



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN TRAMO TÍPICO DE UNA  
VIA ELEVADA A TRAVÉS DEL USO DE ACCELERÓMETROS”**

**T E S I S**

PRESENTADA POR:

**Karla Guadalupe Sumuano Morales**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

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



**MÉXICO, D.F.**

**AGOSTO 2012**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## DEDICATORIA

Porque tú eres parte fundamental de esta gran aventura gracias María de la Luz Morales de la Cruz por tu gran esfuerzo, valor y dedicación, ¡mamí te amo!

A mi papá Carlos Isunza Reyes,... "porque PADRE no es el que engendra... sino el que cría... Gracias siempre has estado ahí cuando más te necesito.

Porque mi mamá siempre dijo que yo tenía que ser tu ejemplo, para ti mi gran y único hermano Rafael Sumuano Morales, por estar ahí siempre conmigo.

A una gran amiga que se atravesó en mi camino y comparte el asiento de la mesa para cuando realizo mis tareas Kalí e hijas, Pepina y Pautí.

Porque en casa nunca me faltaron las porras y los aventones señores Jorge y Margarita gracias por la confianza y la oportunidad. A los cuñis Beré, Marcos y Oralía por su comprensión y su gran apoyo.

A mis sobrinos, primos y tíos, que siempre me daban palabras de aliento, consejos, ayudas y demás ¡gracias! A mis Tías Hilda y Carolina por siempre creyeron en mí.

Para aquellos que confiaron en mí, mis compañeros y amigos Faby, Claudia y Flor... muchos más que me faltarían manos... A todo ellos por el gran apoyo mutuo.

Que decir a los grandes amigos que hice en el instituto Marco, Joel, Dany's y Jorge.

Porque ellos fueron la razón de mi trabajo y esfuerzo, ellos que siempre me han levantado en cada desplome y me han dado la mejor lección de mi vida. De ellos estoy orgullosa porque me dieron la oportunidad de crecer junto con ellos, siempre han confiaron ciegamente en mí. A mis amores Jorge y Santiago los amo.

A tí que te atravesaste en mi camino y decidiste darme la oportunidad de crecer junto a tí. Que con tu gran amor, paciencia, dedicación, esfuerzo y confianza lo pude lograr. Gracias por el beso. Y sí ¡acepto! ¡TE amo! CRAC.

## AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Ingeniería por abrirme sus puertas y poder realizar uno de mis sueños.

Porque es un ejemplo a seguir desde que lo conocí al M.I. Gerardo Rodríguez Gutiérrez por darme la oportunidad de aprender de él, por su gran apoyo constante y paciencia.

A M.I. Alba Beatriz Vázquez González, M.I. Miguel Ángel Rodríguez Vega, Ing. Marcos Trejo Hernández y M.I. Miguel Ángel Mendoza García por su apoyo, observaciones y revisión del texto.

Al personal que labora en el Instituto de Ingeniería UNAM, por las facilidades y contribución de las pruebas de campo, al igual que a los becarios Joel Cortes Patiño, Marco Antonio Mendoza Salas, José Camargo, Daniel Barrios Ramírez.

A la Facultad de Ingeniería por abrirme sus puertas y a todos mis profesores de carrera por impulsarme en el desarrollo profesional a todo ellos ¡infinitas gracias!

A mi alma mater “Universidad Nacional Autónoma de México” por permitirme ser parte de ella por siempre.

**Todos somos muy ignorantes. Lo que ocurre es que no todos ignoramos las mismas cosas. (Albert Einstein)**

“En este lugar  
perdemos demasiado tiempo  
mirando hacia atrás.

Camina hacia el futuro,  
abriendo nuevas puertas  
y probando cosas nuevas.

Sé curioso...  
porque nuestra curiosidad  
siempre nos conduce por nuevos caminos” (Walt Disney)

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
Antecedentes .....	1
Objetos y alcances.....	1
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL TRAMO EN ESTUDIO</b> .....	3
1.1 Ubicación y propósito de la obra .....	3
1.2 Descripción del sistema estructural .....	5
<b>2. PRINCIPALES PRUEBAS DE CAMPO EN VIAS ELEVADAS</b> .....	8
2.1 Pruebas de Vibración Ambiental.....	8
2.2 Pruebas de Carga Dinámica.....	8
2.3 Pruebas de Tracción .....	10
<b>3. PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNA VIA ELEVADA</b> .....	11
3.1 Información obtenida durante las pruebas de vibración ambiental.....	11
3.2 Metodología Experimental.....	11
3.2.1 Pruebas de Vibración Ambiental.....	13
3.2.2 Pruebas Terreno-Cimentación .....	16
3.2.3 Pruebas de Carga Dinámicas .....	16
3.2.4 Pruebas de Tracción .....	19
3.3 Descripción de los sensores y equipo .....	20
3.4 Conceptos básicos de señales y sistemas.....	23
<b>4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b> .....	27
4.1 Resultados de pruebas de Vibración Ambiental .....	27
4.2 Efectos de interacción Terreno – Cimentación .....	40
4.3 Resultado de pruebas Dinámicas .....	45
4.4 Resultados de pruebas de Tracción .....	51
<b>5. COMENTARIOS FINALES</b> .....	56
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	57
<b>7. REFERENCIAS</b> .....	59

## ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN TRAMO TÍPICO DE UNA VIA ELEVADA A TRAVÉS DEL USO DE ACCELERÓMETROS.

### INTRODUCCIÓN

#### Antecedentes

Durante las últimas dos décadas en México se pretende mejorar y ampliar la capacidad de las principales vías de acceso controlado, permitiendo así una adecuada movilidad de personas, bienes y servicios; una de las principales opciones que en México se ha asumido para lograr este objetivo, son las vías elevadas. De manera particular la Vía Elevada en estudio, tiene como intención hacer eficiente la circulación del tránsito vehicular sobre el Periférico Norte, desde Cuatro caminos hasta Tepalcapa, en el Estado de México; tiene una longitud de 22 kilómetros en su primera etapa y a su vez está dividida en cinco tramos.

Debido a su importancia y a la necesidad de revisar el estado inicial de la estructura, se realizaron estudios experimentales a la Vía Elevada, consecutivamente tener un historial completo y actualizado del comportamiento estructural, para las posteriores labores de mantenimiento periódicas que se vayan a realizar. Los estudios consistieron en pruebas de vibración ambiental, pruebas estáticas y dinámicas (de carga vehicular), así como pruebas de tracción, con un equipo como son: transductores de desplazamiento, deformímetros, inclinómetros, acelerómetros, entre otros.

Cabe mencionar que las pruebas ejecutadas a la Vía Elevada se realizaron antes de que se inaugurara, con el fin de corroborar que la Vía Elevada se encontraba en perfectas condiciones para su uso; a su vez se necesitaba entender e interpretar con seguridad, la respuesta de la Vía a diferentes tipos de sollicitaciones dinámicas como son tráfico vehicular, viento y sismo.

El procesamiento, análisis e interpretación de datos que nos proporcionen las pruebas realizadas con el equipo y sensores, determinaremos la cinemática de un tramo de la Vía para ser utilizadas posteriormente.

El procesamiento, análisis e interpretación de datos que nos proporcione el equipo de acelerómetros a través de vibración ambiental, nos ayudara a determinar la cinemática de un tramo de la Vía Elevada para ser utilizadas posteriormente.

#### Objetivos y alcance

En la Vía Elevada se realizó un programa de pruebas utilizando el método de Vibración Ambiental a través del uso de acelerómetros, con el fin de comprender el comportamiento de esta superestructura; mediante la obtención de los efectos de interacción suelo

estructura y de sus propiedades dinámicas como son: frecuencias naturales, formas modales y coeficientes de amortiguamiento.

A partir de las propiedades cinemáticas de la Vía será posible efectuar comparaciones futuras sobre la condición de la estructura y sus variantes; así mismo se pretende observar el comportamiento de la estructura mediante condiciones normales de servicio así como de carga extrema.

Por medio de la información de los acelerómetros se obtuvieron datos necesarios para el análisis e interpretación de señales, pretendiendo así la determinación de la cinemática de la Vía Elevada que se presenta en este trabajo. Donde primeramente se describe el tramo en estudio de la Vía Elevada, posteriormente se describe la metodología experimental llevada a cabo en el método de VA, se menciona el programa de pruebas llevadas a cabo y a partir de los resultados obtenidos se realizan comentarios en relación a las propiedades dinámicas de la estructura y la influencia del terreno adyacente.

# DESCRIPCIÓN DEL TRAMO EN ESTUDIO

## 1. DESCRIPCIÓN DEL TRAMO EN ESTUDIO

### 1.1 Ubicación y propósito de la obra

Esta Vía se encuentra sobre periférico Norte desde Cuatro Caminos hasta Tepalcapa, en el Estado de México.

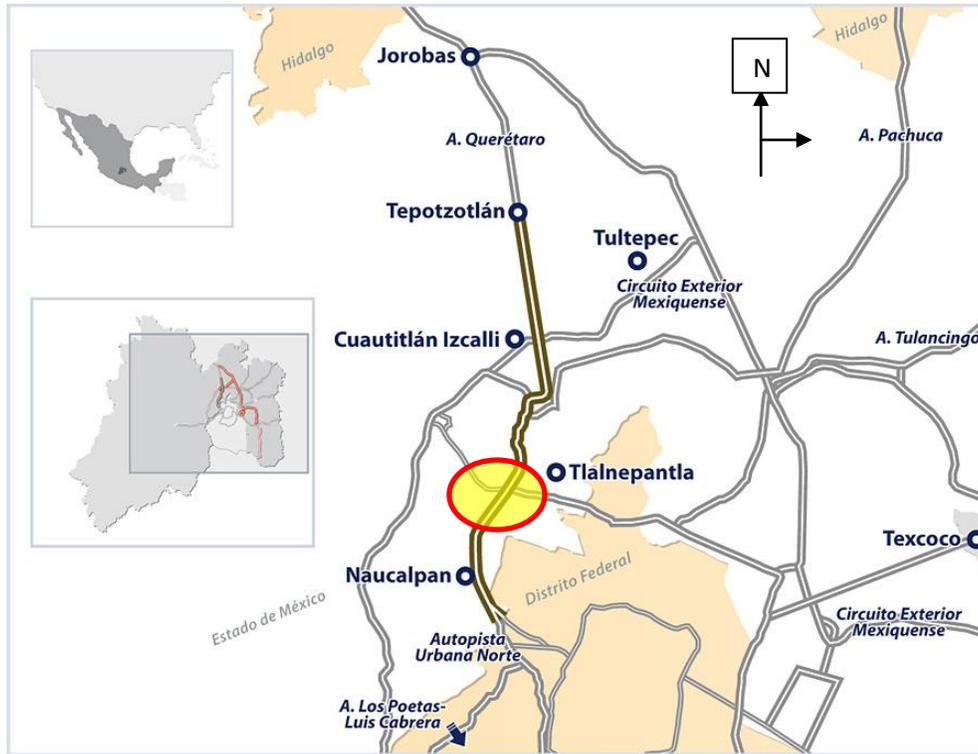


Fig. 1.1 Ubicación del sitio de estudio

Como primera etapa de 22 Km se realizó de Tereo Cuatro Caminos a Tepalcapa y esta a su vez se divide en cinco tramos.



Fig. 1.2 Ubicación del tramo en estudio

## DESCRIPCIÓN DEL TRAMO EN ESTUDIO

Únicamente el tramo en estudio, es el tres que corre de Santa Mónica a Valle Dorado, con longitud de 3 Km.

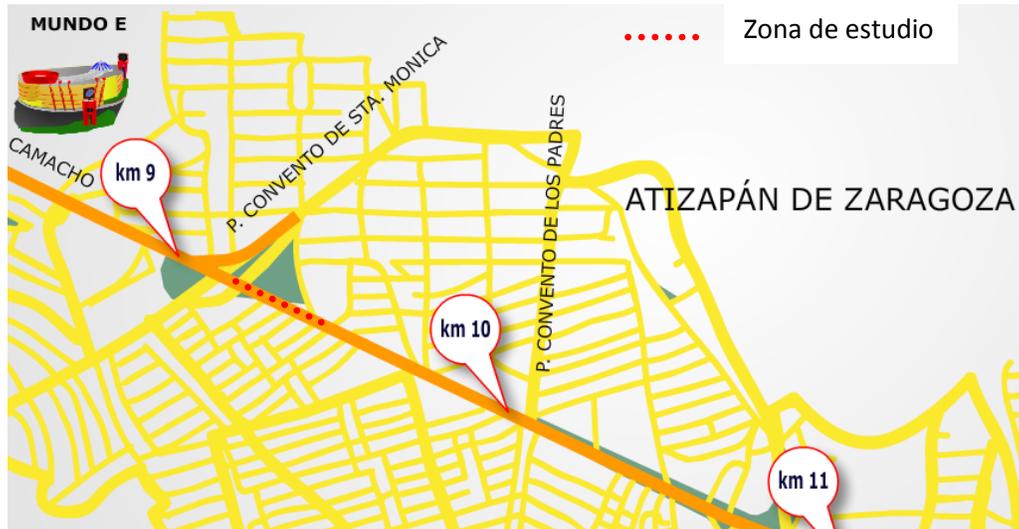


Fig. 1.3 Ubicación de la zona



Fig. 1.4 Perspectiva del sitio

# DESCRIPCIÓN DEL TRAMO EN ESTUDIO



Fig. 1.5 Perspectiva del sitio en estudio

El propósito de la obra es comunicar varios municipios de la zona conurbada del Estado de México y reducir el tiempo de recorrido de Tere de Cuatro Caminos a Tepalcapa y viceversa; poder abandonar esta vía en cualquiera de sus trece salidas donde sea más práctico y útil.

## 1.2 Descripción del sistema estructural

La Vía Elevada se caracteriza por estar conformada por traveses rigidizados apoyados sobre columnas y cabezales. El tramo de estudio consistió en 9 columnas y 9 traveses, haciendo incipiente que los marcos de arreglo están dados en pares de columnas Fig. 1.6. También cabe recalcar que la mayor parte del estudio se realizó en las columnas A240, A241 y A242 así como en sus respectivas traveses.

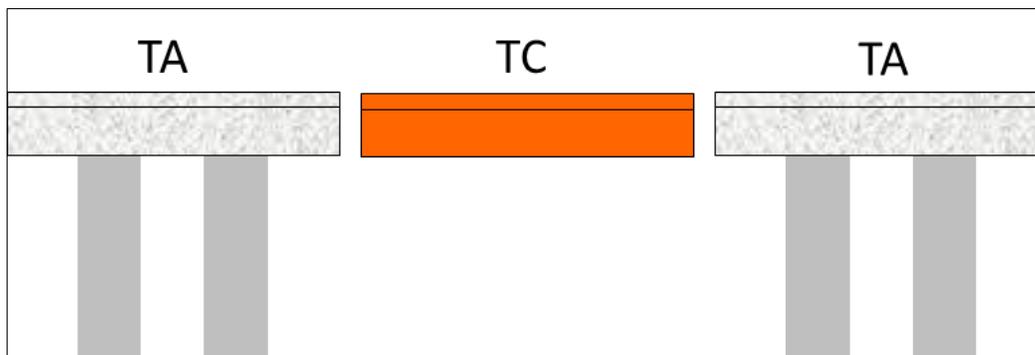


Fig. 1.6

## DESCRIPCIÓN DEL TRAMO EN ESTUDIO

Las vigas son rígidas prefabricadas; con un ancho de 12.6 (m) y se identifican para su estudio en Trabes de Apoyo (TA) y Trabes Centrales (TC); las TA tienen una longitud de 15 (m) y las TC varían en su longitud desde 35(m) hasta los 45 (m) aproximadamente.

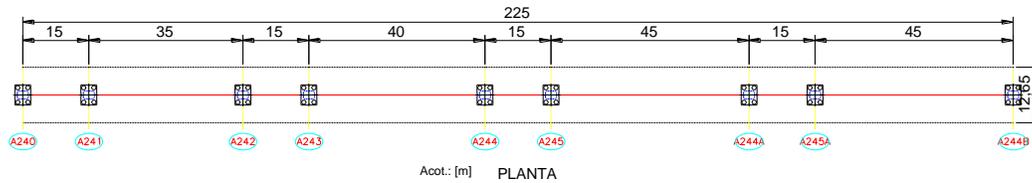


Fig. 1. 7 Vista de planta de vigas y columnas

Las columnas son hucas rectangulares que se van acartelando y que al final se abre en el cabezal; tienen un armado de refuerzo denso y torones en toda su longitud; estas se identificaron como A240, A241, A242, A243, A244, A245, A245A y A244B.

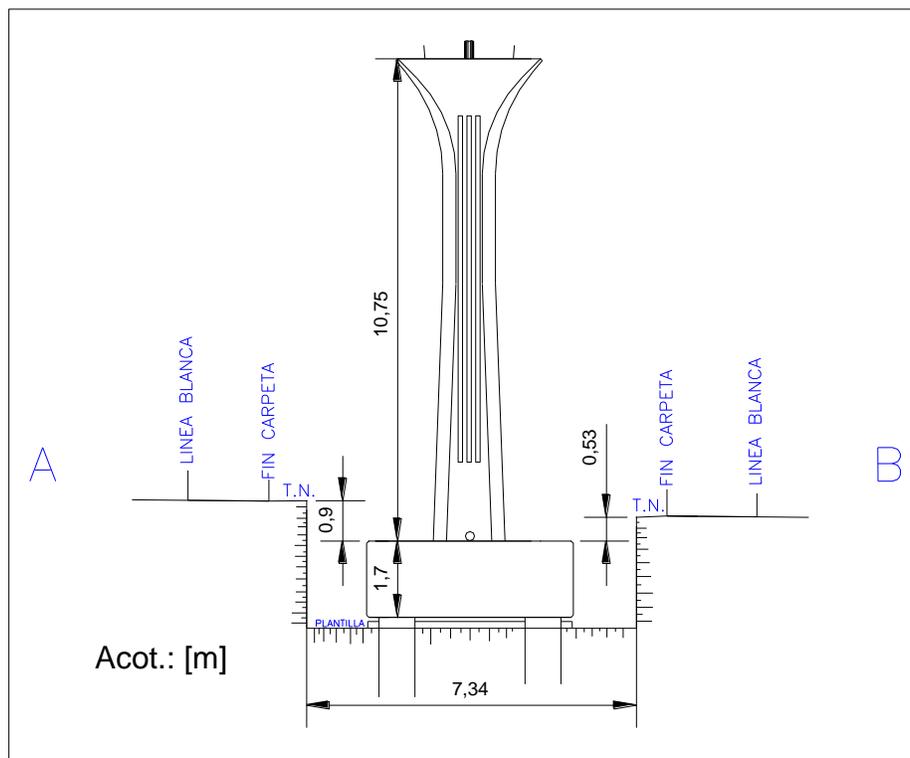


Fig 1.8 Vista transversal de columna

La altura de la columna varía considerando que la altura promedio de la vía es de 9.75 metros aproximadamente.

## DESCRIPCIÓN DEL TRAMO EN ESTUDIO

Las zapatas macizas de concreto que miden 3.6 X 4.6 X 1.6 (m) de peralte. Con cuatro pilas de cimentación de 96 cm de diámetro y con longitudes variables hasta los 35 m de profundidad.

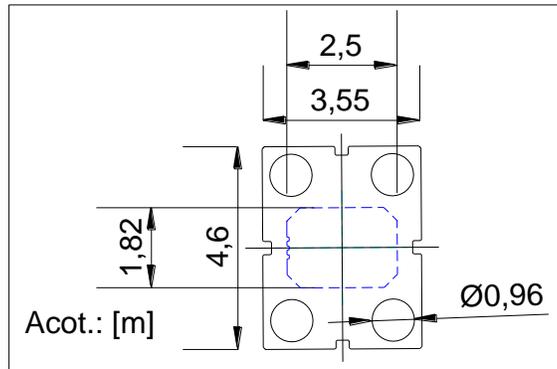
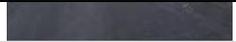
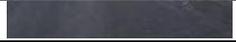
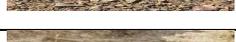


Fig. 1.9 Vista de Planta. Detalle de zapatas

### Estatigrafía

Las características estratigráficas de la zona en estudio se encuentra en la zona de Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 metros de profundidad aproximadamente y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limoarenosos intercalados con capas de arcilla lacustre, el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros; según el artículo 170 del Reglamento de Construcción para el Distrito Federal.

A grandes rasgos la estratigrafía es la siguiente:

Estrato	Profundidad [m]	Característica
	0.0 - 0.3	Material orgánico.
	0.3 - 0.5	Carpeta asfáltica.
	0.5 - 0.8	Relleno.
	0.8 - 1.0	Carpeta asfáltica.
	1.0 - 4.0	Relleno con roca andesita de diámetro menor a 30 cm y roca suelta de diámetro de 60 cm.
	4.0 - 12.0	Limo arenoso color café de consistencia media.
	12.0 - 18.0	Limo arenoso color gris de consistencia media.
	18.0 - 22.0	Limo arenoso color café de consistencia media.

# PRINCIPALES PRUEBAS DE CAMPO EN VIAS ELEVADAS

---

## 2. PRINCIPALES PRUEBAS DE CAMPO EN VIAS ELEVADAS

### 2.1 Pruebas de Vibración Ambiental

Una de las pruebas que se aplican hoy en día a las superestructuras son las pruebas de vibración ambiental ya que nos permiten identificar con exactitud las más relevantes propiedades estructurales (estáticas y dinámicas).

Las pruebas de vibración ambiental sobre una estructura no utilizan ninguna excitación artificial, por el contrario la respuesta de la estructura es medida por la excitación producida por el ambiente; como el viento, el tráfico o los microsismos. Siendo los resultados de las pruebas mejores, si la excitación producida por el medio ambiente tiene un gran ancho de banda en frecuencia que permita excitar todas las frecuencias naturales de la estructura [1].

Los principales objetivos del análisis de la respuesta dinámica de estructuras usando vibración ambiental son:

- \* *Control de calidad de una obra.* Medición en estructuras recién construidas para contrastar datos obtenidos con los valores teóricos utilizados en el diseño. Así se puede determinar si han sufrido modificaciones importantes entre el diseño y la construcción. Además los resultados obtenidos permiten tener un punto de comparación para mediciones futuras.
- \* *Control de daños causados por un sismo.* Medición en estructuras después de un evento sísmico. Con esto se pretende determinar si ha habido daños estructurales importantes que sea necesario reparar.
- \* *Verificación de reparaciones o modificaciones.* Medición en edificios que hayan sido reparados o reforzados después de haber sufrido daños estructurales, con el objeto de verificar si se han restituido las características estructurales originales.
- \* *Control de una estructura durante su vida útil.* Medición periódica para determinar si ha habido algún deterioro estructural importante debido a eventos sísmicos menores, envejecimiento de los materiales, asentamientos del subsuelo, reparaciones, adaptaciones incorrectas o modificaciones estructurales realizadas por los propietarios. [2]

Se sabe que con la correcta ubicación de los acelerómetros en los puntos estratégicos de la estructura y el tiempo adecuado de la captura de señales; son precisos y confiables los resultados obtenidos.

### 2.2 Pruebas de Carga Dinámica

Las pruebas de carga dinámica es esencial en el sentido que proporciona el comportamiento del puente al ser sometido a un tren de carga de servicio móvil extraordinaria y de esta manera se pueden hacer comparaciones con las pruebas de carga estática. Básicamente para que tenga sentido la realización de esta prueba y su posible comparación con la prueba estática, la prueba dinámica tiene que tener el mismo arreglo de sensores que la estática,

## PRINCIPALES PRUEBAS DE CAMPO EN VIAS ELEVADAS

además de que los camiones tienen que tener una configuración parecida a la de los camiones de la prueba de carga estática, aun cuando estos por obvias razones estén en movimiento. [3]

La carga dinámica es una importante componente en las cargas de los puentes ya que está presente todos los días de su vida útil; varía con el tiempo, es de naturaleza aleatoria, depende del tipo de vehículo, su peso, configuración de ejes, distancia de los claros del puente, rugosidad de la superficie de rodamiento y de la posición transversal de los camiones en el puente. Un ejemplo de estos efectos producidos por la carga dinámica se muestra en la figura 2.1, donde se comparan las historias de respuesta de las pruebas de carga estática y dinámica, donde se representa al mismo vehículo a una velocidad relativamente lenta. [3]

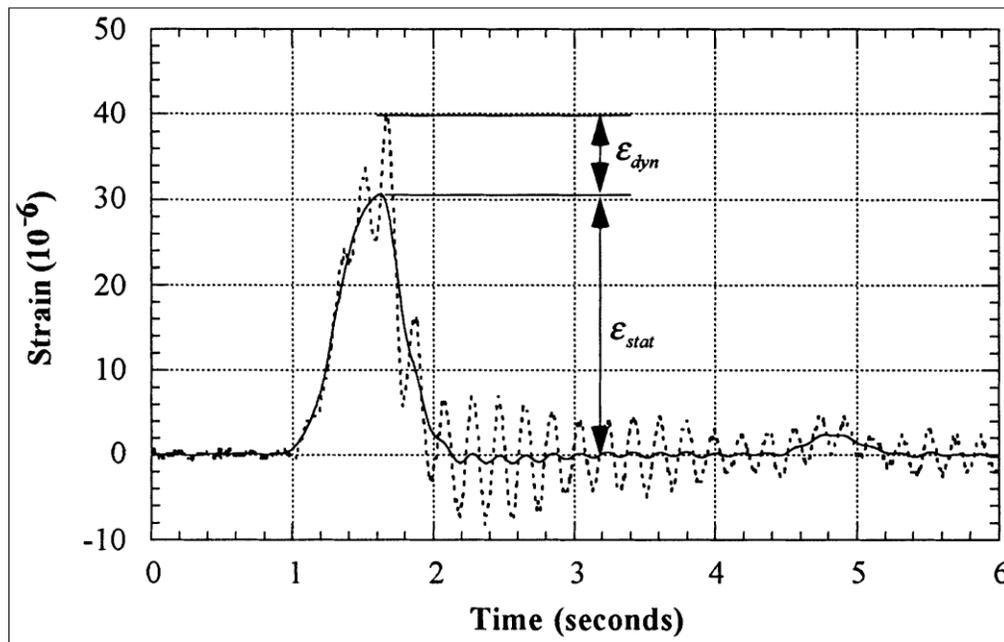


Fig. 2.1 Desviación estática y dinámica producida por un camión en movimiento [3]

La carga dinámica es usualmente considerada como un equivalente a la carga estática y es expresada por un factor de amplificación dinámica (FAD). Hay muchas definiciones para el FAD, y es resumida por Bakht and Pinjarkar en 1989 en su estudio del estado del arte de las pruebas dinámicas en puentes. En ese estudio el FAD es tomado como la relación entre la respuesta dinámica y estática.

$$FAD = \frac{D_{Din}}{D_{Est}}$$

Donde  $D_{Din}$  es la máxima respuesta dinámica (ejemplo, esfuerzo, deformación pasajera o desviación) medida desde la prueba de datos,  $D_{Din} = D_{Tot} - D_{Est}$ ;  $D_{Tot}$  es respuesta

## PRINCIPALES PRUEBAS DE CAMPO EN VIAS ELEVADAS

---

total del sistema y  $D_{Est}$  es la respuesta estática máxima obtenida de separar o filtrar la respuesta dinámica.

Después de varias pruebas e intentos de obtener experimentalmente el factor de amplificación dinámica paralelamente se han obtenido parámetros que muestran los efectos de las cargas móviles (vehículos en movimiento) en puentes urbanos.

### 2.3 Pruebas de Tracción

Las pruebas de tracción como su nombre lo indican, es el tirar o jalar un elemento de una estructura (columna, vigas, trabes, etc.) por medio de dispositivos (grúas, maquinaria pesada, malacates, poleas, etc.) que realice la fuerza necesaria para producir efectos de flexión, cortante o momentos. El equipo mínimo necesario para la realización de la prueba es contar con un dispositivo que puede aplicar una fuerza o jalón controlado, tal como una grúa o malacate y un equipo de obtención de datos tales como transductores de desplazamiento, celda de carga, acelerómetros de alta resolución para medir la historia del comportamiento dinámico de la estructura a probar, equipo de computo y un equipo topográfico para medir desplazamientos relativos.

El propósito de este tipo de pruebas es determinar en lo mayor posible los cambios en las frecuencias, amortiguamiento, deformaciones, etc., de los elementos al aplicar una carga, por ejemplo, aplicar una carga "sísmica cuasiestática", ya que con esto se puede determinar si hay un cambio en la rigidez de los elementos al ser sometidos a este tipo de solicitudes.[2]

# PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNA VIA ELEVADA

---

## 3. PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNA VIA ELEVADA

### 3.1 Información que se obtiene de este tipo de pruebas

Las propiedades dinámicas, los efectos de interacción suelo estructura (ISE) y la cinemática de la estructura son parte de la información que nos proporcionan las pruebas de vibración ambiental.

De las frecuencias principales de vibrar de la estructura en sus tres diferentes direcciones transversal (T), longitudinal (L) y vertical (V) con ayuda de los acelerómetros, podemos obtener las propiedades dinámicas. Debido a la magnitud del sistema estructural resulta complicada la identificación de estas frecuencias.

Los efectos de interacción suelo estructura se obtiene de la instrumentación de la base suelo y la superestructura; es muy común realizar cálculos y modelos estructurales suponiendo que la estructura está empotrada en su base, es decir, el subsuelo y la cimentación son infinitamente rígidos. Esto es válido tratándose de suelos muy resistentes como la roca, sin embargo, en cimentaciones superficiales con zapatas o losas de concreto donde se presentan suelos con baja resistencia, es posible evaluar los efectos que existen entre la interacción de la cimentación y el subsuelo. En este estudio podemos encontrar una posible influencia de la cimentación y el suelo en la respuesta dinámica de la estructura.

La respuesta traslacional total de la superestructura ( $U_T$ ), la respuesta de cabeceo de la base ( $\theta_0$ ) y la respuesta traslacional de la base ( $U_0$ ), se estima a través de las frecuencias fundamentales de vibración de la estructura, en sus tres direcciones transversa (T), longitudinal (L) y vertical (V), obtenida durante las pruebas de vibración ambiental.

Para la cinemática de la estructura necesitamos obtener las principales y fundamentales formas modales de la superestructura; recordando que estas formas modales van de la mano con el grado de libertad que tenga la superestructura ya que visualizamos la vía elevada como un puente. Por tanto nuestras formas modales son cuatro V, T, L, así como la torsión (Tor).

### 3.2 Metodología Experimental

El equipo empleado para las mediciones es la marca Kinematics y está formado por seis acelerómetros triaxiales Episesor ES-T (Fig. 3.1), tres digitilizadores Q330 de seis canales cada uno y un concentrador (Fig. 3.2) en el cual se almacena la información obtenida. Es un equipo de muy alta resolución, lo que hace posible registrar los movimientos de vibración ambiental.

La comunicación entre los digitilizadores Q330 y el concentrador se hace a través de ondas de radio, lo que evita el uso de un gran número de cables de longitud considerable. Esta característica lo convierte en un equipo muy apropiado para pruebas de campo o instrumentación de estructuras de grandes dimensiones.

# PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNA VIA ELEVADA



Fig. 3.1 Acelerómetros triaxiales y uniaxiales

Para el procesamiento de la información obtenida, se realizaron los programas para el manejo de señales desarrollados por Murià Vila y et al. (2006) [5], que están basados en un análisis de señales aleatorias convencional [4]. Cada señal se dividió en tramos de 20.48 s, se calcularon las densidades espectrales de cada tramo y se obtuvieron los promedios. Además, entre pares de señales se calcularon las funciones de transferencia, ángulos de fase y sus correspondientes funciones de coherencia utilizando algunos de los puntos de medición como referencias.

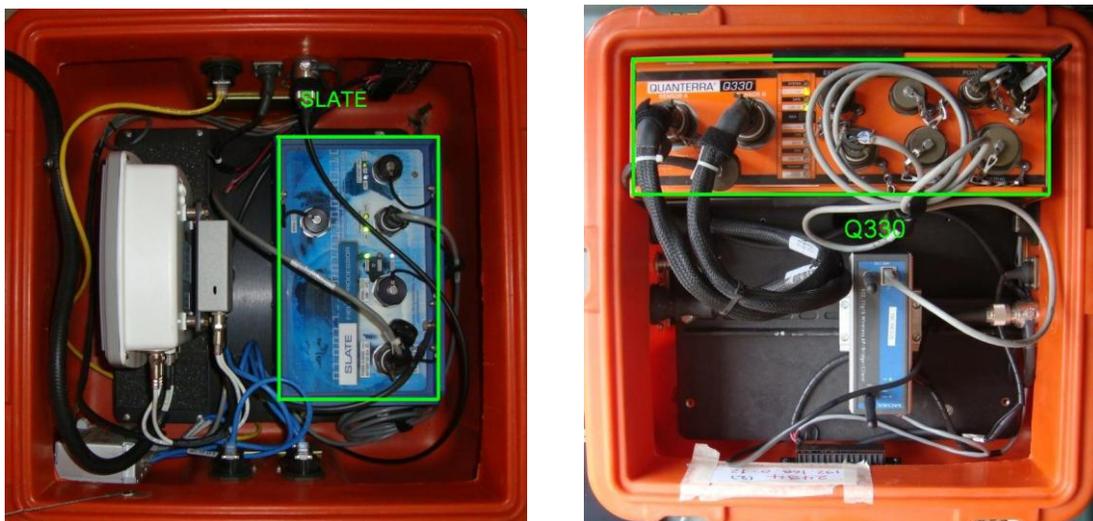


Fig. 3.2 Concentrador y Q330

## PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNA VIA ELEVADA

En campo se midieron las aceleraciones de los más de 40 puntos estratégicos de la estructura en 10 pruebas incomparables y en tres diferentes entornos: normal, con tracción y por ultimo con el paso de vehículos.

Se utilizaron 6 acelerómetros (sensores) triaxiales y 8 uniaxiales con diferentes arreglos para cada prueba ya que de esta manera se pretendió obtener la información necesaria para posteriormente analizarla.

Debido a la gran cantidad de puntos estrategicos de la estructura (juntas entre trabes, ejes de columnas, centros y orillas del claro de trabes, así como terreno) se elaboro un programa de pruebas (Tabla 3.1), pretendiendo tener un orden y control de las mismas así como de los resultados.

Para este trabajo solo se presentan las pruebas y puntos estratégicos más representativos.

PROGRAMA DE PRUEBAS

Nº de Prueba	Nombre de la prueba	Prueba que se elaboro
1	Prueba 1	Prueba VA
2	Prueba 2	Efectos ISE
3	Prueba 2b	Prueba de Tracción
4	Prueba 3	Prueba VA
5	Prueba 4	Prueba VA
6	Prueba 5d	Prueba de CD
7	Prueba 5p	Prueba de CD posterios
8	Prueba 7	Prueba VA

Tabla 3.1

Una vez realizada la prueba, ya en gabinete se revisan la señales capturadas por los acelerómetros para ser procesada mediante un análisis espectral convencional. Este análisis espectral, nos permite cambiar del dominio del tiempo al de la frecuencia para analizar una señal y está basado en la aplicación de la transformada de Furier a un proceso de origen aleatorio [4].

### 3.2.1 Pruebas de Vibración Ambiental

Según la tabla 3.1 las pruebas de vibración ambiental fueron la Prueba 1, Prueba 3, Prueba 4 y Prueba 7.

Acontinuación se muestran los arreglos de los acelerómetros para cada prueba de vibración ambiental que se desarrollaron en las pruebas.

En la fig. 3.3 se muestra el tablero azul semejjando a las dovelas, vistas desde planta y el eje de las columnas. En punto 38 se midió en el terreno.

# PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNA VIA ELEVADA

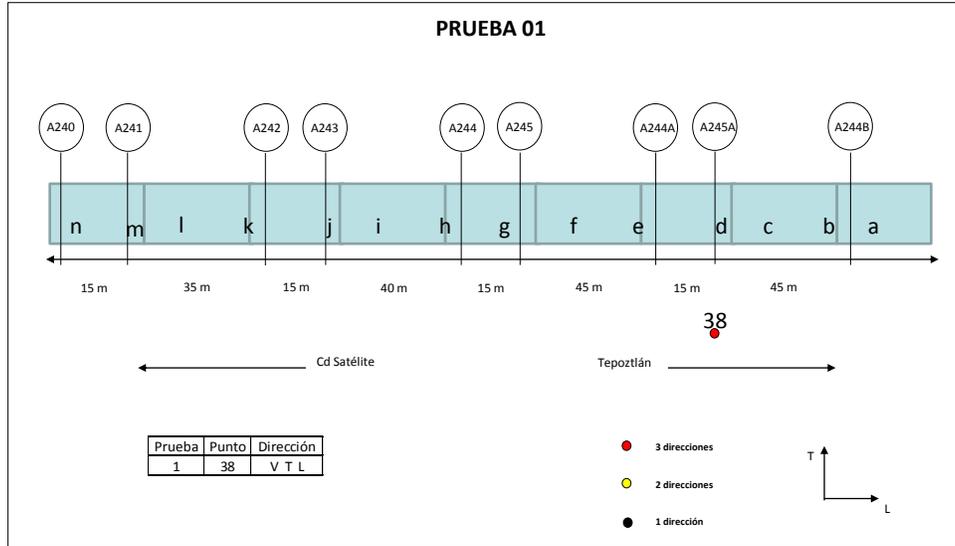


Fig. 3.3 Arreglo de Prueba 1

En la fig. 3.4 se muestra la colocación de los acelerómetros y en qué dirección se midió.

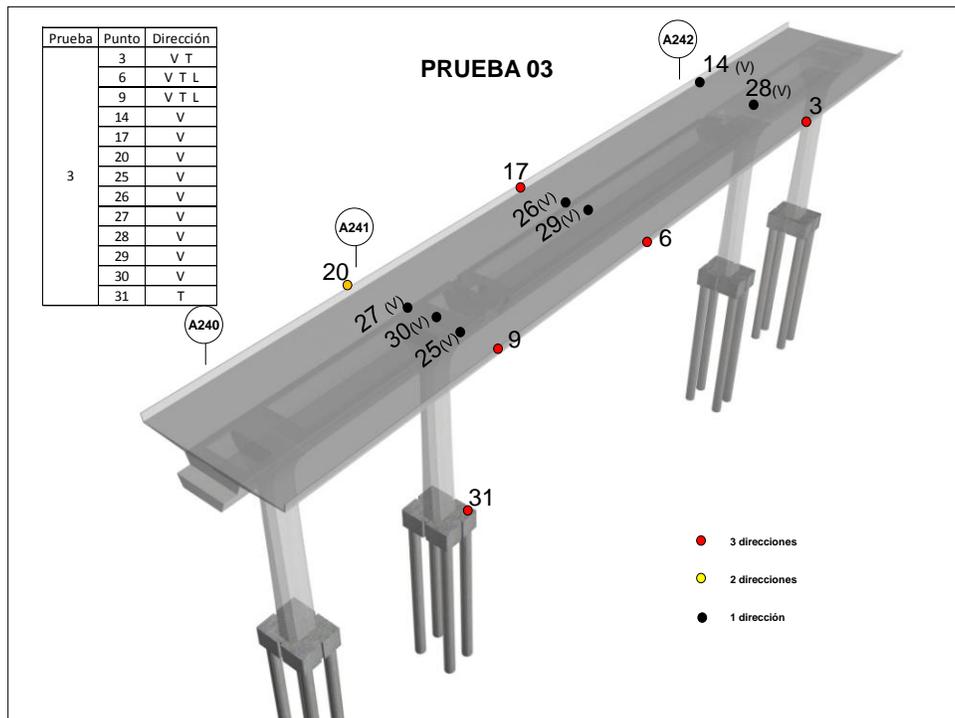


Fig. 3.4 Arreglo de sensores. Prueba 3

En la figura 3.5 los acelerómetros en los laterales superiores de la estructura.

# PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNA VIA ELEVADA

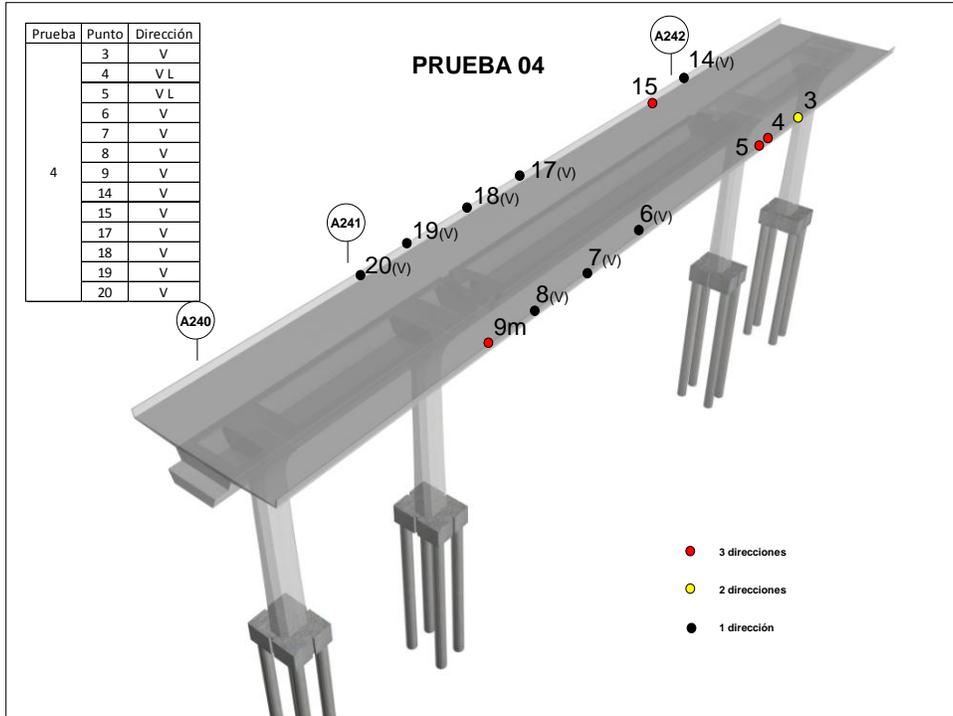


Fig. 3.5 Arreglo de acelerómetros Prueba 4

En la figura 3.6 se muestra el arreglo de los sensores en la parte superior de la estructura vista de planta.

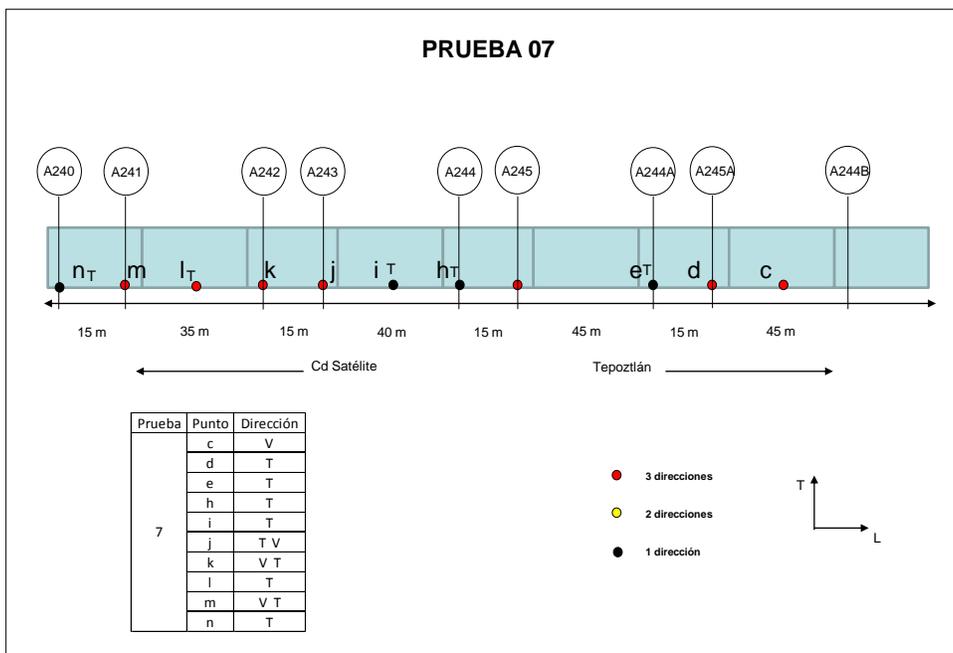


Fig. 3.6 Arreglo de sensores prueba 7

# PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNA VIA ELEVADA

## 3.2.2 Pruebas Terreno-Cimentación

En la figura 3.7 muestra el arreglo de la prueba 2 donde se tratara de ver la influencia que tiene la estructura sobre el terreno y las zapatas.

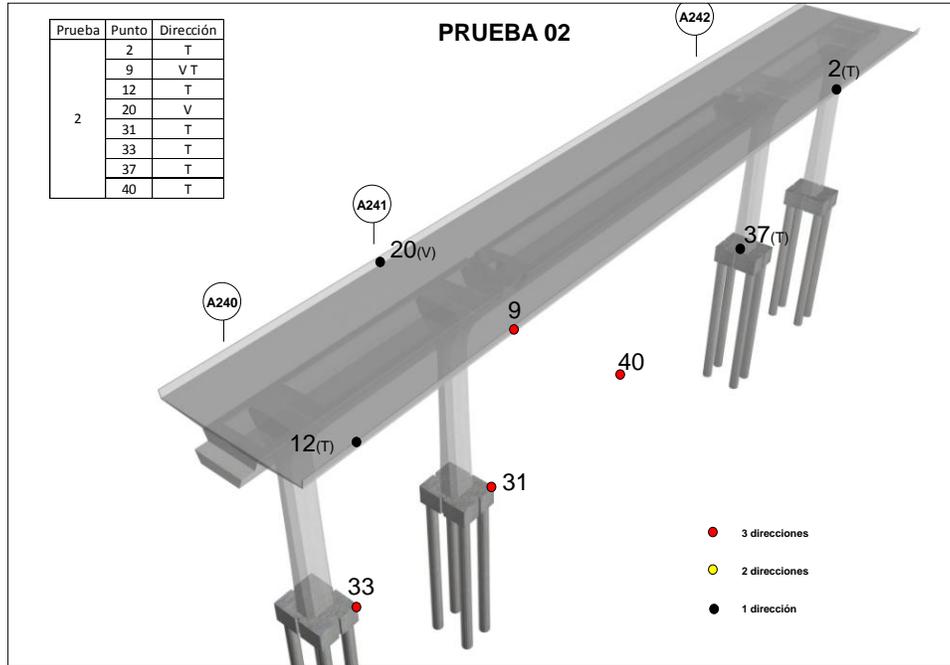


Fig. 3.7 Arreglo de acelerómetros prueba 2

## 3.2.3 Pruebas de Carga Dinámicas

Para esta prueba se utilizaron unos camiones tipo torton (fig. 3.8, 3.9 y tabla 3.2) con carga y sin carga (tabla 3.3); cabe mencionar que se realizaron diferentes tipos de arreglo con los camiones sobre la estructura con el fin de obtener datos sobresalientes. Para este trabajo solamente nos detuvimos en un solo arreglo (fig. 3.9), por la magnitud de datos de esta manera se determinarían si hubo cambios sobre la estructura.

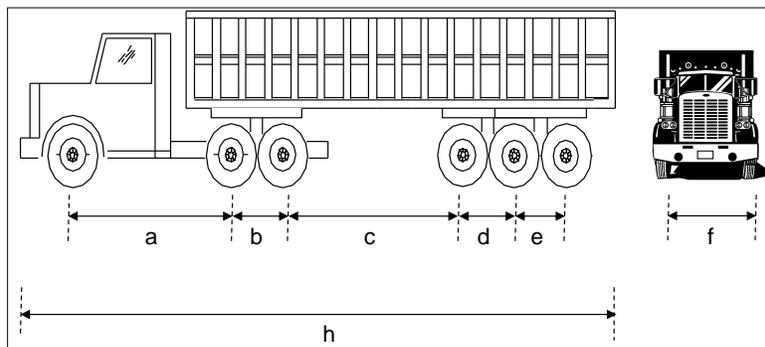


Fig. 3.8 Camiones utilizados

# PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNA VIA ELEVADA



Fig. 3.9 Camiones tipo torton

Camión	Tipo de camión	Dimensiones, en (m)							
		a	b	c	d	e	h	f <sub>del</sub>	f <sub>tras</sub>
0	T3-S2	4.40	1.40	4.20	1.30		13.00	2.20	1.95
1	T3-S2	4.60	1.40	4.50	1.25		13.50	2.10	2.00
3	T3-S2	4.40	1.35	4.30	1.30		13.70	2.10	2.10
4	T3-S3	4.80	1.30	4.15	1.25	1.20	15.00	2.00	2.10
5	T3-S3	4.40	1.35	4.10	1.25	1.30	14.65	2.05	2.10
6	T3-S3	4.40	1.35	4.00	1.30	1.25	14.60	2.10	2.00

Tabla 3.2 Características de los camiones

Camión	Tipo de camión	Descargas por eje, en (t)						Peso total, en ton.
		1 V	2 V	3 V	1 C	2 C	3 C	
0	T3-S3	11.190	5.140	16.330				33
1	T3-S3	11.600	5.340	16.900	23.380	23.070	46.300	127
3	T3-S3	8.200	9.395	17.510	28.350	36.290	64.640	164
4	T3-S3	9.048	9.235	18.380	29.730	34.190	60.920	162
5	T3-S3	8.865	9.630	18.495	25.270	35.060	60.020	157
6	T3-S3	9.360	9.550	19.190	28.130	41.730	70.640	179

Tabla 3.3 Descargas por eje de camiones

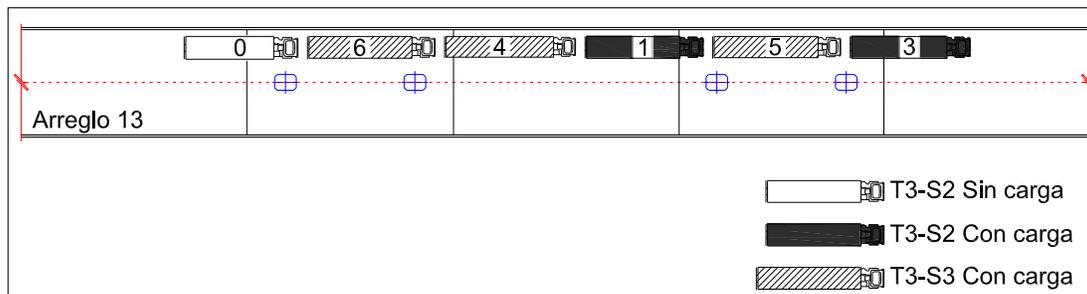


Fig. 3.10 arreglo de los camiones para prueba dinámica

## PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNA VIA ELEVADA

Por lo tanto el arreglo de los acelerómetros para la prueba de carga dinámica es como se muestra en la figura 3.11, son dos acelerómetros colocados en las orillas de la dovela central, otro colocado en un extremo del dado de la columna A241.

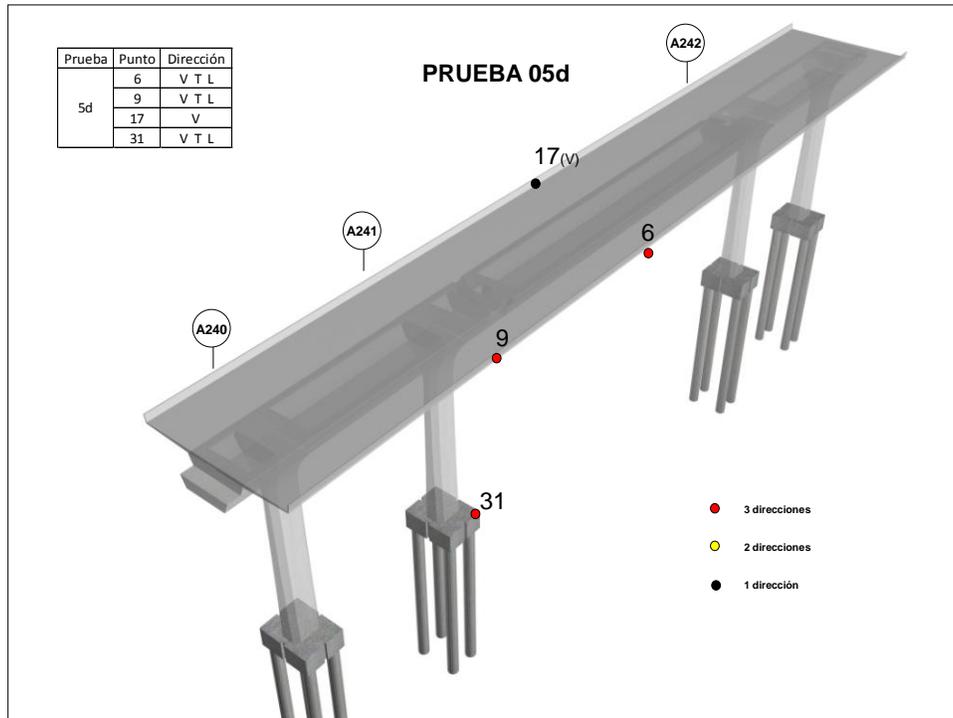


Fig. 3.11 Arreglo de sensores de la prueba 5c



Fig. 3.12 Acomodo de camiones

Para la prueba 5p (fig. 3.13) se utilizó el mismo arreglo de acelerómetros pero sin carga y después de la prueba de carga dinámica, esto con el hecho de saber si hay variación en la estructura.

# PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNA VIA ELEVADA

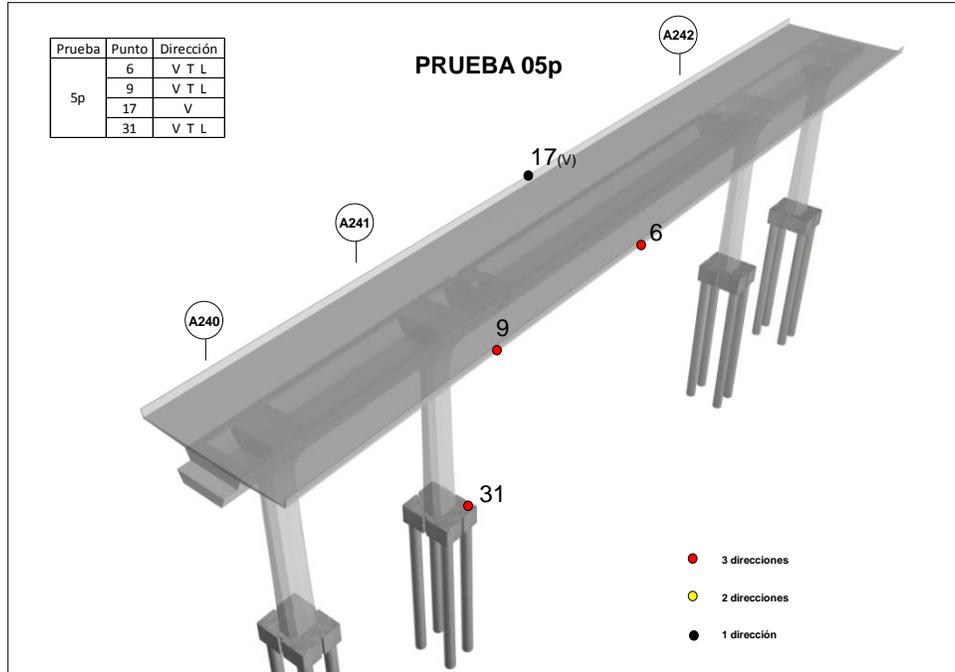


Fig. 3.13 Arreglo de sensores prueba 5p

## 3.2.4 Pruebas de Tracción

Para esta prueba se utilizó una grúa (fig. 3.15) la cual aplicó una fuerza total de 43 toneladas a la columna A241 con ayuda de un juego de poleas, la fuerza se fue subiendo gradualmente; el arreglo de los acelerómetros fue el siguiente figura 3.14.

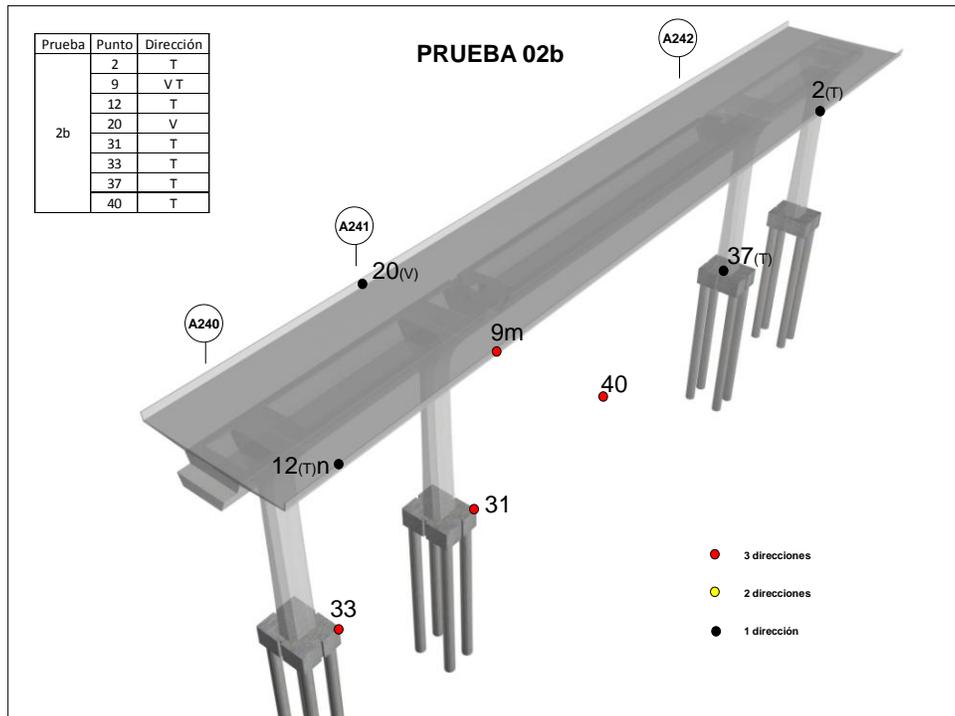


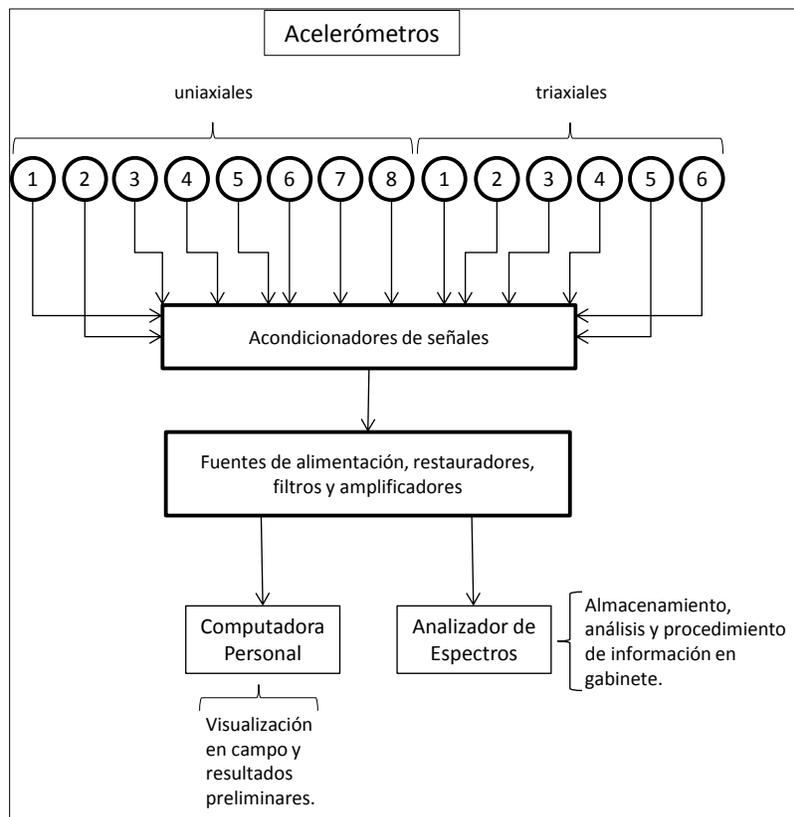
Fig. 3.14 Arreglo de acelerómetros prueba 2b



Fig. 3.15 Grúa y polea para prueba de tracción

### 3.3 Descripción de los sensores y equipo

El sistema de adquisición de datos (Fig. 3.16) está formado por acelerómetros, acondicionadores de señales, fuentes de alimentación, restauradores, filtros y amplificadores, así como una PC portátil y un analizador de espectros.



# PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNA VIA ELEVADA

Fig. 3.16 Flujo de adquisición de datos

**Acelerómetros:** Sensor de alta resolución triaxial de Marca Episesor ES-T con características físicas de 1.50 Kg, 13.3 cm de diámetro y 6.2 cm de altura. Con ancho de banda de CC a 200 Hz, que permite estudiar los movimientos en frecuencias más altas, trabaja en un rango dinámico de 155 dB. Figura 3.17.

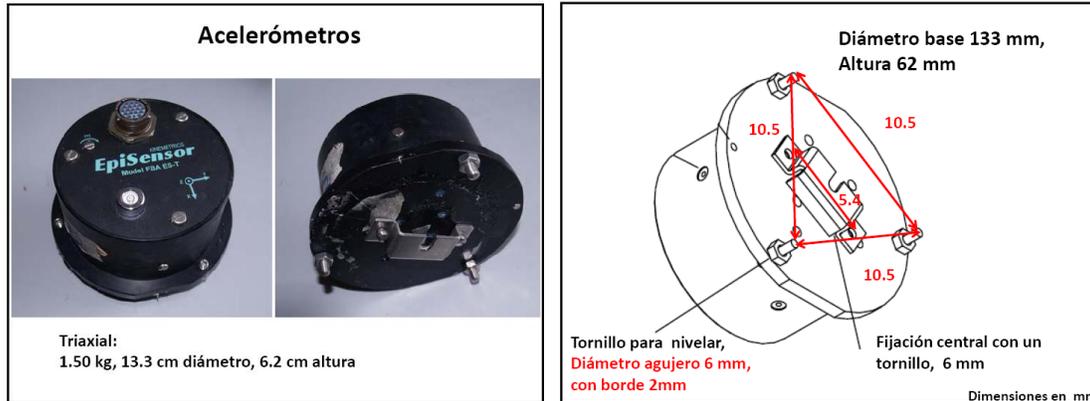


Fig. 3.17 Características acelerómetro triaxial

Sensor de alta resolución uniaxial de Marca Episesor ES-U2 con características físicas de 0.35 Kg, 5.5 cm de altura, 6.5 cm de ancho y 9.7 cm de largo. Con rango dinámico de 140 dB y con ancho de banda de CC a 200 Hz. Figura. 3.18.



Fig. 3.18 Características acelerómetro uniaxial

**Cables uniaxiales y triaxiales:** Son cables con un diámetro aproximado de 2 centímetros y de diferentes longitudes de 25, 50 y 100 metros.

**Q330:** Es un convertidor analógico digital de señales, cada unidad tiene 2 canales, cada uno de los cuales es capaz de asimilar 3 señales distintas. Sus dimensiones son 44 cm de ancho y largo y 36 cm de altura, con un peso de 15 Kg aproximadamente. Además contiene un radio

## PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNA VIA ELEVADA

que permite la conexión de los equipos Q330 con el Slate, con el fin de enviar la información obtenida por los sensores al Slate. Figura. 3.19.

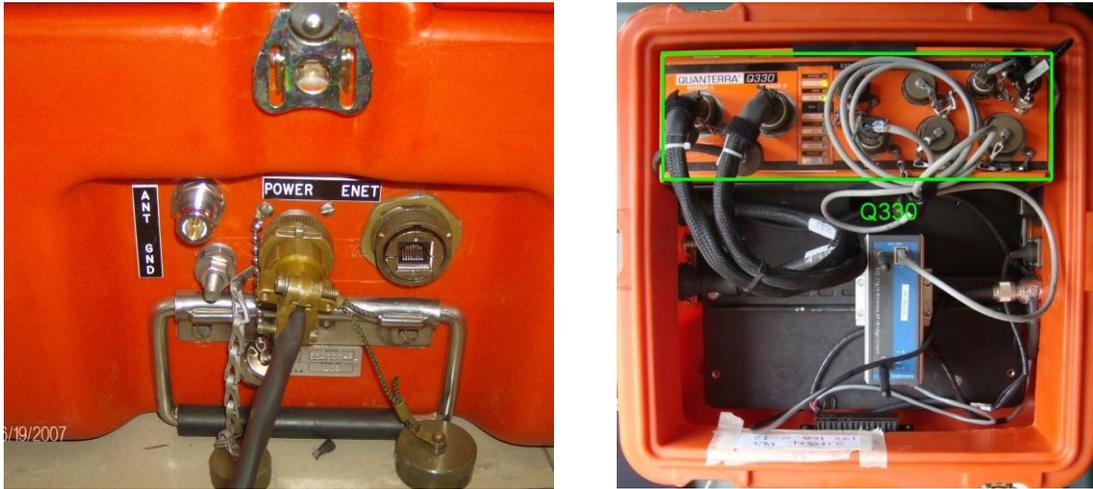


Fig. 3.19 Q330

**Slate:** Funciona como receptor de las señales enviadas por cada uno de los equipos Q330, únicamente se tiene una unidad, que sincroniza a los equipos Q330. Tiene un procesador de 400 MHz Intel XScale aPXA255, memoria de 256 MB de SDRAM. Figura 3.2.

**Fuente de poder:** Dispositivo que provee de la energía con que se alimenta el Q330 y el Slate. Figura 3.20.

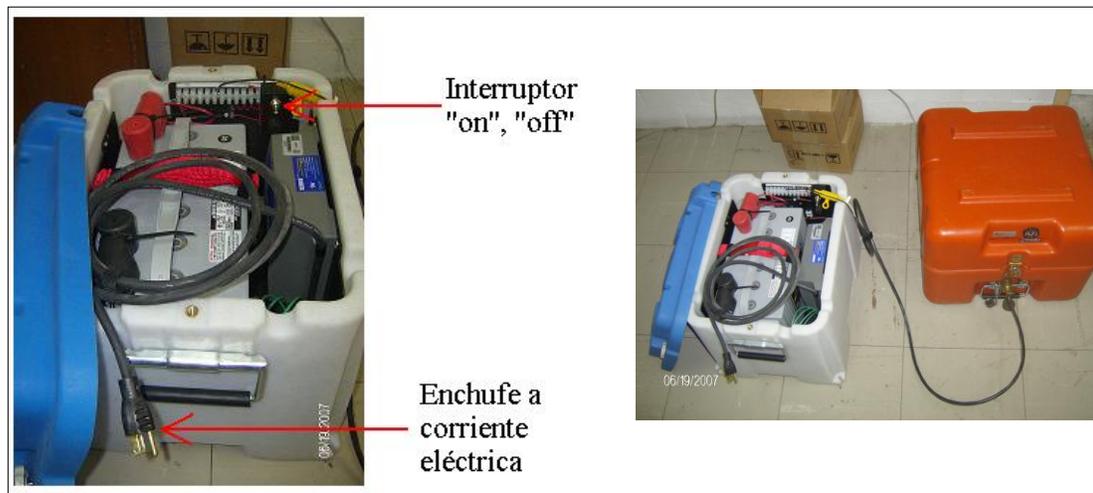


Fig. 3.20 Fuente de poder

# PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNA VIA ELEVADA

**Antena GPS:** Cada Q330 trae integrada una antena GPS para captar las señales de los satélites y poder hacer una conexión con el Slate.



Fig. 3.21 Antena GPS

**PC portátil:** Esta nos ayudara a sincronizar los Q330 con el Slate y poder realizar el registro de los sensores y a la vez poder visualizar la señal de los sensores en campo.

### 3.4 Conceptos básicos de señales y sistemas

Para poder realizar el análisis de señales que se producen en una vibración aleatoria es necesario recurrir a herramientas matemáticas que permitan manejar la información, de manera que su interpretación física no resulte complicada.

La representación matemática de una de estas señales con respecto al tiempo, resultaría muy compleja, por lo que se recurre a la transformada finita de Fourier [4], para poder evaluar la señal obtenida, y poder expresar la función original en una suma de funciones más sencillas, donde cada una de estas tiene un factor de contribución, el cual nos indica con qué porcentaje participa cada una de ellas en la función original.

$$x(f) = \int_0^T x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

Donde:

$x(t)$  es la señal registrada

$T$  es la duración de la medición

$j = \sqrt{-1}$  y  $f$  es la frecuencia de análisis

La principal ventaja que se obtiene de la aplicación de la transformada de Fourier, es que cambia la función original del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Esto es, si se obtiene el registro de una señal, en cuyo eje de las abscisas se grafica el tiempo y en eje de

## PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNA VIA ELEVADA

las ordenadas las amplitudes de cada punto de la señal, y posteriormente se le aplica la transformada de Fourier, se podrá obtener el contenido de frecuencias de la señal y las amplitudes asociadas a cada frecuencia. Si se grafican estos puntos se obtiene el llamado espectro de Fourier.

Si se toma el resultado de la expresión (1), se calcula su módulo y se eleva al cuadrado, se obtiene el espectro de potencia de esa señal,  $|x(f)|^2$ . A partir del cual se pueden obtener las amplitudes y las frecuencias, en el caso de vibración ambiental, asociadas a los modos de vibrar de la estructura, lo que resulta más práctico que si la señal se estudiara en el dominio del tiempo.

Con el fin de poder observar la correspondencia que existe entre las dos señales, el tiempo de retraso de una con respecto a otra y detectar la presencia de señales extrañas.

La expresión matemática a través de la cual se efectúa esta correlación recibe el nombre de función de correlación cruzada:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) y(t + \tau) dt \quad (2)$$

Donde:

$x(t)$  y  $y(t)$ , representan dos señales diferentes

$\tau$  es el tiempo de retraso entre una señal y otra

Cuando la expresión anterior se aplica a una sola señal, en el sentido de investigar la relación entre los valores de la misma señal, se obtiene la función de autocorrelación:

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) x(t + \tau) dt \quad (3)$$

Si estas expresiones se les aplica el concepto de transformada de Fourier, se pueden obtener expresiones matemáticas, que son conocidas como las transformadas de las funciones de correlación y autocorrelación respectivamente, las cuales son de utilidad para poder definir las frecuencias asociadas a los modos de vibrar de una estructura y su correspondiente configuración modal.

$$F_{xy}(f) = \int_0^T R_{xy}(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (4)$$

$$F_{xx}(f) = \int_0^T R_{xx}(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (5)$$

Si se toma la expresión  $F_{xy}(f)$ , la cual tiene tanto parte real como imaginaria, puede expresarse como:

## PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNA VIA ELEVADA

$$F_{xy}(f) = H_R(f) - jH_I(f) \quad (6)$$

Donde:

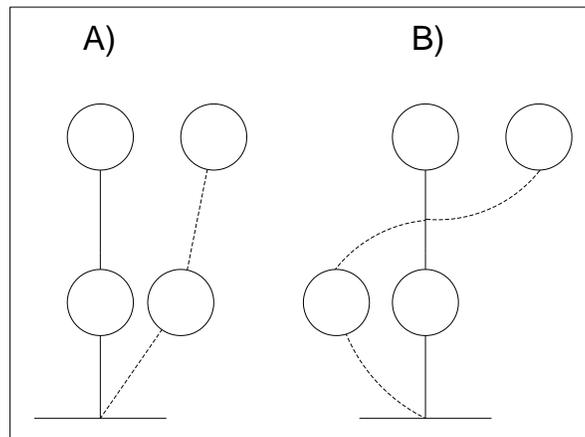
$$H_R(f) = \int_0^{\infty} R_{xy}(t) \cos 2\pi ft \, dt \quad H_I(f) = \int_0^{\infty} R_{xy}(t) \sen 2\pi ft \, dt$$

Que a su vez y por conveniencias puede expresarse en forma polar de la siguiente manera:

$$F_{xy}(f) = |F_{xy}(f)|e^{-j\phi(f)} \quad \phi = \tan^{-1} \left[ \frac{H_I(f)}{H_R(f)} \right]$$

Si se obtiene el ángulo tangente entre la parte imaginaria y la parte real, el resultado será el llamado ángulo de fase. A cada frecuencia natural que se obtiene le corresponde un ángulo de fase cuyo valor será entre 0 y 180 grados. Figura 3.21.

Este ángulo indica el retraso de las señales producidas en dos diferentes puntos de la estructura, y con base en su valor poder trazar correctamente las configuraciones modales, tanto de modos fundamentales como de modos superiores.



**Fig. 3.21 A) Movimiento de las masas en fase 0° B) Movimiento de las masas en fase opuesta 180°**

De las transformadas de las funciones de correlación y autocorrelación se pueden obtener dos funciones de suma importancia:

La función de transferencia, que se obtiene del cociente de las ordenadas espectrales de dos puntos de medición en un mismo experimento.

$$H_{xy} = \frac{F_{xy}(f)}{F_{xx}(f)}$$

La coherencia que representa un índice de la relación de movimiento entre dos puntos de medición.

## PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNA VIA ELEVADA

---

$$\gamma_{xy} = \frac{|F_{xy}(f)|}{F_{xx}(f)F_{yy}(f)}$$

Sus valores van de 0 a 1, si son próximos a uno esto nos indica que existe una buena proporción lineal entre las dos señales, si son cercanos a cero no existirá relación entre el movimiento de los puntos de medición, esto provocado muchas veces por el ruido presente durante la medición.

El ruido puede definir como una perturbación indeseada que se sobrepone a la señal útil. En el caso de la vibración ambiental en estructuras, se considera como ruido todas aquellas frecuencias ajenas a las propias de la estructura. Este ruido puede ser provocado ya sea por los propios aparatos de medición, algún tipo de maquinaria cercana a la estructura, el paso de vehículos sumamente pesados, etc. Lo que dificulta la identificación de las frecuencias correspondientes a los modos de vibrar de alguna estructura. [6]

## 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para este apartado se realizó un análisis espectral de las pruebas experimentales más significativas. Aunque se puede realizar un análisis más detallado de la información e identificar otras propiedades dinámicas de la estructura, el principal propósito de este análisis fue únicamente la identificación de las frecuencias fundamentales de vibrar del tramo en estudio. Lo anterior, debido a la importancia que tiene el conocer la frecuencia fundamental en la respuesta dinámica de este tipo de obras civiles. Básicamente se recurrió al uso de los espectros de potencia y la función de transferencia. El uso de los primeros fue con el fin de identificar las ordenadas espectrales más significativas (picos) y que a su vez están asociadas a un valor de amplitud máxima en dicho espectro. Como segundo análisis en el cociente espectral o función de transferencia, se detectan las frecuencias de las ordenadas más significativas, aquellas que coincidan con los espectros de potencia son consideradas como frecuencias naturales de vibración. También, en algunos casos se recurrió a la coherencia y el ángulo de fase, con el fin de corroborar algunos resultados. Cabe mencionar que en análisis más detallados, para este rango de frecuencias se puede asociar un modo de vibrar que se obtiene del ángulo de fase y la coherencia, lo anterior para saber si el rango de frecuencias asociado es bueno. La identificación de formas modales, acoplamientos y coeficientes de amortiguamiento, debido a su extensión, se deja para estudios posteriores.

### 4.1 Resultados de pruebas de Vibración Ambiental

#### Frecuencia fundamental del sitio

La prueba 1 tuvo como principal objetivo, el conocer de la manera más aproximada, la frecuencia fundamental o frecuencia predominante del terreno en el cual se desplanta el tramo estructural en estudio. Como ejemplo de los resultados de esta prueba, se muestran los obtenidos el punto 38 en terreno. Con una técnica que consiste en obtener en un mismo punto, los cocientes de los movimientos horizontales entre verticales, a través de la función de transferencia, se pueden llegar a identificar intervalos de frecuencia asociados la frecuencia fundamental del sitio. A continuación se muestran los resultados obtenidos en el punto 38 del terreno (figura 4.1 y 4.2). De esta manera se puede determinar las frecuencias predominantes en el sitio.

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 1 38T- 38V

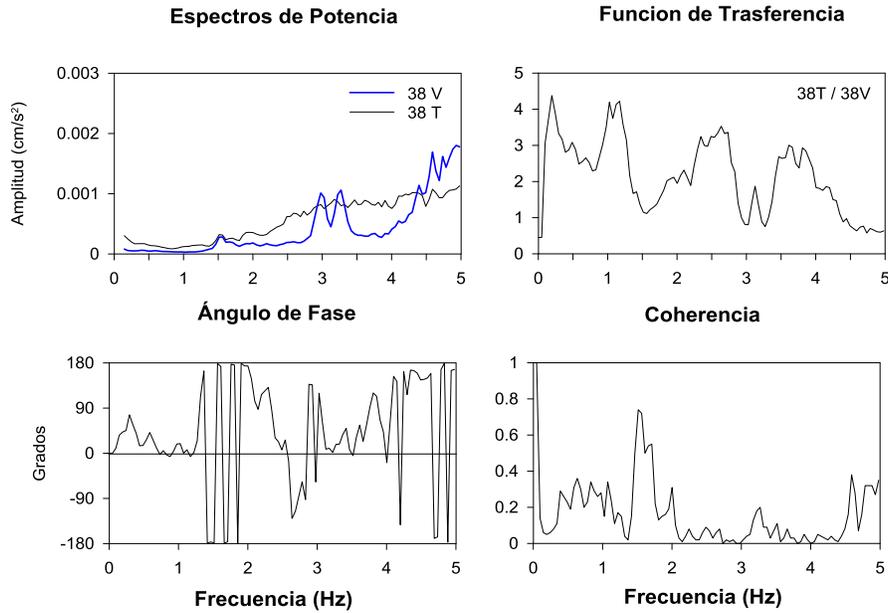


Fig. 4.1 Espectros simultáneos entre los puntos 38T y 38V sobre el terreno entre las columnas A244A y A245A

## Prueba 1 38L- 38V

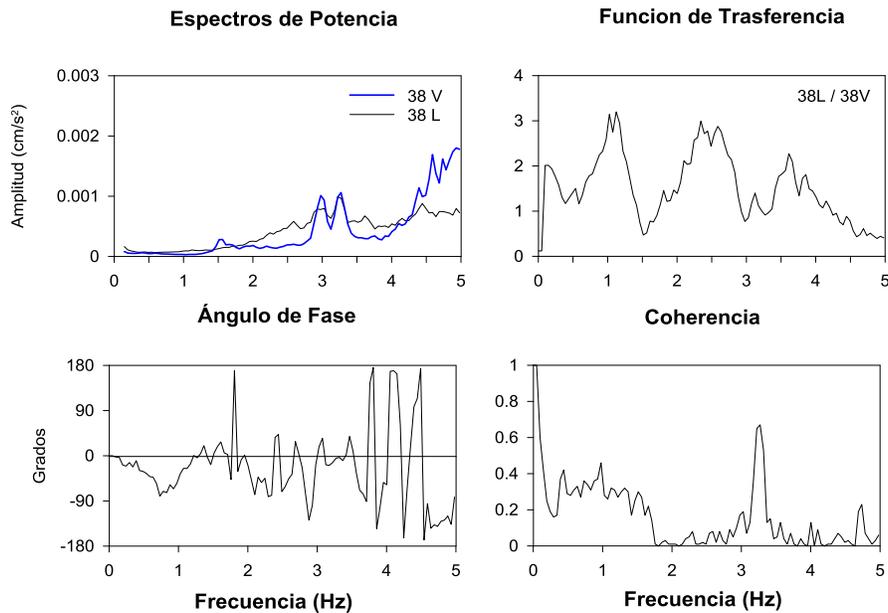


Fig. 4.2 Espectros simultáneos entre los puntos 38L y 38V sobre el terreno entre las columnas A244A y A245A

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La frecuencia y el período fundamental del sitio se muestran en la siguiente tabla 4.1.

Cociente	Frecuencia (Hz)	Período (s)
38T-38V	1.025 - 1.172	0.976 - 0.853
38L-38V	0.977 - 1.221	1.024 - 0.819

Tabla 4.1 Intervalo de frecuencias de vibración en el suelo punto 38

## Frecuencias Fundamentales Transversal y Vertical del tramo en estudio

Para la determinación de las frecuencias fundamentales de vibrar del tramo en estudio, se muestran algunos de los espectros obtenidos en la prueba 3. Se pretendió obtener la frecuencia o periodo fundamental de vibración en dirección transversal y vertical de la viga central entre las columnas A241 y A242. Las gráficas correspondientes al análisis espectral de los puntos que relacionan el movimiento en dirección transversal de las columnas A241 y A242 en su parte más alta con respecto a sus apoyos se muestran en las figuras 4.3 y 4.4.

Mientras que en la tabla 4.2 se muestran las frecuencias más representativas de los cocientes obtenidos tanto en dirección transversal como vertical.

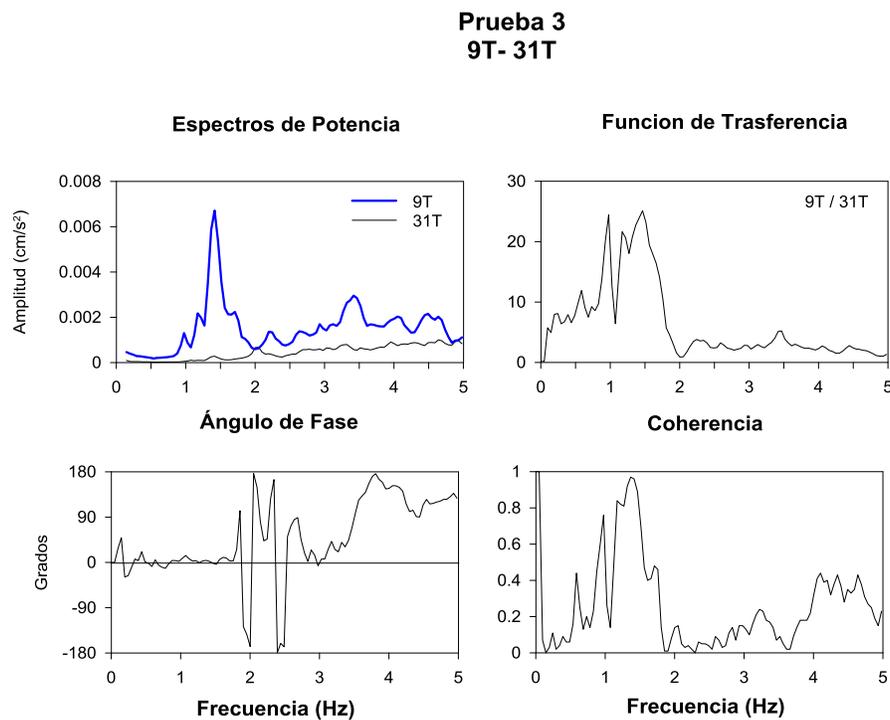


Fig. 4.3 Espectros de la prueba 4 puntos 9 y 31 en dirección transversal

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 3 3T- 31T

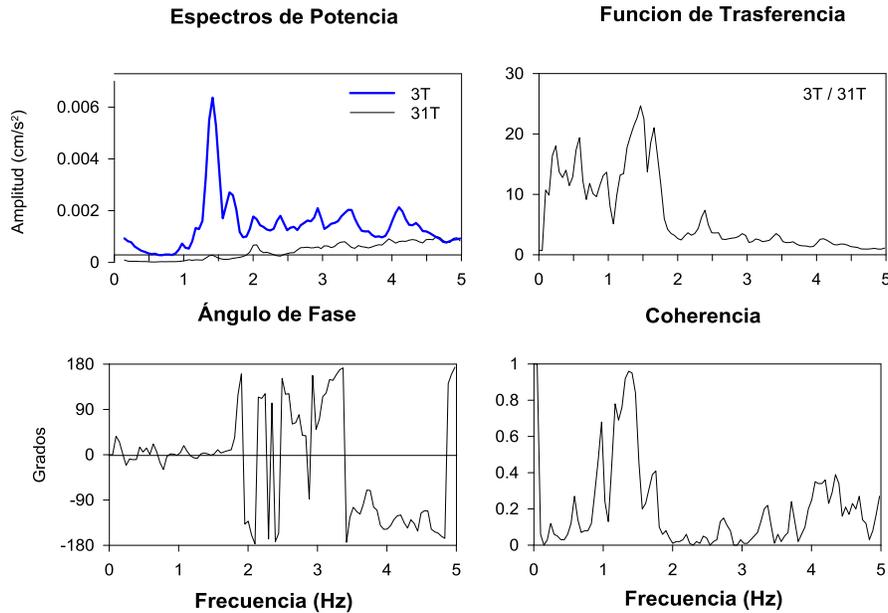


Fig. 4.4 Espectros de la prueba 4 puntos 3 y 31 en dirección transversal

En ambas figuras se observan amplitudes importantes de frecuencia en intervalos entre 1.3 y 1.5 Hz, los cuales a su vez presentan coherencias importantes y ángulos de fase muy próximos a cero, por lo cual dicho intervalo se puede asociar a la frecuencia fundamental del tramo en estudio en dirección transversal o T.

Para la identificación de la frecuencia fundamental en dirección vertical o V, se recurrió a los espectros que se muestran en el las figuras 4.5 a 4.7. En este caso se puede observar que las frecuencias significativas, tanto en los espectros de potencia, como en la función de transferencia se encuentran entre 4.59 a 5.37 Hz.

Cociente	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)
3T-31T	1.367 - 1.514	0.732 - 0.661
9T-31T	1.367 - 1.514	0.732 - 0.661
14V-28V	4.590 - 4.688	0.218 - 0.213
	6.299 - 6.348	0.159 - 0.158
26V-6V	4.590 - 4.785	0.218 - 0.209
	6.299 - 6.396	0.159 - 0.156
	8.691 - 8.789	0.115 - 0.1138
9V-30V	5.273 - 5.371	0.1896 - 0.1862
	8.740 - 8.887	0.1144 - 0.1125
	10.938 - 11.084	0.0914 - 0.0902

Tabla 4.2 Intervalo de frecuencias de vibración en dirección T y V prueba 3

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 3 26V- 6V

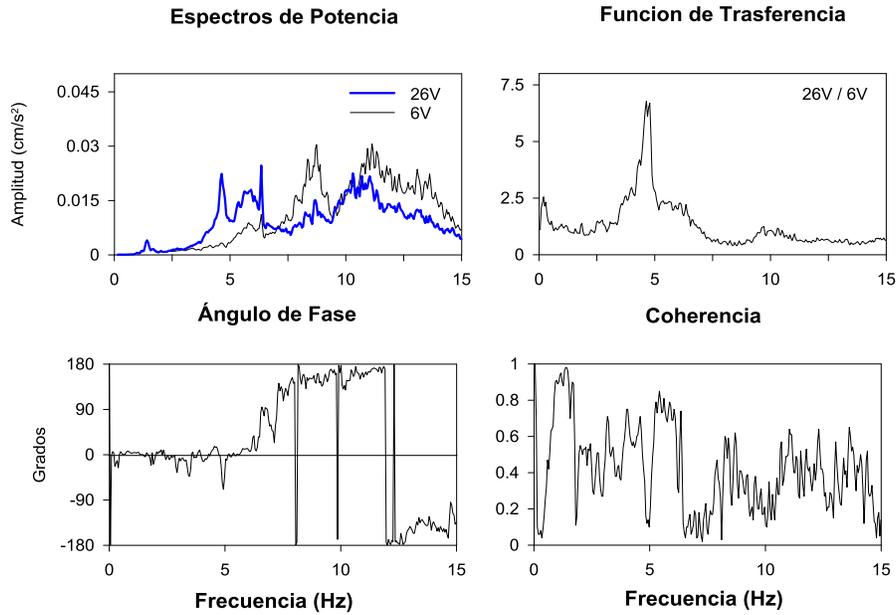


Fig. 4.5 espectros de la prueba 3 puntos 26 y 6 en dirección vertical

## Prueba 3 14V- 28V

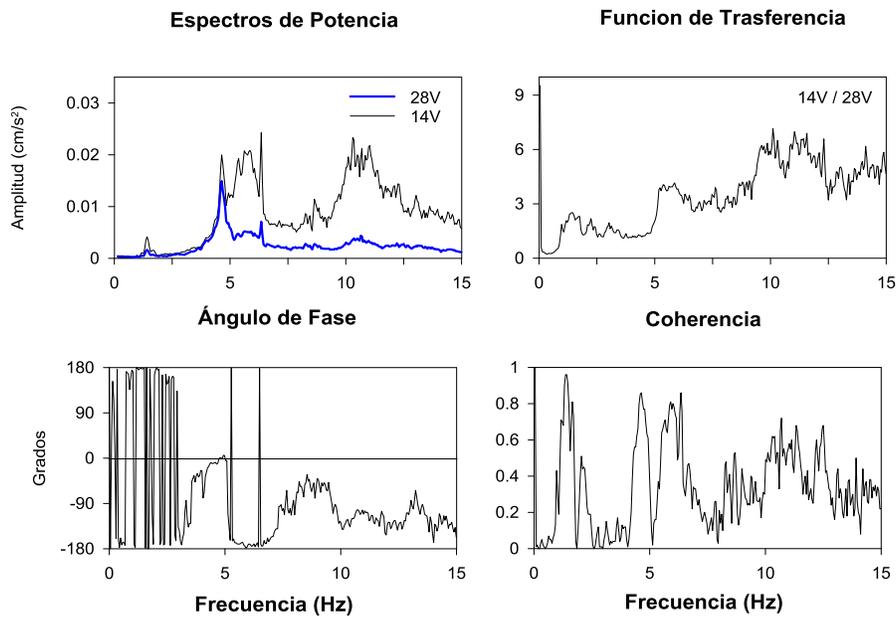


Fig. 4.6 Espectros de la prueba 3 puntos 14 y 28 en dirección vertical

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 3 9V- 30V

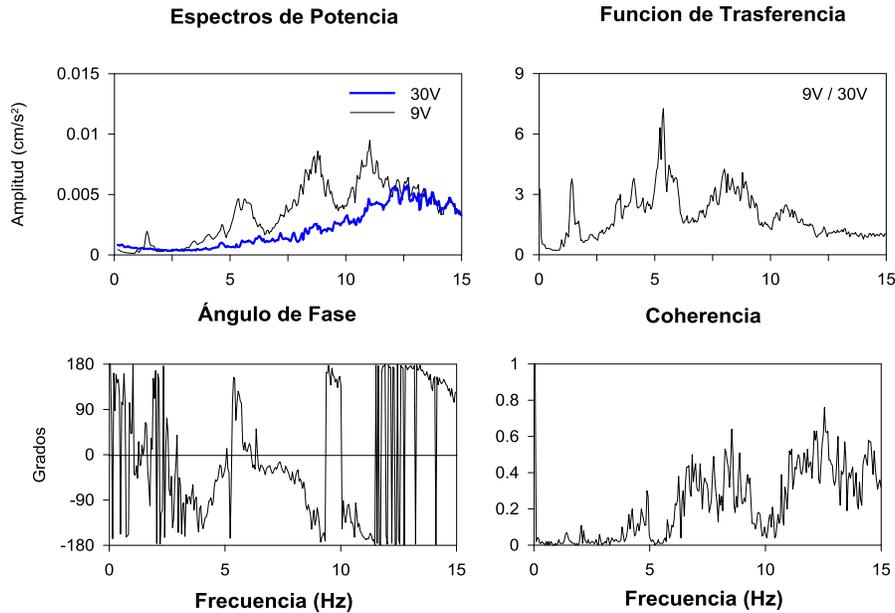


Fig. 4.7 Espectros de la prueba 3 puntos 9 y 30 en dirección vertical

En la tabla 4.2 también se indican otros intervalos de frecuencia que resultan significativos, y que pueden estar asociados a modos superiores de vibrar de la estructura.

Uno de los objetivos de la prueba 4 fue tener la posibilidad de identificar la frecuencia fundamental de torsión del tablero en estudio. Así, en esta prueba se colocaron sensores en los laterales de la dovela central, entre la columna A241 y A242.

En la tabla 4.3 se logra apreciar que las frecuencias más significativas de esta prueba. Se observan intervalos de frecuencias similares a los obtenidos con la prueba 3, sin embargo en esta caso aparecen entre el rango de frecuencias 4.54 a 5.37 Hz en dirección vertical (V) ángulos de fase cercanos a los 180 grados, lo cual implica efectos de torsión. Se vuelven a apreciar amplitudes importantes entre 1.17 y 1.5 Hz en dirección (T) transversal; esto corrobora que la frecuencia fundamental del tablero en esta dirección se encuentra dentro de este rango de frecuencias.

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Cociente	Frecuencia (Hz)	Período (s)
17V-6V	4.541 - 4.736	0.220 - 0.211
	5.273 - 5.371	0.190 - 0.186
19V-8V	4.492 - 4.785	0.223 - 0.209
4V-5V	4.346 - 4.492	0.230 - 0.223
	4.688 - 4.785	0.213 - 0.209
4T-5T	1.172 - 1.465	0.853 - 0.683
4L-5L	4.492 - 4.785	0.223 - 0.209

Tabla 4.3 intervalo de frecuencias de vibración en V, T y L prueba 4

A continuación las graficas de los espectros más representativos de la prueba 4.

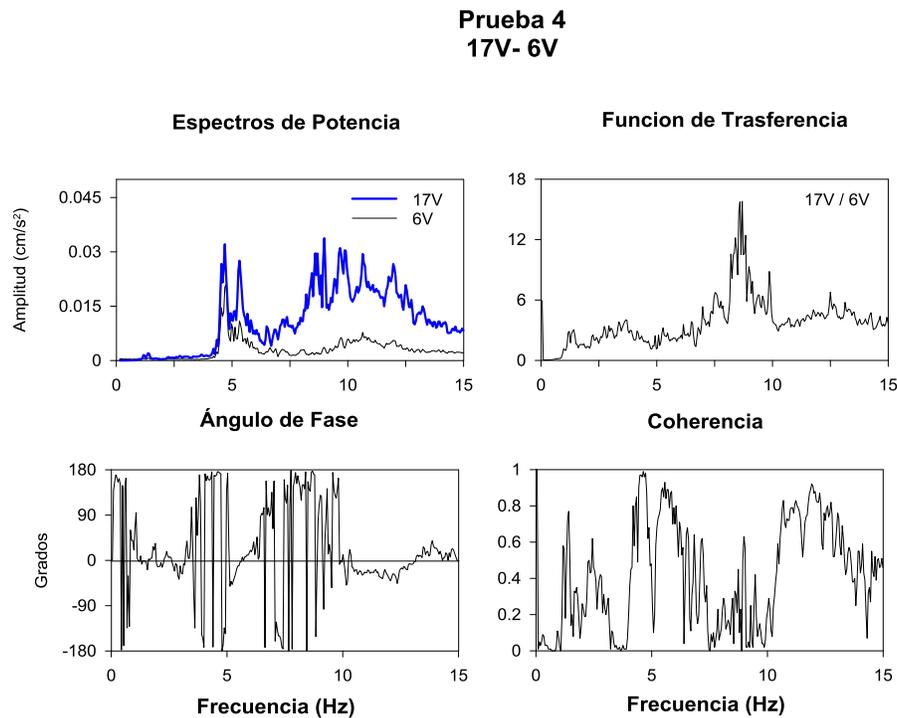


Fig. 4.8 Espectros de la prueba 4 puntos 17 y 6 en dirección vertical

El punto 17V de la figura 4.8 muestra mayor amplitud que el punto 6V en el intervalo de frecuencias de torsión. El punto 17 se dispara mucho en sus amplitudes después de los 6 Hz. Ubicando el rango de frecuencias 4.541 a 4.736 Hz en la mencionada figura se observa que el ángulo de fase es casi de 180 grados; por tanto podríamos mencionar que el rango de

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

frecuencia de vibración es de torsión, además los puntos se localizan en los laterales de la dovela central, es decir de frente y a la mitad de la dovela central.

Mientras que en la figura 4.9 los puntos 19 y 8 también se encuentran prácticamente uno frente a otro y están apoyados casi sobre la columna A241, por tanto sus frecuencias de vibrar son 4.492 a 4.785 Hz y sus ángulos de fase son cercanos a cero.

Se realizaron los cocientes de dos puntos 4 y 5 en sus tres direcciones, estos ubicados muy cerca de la junta de la columna A242. Las figuras 4.10, 4.11 y 4.12, muestra el gran parecido entre estos. Sus frecuencias se muestran en la tabla 4.3.

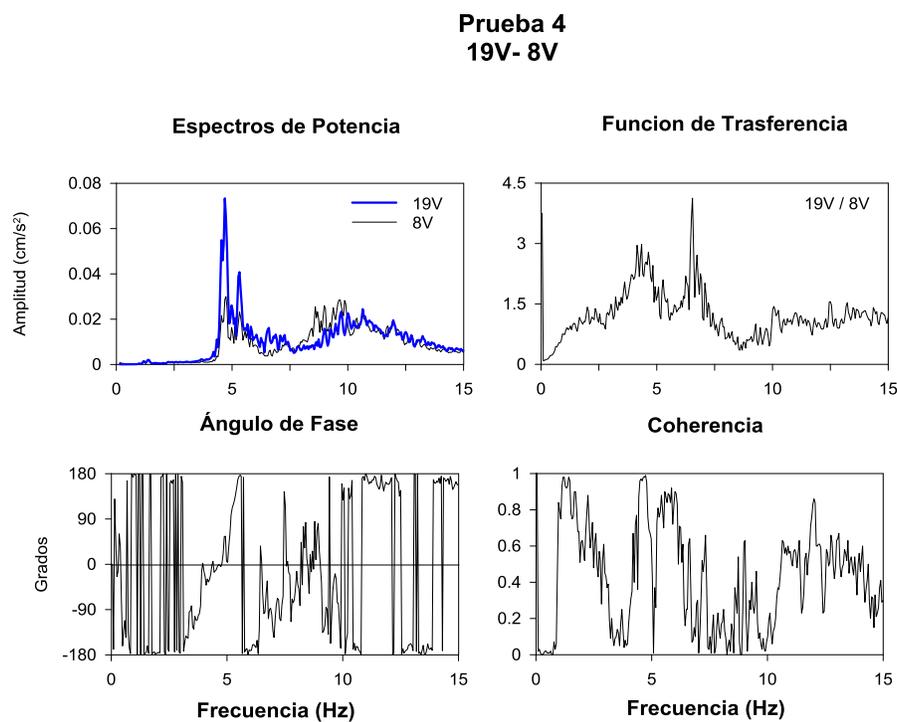


Fig. 4.9 Espectros de la prueba 4 puntos 19 y 8 en dirección vertical

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 4 4V- 5V

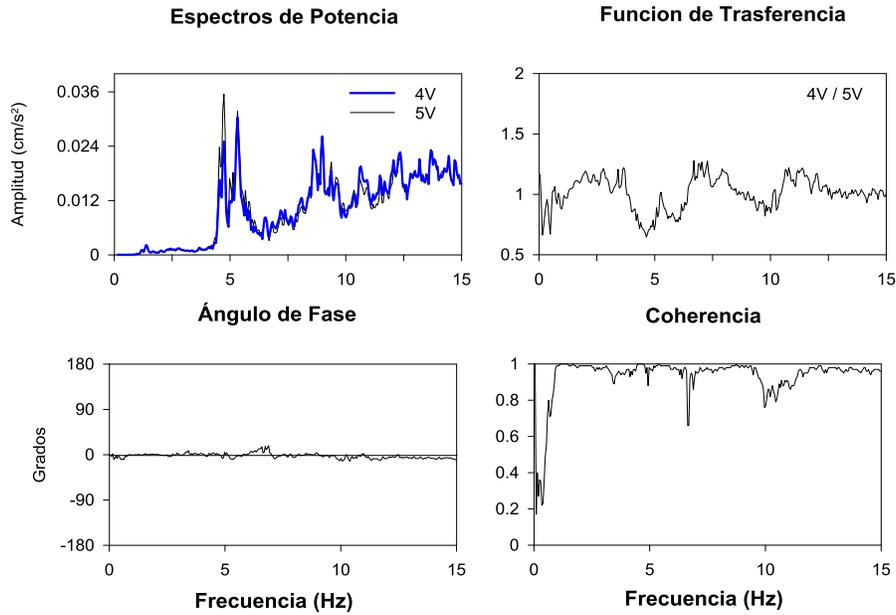


Fig. 4.10 Espectros de la prueba 4 puntos 4 y 5 en dirección vertical

## Prueba 4 4T - 5T

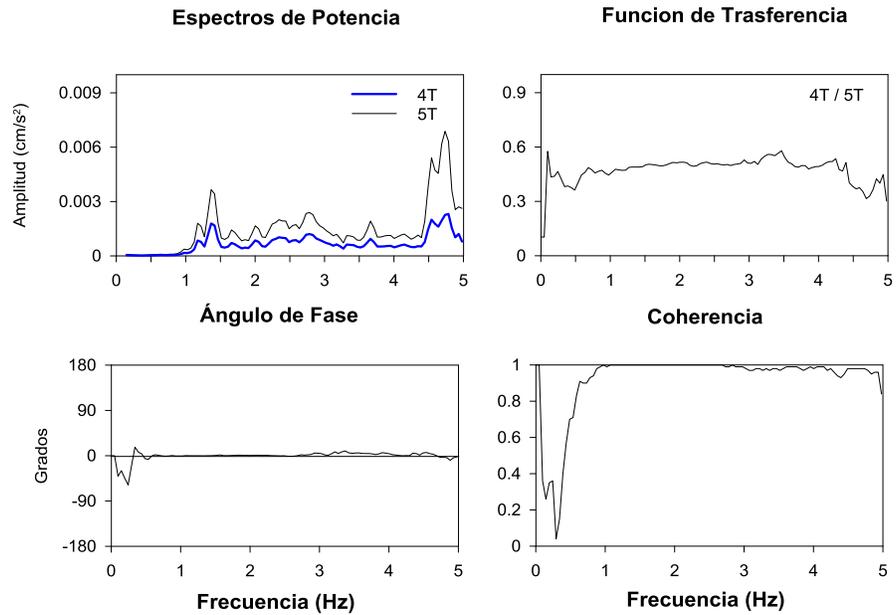


Fig. 4.11 Espectros de la prueba 4 en los puntos 4 y 5 en dirección longitudinal

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 4 4L - 5L

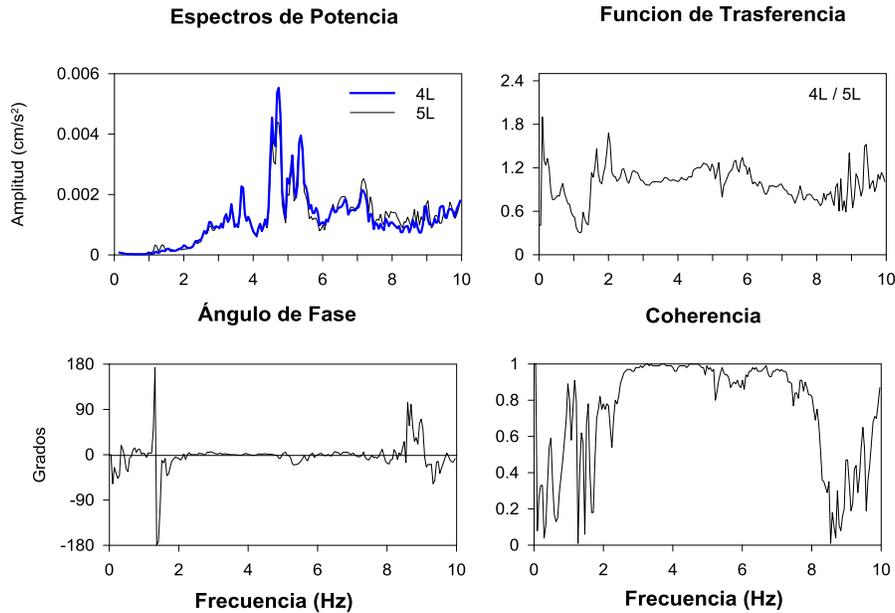


Fig. 4.12 Espectros de la prueba 4 en los puntos 4 y 5 en dirección longitudinal

Como última prueba de vibración ambiental, esta la prueba 7 que consistió en colocar los acelerómetros en la parte superior de la vía es decir a lo largo del tablero de 225 metros en uno de sus laterales, de la columna A240 a A244B.

Como puntos estratégicos fueron aquellos donde estaban en paralelo con las columnas y al centro de la dovela central.

A continuación se muestran los espectros en dirección transversal de la prueba 7 con los puntos m y l, Figura 4.13. Recordando que el punto m se encuentra en una junta mientras que el punto l se encuentra a la mitad de la dovela central entre las columnas A241 y A242. Por tanto en sus espectros se nota que las graficas se parecen aunque en l hay mayor amplitud que en m. Su frecuencia de vibrar es de 1.172 a 1.416 así como 1.660 a 1.758 Hz.

En la tabla 4.4 se muestran los periodos de vibrar y sus frecuencias más representativas de la prueba 7.

En la figura 4.14 muestra el espectro de dos puntos cerca de los ejes de las columnas A242 y A243. El grafico es parecido aunque k tiene algunas frecuencias con mayor amplitud. Su frecuencia es de 1.318 a 1.416 así como de 1.660 a 1.758 Hz.

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 7 mT - IT

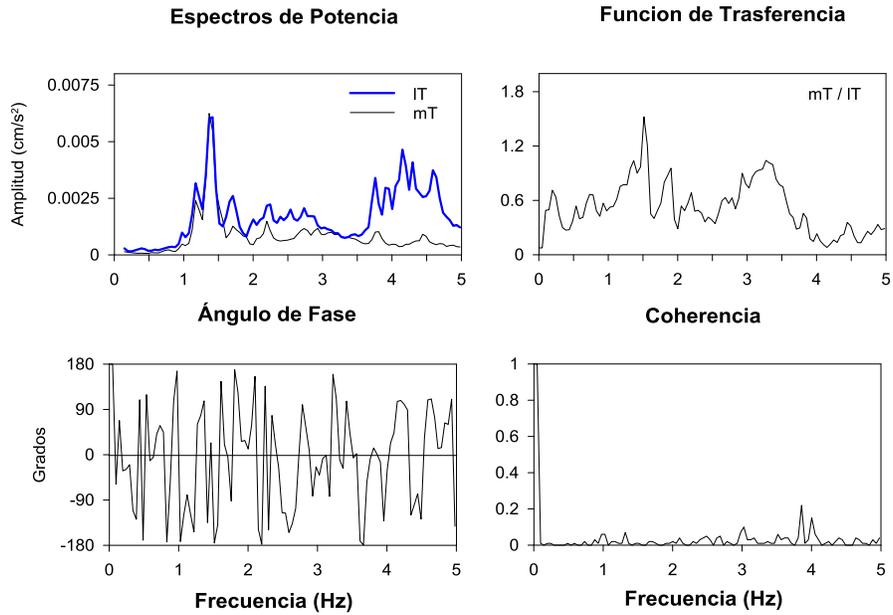


Fig. 4.13 Espectros de los puntos m y l en dirección transversal de la prueba 7

## Prueba 7 kT - jT

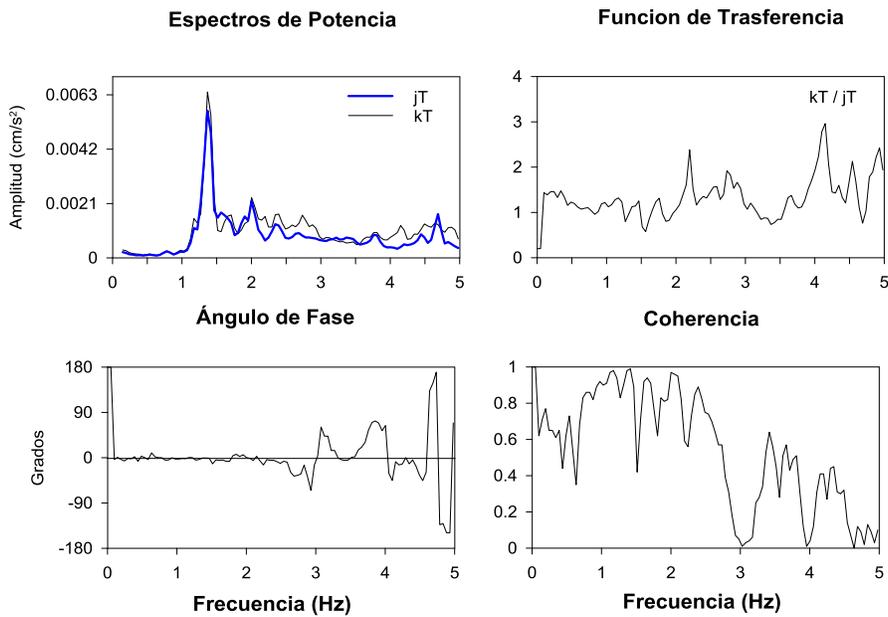


Fig. 4.14 Espectros de los puntos k y j de la prueba 7 en dirección transversal

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A continuación se muestran los espectros de los puntos h, e y d con respecto al punto k, observando que va teniendo mayor distancia cada punto con respecto a k respectivamente.

## Prueba 7 hT - kT

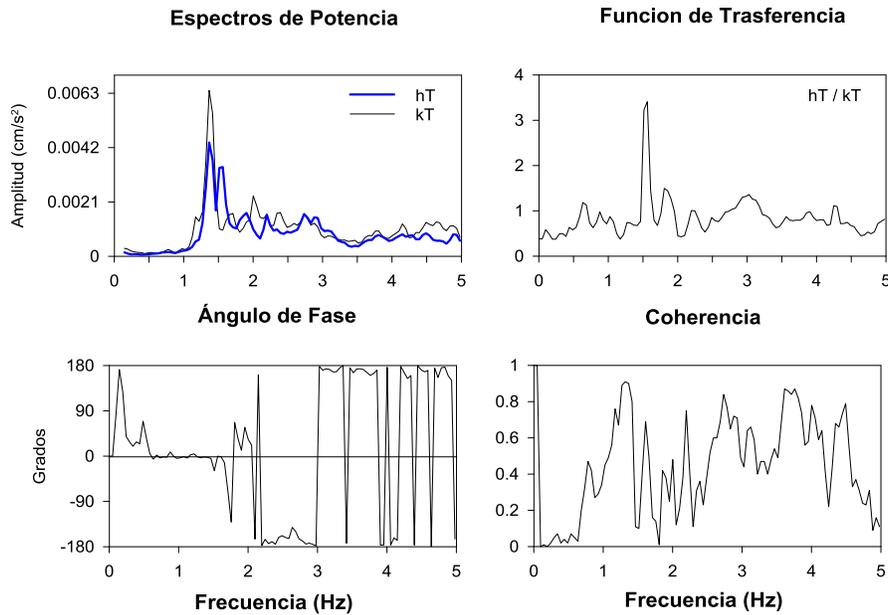


Fig. 4.15 Espectros de los puntos h y k en dirección transversal de la prueba 7

## Prueba 7 eT - kT

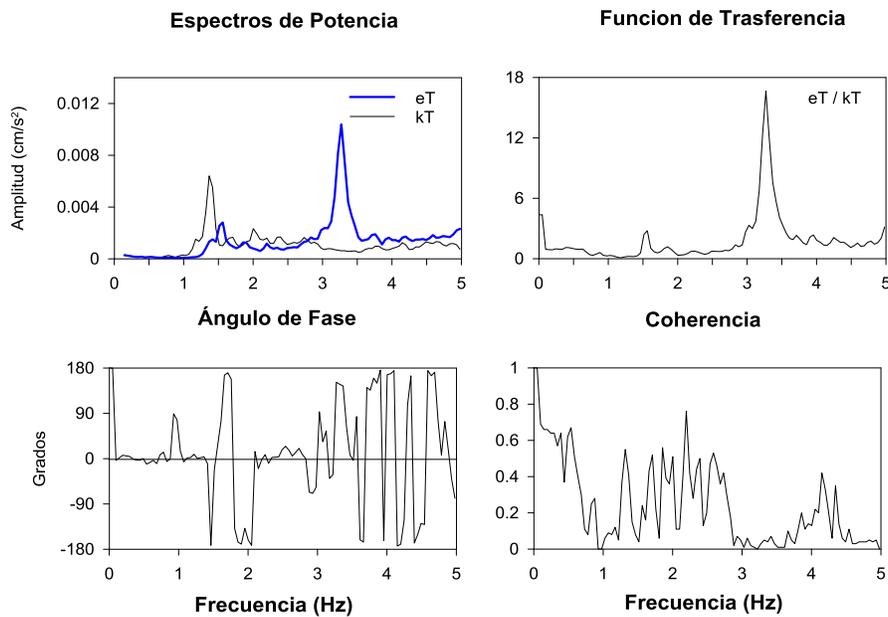


Fig. 4.16 Espectros de la prueba 7, puntos e y k en dirección transversal

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En la figura 4.15 se muestra que los espectros son parecidos aun que ligeramente con mayor amplitud en k. su frecuencia fundamental es de 1.172, 1.318 a 1.416 y 1.514 a 1.563 Hz respectivamente.

Los espectros de la figura 4.16 muestran que se parecen hasta los 3 Hz con mayor amplitud en k y desplazado e con respecto a k. Sus frecuencias van de 1.318 a 1.367 y 3.223 a 3.320 hertz.

La figura 4.17 muestra unos espectros parecidos, muy ligeramente con mayor amplitud en k en algunos hertz; y sus frecuencias naturales son de 1.318 a 1.416 y 1.514 a 1.563 hertz.

Para los puntos j y m en dirección vertical de la figura 4.18, los puntos están colocados en paralelo a la columna A243 y A241 respectivamente. Sus frecuencias son 1.318 a 1.416, 5.615 a 5.811, 8.301 a 8.398 y 10.645 a 10.791 Hz. (tabla 4.4)

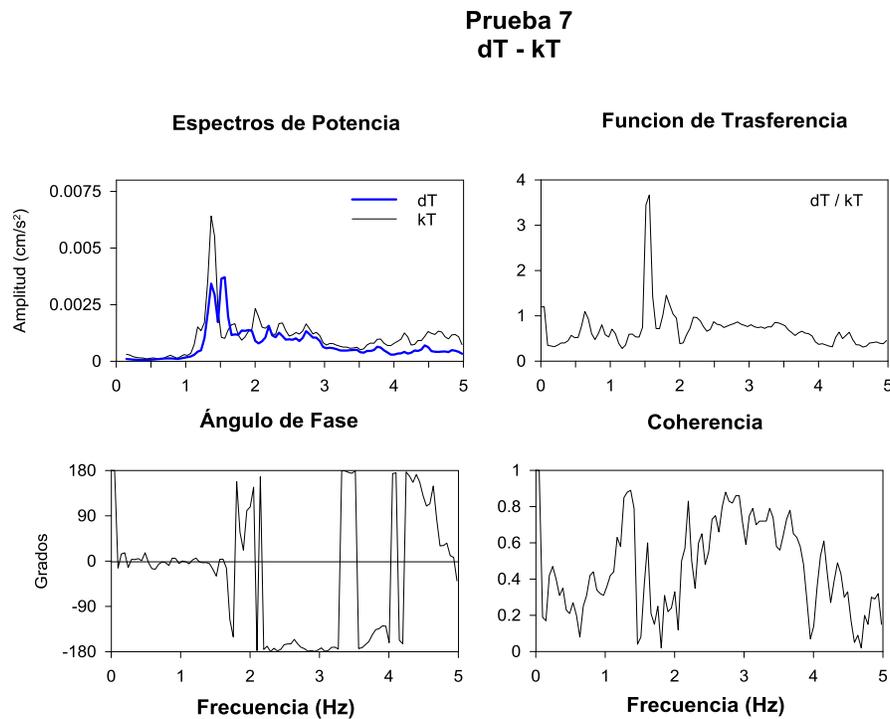


Fig. 4.17 espectros de los puntos d y k en dirección transversal de la prueba 7

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 7 jV- mV

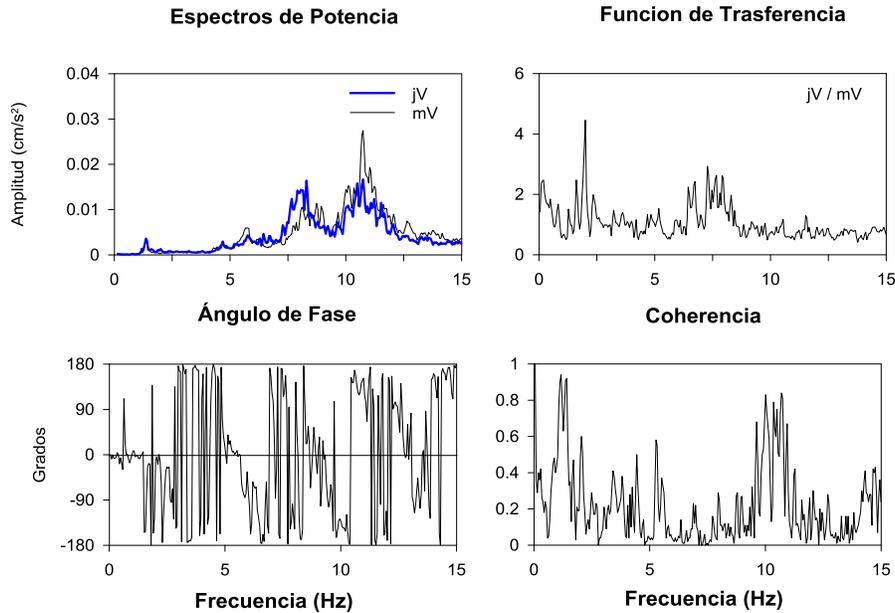


Fig. 4.18 Espectros de los puntos j y m en dirección vertical de la prueba 7

Cociente	Frecuencia (Hz)	Período (s)
mT-IT	1.172 - 1.416	0.853 - 0.706
	1.660 - 1.758	0.602 - 0.569
kT-jT	1.318 - 1.416	0.759 - 0.706
	1.953 - 2.051	0.512 - 0.488
hT-kT	1.172	0.853
	1.318 - 1.416	0.759 - 0.706
	1.514 - 1.563	0.661 - 0.640
eT-kT	1.318 - 1.367	0.759 - 0.732
	3.223 - 3.320	0.310 - 0.301
dT-kT	1.318 - 1.416	0.759 - 0.706
	1.514 - 1.563	0.661 - 0.640
jV-mV	1.318 - 1.416	0.759 - 0.706
	5.615 - 5.811	0.178 - 0.172
	8.301 - 8.398	0.120 - 0.119
	10.645 - 10.791	0.094 - 0.093

Tabla 4.4 Intervalo de frecuencias en T y V prueba 7

### 4.2 Efectos de interacción Terreno - Cimentación

En este subtema vamos a analizar la prueba 2 que fue realizada antes de la prueba de tracción prueba 2b. Con los sensores colocados en la parte superior de las dovelas y parte

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

de la cimentación del sitio, nos puede ayudar a saber que tanta relación tiene la estructura con el sitio donde esta cimentada.

A continuación se muestran los cocientes de la prueba 2 realizada en la Vía elevada.

En la siguiente figura 4.19 se muestra el punto 2 que se localiza en el tablero sobre la columna A242 y el punto 37 que está en el dado de cimentación de dicha columna. Se observa que hay mayor amplitud en el punto 2 y que el grafico no se parece en nada. Sus frecuencias son de 1.343 a 1.416, 1.538 a 1.563 y 1.660 a 1.685 Hz. (tabla 4.5).

En la figura 4.20 es el punto 12 localizado la parte superior de la estructura en la dovela apoyada sobre la columna A240 y el punto 33 colocado en el dado de cimentación de dicha columna. De igual forma que la anterior figura los espectros no se parecen y además existe mayor amplitud en el punto 12, sus frecuencias son muy parecidas a las anteriores son de 1.709 a 1.904 Hz.

Para los puntos 9 y 31 de la figura 4.21, localizado en la parte superior de la columna A241 y en el dado de cimentación de dicha columna respectivamente; el grafico es el mismo al de los anteriores el que tiene mayor amplitud es el punto 9 que está en la parte superior de la estructura, sus frecuencias de vibrar son 1.147 a 1.904 Hz.

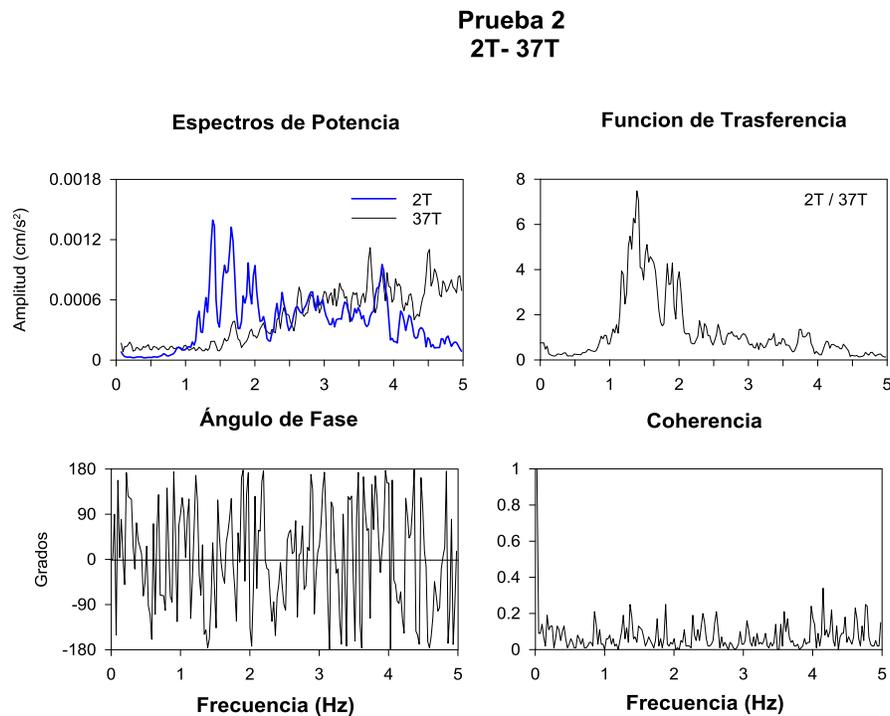


Fig. 4.19 Espectros de la prueba 2 puntos 2 y 37 en dirección transversal

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 2 12T- 33T

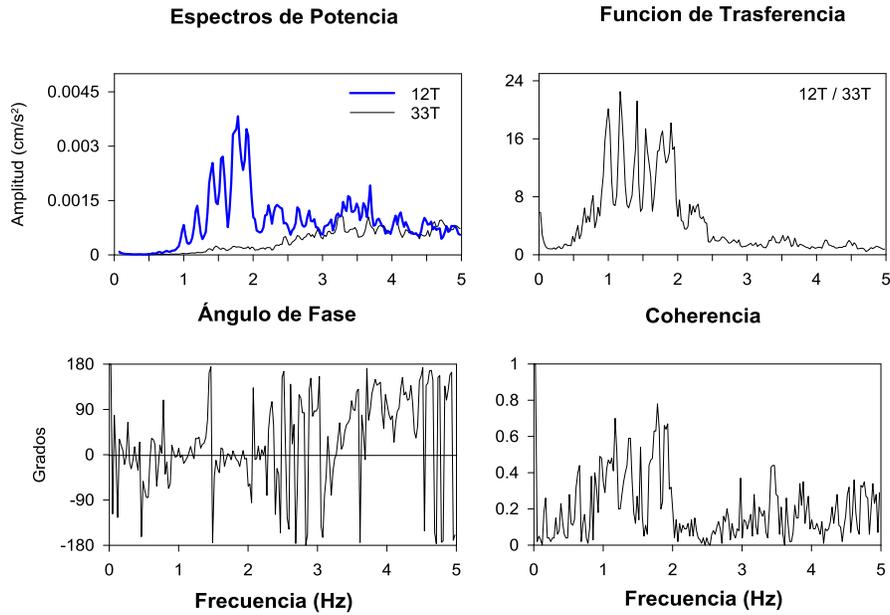


Fig. 4.20 Espectros de los puntos 12 y 33 en dirección transversal de la prueba 2

## Prueba 2 9T- 31T

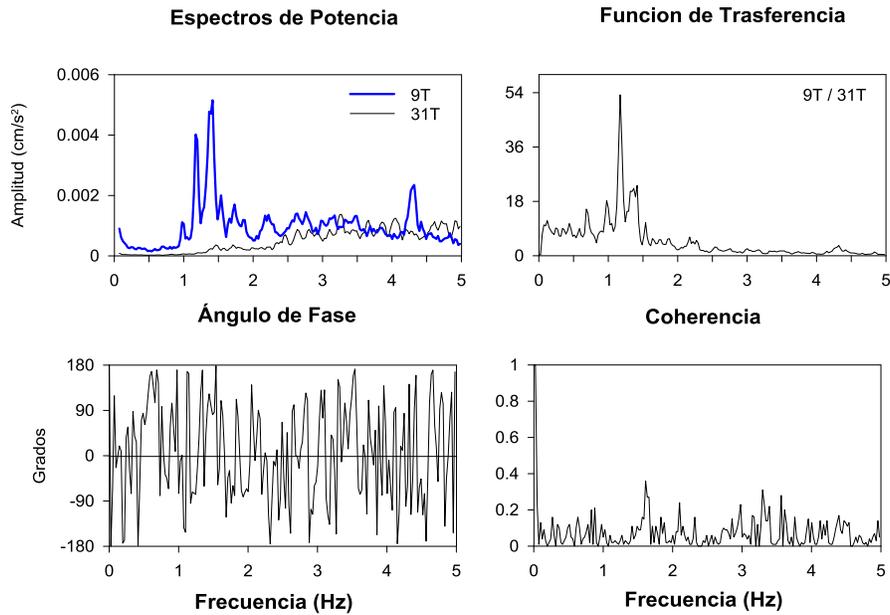


Fig. 4.21 Espectros de los puntos 9 y 31 en dirección transversal de la prueba 2

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Las figuras siguientes 4.22, 4.23 y 4.24 muestran los espectros de los puntos de la parte superior de la dovela entre las columnas A241 y A242 con respecto al punto 40 localizado a ras del suelo del sitio en estudio.

Las tres figuras mencionadas muestran que la disposición de los espectros es parecida a las gráficas anteriores; los puntos de la parte superior de la estructura, también presentan mayor amplitud que el punto en el suelo.

Sus rangos de frecuencias son muy parecidos entre ellas y se muestran en la tabla 4.5.

La figura 4.25 está mostrando los espectros del punto 9 localizado en la parte superior de la estructura y el 20 que esta frente al punto 9 sobre la columna A241 en dirección vertical. El comportamiento de los espectros es parecido aun que el que tiene mayor amplitud es el punto 20, sus frecuencias de vibrar son las siguientes 5.786 a 5.835, 8.081 a 8.154 y 8.691 a 8.765 Hz.

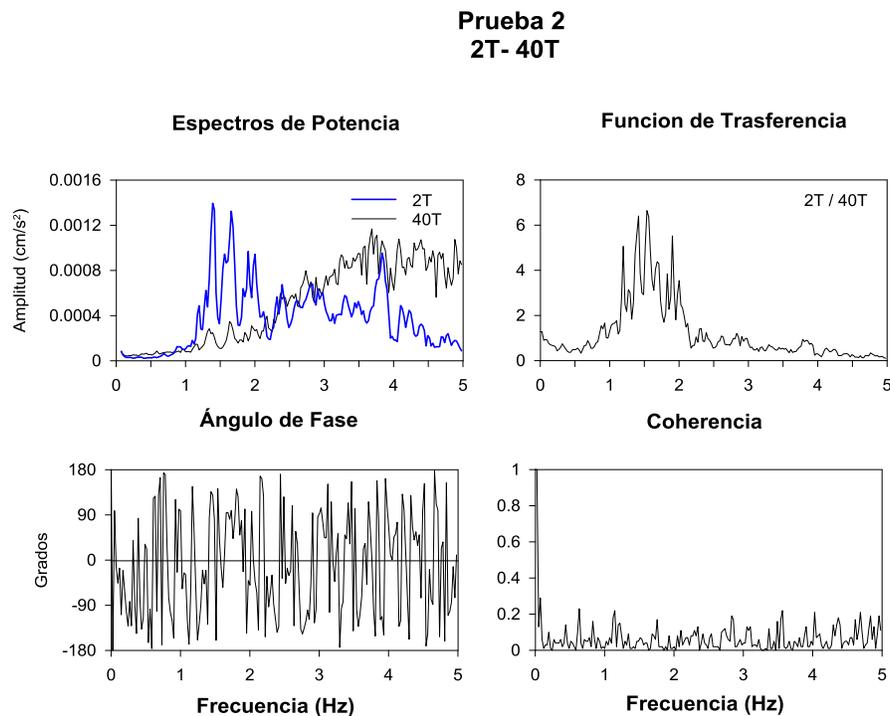


Fig. 4.22 Espectros de los puntos 2 y 40 en dirección transversal de la prueba 2

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 2 12T- 40T

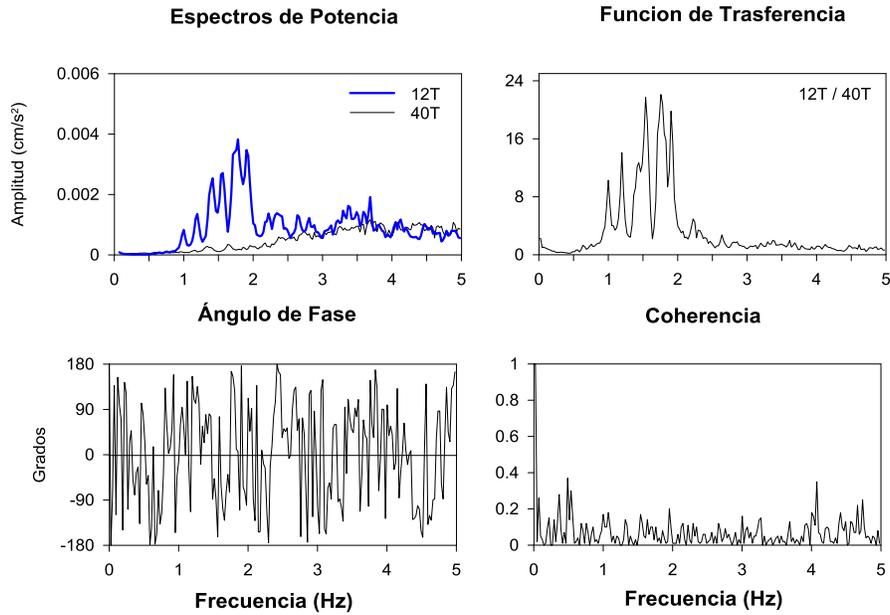


Fig. 4.23 Espectros de los puntos 12 y 40 en dirección transversal de la prueba 2

## Prueba 2 9T- 40T

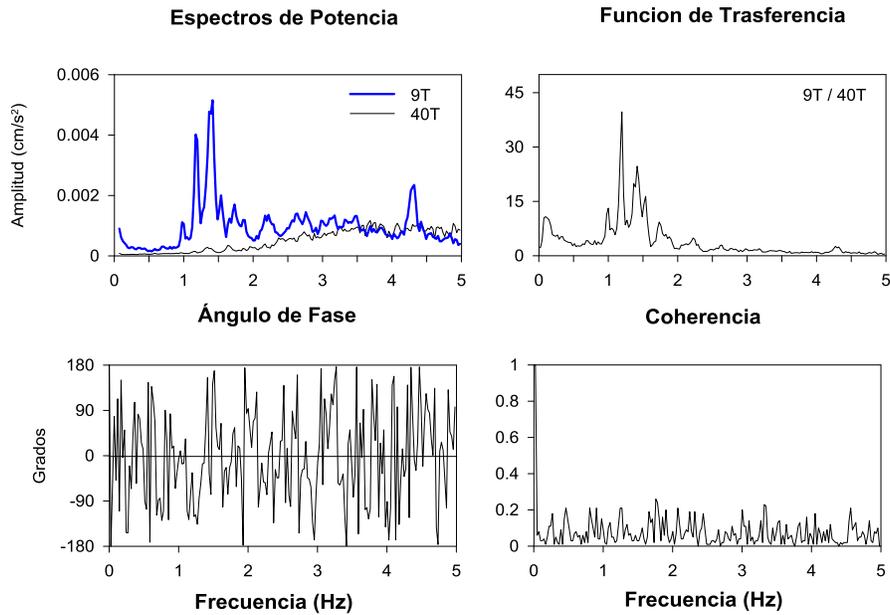


Fig. 4.24 Espectros de los puntos 9 y 40 en dirección transversal de la prueba 2

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 2 9V - 20V

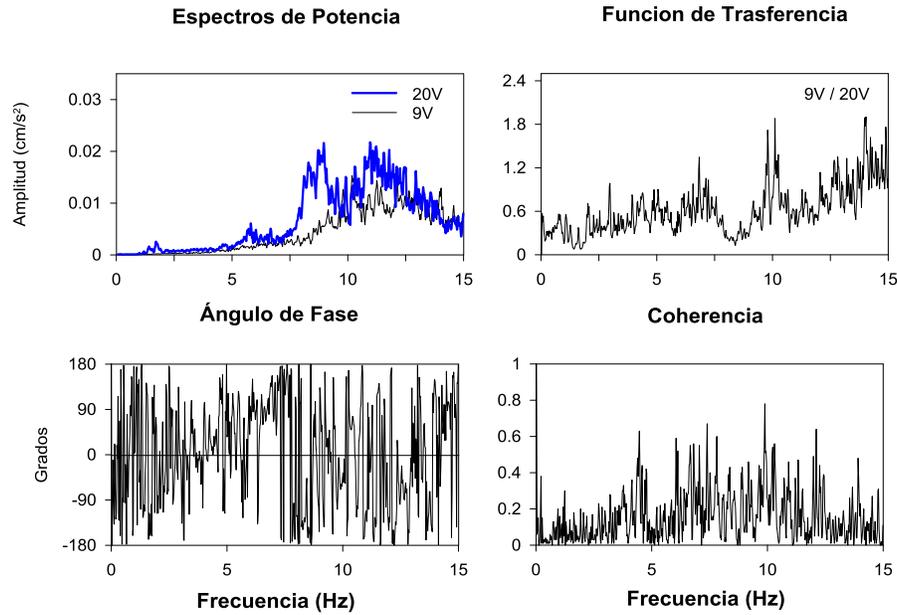


Fig. 4.25 Espectros de los puntos 9 y 20 en dirección vertical de la prueba 2

A continuación la tabla 4.5 de las frecuencias de la prueba 2.

Cociente	Frecuencia (Hz)	Período (s)
2T - 37T	1.343 - 1.416	0.745 - 0.706
	1.538 - 1.563	0.650 - 0.640
	1.660 - 1.685	0.602 - 0.593
12T - 33T	1.709 - 1.904	0.585 - 0.525
9T - 31T	1.147 - 1.343	0.872 - 0.745
12T-40T	1.685 - 1.807	0.593 - 0.553
9T-40T	1.147 - 1.196	0.872 - 0.836
	1.343 - 1.392	0.745 - 0.718
2T - 40T	1.343 - 1.416	0.745 - 0.706
9V-20V	5.786 - 5.835	0.173 - 0.171
	8.081 - 8.154	0.124 - 0.123
	8.691 - 8.765	0.115 - 0.114

Tabla 4.5 Intervalo de frecuencias de la prueba 2 en T y V

### 4.3 Resultado de pruebas Dinámicas

En estas pruebas vamos a compara las pruebas con el paso de vehículos (5c) y la prueba posterior (5p).

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

De las pruebas de vehículos y posteriores se analizaran 4 y 4 graficas con los mismos puntos respectivamente para obtener las posibles variantes.

Como primera grafica analizaremos la figura 4.27 los puntos son 17 situado en la orilla de la dovela central exactamente a la mitad, y el punto 9 situado en la orilla de dovela de apoyo sobre la columna A241. En el grafico se aprecia el parecido de los espectros aun que muy ligeramente con mayor amplitud en 17. Sus frecuencias de vibrar son 4.639 a 4.785, 9.326 a 9.473 y 10.010 a 10.205 como se muestra en la tabla 4.6.

### Prueba 5c 17V- 9V

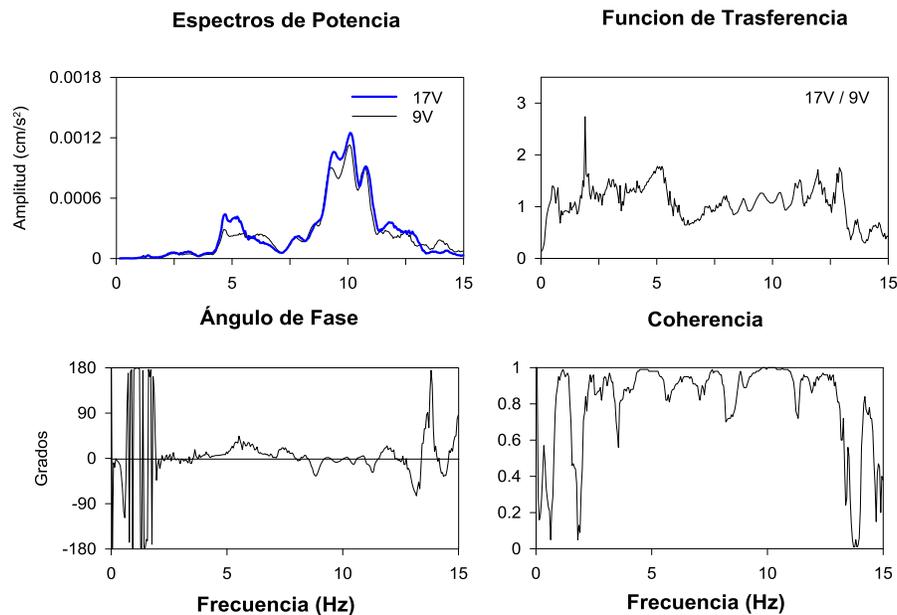


Fig. 4.26 Espectros de la prueba 5c puntos 17 y 9 dirección vertical

Para las siguientes tres figuras 4.28, 4.29 y 4.30 se analizan los puntos 6 y 9 en las tres direcciones, el primero localizado en la orilla de la dovela central y el segundo en la orilla de la dovela de apoyo en la columna a 241.

En las tres graficas se aprecia el gran parecido entre ellos aunque muy ligeramente con mayor amplitud en el punto 6.

En la tabla 4.6 se muestran los intervalos de frecuencias de la prueba 5.

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 5c 6V- 9V

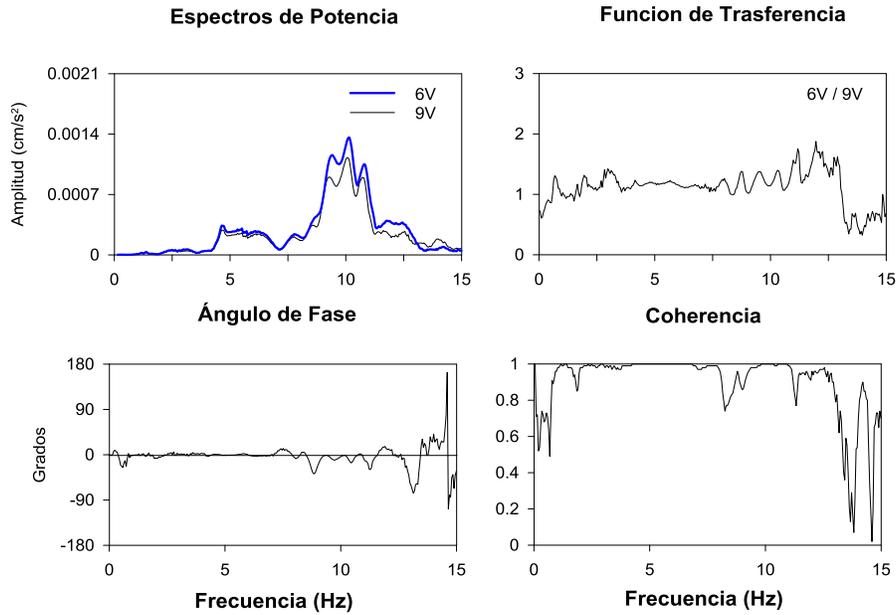


Fig. 4.27 Espectros de los puntos 6 y 9 de la prueba 5c en dirección vertical

## Prueba 5c 6T- 9T

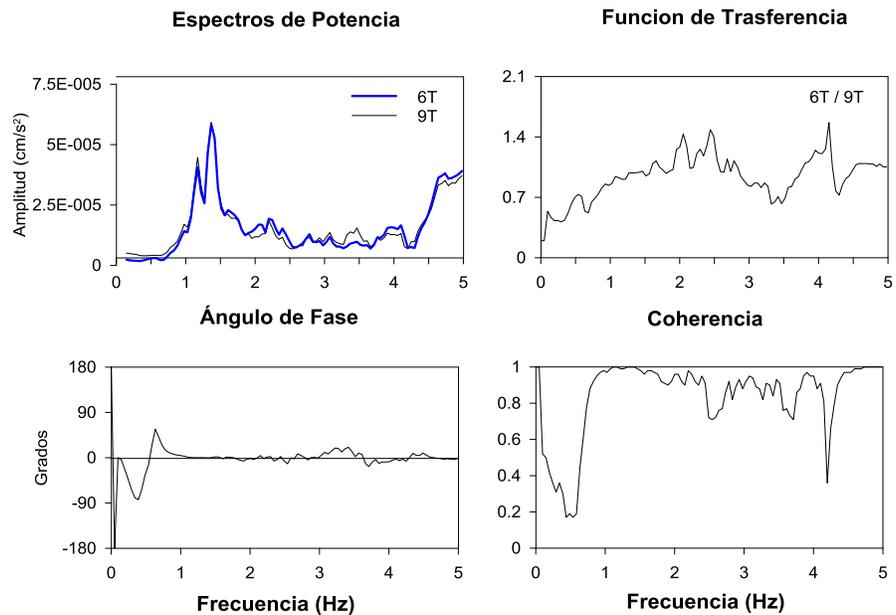


Fig. 4.28 Espectros de los puntos 6 y 9 en dirección transversal de la prueba 5c

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 5c 6L - 9L

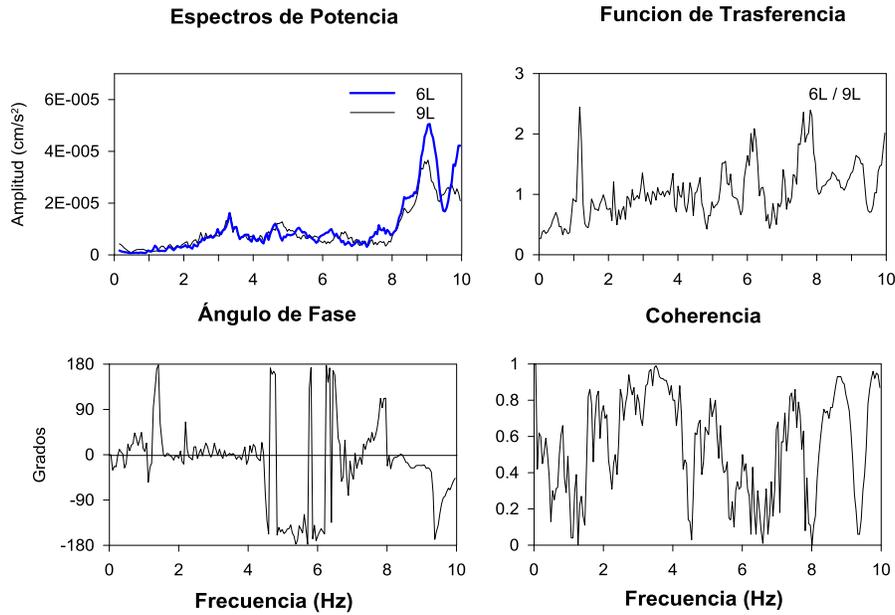


Fig. 4.29 Espectros de los puntos 6 y 9 en dirección longitudinal de la prueba 5c

Cociente	Frecuencia (Hz)	Período (s)
17V-9V	4.639 - 4.785	0.216 - 0.209
	9.326 - 9.473	0.107 - 0.106
	10.010 - 10.205	0.100 - 0.098
6V-9V	4.590 - 4.736	0.2179 - 0.2111
	9.326 - 9.521	0.1072 - 0.1050
	10.059 - 10.205	0.0994 - 0.0980
6T-9T	1.123 - 1.221	0.890 - 0.819
	1.318 - 1.465	0.759 - 0.683
6L-9L	3.271 - 3.369	0.306 - 2.97
	4.736 - 4.834	0.211 - 0.207

Tabla 4.6 intervalo de frecuencias de la prueba 5c en V, T y L

A continuación se muestran las figuras de los espectros de la prueba 5p, recordemos que esta fue una prueba posterior a la de camiones y por tanto la estructura aun estaba avivada.

En la figura 4.31 se muestra que los puntos 17 y 9 en dirección vertical ya no se parecen en sus espectros como en la prueba 5c. y de igual forma para la figura 4.32 con los puntos 6 y 9 en dirección vertical.

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 5p 17V- 9V

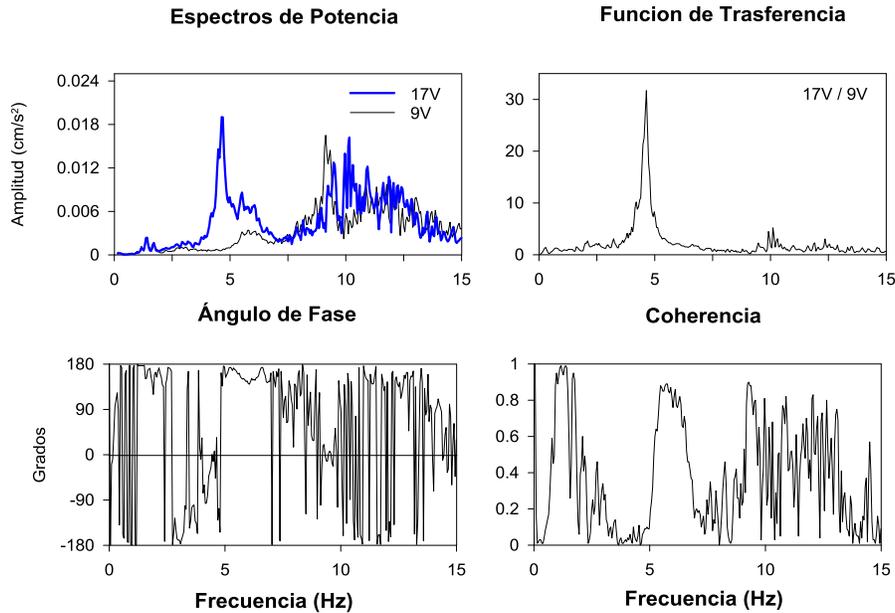


Fig. 4.30 Espectros de los puntos 17 y 9 en dirección vertical de la prueba 5p

## Prueba 5p 6V- 9V

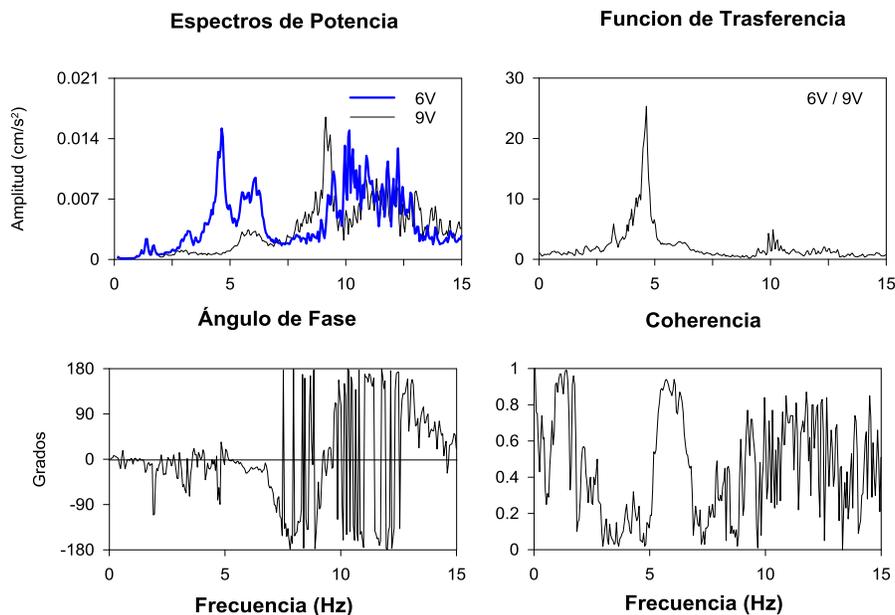


Fig. 4.31 Espectros de los puntos 6 y 9 en dirección vertical de la prueba 5p

Pero en las figuras 4.33 y 4.34 que están los puntos 6 y 9 en dirección transversal y longitudinal respectivamente, aquí si se aprecia el parecido tanto en esta prueba p como en la 5c.

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 5p 6T- 9T

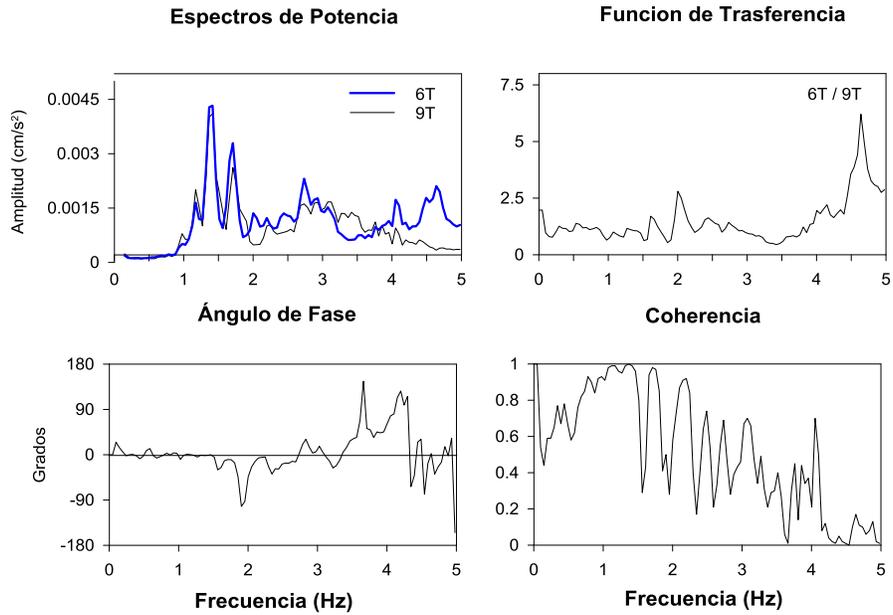


Fig. 4.32 Espectros de los puntos 6 y 9 en dirección transversal de la prueba 5p

## Prueba 5p 6L - 9L

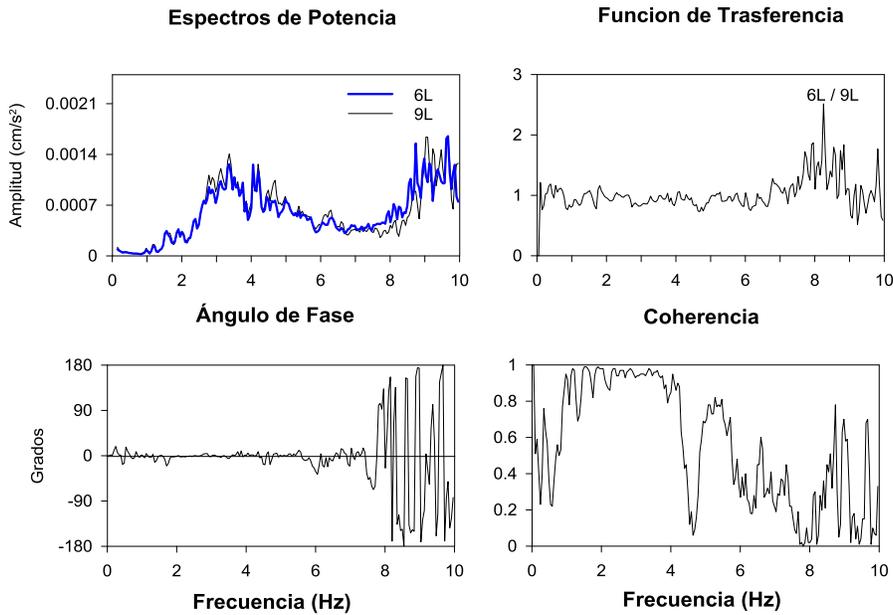


Fig. 4.33 Espectros de los puntos 6 y p en dirección longitudinal de la prueba 5p

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Sin embargo en la tabla 4.7 sus intervalos de frecuencia de la prueba 5p no varían tanto de la prueba 5c.

Cociente	Frecuencia (Hz)	Período (s)
17V-9V	4.639 - 4.688	0.216 - 0.213
	9.424 - 9.521	0.106 - 0.105
	10.107 - 10.156	0.099 - 0.098
6V-9V	4.590 - 4.688	0.218 - 0.213
	5.957 - 6.104	0.168 - 0.164
	9.033 - 9.180	0.111 - 0.109
6T-9T	1.123 - 1.221	0.890 - 0.819
	1.367 - 1.416	0.732 - 0.706
	1.660 - 1.758	0.602 - 0.569
6L-9L	2.734 - 2.930	0.366 - 0.341
	3.320 - 3.418	0.301 - 0.293
	4.004 - 4.102	0.250 - 0.244

Tabla 4.7 Intervalo de frecuencias de la prueba 5p en V, T y L

### 4.4 Resultados de pruebas de Tracción

La misma prueba 2 se sometió a una carga lateral por la columna A242, así que las siguientes figuras las analizaremos y compararemos con las de la prueba dos, vistas en el subtema 4.2.

Como primera figura esta la 4.35 con los puntos 2 y 37 en dirección transversal con frecuencias de 1.367 a 1.416 Hz, muy parecidas a las de la prueba 2 del aparatado 4.2.

De la figura 4.36 comparada con la de la prueba 2 es parecido y de igual forma el de mayor amplitud es el punto 12 y sus frecuencias son 1.318 a 1.392 Hz que son más bajas que las de la prueba 2.

Para la figura 4.37 el punto con mayor amplitud es el 9 y la frecuencia de vibrar es de 1.318 a 1.440 Hz frecuencias más grandes a las de la prueba 2, aun así el grafico se sigue pareciendo.

Las figuras 4.38, 4.39 y 4.40 son figuras parecidas a las de la prueba 2 sus frecuencias son de 1.367 a 1.416, 1.343 a 1.416 y 1.367 a 1.440 Hz respectivamente. Las frecuencias de los cocientes 12T-40T son más bajas que las de la prueba 2, mientras que las frecuencias de los cocientes 9T-40T y 2T-40T son parecidos.

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 2b 2T- 37T

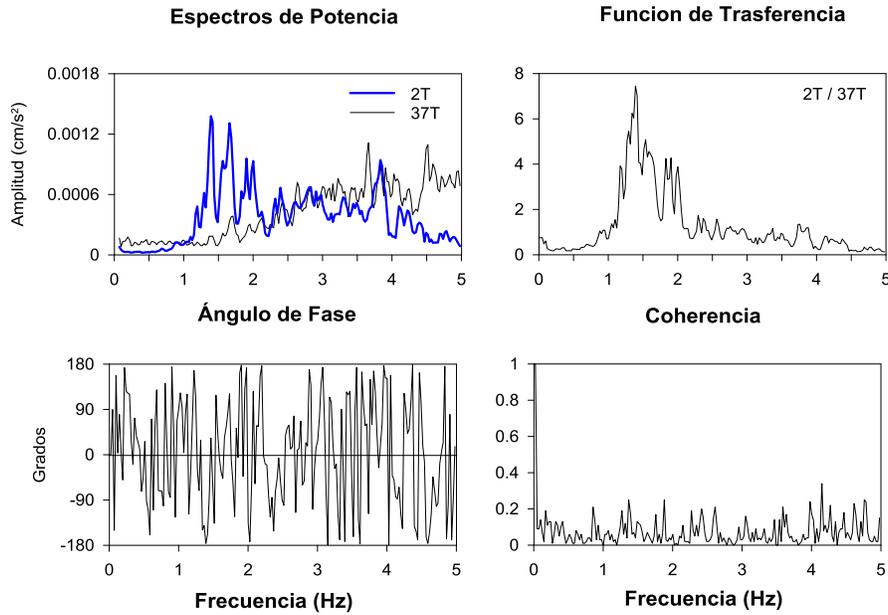


Fig. 4.34 Espectros de los puntos 2 y 37 en dirección transversal de la prueba 2b

## Prueba 2b 12T- 33T

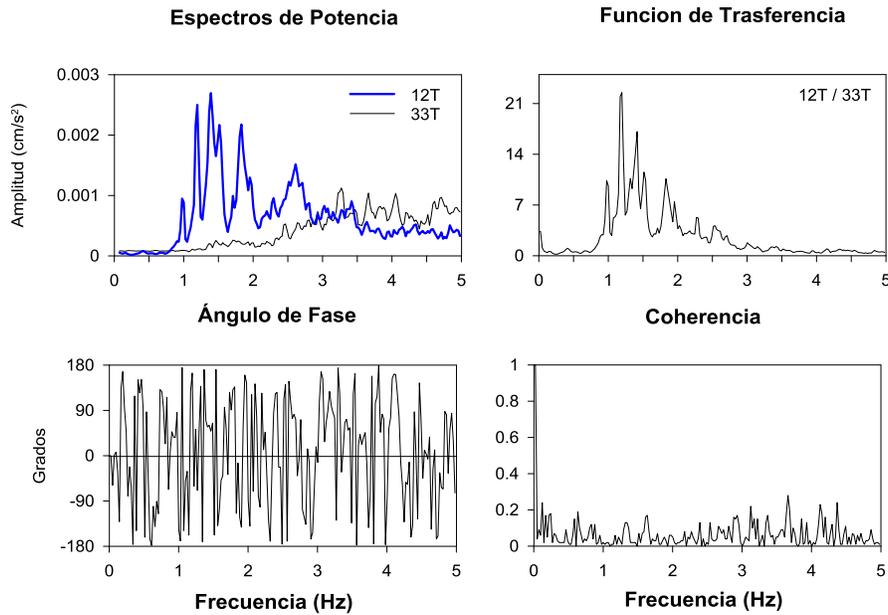


Fig. 4.35 Espectros de los puntos 12 y 33 en dirección transversal de la prueba 2b

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 2b 9T- 31T

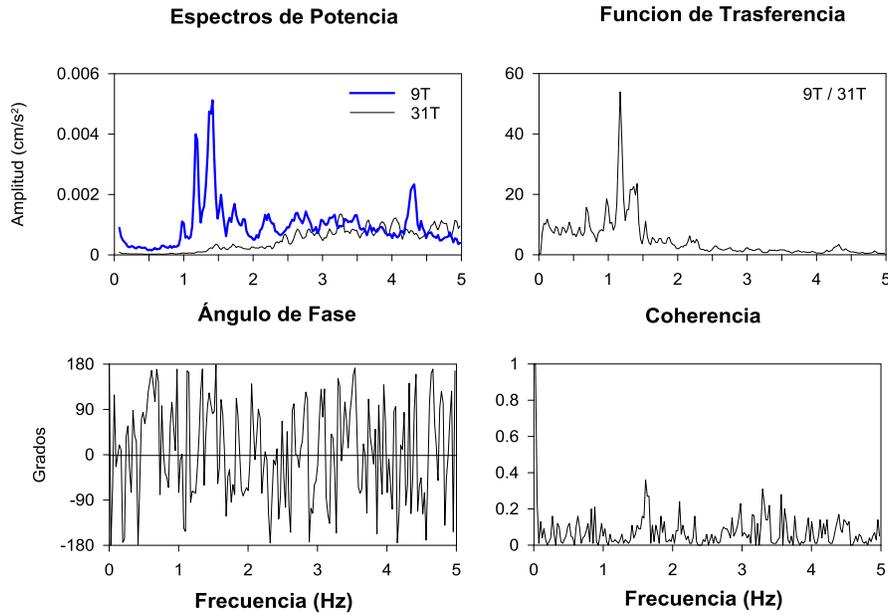


Fig. 4.36 Espectros de los puntos 9 y 31 en dirección transversal de la prueba 2b

## Prueba 2b 12T- 40T

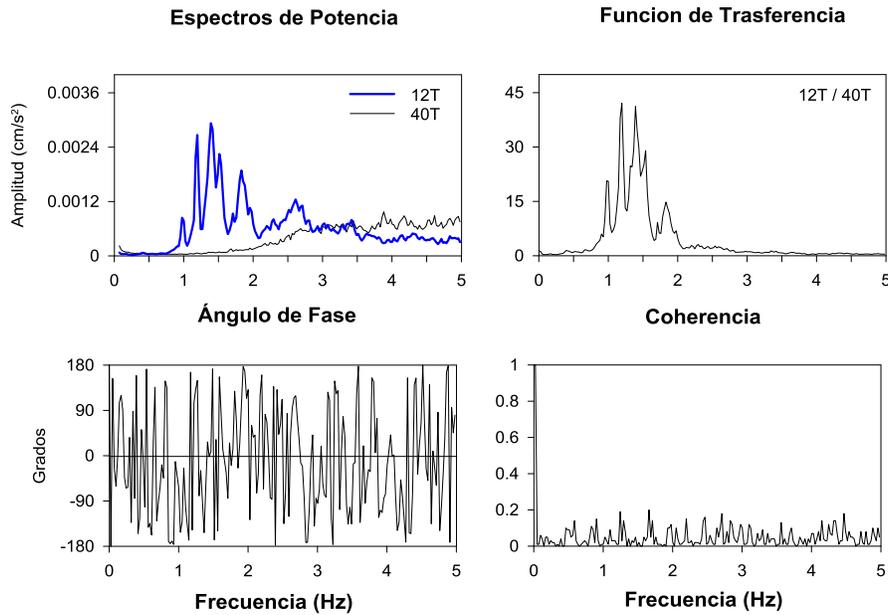


Fig. 4.37 Espectros de los puntos 12 y 40 en dirección transversal de la prueba 2b

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 2b 9T- 40T

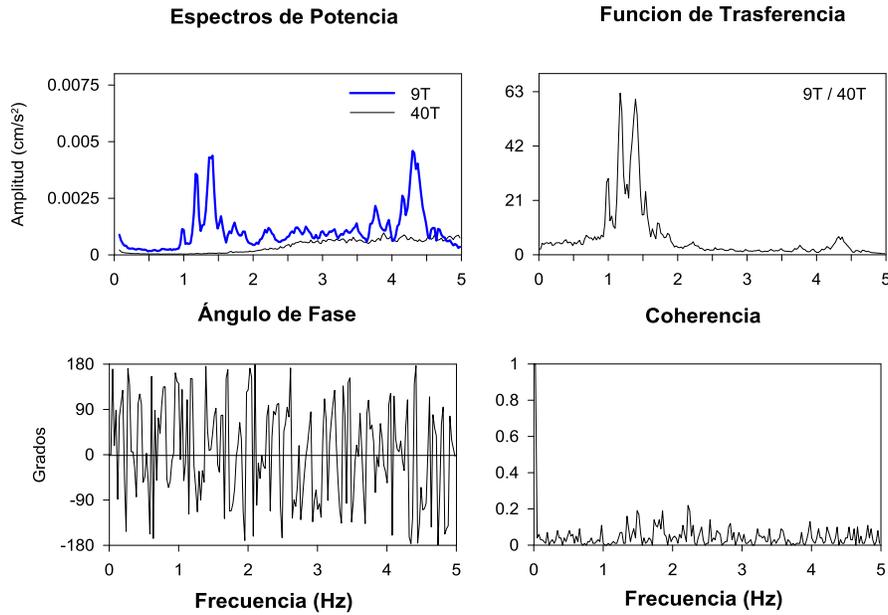


Fig. 4.38 Espectros de los puntos 9 y 40 en dirección transversal de la prueba 2b

## Prueba 2b 2T- 40T

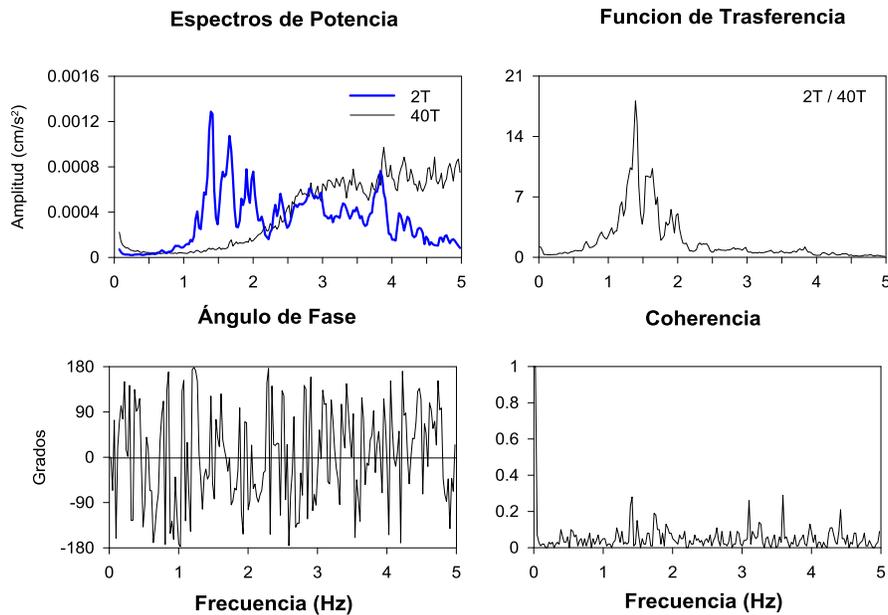


Fig. 4.39 Espectros de los puntos 2 y 40 en dirección transversal de la prueba 2b

# ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## Prueba 2b 9V - 20V

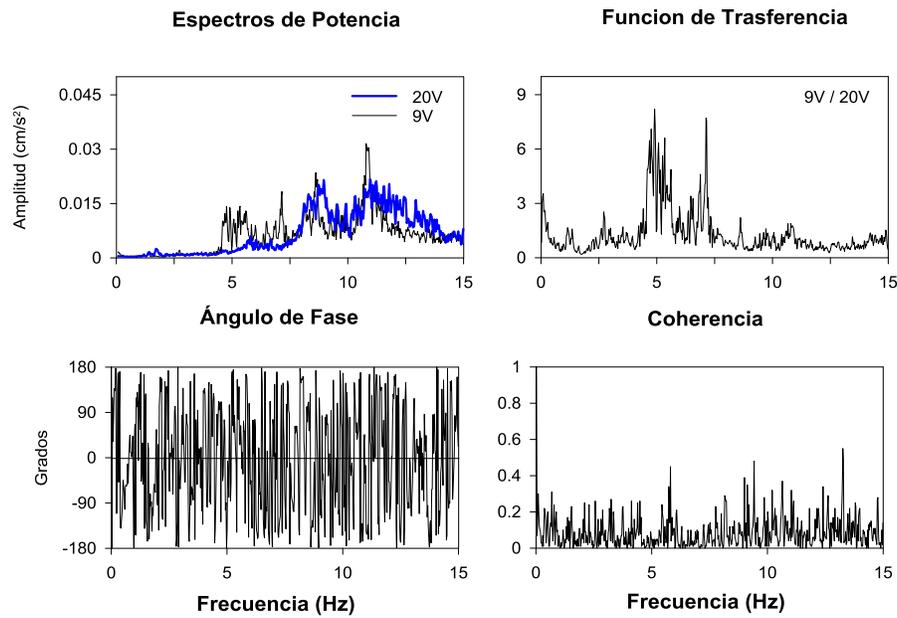


Fig. 4.40 Espectros de los puntos 9 y 20 en dirección vertical de la prueba 2b

La figura 4.41 no se parece en nada a la de la prueba 2 y sus frecuencias son más altas como se identifica en la tabla 4.8.

Cociente	Frecuencia (Hz)	Período (s)
2T-37T	1.367 - 1.416	0.732 - 0.706
12T-33T	1.318 - 1.392	0.759 - 0.718
9T-31T	1.318 - 1.440	0.759 - 0.694
12T-40T	1.367 - 1.416	0.732 - 0.706
9T-40T	1.343 - 1.416	0.745 - 0.706
2T-40T	1.367 - 1.440	0.732 - 0.694
20V-9V	10.791 - 10.864	0.0927 - 0.0920
	10.962 - 11.011	0.0912 - 0.0908

Tabla 4.8 Intervalo de frecuencias de la prueba 2b en T y V

### 5. COMENTARIOS FINALES

Las pruebas de vibración ambiental con el uso de acelerómetros, han demostrado ser de gran utilidad en el monitoreo de diversas obras civiles.

Los parámetros que se obtienen de ellas, sirven de base para calibrar con mayor precisión modelos analíticos de estructuras recién construidas, o que vayan a ser sometidas a un proceso de revisión de su seguridad estructural.

En el caso de la vía elevada en estudio, con la vibración ambiental se obtuvieron básicamente las frecuencias fundamentales de vibrar del tramo en estudio, en las direcciones T, L, V y Torsión. Conocer estos parámetros resulta fundamental para evaluar el comportamiento dinámico de esta estructura de manera más próxima a su comportamiento real.

En general, las pruebas de vibración ambiental se pueden insertar dentro de todo un proceso que puede conducir a un monitoreo temporal o permanente de obras civiles de gran magnitud. En la actualidad los sistemas de monitoreo estructural han comenzado a tomar gran relevancia gracias a los recientes avances tecnológicos en cuanto a instrumentos, sistemas de adquisición de datos y comunicaciones.

En el caso de la obra civil en estudio, cabe mencionar, que las pruebas de vibración ambiental fueron solamente una parte de todo un sistema de instrumentación al cual fue sometido el tramo en estudio, durante la realización de un ambicioso programa de pruebas de campo.

## 6. CONCLUSIONES

Con los análisis realizados de las pruebas de vibración ambiental de la Vía elevada a través del uso de acelerómetros podemos concluir lo siguiente:

### Para las pruebas de vibración ambiental.

La frecuencia fundamental del terreno se encuentra en un intervalo entre 0.976 a 0.853 y 1.024 a 0.819 Hz. Esta

La prueba 3 consistió en conocer el comportamiento del tablero de la estructura a través de la obtención de sus frecuencias fundamentales de vibrar en dirección T, L y torsión. La frecuencia fundamental de la estructura en dirección T, se encuentra en un rango muy próximo al rango de frecuencias del suelo.

En la prueba 4 se identificó el intervalo de frecuencias asociadas a la torsión. Por sus valores y sus ángulos de fase, se identifican dos intervalos 4.541 a 4.736 y 5.273 a 5.371 Hz, con ángulos de fase cercanos a 180 grados. La existencia de estos dos intervalos puede interpretarse, como la existencia de un acoplamiento entre el modo fundamental de torsión del tablero y un modo superior del mismo.

Con la prueba 7 se observó que el rango de frecuencias de las pruebas fue aproximado entre ellas a pesar de la longitud que había.

### Para las pruebas de interacción terreno-cimentación

Para conocer la posible influencia de la cimentación y el suelo en la respuesta dinámica de la estructura, se realizó la prueba 2 una prueba antes de la de tracción donde los puntos analizados implican el suelo la estructura y la cimentación. El rango de frecuencias de esta prueba fue muy similar al de todos los cocientes que se analizaron, cabe destacar que los puntos analizados más arriba del nivel del suelo tiene a tener mayor amplitud en sus espectros.

### Para las pruebas Dinámicas

Comparando la prueba de camiones llamada 5c con la 5p que fue la posterior, se observa que el rango de frecuencias de la prueba 5c (ver tabla 4.6) es muy parecido al de la prueba 5p (ver tabla 4.79). Mientras que al observar las graficas de los espectros de estas dos pruebas en dirección L y T las graficas son parecidas.

### Para las pruebas de Tracción

Haciendo la comparación de esta prueba 2b con la 2 de terreno cimentación, las graficas de los espectros son muy parecidas, aumentan las amplitudes muy poco en la prueba 2b, los

## CONCLUSIONES

---

rangos de frecuencias son muy parecidos en dirección T, mientras que en V las amplitudes se agrandan poco y el rango de frecuencias es por arriba de 10 Hz.

Con la selección de puntos analizados se observo que con el paso de vehículos las frecuencias se alzan en dirección vertical las cuales fueron 4.590 a 4.736, 9.326 a 9.521 y 10.010 a 10.205 Hz y poco menos en dirección longitudinal 3.271 a 3.369 Hz mientras que en dirección transversal es de 1.123 a 1.221 y 1.318 a 1.465 Hz.

Dentro de lo que cabe destacar la estructura y el suelo en estudio, mantiene sus rangos de frecuencia en lo esperado, pese a la carga aplica en la prueba de tracción y la prueba dinámica con el paso de vehículos.

Los resultados anteriores, se pueden tomar como referencia en la realización de estudios más detallados de la estructura. A futuro se podrán identificar las formas modales asociadas tanto a las frecuencias fundamentales identificadas en este trabajo, como a frecuencias superiores del sistema.

Los efectos de interacción suelo estructura, se podrán determinar de una manera más precisa, al aplicar técnicas más rigurosas para determinar dichos efectos.

Los registros de aceleración de los efectos del jalón y el tránsito vehicular, se podrán descomponer en el tiempo, con el fin de estudiar el cambio de las frecuencias fundamentales identificadas durante la aplicación de las cargas mencionadas.

Por último, los resultados obtenidos se podrán integrar a los obtenidos con otro tipo de instrumentación, como lo son transductores de desplazamiento e inclinómetros, y así estar en posibilidades de conocer de una manera más detallada, el comportamiento del tramo en estudio.

### 7. REFERENCIAS

- [1] Gómez Araujo; Maldonado Rondón; Chio Cho; (2010). "Pruebas de Vibración Ambiental en Puentes". Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras, Universidad Industrial de Santander.
- [2] Bennetts Toledo Felipe (2005). "Estudios de los aspectos más importantes en el análisis de la respuesta dinámica en puentes urbanos". Tesis de Licenciatura, UNAM.
- [3] Nowak A. S., Kim S. (2000). "Weigh-in-Motion Measurement of Trucks on Bridges" -Chapter 55-. Bridge Engineering Handbook.
- [4] Bendat J. S. y Piersol A. G. (1986). "Random Data. Analysis and Measurement Procedure". Wiley Interscience, New York.
- [5] Muria Vila D, Pérez J H, Zapata A, Taborda R, Cruz C A y Camargo J (2006), "Programa para calcular la corrección de línea de base, transformada rápida de Fourier, función de transferencia, ángulos de fase y coherencias entre dos señales", Instituto de Ingeniería, UNAM.
- [6] Gerardo Rodríguez Gutiérrez. "Propiedades Dinámicas de un Edificio de Planta Irregular". Tesis de Licenciatura, UNAM.