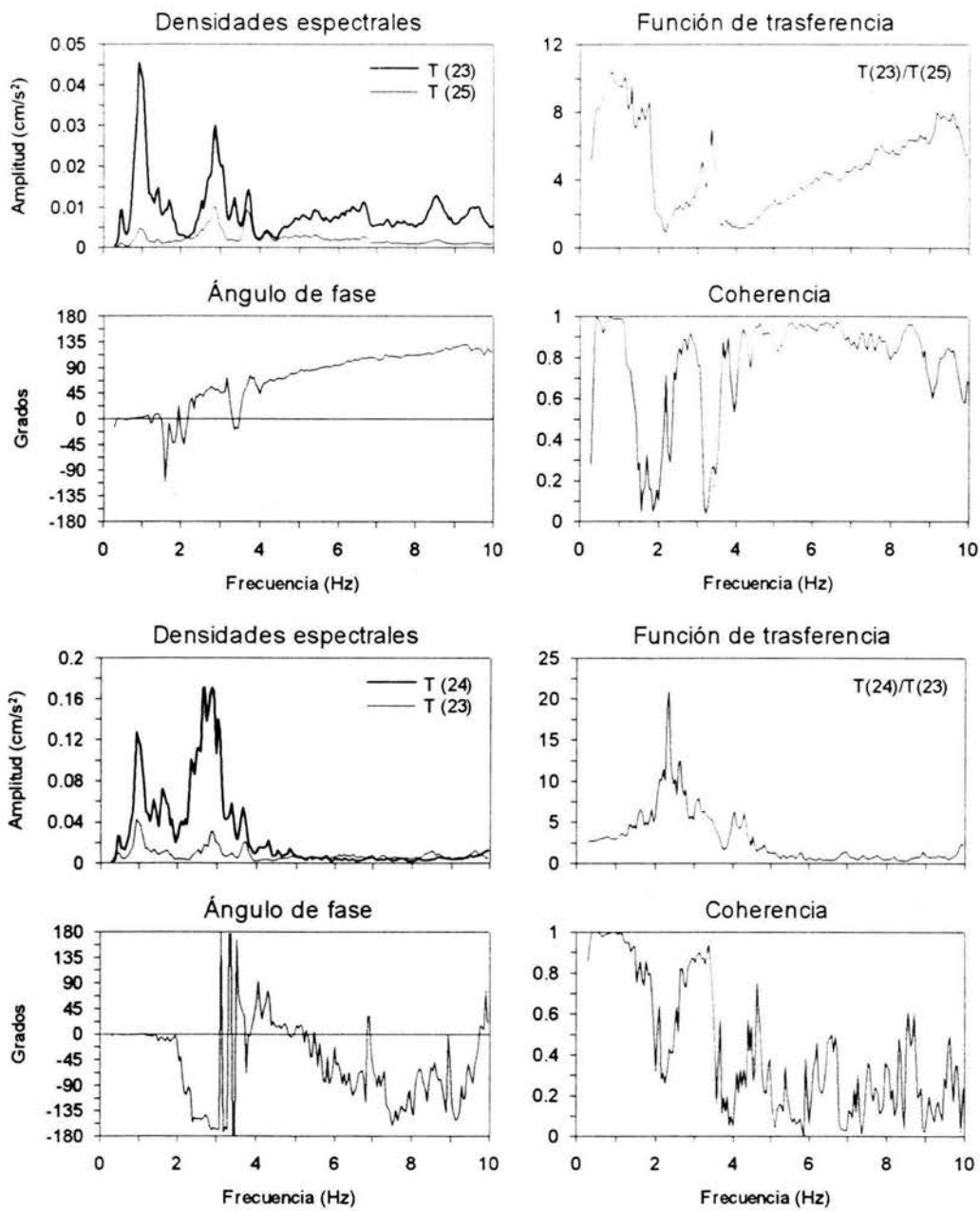


Fig 4.9 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo de fase y coherencia de los puntos 23, 24,25, y 23/25, 24/23 respectivamente en la dirección T de la pila P5M, correspondientes al puente Coatzacoalcos II.

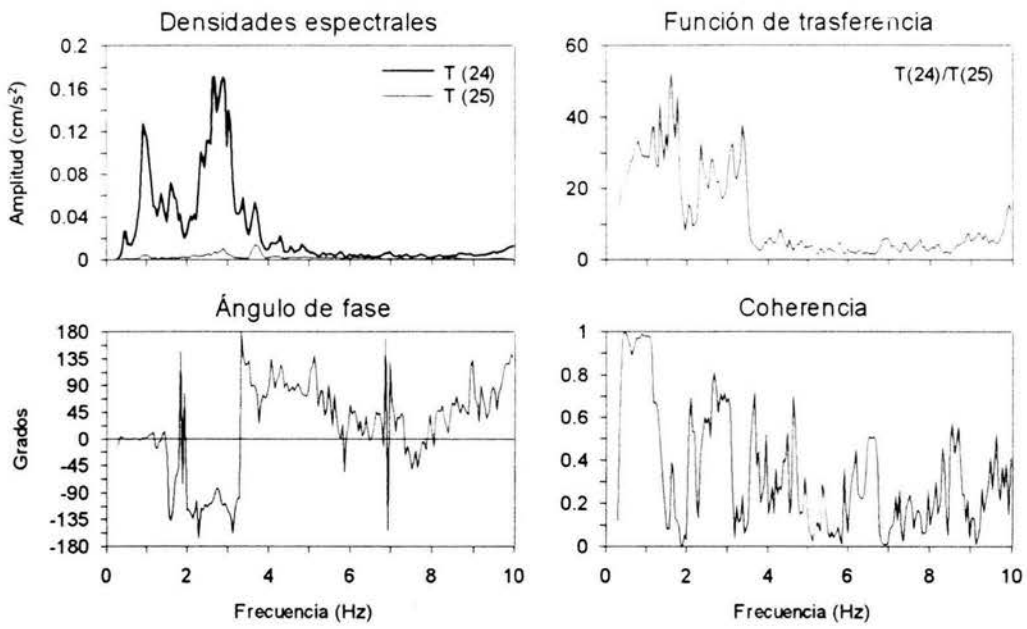


Fig 4.10 Densidades espectrales, función de trasferencia, ángulo de fase y coherencia de los puntos 24,25, y 24/25, respectivamente en la dirección T de la pila P5M, correspondientes al puente Coatzacoalcos II.

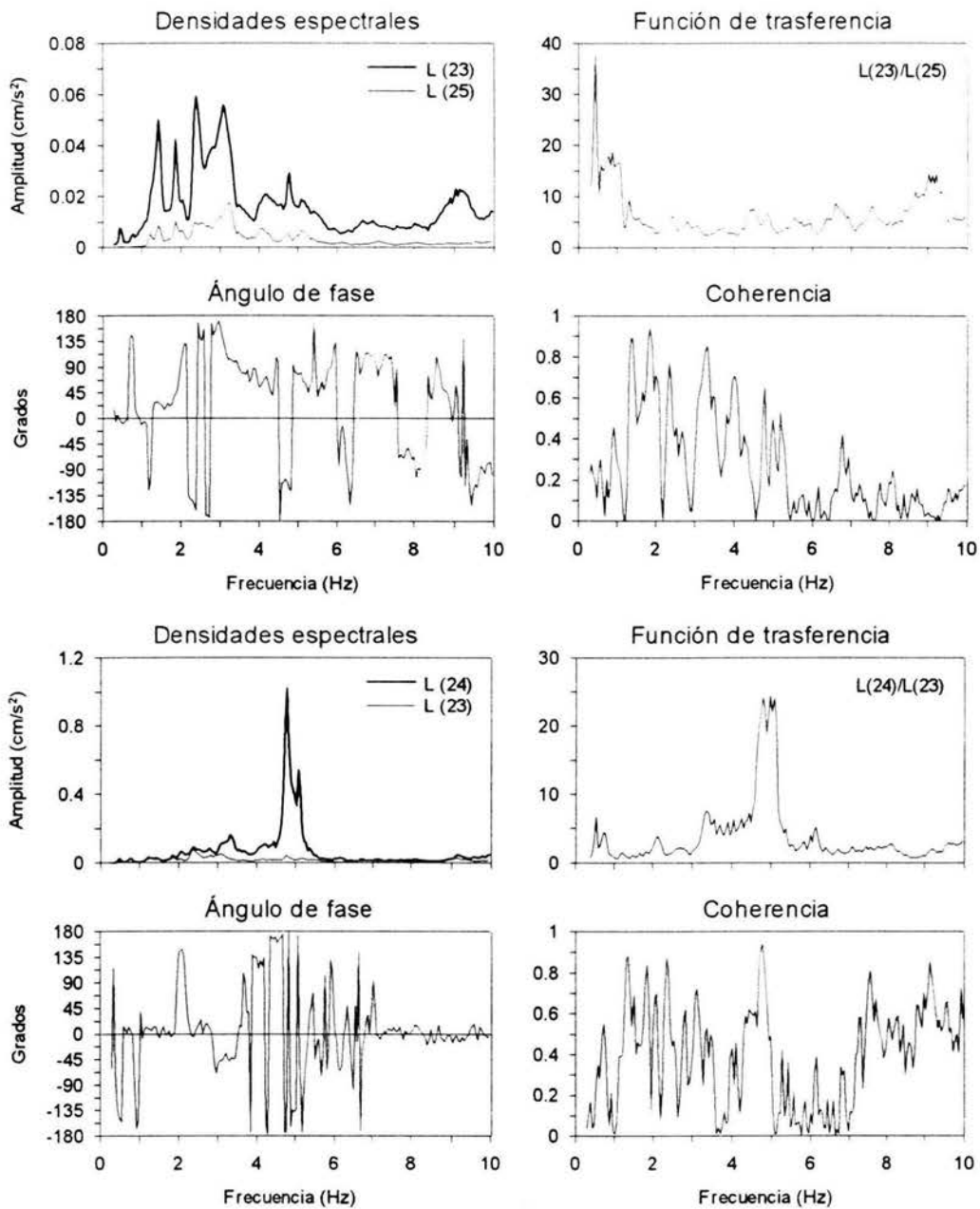


Fig 4.11 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo de fase y coherencia de los puntos 23, 24,25, y 23/25, 24/23 respectivamente en la dirección L de la pila P5M, correspondientes al puente Coatzacoalcos II.

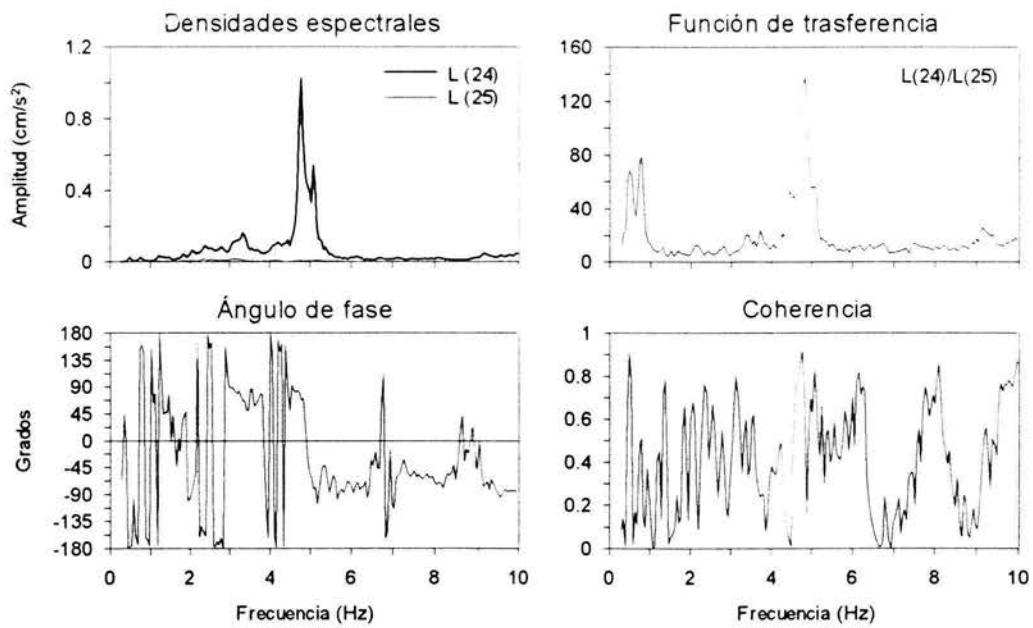


Fig 4.12 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo de fase y coherencia de los puntos 24,25, y 24/25, respectivamente en la dirección L de la pila P5M, correspondientes al puente Coatzacoalcos II.

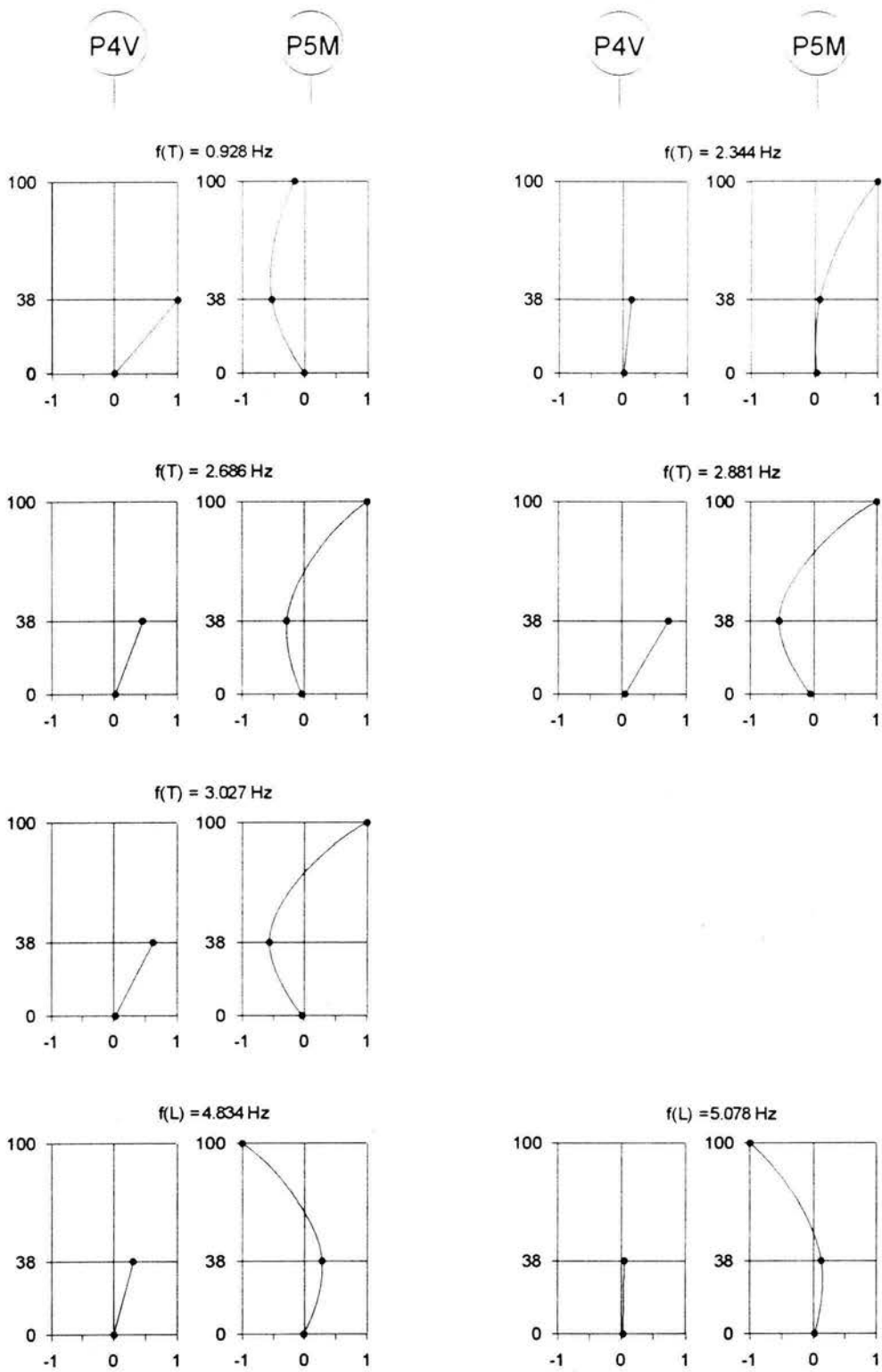


Fig 4.13 Configuraciones de las pilas P4V y P5M para las frecuencias más significativas, identificadas en el componente trasversal (T) y longitudinal (L) del puente Coatzacoalcos II.



#### 4.4 Comparaciones con respecto a otros estudios en puentes atirantados

Una vez obtenidas las formas modales en tablero y pilas, es pertinente comparar la información obtenida, con objeto de ubicar el puente en estudio con respecto a otros puentes atirantados con características similares.

En la tabla 4.2 se resumen las características principales de 23 puentes atirantados y la información proviene de estudios publicados en diversas revistas (A. Cunha, *et al*, 1995, C.C. Chang, *et al* 2001, J. C. Wilson, *et al* 1991, N. Narita, *et al*, 1991 y R. Gómez, *et al*, 2001), la nomenclatura usada es la siguiente:

TIPO DE CABLES	
Espiral cerrado	EC
Cables paralelos aislados	CPA
Cables paralelos aislados prefabricados	CPAP
Cables de concreto presforzado	CCP
barras de concreto presforzado	BCP
CONFIGURACION DE CABLES EN ELEVACIÓN	
Tipo radial	R
Tipo arpa	Ar
Tipo abanico	Ab
Configuración de cables en un plano	Sufijo 1
Configuración de cables en dos planos	Sufijo 2
CONFIGURACIÓN DE MÁSTILES	
Tipo marco	M
Forma de A	A
Forma de I	I
Forma de Y	Y
Forma de H	H
TIPO DE VIGAS	
Vigas de acero	VA
Armadura de acero	AA
Vigas de concreto presforzado	VCP
Vigas de acero y hormigón	AH

Las frecuencias naturales asociadas a una forma modal para cada uno de los puentes se muestra en la tabla 4.3, donde la letra "S" indica un modo simétrico, la "A" un modo asimétrico, la "R" un modo de torsión y el número como sufijo, el número del modo en cuestión.

Tabla 4.2 Características principales de algunos puentes atirantados.

Nº	Datos generales del puente								
	Nombre del puente	Año de constr.	Claros, en m			Tipo de cables	Conf. de cables	Conf. de mástiles	Tipo de viga
			lateral	centro	lateral				
1	Onomichi Ohashi	1968	85	215	85	EC	R2	M	VA
2	Toyosato Ohashi	1970	80.5	216	80.5	CPAP	Ab1	A	VA
3	Arakawa Ohashi	1970	60.3	160	60.3	CPAP	Ar1	I	VA
4	Kamome Ohashi	1975	100	240	100	CPAP	Ab1	I	VA
5	Suehiro Ohashi	1975	110	250	110	CPAP	Ab1	I	VA
6	Suigo Ohashi	1977	178.85	111.6		CPAP	Ar1	I	VA
7	Gasshou Ohashi	1979	144	46	144	EC	Ab2		VA
8	Yamatogawa Kyouryou	1982	149	355	149	CPAP	Ar1	I	VA
9	Meiko Nishi Ohashi	1985	175	405	175	CPA	Ab2	A	VA
10	Iwaguro Jima-Hitsuichi Jima Hashi	1988	185	420	185	CPA	Ab2	M	AA
11	Bannaguro Ohashi		87.8	140.4		CCP	Ar1	I	VA
12	Aratsu Ohashi	1988	184.2	115	44.4	CCP	Ab1	I	VA
13	Rokko Ohashi	1977	89.35	220	89.35	CPAP	Ab2	M	AA
14	Yokohama Bay Hashi	1989	200	460	200	CPA	Ab2	M	AA
15	Matugayama Hashi	1978		96.6		BCP	Ab2	M	VCP
16	Omotogawa Hashi	1979	45.65	85	45.65	CCP	Ar2	M	VCP
17	Bungo Hashi	1983	37.45	37.45		CCP	Ar2	M	VCP
18	Yobuko Ohashi	1989	121	250	121	CCP	Ar2	M	VCP
19	Vasco da Gamma		62	420	62	CPAP	Ab2	H	VCP
20	Hong Kong	1997	80	430	80	CPAP	Ab2	H	VCP
21	Quincy Bayview	1987	134	274	134	CPAP	Ab2	H	VCP
22	Tampico	1988	72	360	66	CPAP	Ab1	Y	AH
23	Coatzacoalcos II	1984	112.35	288	112.35	CPAP	Ab1	Y	VCP

Tabla 4.3 Formas modales identificadas en algunos puentes atirantados.

N°	Nombre del puente	Frecuencias naturales, en Hz											
		Vertical								Torsión			
		1° S1	2° A1	3° S2	4° A2	5° S3	6° A3	7° S4	8° A4	1° SR1	2° AR1	3° SR2	4° AR2
1	Onomichi Ohashi	0.58	0.92	1.38	1.62					1.66	2.94		
2	Toyosato Ohashi	0.52	1.22	1.92	2.48	3.33				1.43	3.25	4.08	
3	Arakawa Ohashi	0.75	1.25	1.91	2.41	2.83				1.45	2.8	4.24	
4	Kamome Ohashi	0.47		0.99		1.46							
5	Suehiro Ohashi	0.47	0.71	1.07	1.26	1.62	2.09			1.45	2.89	4.44	6.71
6	Suigo Ohashi	0.45	0.85	1.26	2.03	2.56	3.38	4.59		1.64	2.98	4.45	5.63
7	Gasshou Ohashi	0.64	0.93	1.31	1.42					1.7			
8	Yamatogawa Kyouryou	0.34	0.42	0.63	0.86	1.03		1.7	1.86	0.87	1.67		
9	Meiko Nishi Ohashi	0.33	0.41	0.73	0.81	0.95				1.31			
10	Iwaguro Jima-Hitsuichi Jima Hashi	0.43	0.73	1.03						1.06	1.91		
11	Bannaguro Ohashi	0.57	1.12	1.59						1.31			
12	Aratsu Ohashi	0.47	0.89	1.23	1.74					1.38	2.09		
13	Rokko Ohashi	0.94	1.76	2.42	2.68			3.37		2.05	3.92	4.97	
14	Yokohama Bay Hashi	0.34	0.57	0.8						0.88			
15	Matugayama Hashi	1.33								3.08			
16	Omotogawa Hashi	1.99	2.94	5.3									
17	Bungo Hashi	1.6	2.68	3.3	5.3	5.69				2.93	3.68	6.86	
18	Yobuko Ohashi	0.37	0.76	1.09	1.55	2.03	2.3			1.71	3.54		
19	Vasco da Gamma	0.34	0.44	0.65	0.82	0.99				0.47	0.62	0.9	
20	Hong Kong	0.39	0.66	1.07	1.54	1.81	2.71	3.08		0.83	1.39	1.9	2.56
21	Quincy Bayview	0.38	0.5	1.06	1.38	1.43				0.55	0.89	1.11	
22	Tampico	0.39	0.54	0.88	1.17	1.42	1.76	2.2	2.25	0.98	2.05	2.98	3.37
23	Coatzacoalcos II	0.49	0.78	1.22	1.86	2.39	3.27	3.61	4.74	1.42	2.93	4.20	5.42

Entre los puentes que se encuentran en la tabla 4.2, pueden hacerse algunas comparaciones de las frecuencias de vibración y sus características estructurales, que den una idea más amplia de las similitudes o diferencias que hay entre un puente y otro.

La respuesta dinámica de estos puentes depende de varios parámetros entre los que destaca el claro. En la fig 4.15 se hace la comparación de la variación de las frecuencias naturales de vibración de acuerdo a la longitud del claro central. Se aprecia que conforme disminuye la longitud, las frecuencias naturales aumentan.

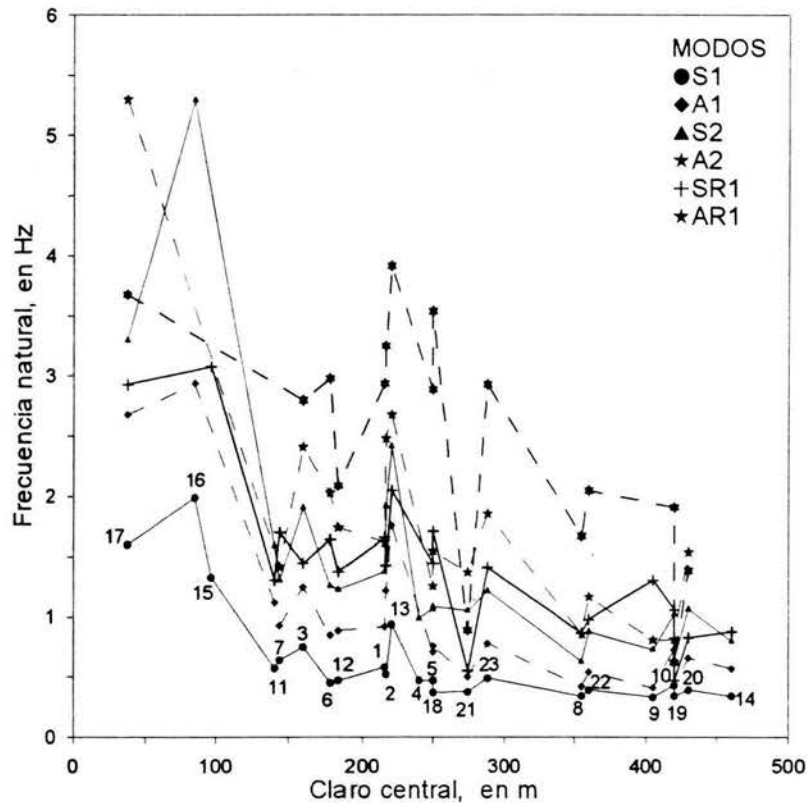


Fig 4.15 Relación entre longitud del claro central y frecuencias naturales de algunos puentes atirantados, los números identifican los puentes de las tablas 4.2 y 4.3.

En la fig 4.15 llama la atención que la forma de las líneas que describen las frecuencias asociadas al componente vertical, difieren de las de torsión, por lo que es conveniente separar ambos componentes (figs 4.16 y 4.17).

En el componente vertical se observan algunos casos, en los que se presentan marcadas variaciones entre puentes contiguos, como son los puentes asociados a los números 16, 11, 7, 1, 2, 13 y 23.

En el caso del puente 16, la relación entre S2 y los otros modos, hace pensar en un posible error de identificación de las frecuencias asociadas a S2, debido a que estas presentan considerables variaciones.

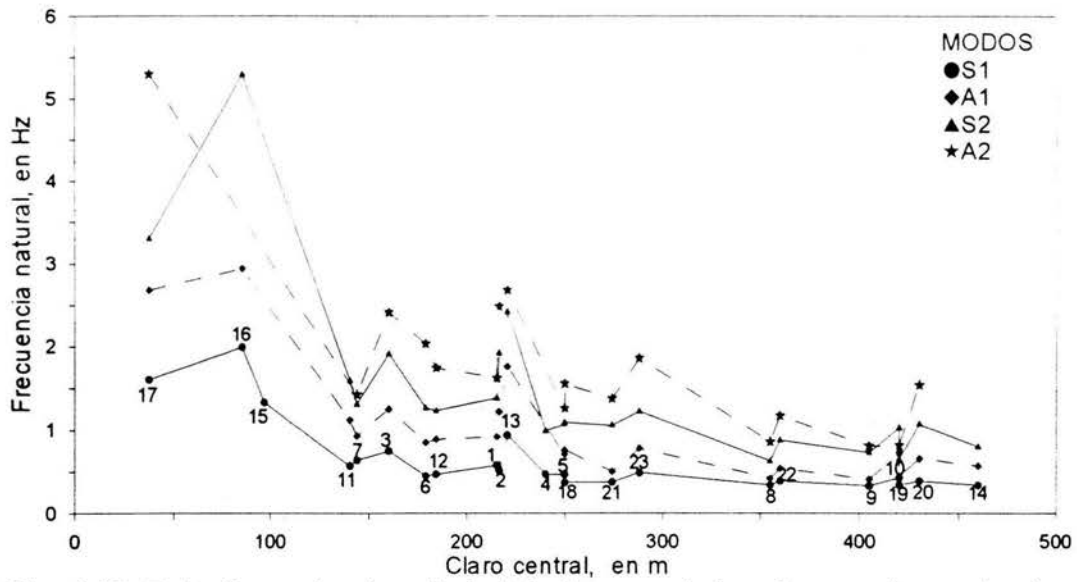


Fig 4.16 Relación entre longitud del claro central y frecuencias naturales (vertical) de algunos puentes atirantados, los números identifican los puentes, de las tablas 4.2 y 4.3.

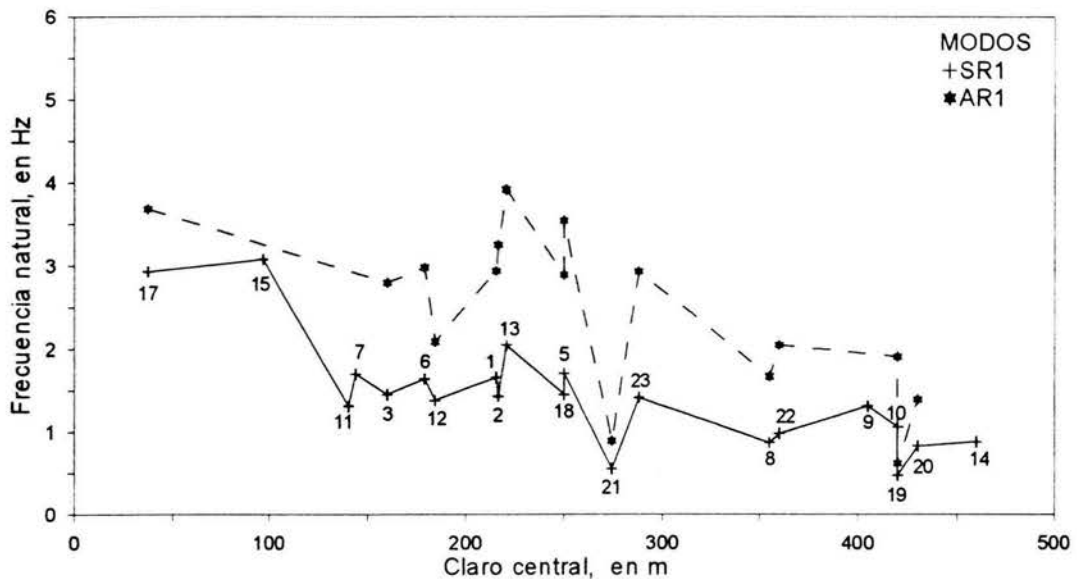


Fig 4.17 Relación entre longitud del claro central y frecuencias naturales (torsión) de algunos puentes atirantados, los números identifican los puentes, de las tablas 4.2 y 4.3.

Para intentar explicar las variaciones de las frecuencias de vibración en puentes con claros similares, es necesario conocer las características estructurales de cada puente.

Puentes en los que la diferencia entre sus claros es mínima, pueden presentar variaciones en sus frecuencias de vibración, debido a la diferencia de sus características estructurales. Esto se puede observar en los pares de puentes 11 y 7, 1 y 2, 5 y 18, donde las características como tipo de cables, configuración de cables y configuración de mástiles son diferentes.

Hay casos en los que puentes con claros similares, pero con un mismo tipo de viga y cables presentan variaciones significativas en sus frecuencias de vibración, debido al tipo de atirantamiento. En particular, el que este sea en uno o dos planos repercute considerablemente.

El puente 13, difiere por el tipo de atirantamiento con respecto a los puentes contiguos. Para el caso del componente vertical los puentes 2 y 4 presentan una configuración de cables tipo abanico en un plano (Ab1), mientras que el puente 13 una configuración de cables de tipo abanico en dos planos (Ab2). La configuración de cables del puente 13 resulta más rígida que las de los otros dos puentes, lo cual explica en parte que las frecuencias asociadas a sus respectivos modos sean mayores.

El puente 21 difiere de los puentes 5 y 23, probablemente por el tipo de atirantamiento. El puente 21 tiene una configuración de cables tipo abanico en 2 planos (Ab2), distinta a la tipo abanico en un plano (Ab1) correspondiente a los otros dos puentes.

En el componente de torsión se aprecia la gran influencia de la longitud del claro, pero existen apreciables fluctuaciones, por ejemplo entre los puentes 11 y 7, 2 y 13, 5 y 18, 21 y 23. La relación entre las dos frecuencias de vibración en torsión identificadas en cada puente es consistente, salvo en dos casos (puentes 19 y 21).

Con el propósito de visualizar más fácilmente las similitudes y diferencias entre los puentes de las tablas 4.2 y 4.3, se agrupan los puentes en diferentes grupos, de acuerdo a la coincidencia de cuatro características, como tipo de viga, tipo de cables, configuración de cables y mástiles, haciendo la distinción entre el componente vertical y el de torsión.

Para el caso de los puentes agrupados por su tipo de cables, hay cuatro subgrupos que comprenden los diferentes tipos de cables de los puentes en estudio y que son: cables de concreto presforzado (CCP) cables paralelos aislados (CPA) cables paralelos aislados prefabricados (CPAP) y espiral cerrado (EC)

Por la configuración de sus cables, hay cuatro subgrupos que son: tipo abanico en un plano (Ab1), tipo abanico en dos planos (Ab2), tipo arpa en un plano (Ar1) y tipo arpa en dos planos (Ar2).

Por la configuración de sus mástiles, hay cinco subgrupos que son: forma de A (A), forma de H (H), forma de I (I), tipo marco (M) y forma de Y (Y).

Por el tipo de viga, hay tres subgrupos que son: vigas de acero (VA), armadura de acero (AA), vigas de concreto presforzado (VCP) y vigas de acero y hormigón (AH)

Los diferentes grupos de puentes, se muestran en el apéndice C.

Al agrupar los puentes con respecto a cierta característica, se pueden buscar variaciones con respecto al resto de las características, o bien comparar los diferentes tipos de ser posible.

Aun en puentes con características semejantes, incluyendo la longitud del claro se pueden presentar notorias variaciones. Estas encontrarán explicación entrando más a fondo en las características del puente, como pueden ser en las dimensiones de los mástiles, el número de cables, el área de acero, el ancho de la sección de la viga, etc.

Esto se puede apreciar en el apéndice C (fig C.3b), donde los tres puentes que aparecen (21, 19 y 20) poseen el mismo tipo de configuración de mástiles, correspondiente al de forma de H. Los puentes 21, 19 y 20, coinciden en su tipo de cables, configuración de cables y tipo de viga. La variación de frecuencias entre estos puentes se debe probablemente al área de acero de sus cables. Aunque no se cuente con una cuantificación exacta de estos datos, la cantidad de acero del puente 20 resulta mayor que la de los otros dos puentes ya que su número de cables es de más del doble para el puente 19 y más del triple para el puente 21. Por su atirantamiento el puente 20 resulta ser más rígido que los otros dos puentes, lo cual explica que tenga frecuencias más altas.

Al agrupar por tipo de cables (Apéndice C, fig C.1), llama la atención los puentes 3 y 11 que precisamente difieren en eso, el resto de sus características son iguales. El puente 3 tiene configuración de cables paralelos aislados prefabricados (CPAP) y el 11 de cables de concreto presforzado (CCP). A pesar de que el puente 3 tiene mayor claro, presenta frecuencias mayores que el puente 11, lo cual hace pensar que la configuración CPAP es más rígida, aunque no se descarta que el puente 3 tenga mayor área de acero.

En la agrupación de puentes de acuerdo a su tipo de viga, también se pueden hacer algunas observaciones. Al comparar los puentes que tienen vigas de acero (VA) y vigas de concreto presforzado (VCP) con respecto a los que tienen armadura de acero, se puede observar que los últimos tienen frecuencias más altas.

Se pueden encontrar múltiples diferencias y similitudes entre los diferentes grupos de puentes e intentar darles una explicación, pero el comportamiento de cada puente depende de varios parámetros. Esto se acentúa en los grandes puentes como los atirantados, tratados en este estudio, donde además de las características estructurales, factores como la intensidad del viento y el tráfico a que es sometido participan de manera importante en su comportamiento.

#### 4.5 Dos grandes puentes atirantados en México

Entre los puentes seleccionados anteriormente se encuentra el puente tratado en este estudio, el Coatzacoalcos II, así como otro puente importante en México, el puente Tampico, en el cual se realizaron pruebas dinámicas muy semejantes a las realizadas en el puente Coatzacoalcos II. Debido a ciertas similitudes entre las características de ambos puentes, la similitud de las pruebas realizadas en ellos y a que se posee toda la información referente a las pruebas, es posible hacer algunas comparaciones más específicas entre ambos puentes.

El puente Tampico es otro puente importante en México, se encuentra ubicado al norte, sobre la carretera costera del golfo de México en una zona de gran actividad económica agropecuaria y de pesca, así como de explotación e industrialización de hidrocarburos. La longitud total del puente es de 1543 m con un claro central atirantado de 360 m de sección transversal cajón de tipo ortotrópico; el resto de la superestructura es de hormigón pretensado de sección cajón. El ancho total es de 18.10 m y aloja cuatro carriles de circulación con una barrera central y dos acotamientos. Las pilas que sirven de apoyo a los tirantes tienen una altura de 119 m con cimentación de cajones de hormigón armado de forma elíptica; el atirantamiento es axial dispuesto en forma de medio abanico y está formado por 44 cables de longitud variable. (Gómez, *et al*, 2001).

En el año de 1998 se realizó por segunda vez, un programa experimental de pruebas bajo carga estática y dinámica. Se llevaron a cabo pruebas de vibración ambiental en la superestructura y en los tirantes. Los resultados obtenidos mediante una metodología de análisis similar a la descrita en este estudio se muestran en la tabla 4.8.

En la tabla 4.8, los modos marcados con asterisco se encuentran acoplados al componente transversal del tablero, los indicados con doble asterisco se encuentran acoplados al componente torsional del tablero y el marcado con un signo de suma como subíndice, indica que se trata de una frecuencia probable.

Las frecuencias del puente Tampico, mostradas en la tabla 4.8 son comparadas con las obtenidas en el puente Coatzacoalcos II. Con el propósito de conocer sus variaciones, se calcula el cociente entre las frecuencias asociadas a un mismo modo para ambos puentes. Estas comparaciones se muestran en la tabla 4.9, donde se pueden observar las similitudes que hay entre algunas frecuencias, tal es el caso de los modos transversales, donde el valor de las frecuencias para los modos 1TS, 1TA, 2TS y 2TA coincide entre ambos puentes, por lo que la relación entre ellos es de uno.

La comparación entre las frecuencias de vibración identificadas para cada uno de los puentes, se puede realizar también gráficamente por medio de sus respectivas densidades espectrales, funciones de transferencia, ángulos de fase y coherencias. Estas gráficas se pueden observar en el apéndice D, donde se indican los cocientes a comparar para cada uno de los puentes.



Tabla 4.8 Frecuencias identificadas para el tablero en el componente vertical (incluyendo torsión) y trasversal del puente Tampico.

DIRECCIÓN V		TORSIÓN		DIRECCIÓN T	
MODO	FRECUENCIA	MODO	FRECUENCIA	MODO	FRECUENCIA
1VS	0.39	1VSR*	0.98	1TS	0.44
1VA	0.54-0.59	1VAR*	1.95-2.05	1TA	0.73
2VS*	0.88	2VSR*	2.49-2.98	1TS**	0.83-1.07
2VA*	1.17	2VAR*	3.37	1TA	1.27
3VS*	1.42	3VAR*	4.80-4.90	1TA**	2.00-2.05
3VA	1.76	3VSR	5.32-5.38	2TS	1.71
4VS*	2.2			2TA	1.86-1.90
4VS	2.25			2TS**	2.49-2.74
5VS	3.52-3.61			2TA**	3.08
5VA	4.15-4.40			2TA**	3.56-3.61
				3TS	4.2
				3TA**	4.80-4.90
				4TS	5.33
				4TA	5.77-5.86
				5TS	6.25
				5TA	6.64-6.69
				6TS	6.98

La variación entre las frecuencias naturales entre ambos puentes en la dirección vertical y de torsión, se debe a la diferencia de la longitud del claro central, la diferencia del material de la sección trasversal y el atirantamiento. El puente Coatzacoalcos II tiene un claro central de 288 m contra 360 m del puente Tampico. Ambos tienen un atirantamiento axial del tipo medio abanico, sólo que el del puente Coatzacoalcos II es proporcionado por 68 tirantes (34 cables en cada mástil), dando un total de 4572 cm<sup>2</sup> de área de acero, mientras que en el puente Tampico por 44 tirantes de longitud variable (22 cables en cada mástil), dando un total de 2970 cm<sup>2</sup> de área de acero. Por la longitud de su claro central y mayor área de acero en su atirantamiento, el puente Coatzacoalcos II es más rígido que el puente Tampico, aún cuando la sección trasversal del puente Tampico sea de acero. Esto explica que las frecuencias naturales del puente Coatzacoalcos II sean mayores.

Tabla 4.9 Frecuencias asociadas a modos de dos puentes atirantados de similares características (puente Tampico y Coatzacoalcos II), así como la relación existente entre dichas frecuencias.

MODOS		FRECUENCIAS		RELACIONES MODALES
		TAMPICO	COATZACOALCOS II	COATZACOALCOS II/ TAMPICO
DIRECCIÓN V	1VS	0.39	0.49	1.25
	1VA	0.54-0.59	0.78	1.44-1.32
	2VS	0.88	1.22	1.39
	2VA	1.17	1.86	1.59
	3VS	1.42	2.40	1.69
	3VA	1.76	3.27	1.86
	4VS	2.2	3.61	1.64
	4VS	2.25	4.74	2.10
	5VS	3.52-3.61	5.03	1.42-1.40
	5VA	4.15-4.40		
DIRECCIÓN T	1TS	0.44	0.44-0.49	1.00-1.11
	1TA	0.73		
	1TS	0.83-1.07	0.83-1.07	1.00-1.00
	1TA	1.27	1.22-1.27	0.96-1.00
	1TA	2.00-2.05		
	2TS	1.71		
	2TA	1.86-1.90		
	2TS	2.49-2.74	3.32-3.76	1.33-1.37
	2TA	3.08	4.40-4.60	1.43-1.49
	2TA	3.56-3.61		
	3TS	4.2	5.42-5.62	1.29-1.34
	3TA	4.80-4.90	6.10	1.27-1.24
	4TS	5.33	8.11	1.52
	4TA	5.77-5.86		
	5TS	6.25		
	5TA	6.64-6.69		
6TS	6.98			
TORSIÓN	1VSR	0.98	1.42-1.47	1.45-1.5
	1VAR	1.95-2.05	2.93	1.50-1.43
	2VSR	2.49-2.98	4.15-4.20	1.67-1.41
	2VAR	3.37	5.42	1.61
	3VAR	4.80-4.90	6.10-6.59	1.27-1.34
	3VSR	5.32-5.38	5.62	1.05-1.04
	4VSR		7.28	
	4VAR		7.62	
	5VSR		8.11-8.15	

## V. Conclusiones

La metodología de análisis computacional implementada tuvo resultados satisfactorios para el caso del puente Coatzacoalcos II al permitir obtener sus propiedades dinámicas más significativas. Además esta metodología se concibió para ser aplicada a cualquier tipo de puentes y edificios, realizando sencillas modificaciones.

Las pruebas de vibración ambiental han demostrado ser una opción eficiente para la determinación de propiedades dinámicas de las estructuras, estimación de sus frecuencias y formas modales de vibración. Este tipo de pruebas experimentales presentan ciertas ventajas, como es el hecho de no interferir con el uso de la estructura lo cual permite realizarlas en cualquier momento.

En un momento dado se puede hacer la evaluación de una estructura comparando los resultados obtenidos mediante este tipo de pruebas, con el modelo de diseño o bien con pruebas realizadas previamente o a futuro. La primera opción para verificar si existe congruencia entre los resultados obtenidos experimentalmente en la estructura y los resultados obtenidos analíticamente con los criterios de diseño, la segunda como parte de programas de operación y mantenimiento, que tienen como fin evaluar periódicamente la seguridad estructural.

Para el caso del puente Coatzacoalcos II, las propiedades dinámicas identificadas a partir de las pruebas de vibración ambiental, fueron frecuencias y formas modales de vibración. Un total de 32 frecuencias fueron identificadas, 26 en el tablero, de las cuales 9 fueron modos verticales, 9 modos torsionales y 8 modos trasversales.

Dentro las frecuencias de vibración identificadas, en algunos casos existen acoplamientos entre los modos de vibración de la estructura, como lo evidencia el hecho de que varias frecuencias identificadas en los componentes vertical, torsional y trasversal resultan ser las mismas.

Para el caso de las pilas, el programa de pruebas no fue lo suficientemente detallado como para determinar sus formas modales, pero las pruebas indicaron que hay una considerable interacción entre el tablero y las torres. Varias frecuencias identificadas en las pilas estuvieron asociadas con los movimientos del tablero.

En general dentro del comportamiento de los puentes atirantados se observó que sus frecuencias naturales aumentan a medida que disminuye la longitud del claro central y que la diferencia de claros, es el factor por el cual la variación de frecuencias de vibración entre un puente y otro puede ser mayor. Otro de los parámetros que influyen en la variación de las frecuencias es el tipo de atirantamiento, es decir el tipo de cables, la configuración de los cables y la configuración de los mástiles. Las frecuencias modales resultan ser mayores en un puente con una configuración de cables en dos planos que las de un puente con una configuración de cables en un plano, debido a que la primera configuración da mayor rigidez, esto es más evidente en los casos de torsión.

Observaciones como las anteriores, presentan excepciones, debido a la gran cantidad de parámetros que intervienen en una estructura, dando como resultado un comportamiento diferente para cada puente.

Este estudio queda como una fuente de información para estudios posteriores del puente Coatzacoalcos II. Se pueden confrontar las frecuencias y formas modales obtenidas 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 y llevar a cabo la calibración del modelo analítico del puente.

## VI. Referencias.

- A. Cunha, R. Calçada, E. Caetano y R. Delgado, (1995), "Dynamic tests on Vasco da Gama cable-stayed bridge", University of Porto, Portugal.
- A. M. Abdel-Ghaffar y G. W. Housner, (1978), "Ambient vibration tests of suspension bridge", American Society of Civil Engineers, Journal of the Engineering Mechanics Division, p 983-999, Pasadena California, EUA.
- C. C. Chang, T.Y.P. Chang y Q.W. Zhang, (2001), "Ambient vibration of long-span cable-stayed bridge", Journal of bridge engineering, p 46-53, Hong Kong.
- D. Murià-Vila y R. González Alcorta, (1995) "Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México", Instituto de Ingeniería, UNAM, p 25-45, México.
- D. Murià-Vila, G. Rodríguez Gutiérrez, (2002), "Análisis de los registros sísmicos obtenidos de 1993 a 1998 en el edificio Jal", Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- D. Murià-Vila, R. Sánchez Ramírez, R. Gómez Martínez, G. Rodríguez Gutiérrez, M. Mendoza García, A. Escobar Sánchez, J. E. Blanco, C. H. Huerta Carpizo y R. C. Mendoza Carvajal, (2003), "Pruebas experimentales en cinco tramos del Distribuidor Vial de San Antonio", Instituto de Ingeniería, UNAM, proy 3530, México.
- F. Vargas Gómez, (1982), "Construcción de un nuevo puente sobre el río Coatzacoalcos", Colegio de Ingenieros Civiles de México A.C., Ediciones especiales N° 2, p 1-35, México.
- S. Guzmán, I. Guzmán, D. Murià-Vila, F. Fernández, (1992), "Diseño e implementación de un sistema de captura y procesamiento de señales", Instituto de Ingeniería, UNAM, proy 0707, México.
- J. C. Wilson y Tao Liu, (1991), "Ambient vibration measurements on a cable-stayed bridge", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Department of Civil Engineering, McMaster University, p 723-747, Ontario Canada.
- Kazuhiko Kawashima y Shigeki Unjoh, (1991), "Seismic behavior of cables stayed bridges", Earthquake Engineering Division, Public Works Research Institute, Ministry of Construction, p 103-118, Yokohama, Japón.
- Kazuhiko Kawashima, Shigeki Unjoh y Meguru Tsunomoto, (1991), "Estimation of damping characteristics of cable stayed bridge for seismic design", Earthquake Engineering Division, Public Works Research Institute, Tsukuba Science City, p 407-426, Japón.

- N. Narita y K. Yokoyama, (1991), "A summarized account of damping and measures against wind action in cable-stayed bridges in Japan", Cable-stayed bridges, Elsevier Science Publishers B.V., p 257-278, Japón.
- Reed Jacobson, (2001), "Programación con Microsoft Excel 2001 Macros y Visual Basic para aplicaciones", Editorial Mc Graw Hill, España.
- R. Gómez, D. Murià-Vila, J. A. Escobar-Sánchez y R. Sánchez Ramírez, (2001) "Detección experimental y analítica de cambios estructurales de un puente atirantado", Instituto de Ingeniería, UNAM, Revista Internacional Información Tecnológica (ISSN: 0716-8756), vol12, N° 1, México.
- T.A. Wyatt, (1991), "The dynamic behavior of cable-stayed bridges: fundamentals and parametric studies", Cable-stayed bridges, Elsevier Science Publishers B.V., p 151-170, Japón.
- T. Miyata, (1991), "Design considerations for wind effects on long-span cable stayed bridges", Cable-stayed bridges, Elsevier Science Publishers B.V., p 235-255, Japón.

## **APENDICE A. Algoritmos para la identificación de las propiedades dinámicas**

Uno de los algoritmos más importantes de la macro, es el que se encarga de buscar la información en cada una de las hojas de cálculo y mostrarla por medio de una configuración modal. El propósito de mostrar éste algoritmo, es demostrar la sencillez de la programación y el potencial del mismo. Desde luego es tan sólo una parte de la macro.

Los renglones 1 y 26 indican el comienzo y fin de la macro respectivamente.

El renglón 2 selecciona la hoja "Modos" para poder visualizarla.

Los renglones 3 a 7 se refieren a un ciclo, en este caso que se repite 22 veces (se modifica de acuerdo a los puntos que intervienen en la medición de la estructura), que se encarga de borrar la información de un cuadro de datos, empezando en el renglón 52, para tres columnas (E, F y G) de una hoja de cálculo.

En los renglones 8 y 9 se obtiene el valor indicado en la celda D50, donde se indica la frecuencia para la cual se desean conocer los datos que conforman la configuración modal, el primero como valor y el segundo como texto.

Los renglones 10 a 22 se refieren a un ciclo, que se repite 22 veces (se modifica de acuerdo a los puntos que intervienen en la medición de la estructura). Dentro de este ciclo se encuentran un condicional (renglón 11), que de ser positiva la condición (renglón 12), se lleva a cabo otro ciclo (renglón 13 a 20), para este caso se repite 622 veces (varía de acuerdo al incremento entre las frecuencias y la duración de las pruebas). Este ciclo contiene un condicional (renglón 14), que de cumplir la condición se llevan a cabo las instrucciones de los renglones 15 a 17. De esta manera se barren cada una de las hojas de cálculo involucradas en una forma modal, en busca de los datos correspondientes a la frecuencia indicada.

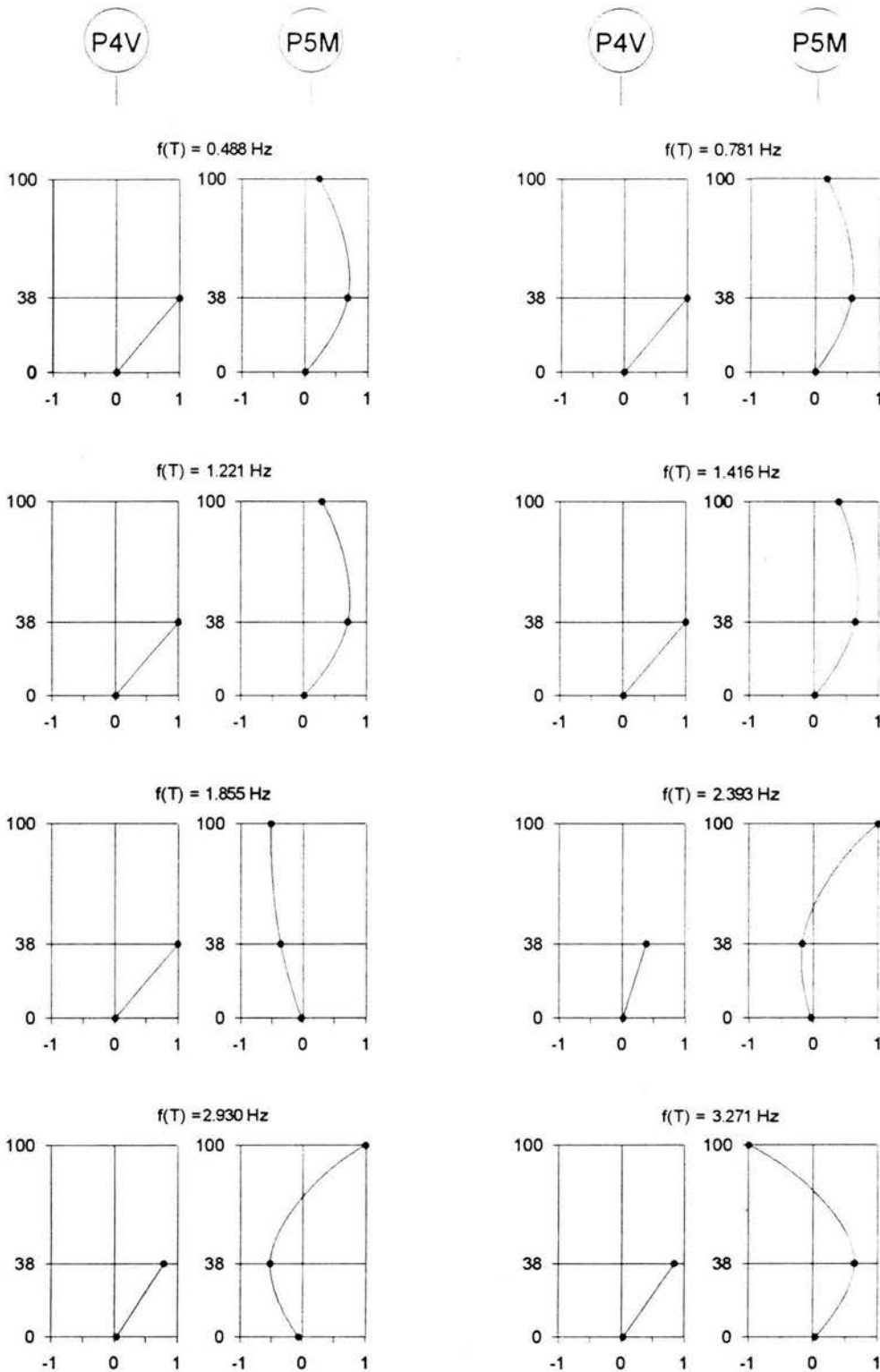
Los renglones 23 a 25 se refieren a una condición que de ser cumplida despliega el mensaje: *"No se encuentran datos para F=" & Frec\_txt & " Hz"*, donde *Frec\_txt* es el valor de la frecuencia analizada.

La programación del algoritmo descrito se muestra a continuación:

<i>Sub Captura()</i>	1
<i>Sheets("Modos").Select</i>	2
<i>For k = 1 To 22</i>	3
<i>Range("E" &amp; 52 + k) = ""</i>	4
<i>Range("F" &amp; 52 + k) = ""</i>	5
<i>Range("G" &amp; 52 + k) = ""</i>	6
<i>Next</i>	7
<i>Frec_vlr = Range("D50").Value</i>	8
<i>Frec_txt = Range("D50").Text</i>	9
<i>For i = 1 To 22</i>	10
<i>If Range("D" &amp; 52 + i).Text &lt;&gt; "" Then</i>	11
<i>Hoja = Range("D" &amp; 52 + i).Text</i>	12
<i>For j = 1 To 622</i>	13
<i>If Sheets(Hoja).Range("B" &amp; 7 + j).Value = Frec_vlr Then</i>	14
<i>Range("E" &amp; 52 + i).Value = Sheets(Hoja).Range("F" &amp; 7 + j).Value</i>	15
<i>Range("F" &amp; 52 + i).Value = Sheets(Hoja).Range("G" &amp; 7 + j).Value</i>	16
<i>Range("G" &amp; 52 + i).Value = Sheets(Hoja).Range("H" &amp; 7 + j).Value</i>	17
<i>j = 622</i>	18
<i>End If</i>	19
<i>Next</i>	20
<i>End If</i>	21
<i>Next</i>	22
<i>If Range("E53").Text = "" Then</i>	23
<i>MsgBox ("No se encuentran datos para F=" &amp; Frec_txt &amp; " Hz")</i>	24
<i>End If</i>	25
<i>End Sub</i>	26



**APENDICE B. Configuraciones modales en la dirección transversal (T) y longitudinal (L) de las pilas P4V y P5M, para todas las frecuencias identificadas en el tablero, en la dirección vertical (V) y trasversal (T).**



**Fig B.1 Configuraciones modales transversales de las pilas P4V y P5M del puente Coatzacoalcos II.**

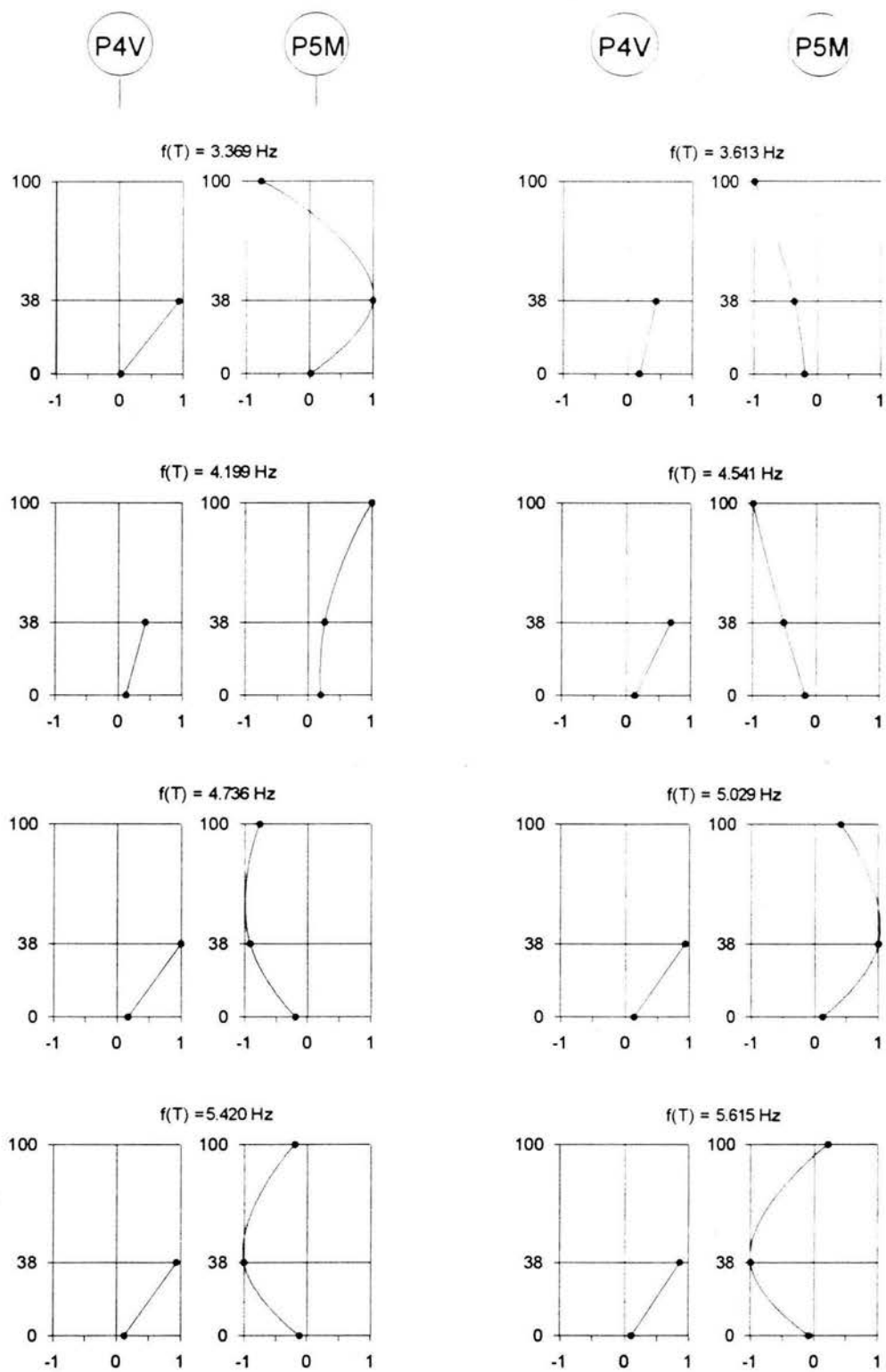


Fig B.2 Configuraciones modales transversales de las pilas P4V y P5M del puente Coatzacoalcos II.

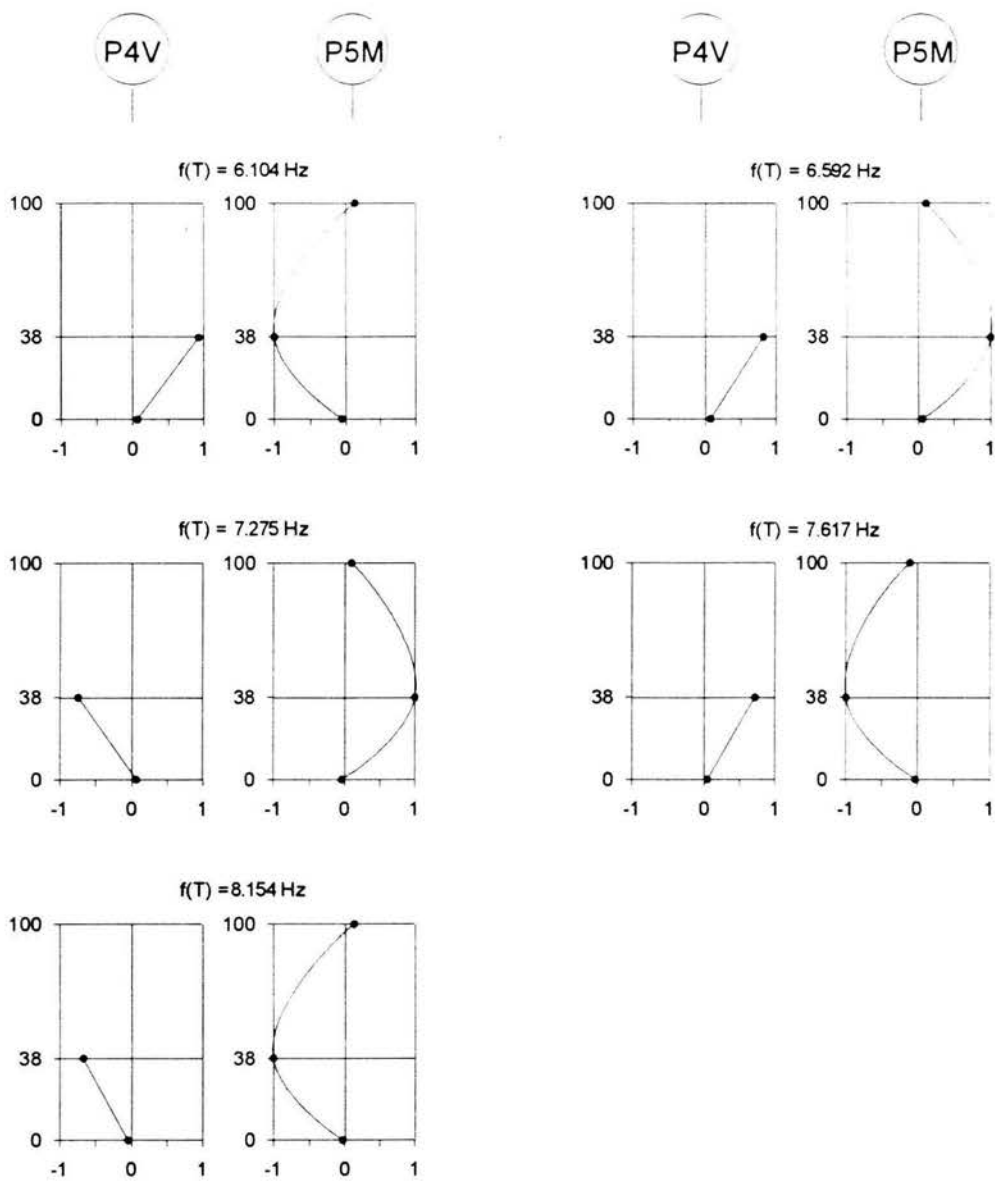


Fig B.3 Configuraciones modales transversales de las pilas P4V y P5M del puente Coatzacoalcos II.

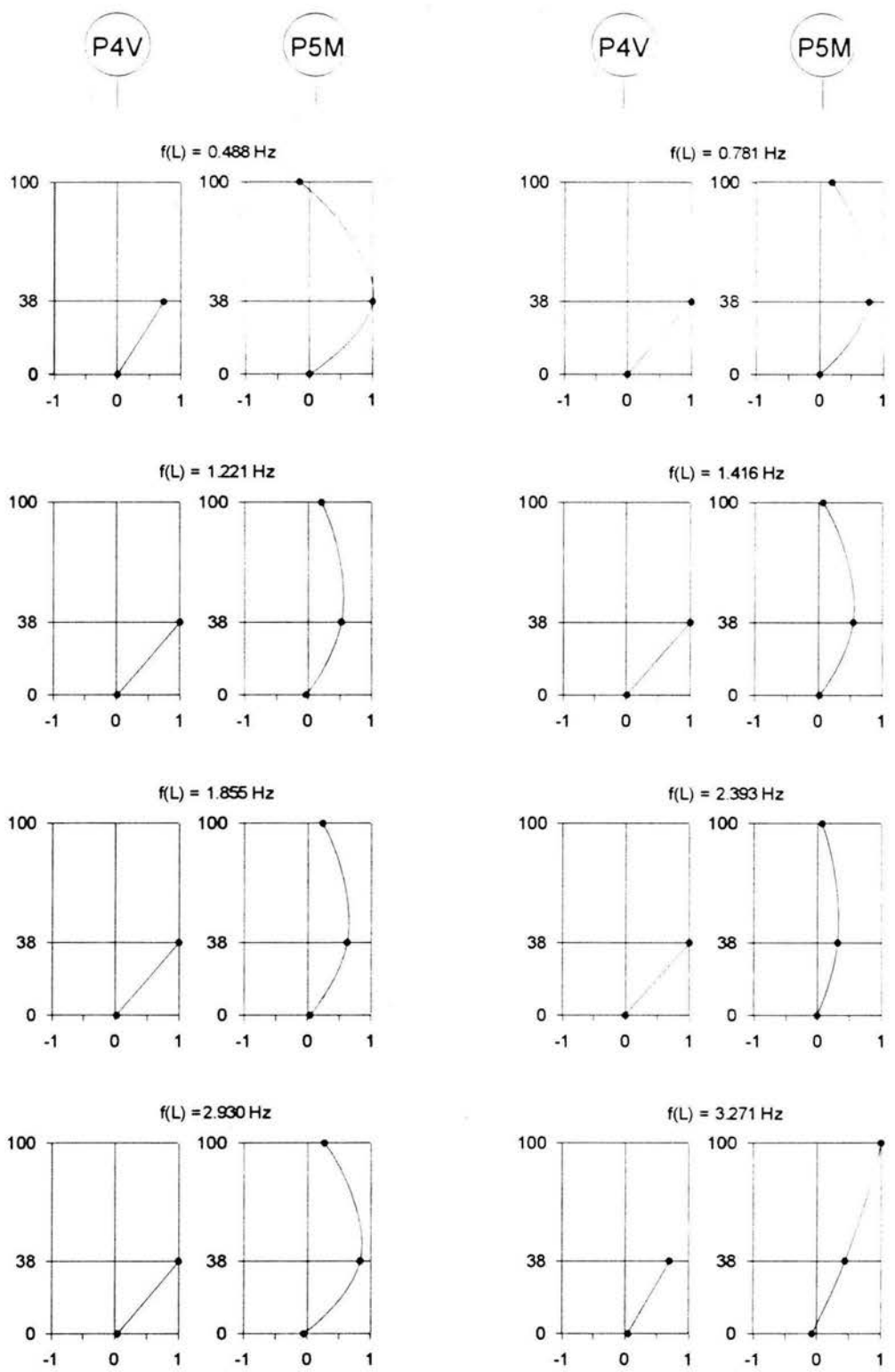


Fig B.4 Configuraciones modales longitudinales de las pilas P4V y P5M del puente Coatzacoalcos II.

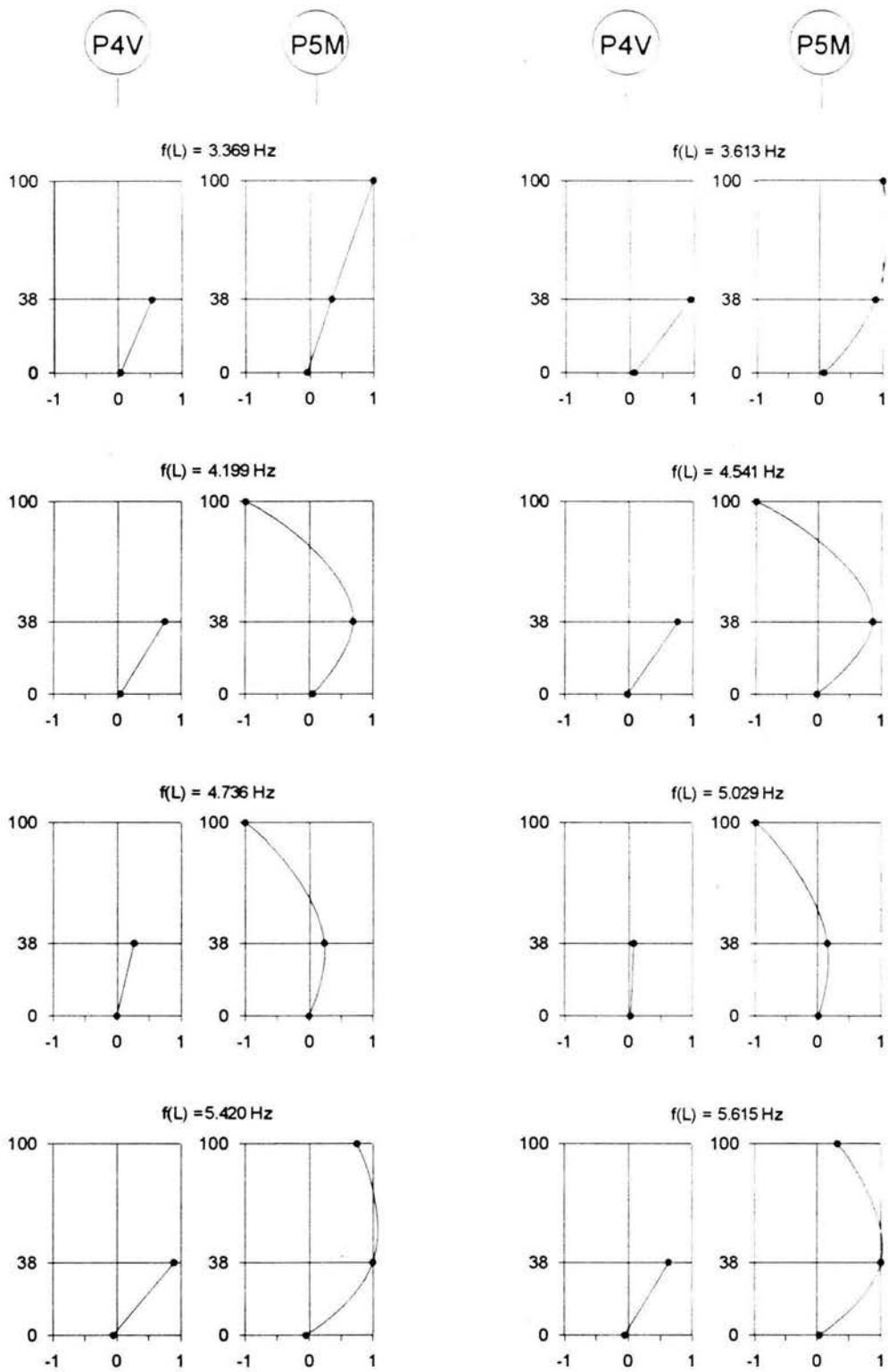


Fig B.5 Configuraciones modales longitudinales de las pilas P4V y P5M del puente Coatzacoalcos II.

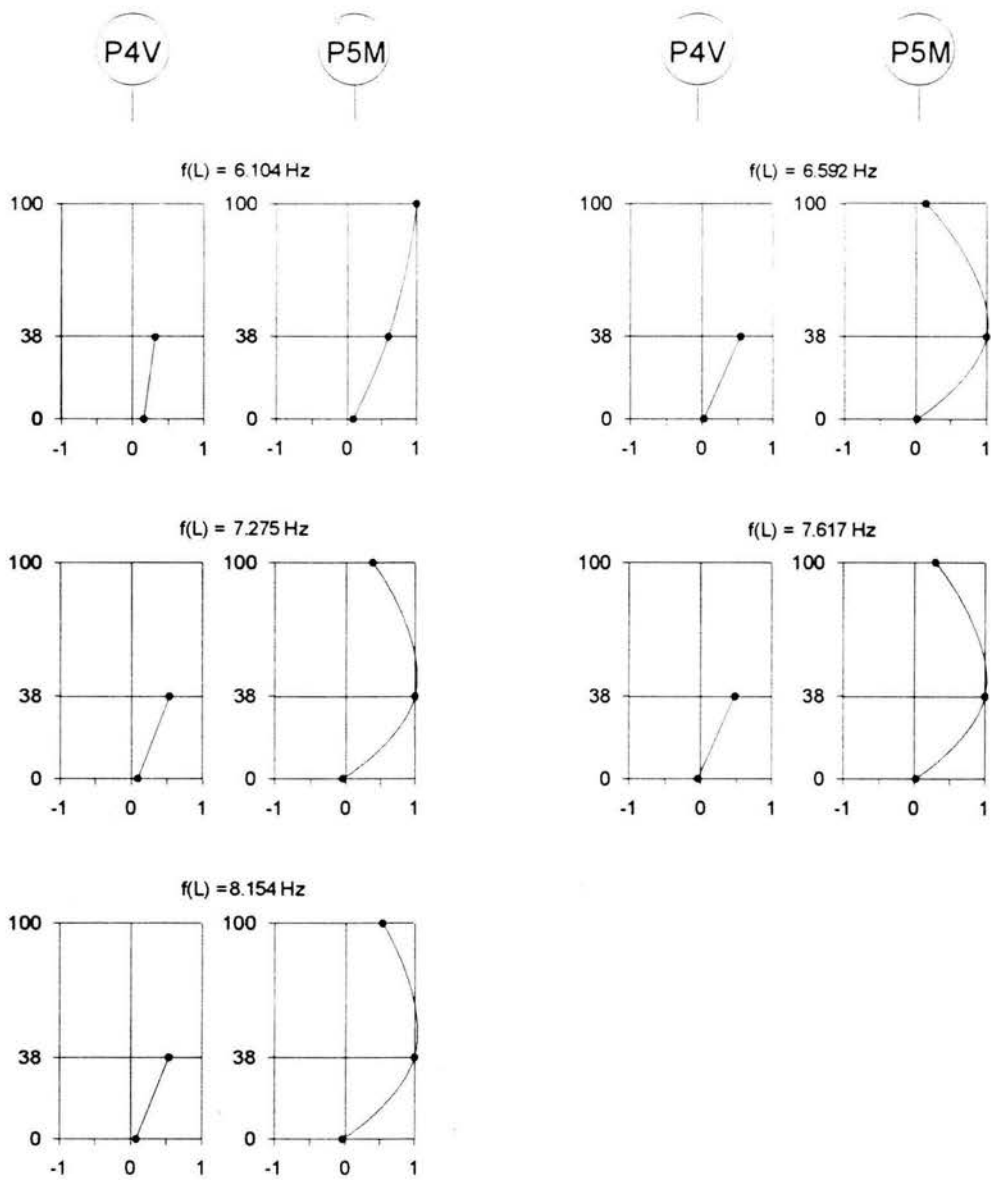
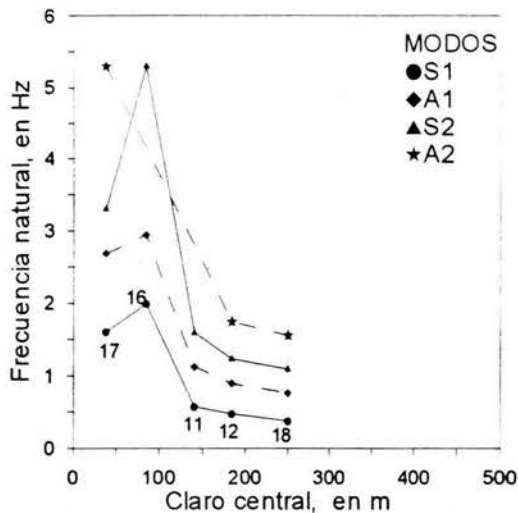
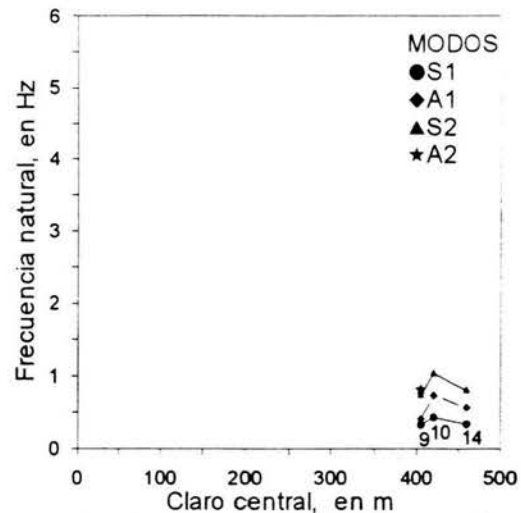


Fig B.6 Configuraciones modales longitudinales de las pilas P4V y P5M del puente Coatzacoalcos II.

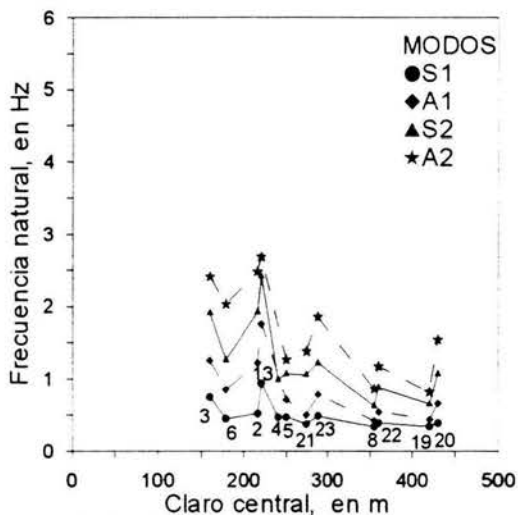
**APENDICE C. Variación de frecuencias naturales de acuerdo a la longitud del claro central de diferentes grupos de puentes de acuerdo a sus características (tipo de viga, tipo de cables, configuración de cables y mástiles)**



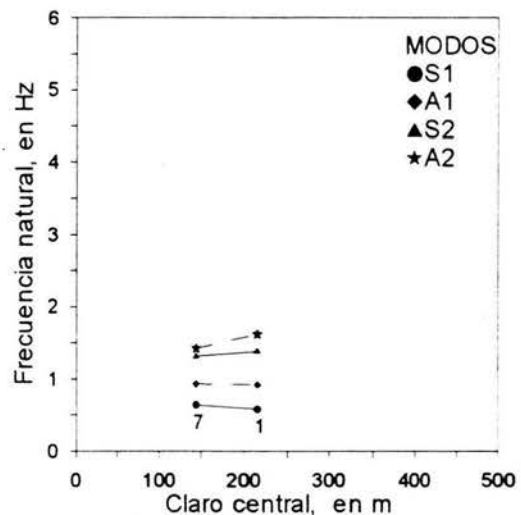
a) Cables de concreto presforzado CCP



b) Cables paralelos aislados CPA

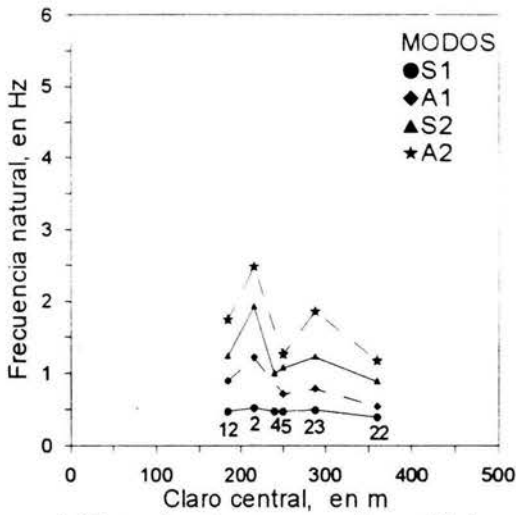


c) Cables paralelos aislados prefabricados CPAP

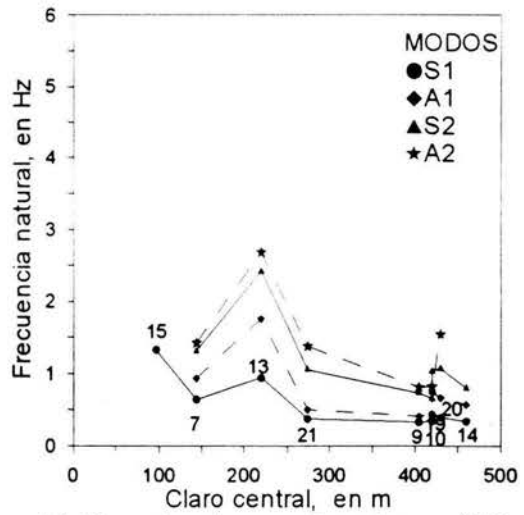


d) Espiral cerrado EC

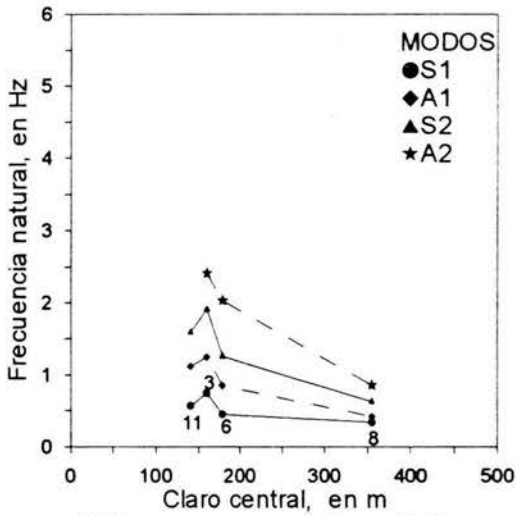
Fig C.1 Relación entre longitud del claro central y frecuencias naturales de algunos puentes atirantados, agrupados por su tipo de cables (los números identifican los puentes, de las tablas 4.2 a 4.5).



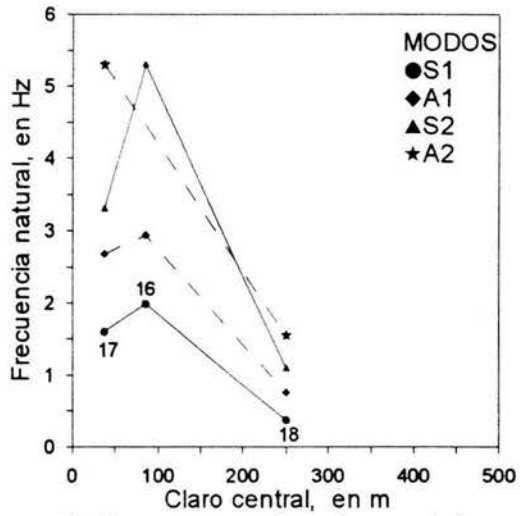
a) Tipo abanico en un plano Ab1



b) Tipo abanico en dos planos Ab2



c) Tipo arpa en un plano Ar1



d) Tipo arpa en dos planos Ar2

Fig C.2 Relación entre longitud del claro central y frecuencias naturales de algunos puentes atirantados, agrupados por la configuración de sus cables. (los números identifican los puentes, de las tablas 4.2 a 4.5).



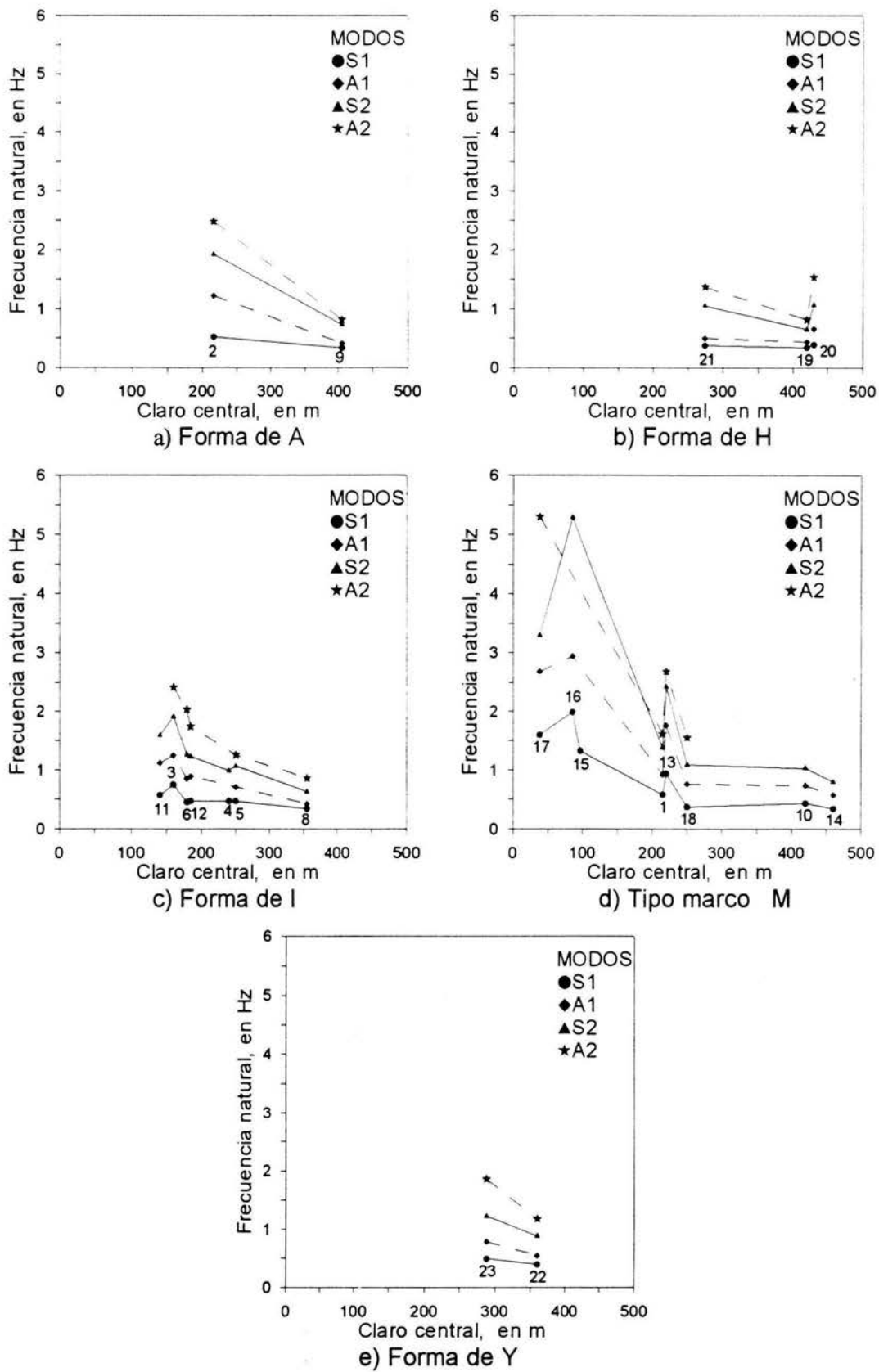
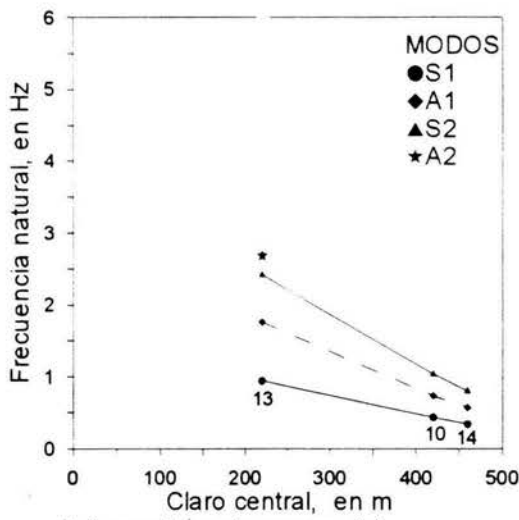
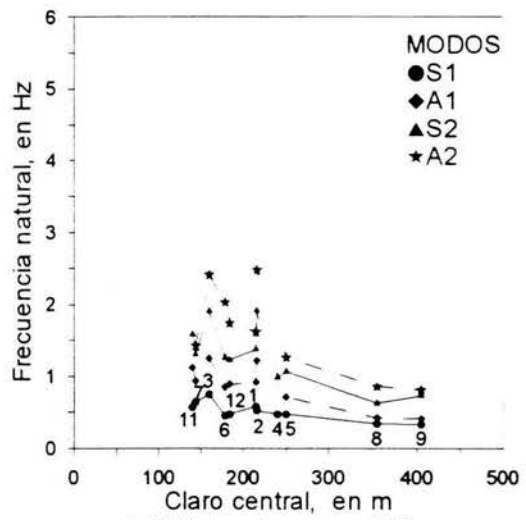


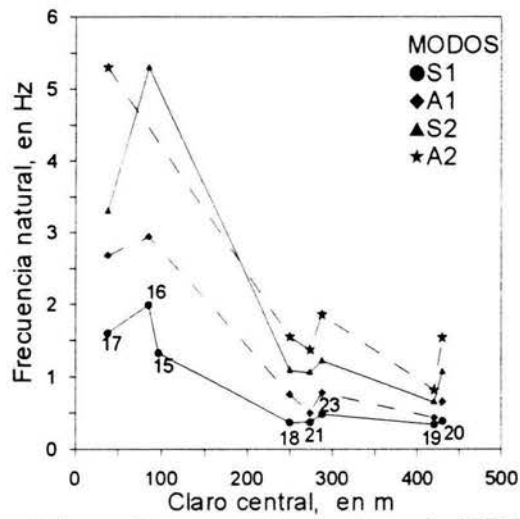
Fig C.3 Relación entre longitud del claro central y frecuencias naturales de algunos puentes atirantados, agrupados por la configuración de sus mástiles.



a) Armadura de acero AA

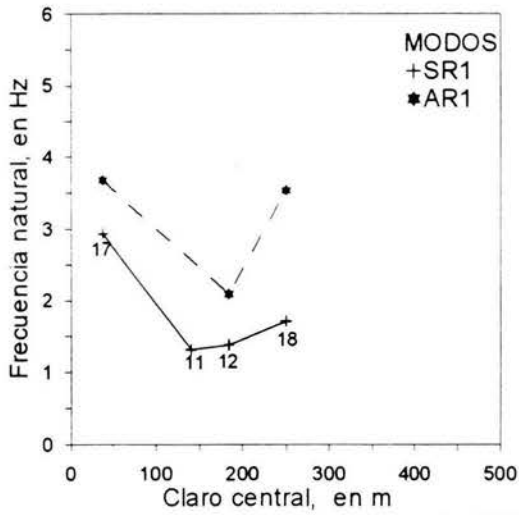


b) Vigas de acero VA

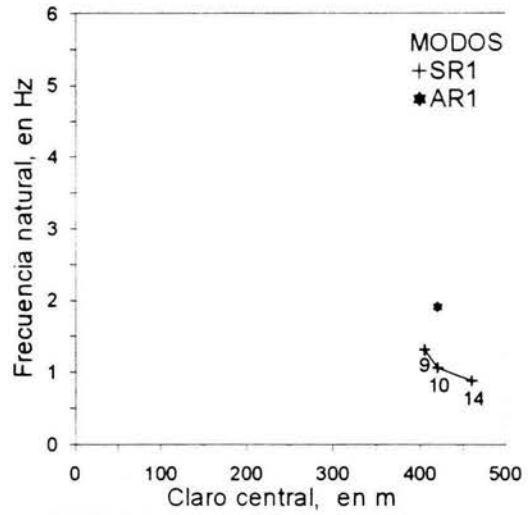


c) Vigas de concreto presforzado VCP

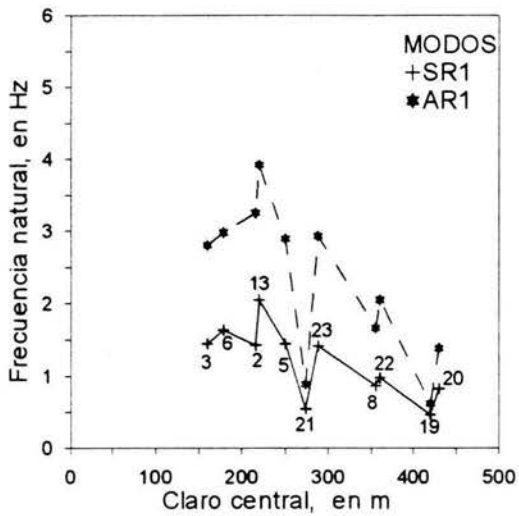
Fig C.4 Relación entre longitud del claro central y frecuencias naturales de algunos puentes atirantados, agrupados por su tipo de viga. (los números identifican los puentes, de las tablas 4.2 a 4.5).



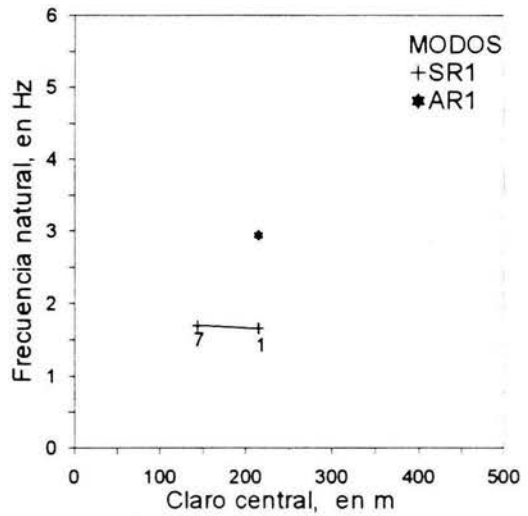
a) Cables de concreto presforzado CCP



b) Cables paralelos aislados CPA

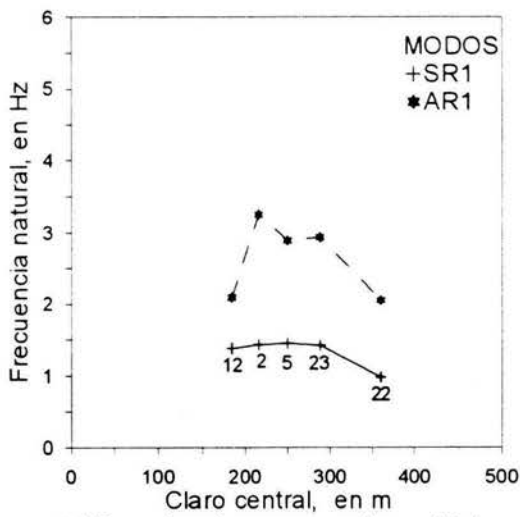


c) Cables paralelos aislados prefabricados CPAP

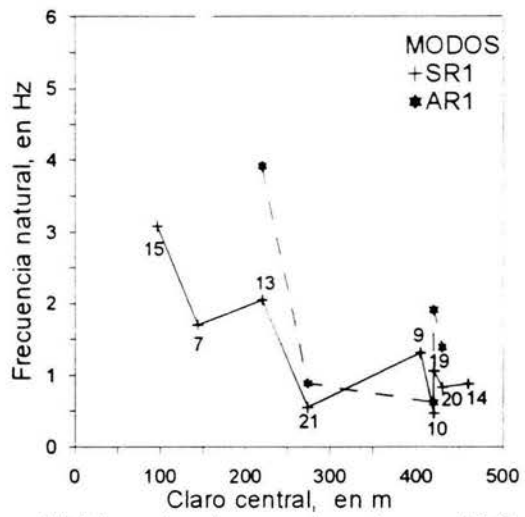


d) Espiral cerrado EC

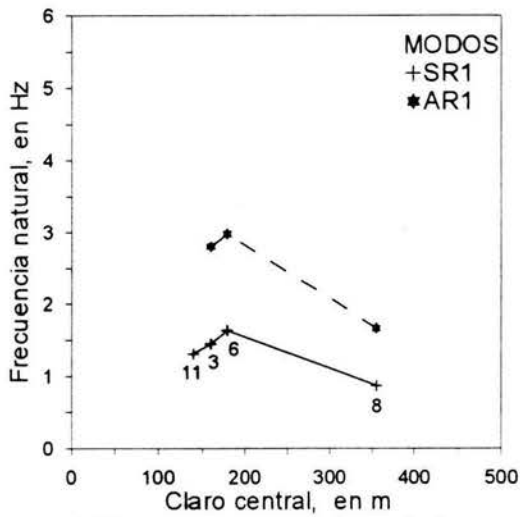
Fig C.5 Relación entre longitud del claro central y frecuencias naturales de algunos puentes atirantados, agrupados por su tipo de cables (los números identifican los puentes, de las tablas 4.2 a 4.5).



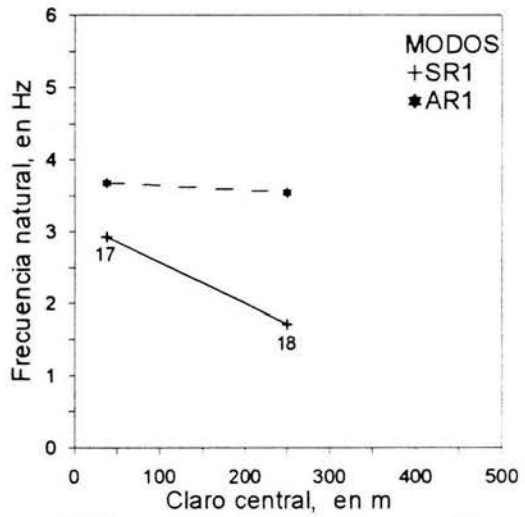
a) Tipo abanico en un plano Ab1



b) Tipo abanico en dos planos Ab2

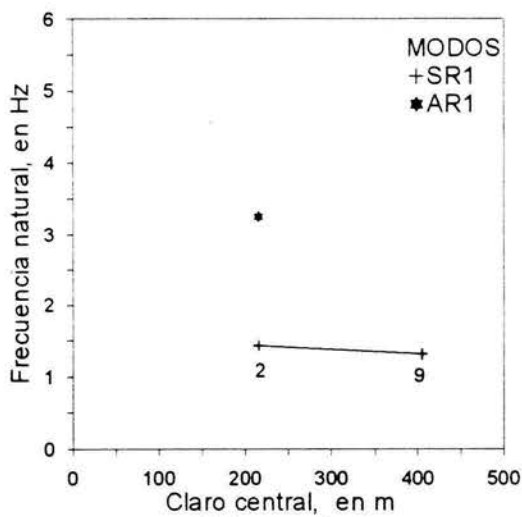


c) Tipo arpa en un plano Ar1

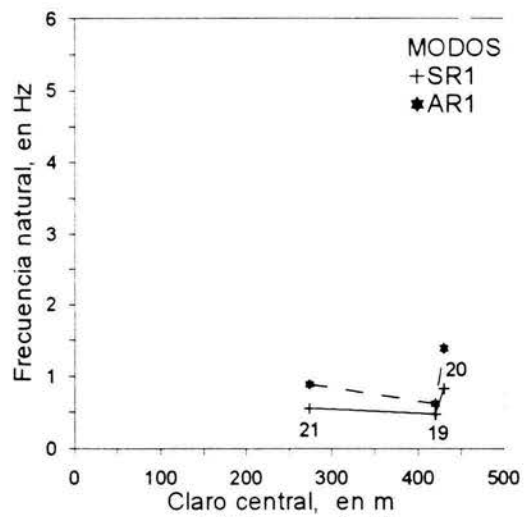


d) Tipo arpa en dos planos Ar2

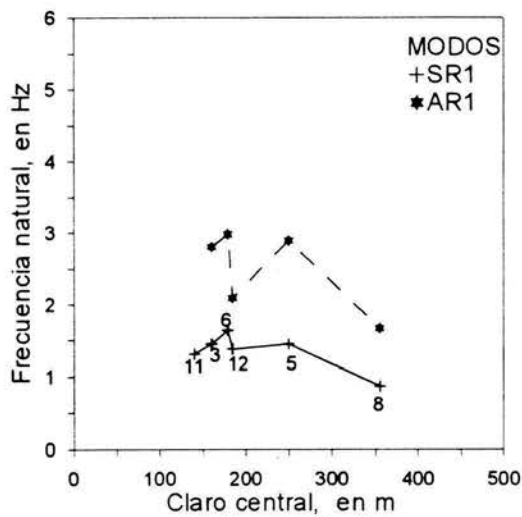
Fig C.6 Relación entre longitud del claro central y frecuencias naturales de algunos puentes atirantados, agrupados por la configuración de sus cables. (los números identifican los puentes, de las tablas 4.2 a 4.5).



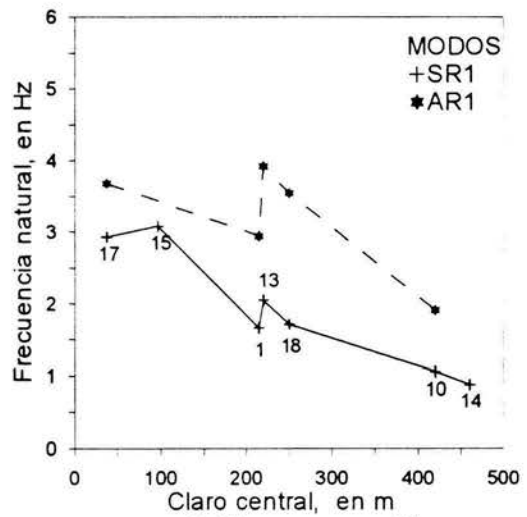
a) Forma de A



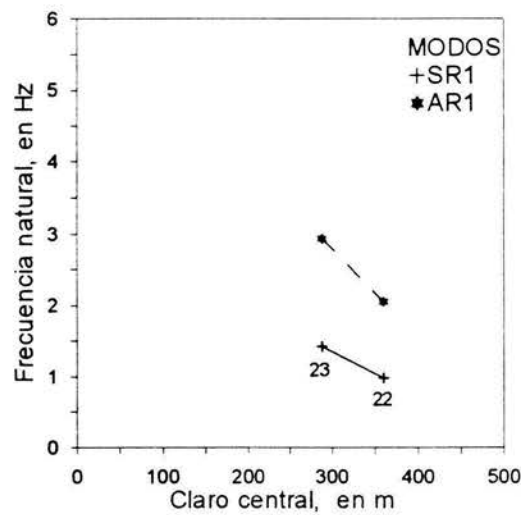
b) Forma de H



c) Forma de I

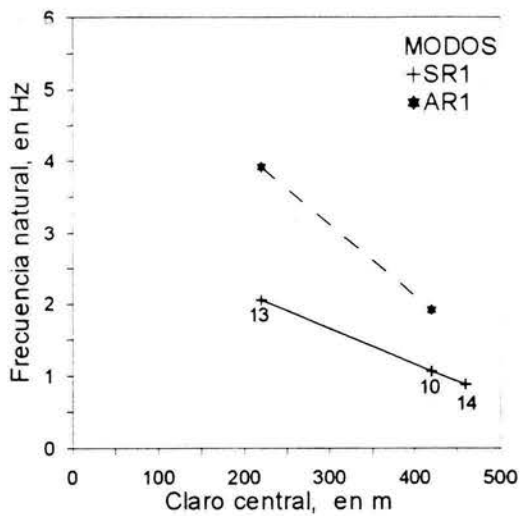


d) Tipo marco M

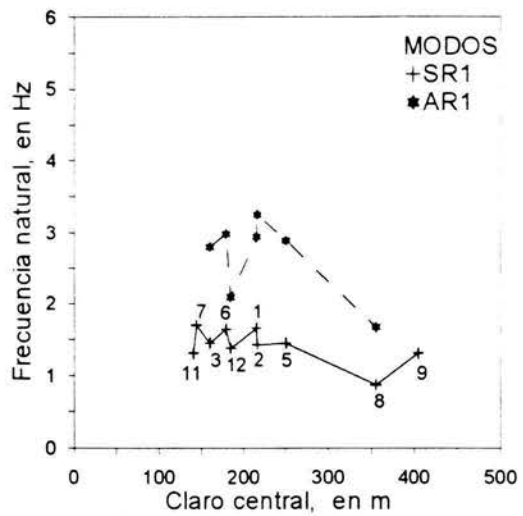


e) Forma de Y

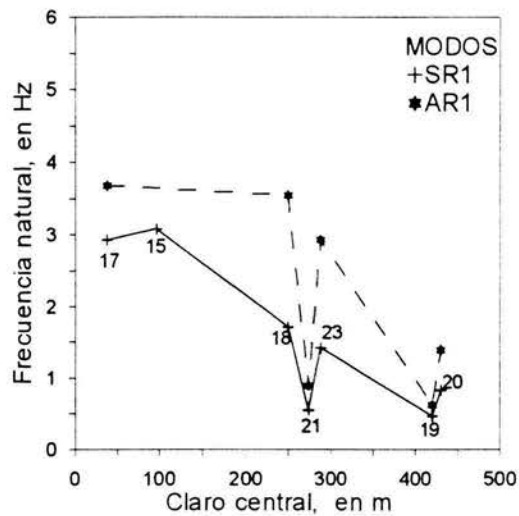
Fig C.7 Relación entre longitud del claro central y frecuencias naturales de algunos puentes atirantados, agrupados por la configuración de sus mástiles.



a) Armadura de acero AA



b) Vigas de acero VA



c) Vigas de concreto presforzado VCP

Fig C.8 Relación entre longitud del claro central y frecuencias naturales de algunos puentes atirantados, agrupados por su tipo de viga. (los números identifican los puentes, de las tablas 4.2 a 4.5).

#### **APENDICE D. Densidades espectrales, funciones de transferencia, ángulos de fase y coherencias de puntos en común de los puentes Coatzacoalcos II y Tampico.**

Las diferencias entre las frecuencias identificadas para cada uno de los puentes, pueden visualizarse fácilmente por medio de densidades espectrales y función de transferencia de algunos pares de puntos en común para ambos puentes.

La relación entre la posición de los pares de puntos a comparar, debe ser lo más semejante posible entre ambos puentes, con el propósito de que existan parámetros de comparación. Es decir, podrían compararse puntos que se encuentren en un extremo del tablero, con los que se encuentren a la mitad, a un tercio, etc, en ambos puentes, sólo debe guardarse la mayor semejanza entre los puntos de comparación.

Los cocientes elegidos para cada uno de los puentes fueron el 8/10 versus 8/12 y 14/8 versus 16/8. El primer cociente de cada par corresponde al puente Coatzacoalcos y el segundo al Tampico. Estos puntos fueron elegidos debido a su posición en cada uno de los puentes.

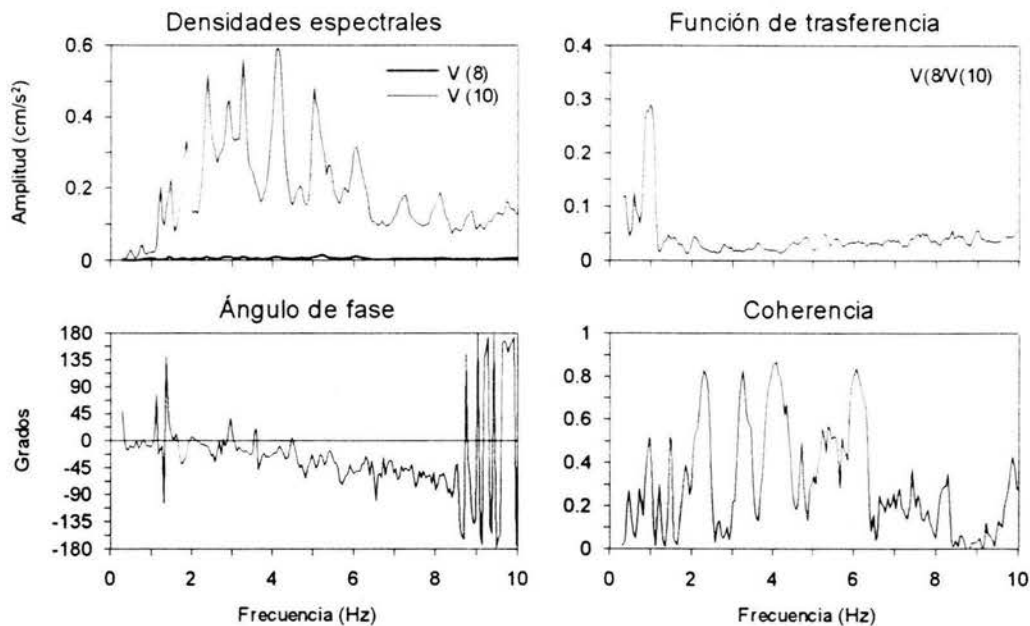
Las gráficas de los cocientes seleccionados en dirección vertical y transversal se muestran en las figs A.1 a A.4. En estas gráficas, se puede observar que las amplitudes del puente Tampico con respecto a las del Puente Coatzacoalcos son mayores, tanto en la dirección V como en la dirección T.

En la fig A.1 y A.2, se muestra el primer par de cocientes, 8/10 versus 8/12. Se trata de la relación de puntos que se encuentran en un extremo del claro central del tablero, comparados con puntos separados por una distancia aproximada de un décimo del claro central. En la dirección V (fig A.1), se puede observar que la forma de las densidades espectrales de los dos puentes, son muy semejantes. La semejanza entre dichas densidades espectrales, se confirma en la similitud de la función de transferencia de cada puente, con un ligero corrimiento entre ellas. En la dirección T (fig A.2), se pueden observar la presencia de algunas amplitudes máximas en las que sus frecuencias son muy semejantes para ambos puentes.

En la fig A.3 y A.4, se muestra el segundo par de cocientes, 14/8 versus 16/8. Se trata de la relación de puntos que se encuentran a una distancia aproximada de tres décimos de un extremo del claro central del tablero, comparados con puntos que se encuentran en dicho extremo.

Tanto en la dirección V como en la T, la forma de las densidades espectrales de los dos puentes, presentan marcadas diferencias entre sí, incluso una diferencia significativa en la escala de las amplitudes, aún en la función de transferencia. Algunas frecuencias asociadas a amplitudes máximas son muy semejantes para ambos puentes.

## COATZACOALCOS II



## TAMPICO

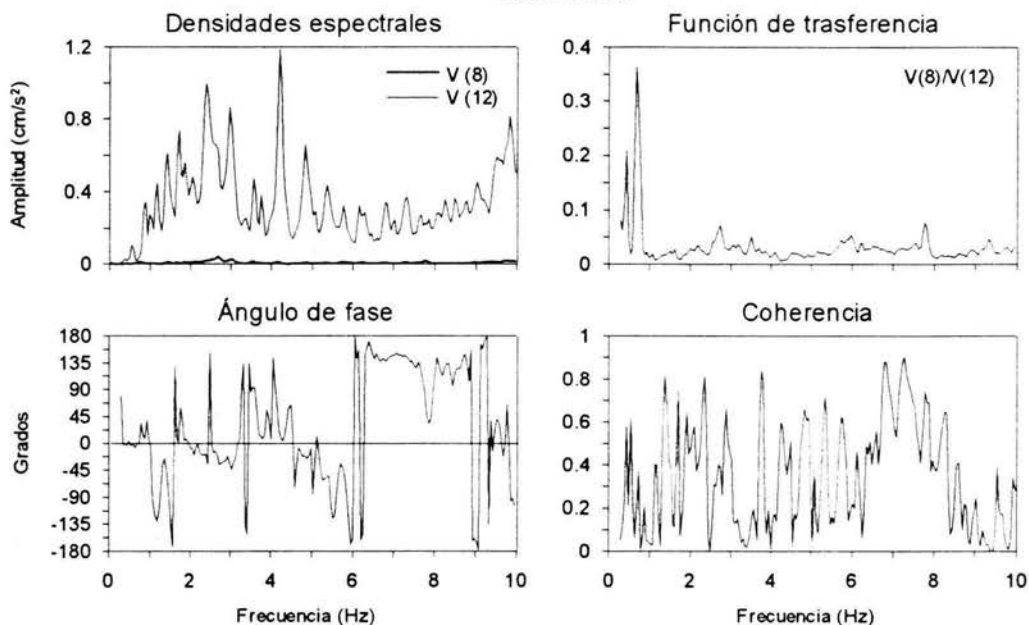
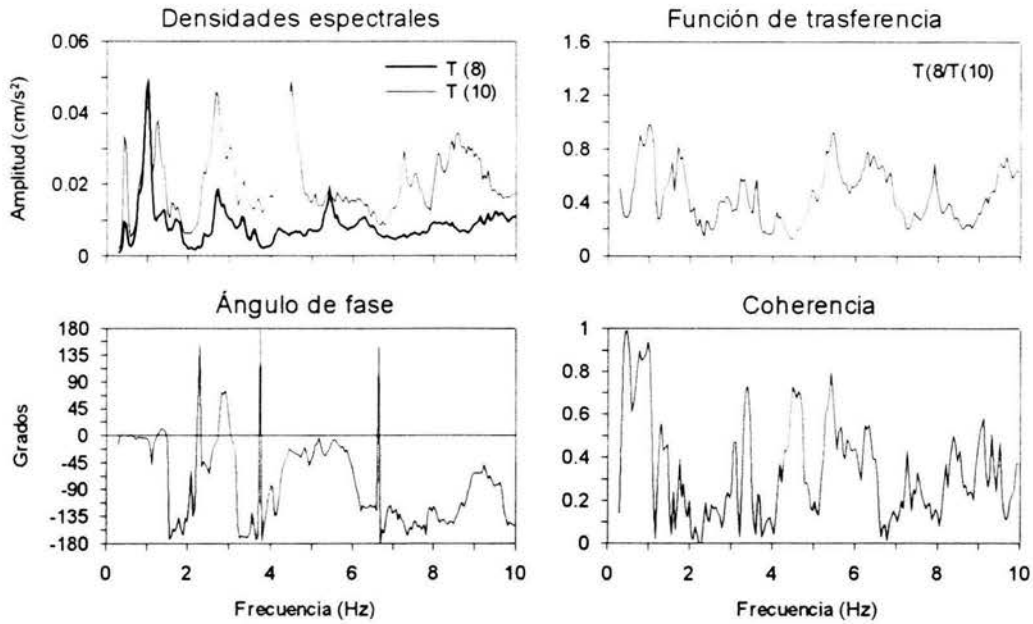


Fig D.1 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo de fase y coherencia de los puntos 8, 10, 12 y 8/10, 8/12 respectivamente en la dirección V, correspondientes al tramo central de los puentes Coatzacoalcos II y Tampico respectivamente.



## COATZACOALCOS II



## TAMPICO

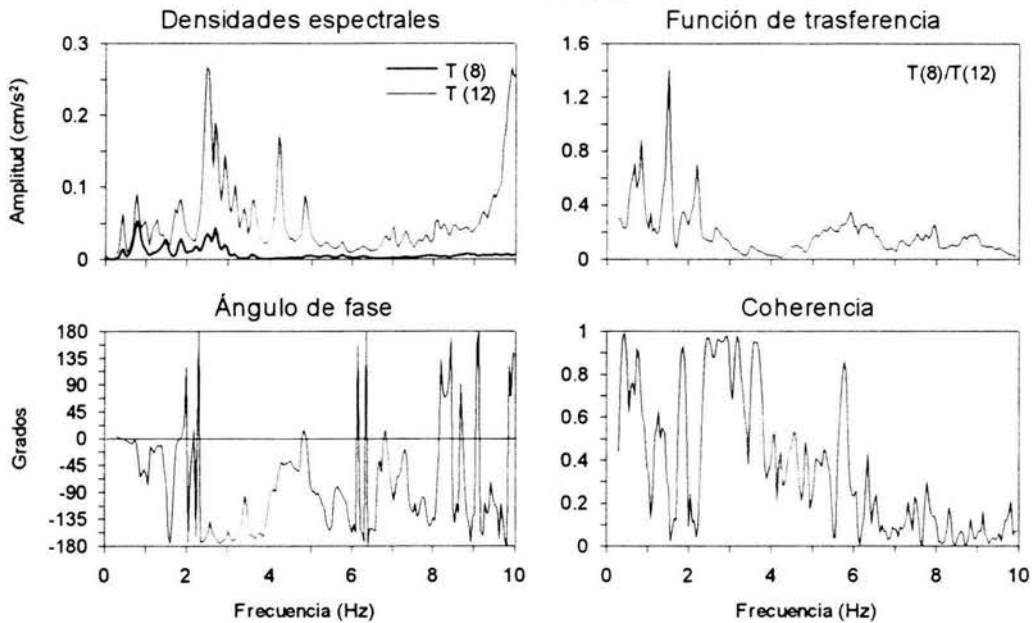
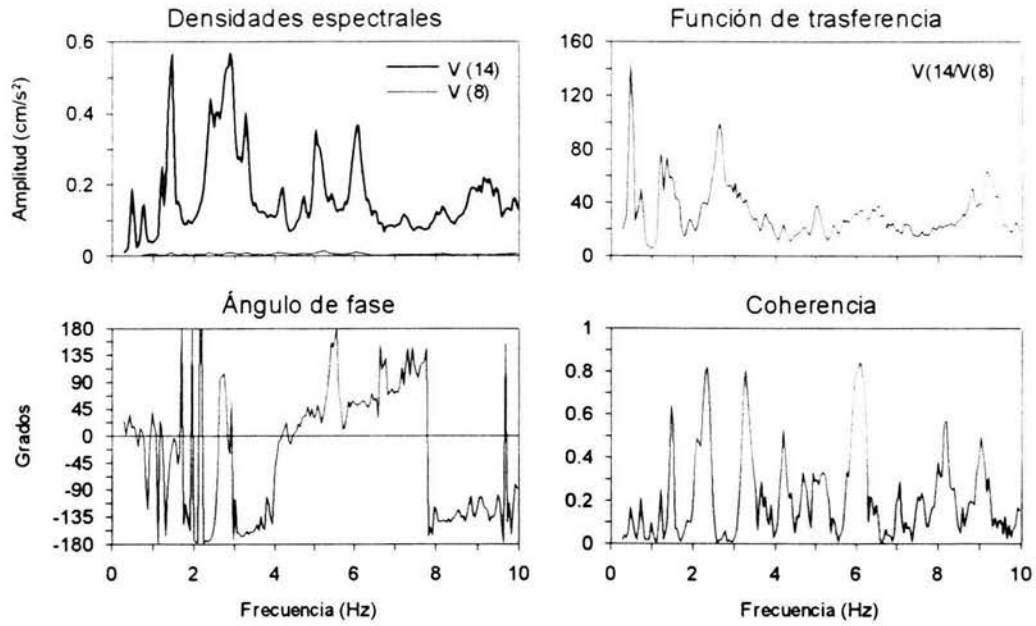


Fig D.2 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo de fase y coherencia de los puntos 8, 10, 12 y 8/10, 8/12 respectivamente en la dirección T, correspondientes al tramo central de los puentes Coatzacoalcos II y Tampico respectivamente.

## COATZACOALCOS II



## TAMPICO

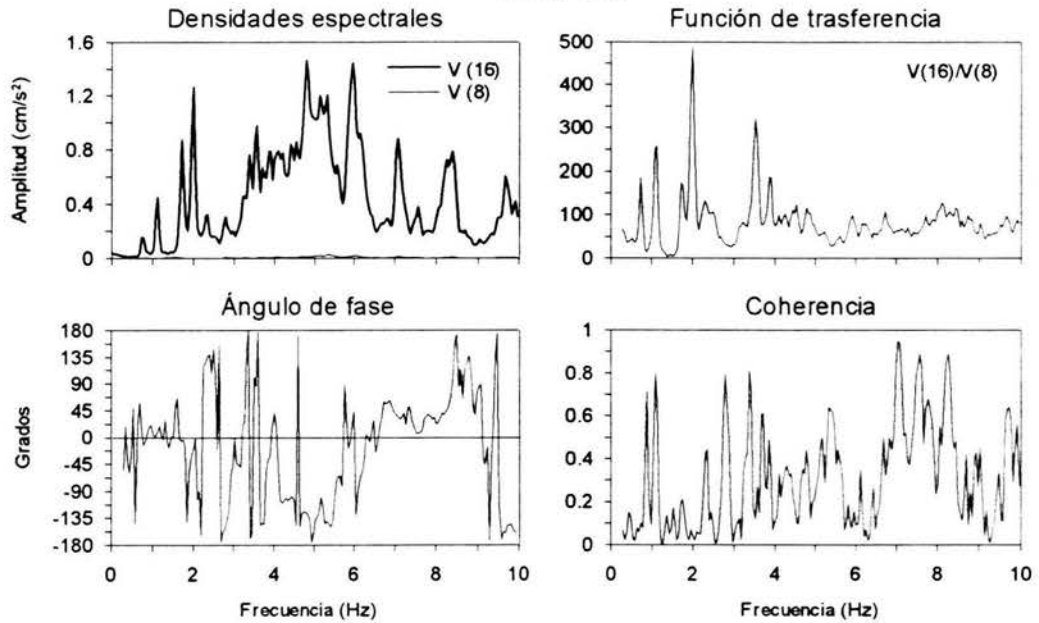
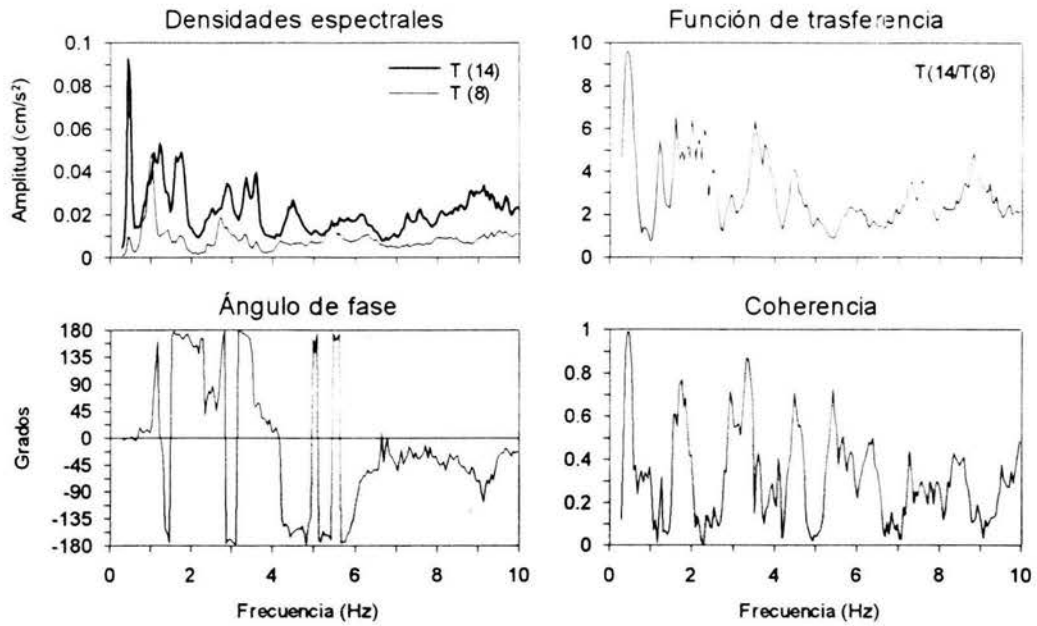


Fig D.3 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo de fase y coherencia de los puntos 8, 14, 16 y 14/8, 16/8 respectivamente en la dirección V, correspondientes al tramo central de los puentes Coatzacoalcos II y Tampico respectivamente.

## COATZACOALCOS II



## TAMPICO

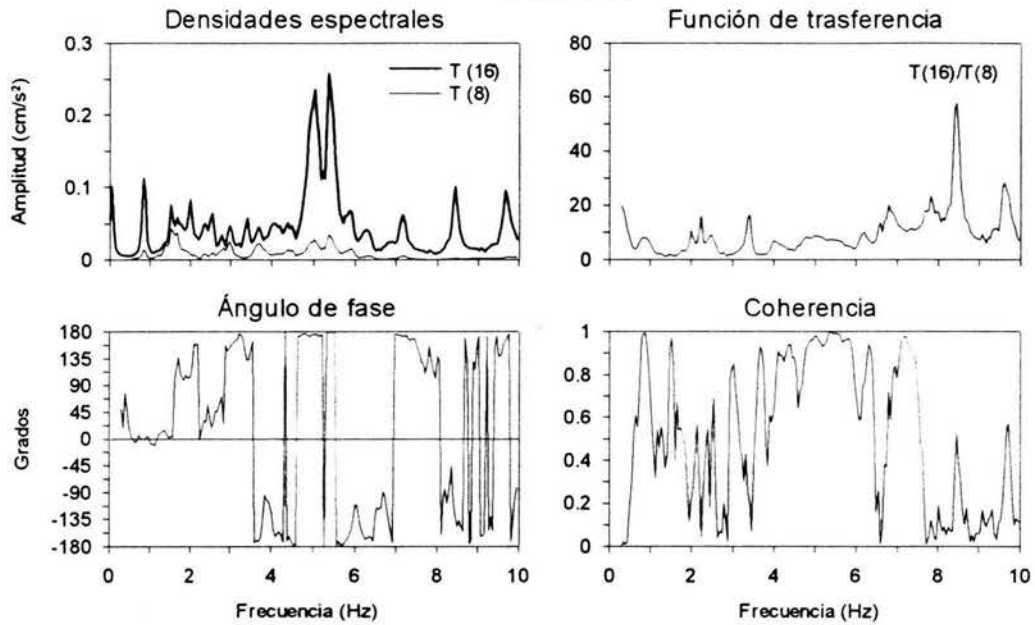


Fig D.4 Densidades espectrales, función de transferencia, ángulo de fase y coherencia de los puntos 8, 14, 16 y 14/8, 16/8 respectivamente en la dirección T, correspondientes al tramo central de los puentes Coatzacoalcos II y Tampico respectivamente.