



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Evaluación de las Propiedades  
Dinámicas de los Tirantes de un  
Puente, Empleando Vibración  
Forzada**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Fernando Samperio Sánchez

**DIRECTOR(A) DE TESIS**

Dr. Adrián Pozos Estrada



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** M. I. Agustín Demeneghi Colina  
**Secretario:** Ing. Guillermo Luis Lauro Esquivel Castañeda  
**Vocal:** Dr. Adrián Pozos Estrada  
**1 er. Suplente:** M. I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose  
**2 d o. Suplente:** M. I. Guillermo Mancilla Urrea

**Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.**

**TUTOR DE TESIS:**

ADRIÁN POZOS ESTRADA

-----  
FIRMA

## DEDICATORIAS

*A mi madre María que me dio la vida y me impulsó a seguir adelante con mis sueños y la cual me brinda mucho cariño, amor y comprensión en cada instante de mi vida.*

*A mi padre Luis Fernando que es el sustento y un ejemplo de fortaleza para continuar en mi camino y ser de mí una excelente persona.*

*A mi hermana Lorena que me brindo consejos sobre la vida y de cómo poder salir delante de cualquier situación difícil.*

*A mi hermano Jorge que es una guía para que no cometa errores y el que no me deja solo en situaciones adversas*

*Todos ellos son mis cimientos en la vida y les dedicare cada uno de mis logros para que siempre se sientan orgullosos de mí y vean el fruto de su esfuerzo.*

## AGRADECIMIENTOS

*Le agradezco a dios por dejarme llegar hasta este instante en mi vida y poder cumplir mi sueño de ser un profesionalista.*

*A mi madre que siempre me dijo palabras de aliento cuando estaba en momentos difíciles y apoyarme con lo pudiera con su amor, vio por mí en lo que llevó de vida.*

*A mi padre que me brindo todo su apoyo y lo necesario para poder seguir adelante y creyó en mí que podría llegar a cumplir mis metas.*

*A mi hermana que de igual manera me dio su apoyo y paciencia durante mis estudios y nunca me dejó solo.*

*A mi hermano que me cuido y fue un buen ejemplo siendo mayor y me ayudo a sobresalir haciéndome fuerte en esta vida.*

*Al Dr. Adrián Pozos Estrada por darme la oportunidad de realizar mi trabajo de tesis con él, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Al Dr. Roberto Gómez Martínez por las facilidades y el apoyo brindado para el desarrollo de las pruebas en el sitio. Al M.I. Edmundo Amaya Gallardo y al Sr. Jesús Razo por el apoyo en las pruebas en campo.*

*Al programa UNAM-DGAPA-PAPIIT por el apoyo que ofreció para realizar esta investigación*

*Les agradezco con de todo corazón por siempre estar conmigo en momentos malos y buenos, no me alcanzará la vida para pagarles todo lo que me brindaron, los quiero mucho y sé que de mí ustedes formaron una excelente persona y profesionalista.*

# CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT .....	1
OBJETIVO GENERAL .....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
1. EFECTOS AERODINÁMICOS DEL VIENTO EN TIRANTES.....	4
1.1 Mecanismos de vibración en tirantes .....	4
2. DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS DE CAMPO EN TIRANTES .....	9
2.1 Características del puente Baluarte.....	9
2.1.1 Superestructura.....	10
2.1.2. Subestructura.....	11
2.1.3. Tirantes .....	11
3. CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS TIRANTES INSTRUMENTADOS .....	21
3.1.1 Transformada de Fourier .....	21
3.1.2 Aplicaciones de la Transformada de Fourier .....	21
3.1.3 Función de correlación .....	22
3.1.4 Espectro de Fourier .....	22
4. Comparación de resultados.....	25
4.1 Identificación de frecuencias fundamentales de los tirantes probados .....	25
4.1.1 Resultados del tirante 1.....	25
4.1.2 Resultados del tirante 9.....	26
4.1.2 Resultados del tirante 19.....	28
4.2 Cálculo de la tensión con base en la frecuencia natural identificada .....	29
4.3 Discusión de resultados .....	30
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	31
BIBLIOGRAFÍA .....	32
REFERENCIAS WEB.....	332

## RESUMEN

Se presenta una descripción de las pruebas de campo de algunos tirantes del puente Baluarte. Los registros obtenidos de las pruebas fueron procesados con análisis espectral para identificar las frecuencias de vibrar de los tirantes. Las frecuencias identificadas fueron empleadas para calcular las tensiones de los tirantes.

## ABSTRACT

A description of the field tests of some stay cables of the Baluarte bridge is carried out. The records obtained from the tests were processed with spectral analysis to identify the vibration frequencies of the stay cables. The identified frequencies were employed to calculate the tension in the stay cables.

## OBJETIVO GENERAL

Evaluar las propiedades dinámicas de algunos tirantes del puente Baluarte, empleando técnicas de vibración forzada.

# INTRODUCCIÓN

Uno de los elementos estructurales principales de los puentes atirantados son los tirantes. Estos elementos son susceptibles a diferentes mecanismos de vibración. Para estudiar su comportamiento estructural es indispensable conocer sus propiedades dinámicas, como la frecuencia de vibrar. Para identificar la frecuencia de vibrar de tirantes generalmente se recurre a pruebas en sitio que consisten en inducir una excitación en el tirante mediante un tirón, el tirón puede ser hecho por una persona, mediante dispositivos mecánicos, como un tirfor, o con la ayuda de una grúa. Una vez que se induce la excitación en el tirante, acelerómetros ubicados en lugares predefinidos registran la aceleración y a partir de los registros de aceleración es posible emplear análisis espectrales para identificar las frecuencias del tirante.

En este trabajo se realizaron pruebas en algunos tirantes del Puente Baluarte. Este puente es uno de los ejemplos de ingeniería más importantes que tiene la infraestructura mexicana. El puente cuenta con 1124 metros de longitud soportados por 152 tirantes de acero, un claro central de 520 metros, pilones con alturas de 169 y 145 metros, y cuatro carriles de circulación suspendidos a una altura de más de 400 metros, superior a la de la Torre Eiffel (324 metros), lo que lo hace el puente atirantado más alto del mundo.

En el capítulo 1 se presenta un resumen de los efectos aerodinámicos que induce el viento sobre los tirantes, el capítulo 2 describe las pruebas de campo realizadas a algunos tirantes del puente, incluyendo los equipos de registro empleados, el capítulo 3 resume algunos aspectos básicos del análisis espectral, útil para la identificación de frecuencias en los tirantes, el capítulo 4 presenta los resultados de los análisis espectrales y presenta una breve discusión de los resultados obtenidos, finalmente las conclusiones y recomendaciones se presentan en el último capítulo del trabajo.



# 1.

## EFFECTOS AERODINÁMICOS DEL VIENTO EN TIRANTES

### 1.1 Mecanismos de vibración en tirantes

En la naturaleza existe un gran número de mecanismos de vibración que pueden conducir a vibraciones de tirantes de puentes. Dependiendo la naturaleza de la vibración, algunos de estos mecanismos de excitación son más críticos que otros. Algunos mecanismos que ocasionan vibraciones en tirantes se enlistan a continuación:

- Excitación debido a vórtices en un cable o en grupos de cables aislados
- Interacción lluvia-viento en cables
- Galopeo de cables secos individuales inclinados
- Galopeo de cables con acumulación de hielo
- Galopeo de los cables en las estelas de otros componentes estructurales (por ejemplo, arcos, torres, elementos de refuerzo, etc.)
- Excitación paramétrica del tirante
- Turbulencia del viento
- Variaciones en tensión de los cables

Algunos de los mecanismos de vibración arriba listados pueden derivar en inestabilidades.

Para el estudio de algunos mecanismos de vibración en tirantes, es necesario definir algunos números adimensionales que resultan relevantes para verificar si el tirante será susceptible a éstos.

#### 1.1.1 Número de Reynolds

Un parámetro muy empleado para describir la relación de las fuerzas inerciales a las viscosas es el número de Reynolds ( $Re$ ) y está dada por la ecuación (1.1), en la que  $D_{CS}$  es el diámetro del cable,  $U$  es la velocidad del viento y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido.

$$Re = \frac{UD_{CS}}{\nu} \quad (1.1)$$

### 1.1.2 Número de Strouhal

El número de Strouhal es un parámetro adimensional que define la frecuencia dominante de desprendimiento de vórtices de un cuerpo y está definido como:

$$S_{st} = \frac{N_s D}{U} \quad (1.2)$$

donde  $N_s$  es la frecuencia de desprendimiento de vórtices,  $D$  es una longitud característica (el diámetro del cable) y  $U$  es la velocidad del viento. El número de Strouhal se mantiene constante durante intervalos extendidos de la velocidad del viento. Para cables de sección transversal circular en el intervalo del número de Reynolds de  $1 \times 10^4$  a  $3 \times 10^5$ ,  $S_{st}$  es de aproximadamente 0.2.

### 1.1.3 Número de Scruton

El número de Scruton, que mide el impacto del amortiguamiento estructural en la respuesta, es un parámetro importante cuando se considera la excitación debida a vórtices, vibraciones inducidas por lluvia-viento, galopeo y galopeo en cables inclinado secos. Se define como:

$$S_c = \frac{m \zeta}{\rho D^2} \quad (1.3)$$

donde  $m$  es la masa del cable por unidad de longitud,  $\zeta$  es el porcentaje de amortiguamiento,  $\rho$  es la densidad del viento y  $D$  una longitud característica (el diámetro del cable).

La mayoría de los tipos de oscilación inducida por el viento tienden a ser mitigados por el aumento del número de Scruton.

## 1.2. Excitación debida a vórtices en cables aislados y grupos de cables

La excitación de los cables debida a vórtices es probablemente el tipo de vibración más común ocasionada por el viento. Este tipo de vibraciones se presentan a velocidad de viento relativamente bajas y produce amplitudes de vibración limitadas. La velocidad crítica del viento (a la que se presentan los vórtices) se obtiene a partir de considerar que la frecuencia de desprendimiento de vórtices coincide con la frecuencia natural del cable ( $f_n$ ), y se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$U = \frac{f_n D}{S_{st}} \quad (1.4)$$

Asimismo, debido a que la amplitud de las oscilaciones del cable es inversamente proporcional al número Scruton  $S_c$ , el aumento de la masa y amortiguamiento de éste ocasiona una reducción de las amplitudes de oscilación.

Los porcentajes de amortiguamiento estructural de los tirantes pueden variar de 0.0005 (0.05%) hasta 0.01 (1%) (Macdonald, 2010). El extremo inferior de este intervalo es típico de un cable muy largo sin ningún tipo de relleno de lechada de cemento, mientras que el extremo superior es más

típico de cables más cortos. Una estimación realista de las relaciones inherentes de amortiguamiento de cable en los puentes en servicio está en el intervalo de 0.001 (0.1%) hasta 0.005 (0.5%).

### 1.3. Vibraciones de los cables inducidas por combinación lluvia-viento

La combinación de lluvia y viento moderado pueden causar vibraciones de cable de alta amplitud en frecuencias bajas. Este fenómeno se ha observado en muchos puentes atirantados y ha sido investigado en detalle. Se identificó por primera vez por Hikami y Shiraishi (1987) en cables del puente atirantado Meiko-Nishi, en Japón. Desde entonces, estas vibraciones se han observado en otros puentes atirantados, incluyendo el puente Fred Hartman en Texas, el Puente de Sidney Lanier Brunswick en Georgia, así como el puente de Cochrane en Alabama. Estas vibraciones se produjeron cuando había lluvia y vientos moderados 8-15 (m/s). Las frecuencias eran bajas, por lo general menos de 3 Hz. Las amplitudes máximas eran muy altas, en el intervalo de 0.25 m a 1 m, con movimientos violentos, dando como resultado choque de cables adyacentes observados en varios casos.

De acuerdo con Hikami y Shiraishi (1987) y Matsumoto *et al* (2003), pruebas de túnel de viento han demostrado que los riachuelos de agua corriendo por las superficies superior e inferior del cable en tiempo de lluvia fueron el componente esencial de esta inestabilidad aeroelástico.

Basándose en los resultados de Saito *et al* (1994), las oscilaciones ocasionadas por la interacción lluvia-viento se pueden reducir a un nivel inofensivo usando el siguiente criterio para el número Scruton:

$$\frac{m\zeta}{\rho D^2} > 10 \quad (1.5)$$

Este criterio se puede utilizar para especificar la cantidad de amortiguación que debe ser añadido al cable para mitigar vibraciones lluvia-viento.

### 1.4. Inicio del galopeo para grupos de cables

El galopeo es el movimiento elíptico causado por las fuerzas de viento en dirección transversal de los cables en la estela de otros elementos, como las torres u otros cables. Este tipo de vibración puede ocasionar problemas de fatiga en los puentes atirantados, pero hasta la fecha ningún problema de este tipo se ha documentado. Se propone una ecuación aproximada para la velocidad mínima del viento  $U_{cg}$  por encima del cual la inestabilidad se puede esperar debido al efecto del galopeo:

$$U_{cg} = C_C f_n D \sqrt{S_C} \quad (1.6)$$

donde  $C_C$  es una constante y  $f_n$  es la frecuencia natural del cable.

## 1.5. Galopeo de cables secos inclinados

Galopante de los cables individuales secos, inclinados es una posibilidad teórica basada en resultados experimentales. Algunos resultados experimentales (Saito *et al* 1994; Miyata *et al* 1994) sugieren que cables secos inclinados podrían presentar vibración debido al galopeo en puentes atirantados. Saito *et al.* (1994) llevaron a cabo una serie de experimentos en túnel de viento en una sección de cable de puente montado en un sistema de suspensión de resortes. Sus datos sugieren un criterio de inestabilidad dado aproximadamente por la siguiente ecuación (FHWA, 2007):

$$U_r = 14\sqrt{S_c} \quad (1.7)$$

donde  $U_r = U/fD$  es la velocidad del viento reducida,  $S_c = m\delta/(\rho D^2)$  es el número Scruton, y  $\delta = 2\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}$  es el decremento logarítmico.

## 1.6. Galopeo del cable con acumulaciones de hielo

La acumulación de hielo sobre un cable puede conducir a un cambio efectivo en forma de cable a uno que es aerodinámicamente inestable. Esto ha causado grandes oscilaciones de amplitud de cables conductores de energía largos y potencialmente podría ocurrir en los cables de puente. En la industria de la energía se han empleado amortiguadores especiales, tales como el amortiguador de Stockbridge para mitigar este problema. Para los puentes, generalmente es suficiente con asegurar un amortiguamiento suficiente para evitar este efecto.

## 1.7. Galopeo de los cables en las estelas de otros componentes estructurales

Las estelas de piezas para puentes, tales como torres o arcos tienen gradientes de velocidad y turbulencia en ellas, y si un cable se ve afectado por estos flujos perturbados, el cable puede experimentar oscilaciones galopantes. Al igual que con otros tipos de inestabilidad, al asegurarse que el cable tiene un amortiguamiento tan alto como sea posible sería una buena medida de prevención general contra este tipo de galopeo.

## 1.8. Oscilaciones del cable debido a la excitación aerodinámica de los otros componentes del puente

SI el puente es considerado como un solo sistema, la interacción entre partes del puente puede ocasionar vibraciones importantes en alguno de éstos. Este puede ser el caso de la interacción entre el tablero del puente y los tirantes. Por ejemplo, si el tablero es excitado por vórtices alternantes, en muy pequeñas oscilaciones que son de poca importancia para la cubierta, éstas podrían ocasionar vibración de magnitud apreciable en los tirantes.

Para el observador este tipo de respuesta al viento también podría aparecer como oscilaciones de cable puros si los movimientos de la cubierta son demasiado pequeños para notar; sin embargo, la fuente de la excitación podría ser en este caso la acción del viento sobre la cubierta.

## 1.9. Efectos de turbulencia en cables

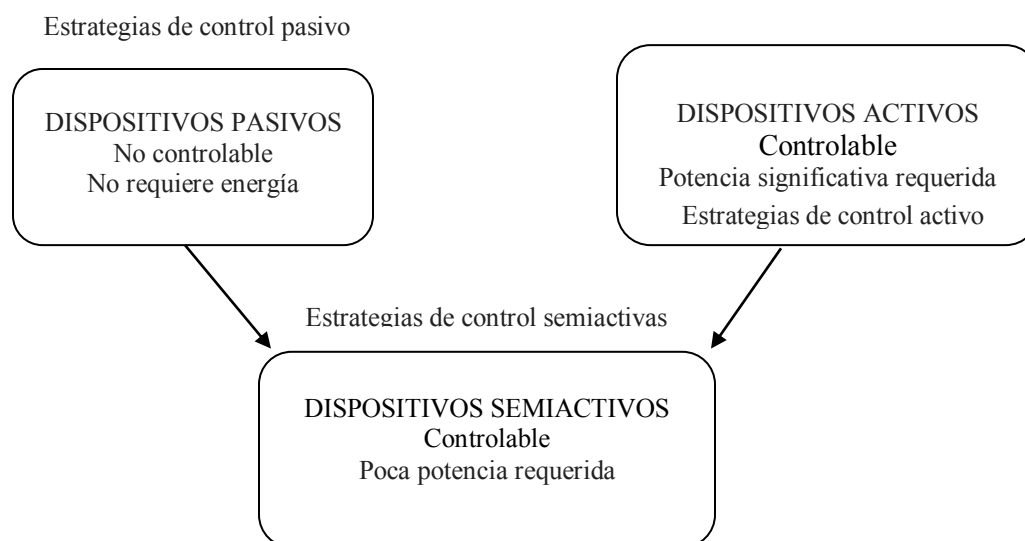
En puentes flexibles, como los atirantados o colgantes, así como en sus componentes, el efecto del viento turbulento es importante. Los primeros modos de vibrar de grandes cables son generalmente excitados por el efecto de la turbulencia. Los efectos de la turbulencia sobre los cables aumentan gradualmente con la velocidad del viento, en vez de a la manera súbita asociada a una inestabilidad.

## 1.10 Movimiento debido a la fluctuación de tensión de los cables

La variación de la tensión en los cables junto que el movimiento de los anclajes puede ocasionar también vibraciones importantes en los cables. Esta interacción de la tensión y el movimiento de los anclajes alimentan de energía en los cables, lo que amplifica el movimiento considerablemente.

## 1.11 Estrategias de control y dispositivos de amortiguamiento

Hay tres clases principales de dispositivos de amortiguamiento suplementarios, categorizados en tres estrategias de control correspondientes, como se muestra en el cuadro conceptual de la Figura 1.3.



**Figura 1.3.** Estrategias de control y dispositivos de amortiguamiento suplementarios asociados

La primera clase de dispositivos de amortiguamiento suplementario es pasivo. Los dispositivos pasivos son no controlables y no requieren de energía para funcionar. La segunda clase de dispositivos de amortiguamiento suplementario son los activos, los cuales son controlables, pero normalmente requieren mucha energía para operar. La tercera clase de dispositivos de amortiguamiento suplementario es semi-activa. Estos dispositivos combinan los aspectos positivos de los dispositivos de control pasivo y activo en cuanto a que son controlables (como los dispositivos activos), pero requieren poca energía para funcionar.

# 2.

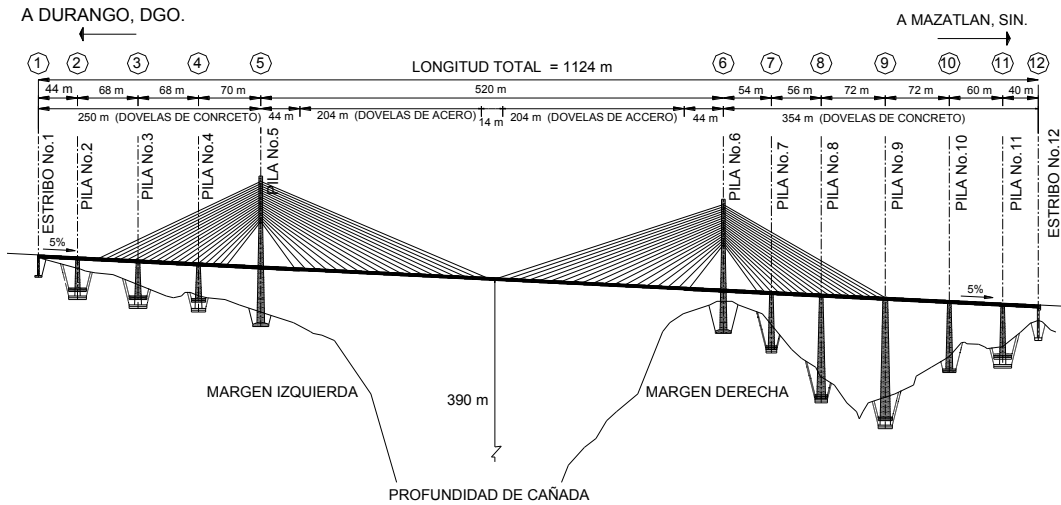
## DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS DE CAMPO EN TIRANTES

### 2.1 Características del puente Baluarte

El puente Baluarte, el puente atirantado más alto de México, inició en el año 2003 con los estudios previos, y el 21 de febrero de 2008 inició su construcción, culminando 5 de enero del 2012, día en que fue inaugurado.

El puente se ubica en las montañas del Pacífico al norte de México, a lo largo de la autopista Durango-Mazatlán, en el kilómetro 157 + 400, justo en la frontera de los estados de Sinaloa y Durango, a unos 50 km de la costa, aproximadamente. La construcción de este puente ayuda a reducir el tiempo de traslado entre estos estados.

El puente Baluarte libra una barranca de 390 m de profundidad. Por tal razón, ostenta el record del puente atirantado carretero más alto del mundo. Con una longitud total de 1124 m, el puente Baluarte es considerado uno de los más largos en su tipo en América del Norte. La Figura 2.1 muestra una vista en elevación del puente.

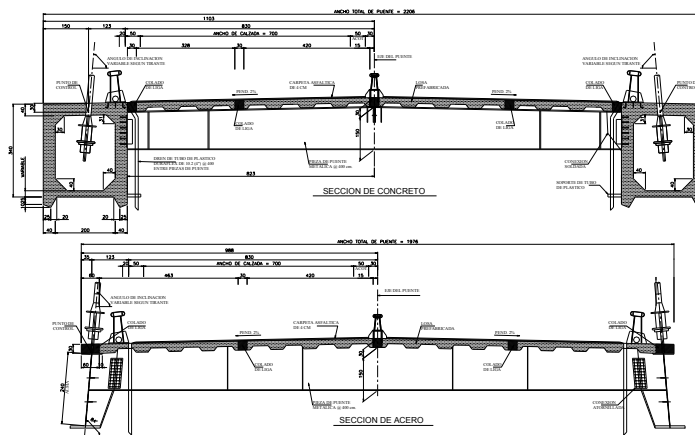


**Figura 2.1. Vista en elevación del puente Baluarte**

El puente tiene un claro principal de 520 m y dos laterales de 250 m y 354 m, respectivamente. El sistema de tirantes está conformado por 76 de estos, en un diseño semi-abanico en dos planos.

### 2.1.1 Superestructura

La superestructura es de dos tipos: el primero es a base de cajones de concreto pretensado con una resistencia de 500 kg/cm<sup>2</sup>; estas vigas cajón están unidas mediante piezas puente metálicas de acero estructural grado A50, y una losa de concreto reforzado con resistencia de 400 kg/cm<sup>2</sup>; el segundo se conforma por dos vigas longitudinales de acero estructural grado A50 de sección I; estas vigas también están unidas por piezas puente y una losa de concreto reforzado. La sección de acero tiene una longitud de 432 m y se ubica en el centro del claro principal, la longitud restante corresponde a la sección de concreto (692 m). El ancho total del puente es de 22.06 m y el ancho de calzada es de 16.60 m. La Figura 2.2 muestra los dos tipos de secciones empleadas en la superestructura del puente Baluarte.



**Figura 2.2. Vista en elevación de las secciones transversales de la superestructura del puente Baluarte**

### 2.1.2. Subestructura

La subestructura está compuesta por 8 pilas de concreto reforzado, cuyas alturas van desde 40 a 140 m, aproximadamente; dos pilones con mástiles del tipo diamante, y dos estribos en los extremos. El pilón más alto (P5), tiene una altura de 165 m, mientras que el otro (P6) tiene una altura de 147 m. Las pilas son de concreto reforzado con una resistencia de 350 kg/cm<sup>2</sup>, de sección transversal variable y huecas. Debido a la altura de éstas, fue necesario colocar travesaños presforzados postensados a lo largo de su altura. Las pilas son rematadas con un cabezal tipo trabe cajón. Los pilones son de concreto reforzado con una resistencia de 350 kg/cm<sup>2</sup>, con una sección cajón celular por debajo de la rasante. Los brazos de los pilones son de sección transversal variable tipo cajón. Presfuerzo postensado fue empleado en la zona de anclaje de los tirantes como medida de confinamiento. El estribo No.1 es de concreto reforzado con una resistencia de 250 kg/cm<sup>2</sup>. La siguiente figura muestra un esquema de los apoyos 5, 6 y 9 de la subestructura del puente.

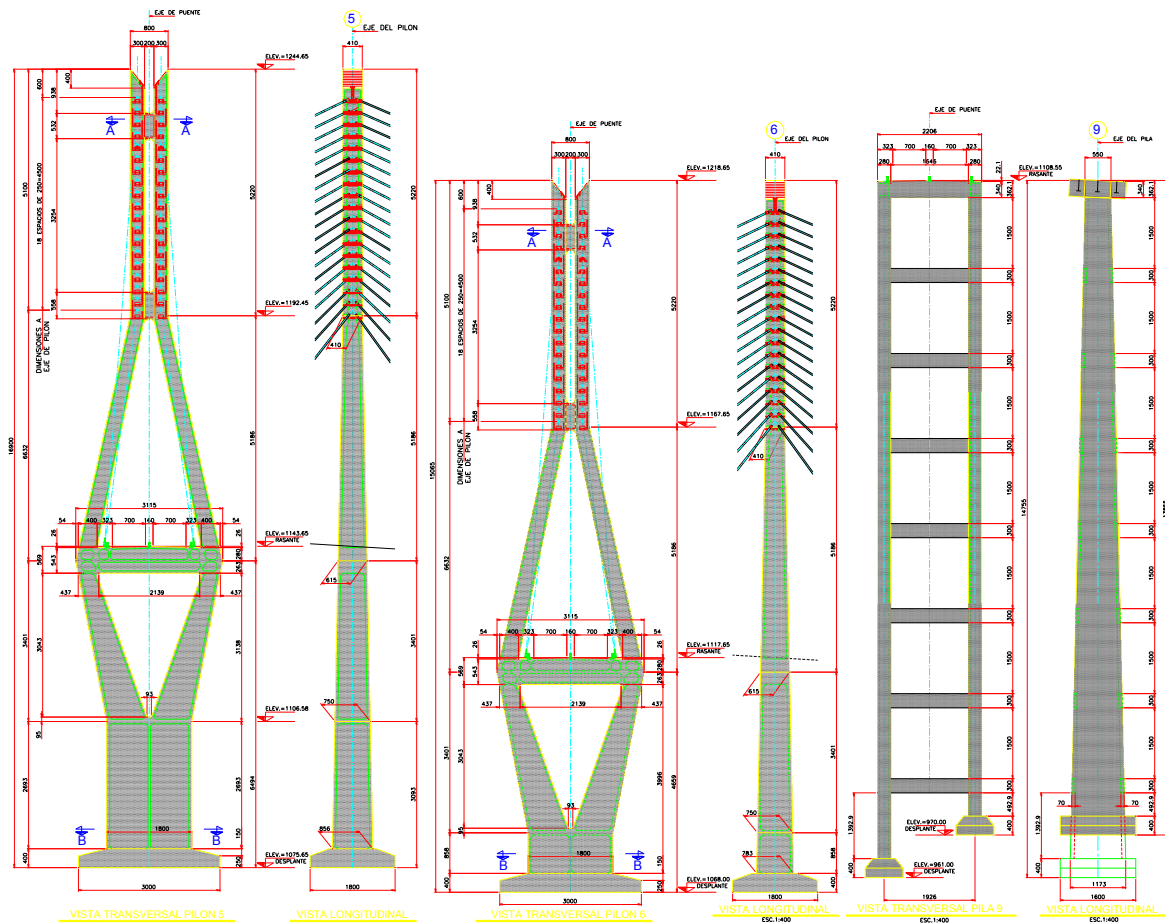


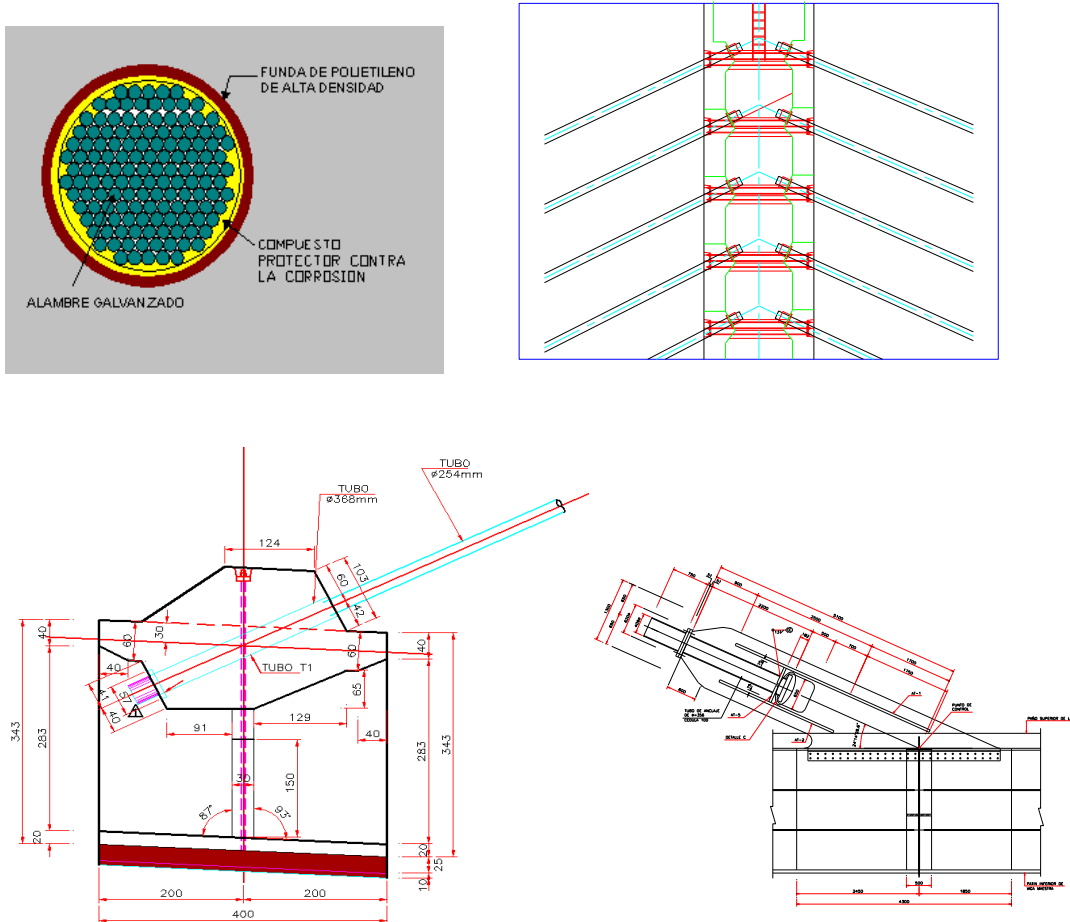
Figura 2.3. Apoyos 5,6 y 9 de la subestructura del puente Baluarte

### 2.1.3. Tirantes

El puente cuenta con un total de 152 tirantes con un diseño semi-abanico en dos planos. El número mínimo y máximo de torones empleados en los tirantes es de 20 y 42, respectivamente. Los torones empleados en los tirantes son monopotegidos de siete hilos galvanizados de 15.7 mm de diámetro.



La protección de los torones es a base de polietileno de alta densidad y cera petrolera. Los tirantes son anclados a cada pilón mediante 76 anclajes distribuidos verticalmente a lo largo de 52.2 m. Los tirantes son anclados en pares a las dovelas de acero del tablero, excepto dos tirantes de cada pilón que son anclados en la sección de concreto presforzado del tablero mediante bloques de concreto presforzado postensado. La siguiente figura muestra algunos detalles del atirantamiento del puente.



*Figura 2.4. Detalles del atirantamiento y anclaje del puente Baluarte*

## 2.2 Características del equipo empleado en las pruebas de campo

Para registrar la velocidad del viento durante las pruebas de tirantes en el puente Baluarte se empleó una estación meteorológica marca WhatchDog. La estación meteorológica registró velocidades del viento de 4 a 11 km/h durante las pruebas. Además de la estación meteorológica, se emplearon también dos acelerómetros inalámbricos para registrar la vibración de los tirantes. A continuación se hace una descripción general del equipo empleado.

### 2.2.1 Estación meteorológica

La estación meteorológica empleada cuenta con las siguientes características:

- 9 puertos de sensores externos
- Capacidad de datos de 8800 intervalos de datos

- La altura 12 pulgadas (30 cm) con el colector de lluvia y 10 pulgadas (26 cm) sin colector de lluvia
- El ancho 8.5 pulgadas (21.5 cm)
- Profundidad de 12 pulgadas (30 cm) con el colector de lluvia y 3.5 pulgadas (8.5 cm) sin colector de lluvia
- Peso (con el colector de lluvia y el anemómetro) 6.4 lbs (2.9 kg)
- Alimentación con 4 pilas AA
- Durabilidad de las pilas 12 meses
- Sensores internos

El siguiente cuadro enumera las especificaciones para los sensores que están incluidos en la estación meteorológica empleada.

Sensor	Disponible en los modelos	Rango de medición	Precisión
Velocidad del viento	Todos salvo el 2800	0-175 mph	±5%
Dirección del viento	Todos salvo el 2800	2° de incrementos	±7°
Temperatura	Todos salvo el 2800	-20° to 70°C -4° to 158° F	±0.6°C ±1°F
Humedad relativa	2550, 2700, 2900ET	Del 20% al 100% @5° a 50° C	±3%
Precipitaciones	2600, 2700, 2900ET	0.01" (0.25cm) de resolución	±2%
Radiaciones solares	2900ET	1-1250 W/m <sup>2</sup>	±5%

*Figura 2.5. Especificaciones de la estación meteorológica empleada en las pruebas*

La Figura 2.6 muestra algunos detalles de la estación meteorológica.



*Figura 2.6. Componentes de la estación meteorológica*

## 2.4. Acelerómetros inalámbricos

Se emplearon dos acelerómetros (nodos) inalámbricos marca MicroStrain. Algunos aspectos generales de este tipo de sensores se describe a continuación.

### 2.4.1. Descripción de la red de sensores inalámbricos

De acuerdo con la página web del distribuidor (<http://www.microstrain.com>), la red de sensores inalámbrica MicroStrain es una de alta velocidad. Cada sistema se compone de nodos inalámbricos de interfaz de sensor, una pasarela de recolección de datos y plataformas de software con todas las funciones de usuario basados en el protocolo de comunicaciones de datos MicroStrain sin pérdida de rango extendido Sincronizada (LXRS). Comunicación inalámbrica bidireccional entre el nodo y la puerta de enlace permite la recolección de datos del sensor y la configuración de hasta dos kilómetros de distancia. Puertas de enlace se pueden conectar localmente a un ordenador central o de forma remota a través de redes locales y móviles. Algunas pasarelas también disponen de salidas analógicas para portar los datos del sensor directamente al equipo de adquisición de datos independiente.

La selección de los nodos disponibles permite interfaz con muchos tipos de sensores, incluyendo acelerómetros, medidores de deformación, transductores de presión, células de carga, el par y sensores de vibración, magnetómetros, 4 a los sensores 20 mA, termopares, sensores RTD, humedad del suelo y sensores de humedad, inclinómetros, y la orientación y sensores de desplazamiento. Algunos nodos están equipados con dispositivos de detección integrados, tales como acelerómetros. Las capacidades de muestreo del sistema son IEEE 802.15.4-compatible y sin pérdidas incluyen el muestreo sincronizado, el muestreo ráfaga continua y periódica, y registro de datos. Una única puerta de enlace puede coordinar muchos nodos de cualquier tipo, y varias puertas de enlace se pueden administrar desde un ordenador con las plataformas de software Commander y nodo SensorCloud. La integración con los sistemas del cliente se puede lograr usando las versiones OEM de los nodos sensores y aprovechando el protocolo de comunicaciones de datos MicroStrain.

### 2.4.2. Información general del acelerómetro (nodo)

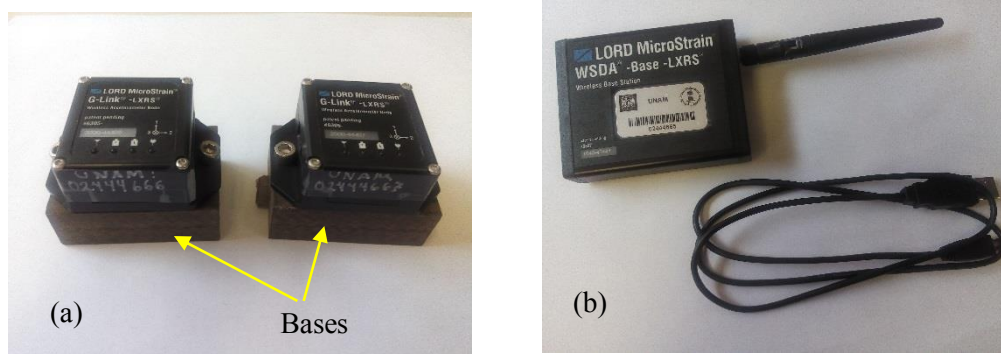
El nodo sensor inalámbrico G-Link®-LXRS® cuenta con dos acelerómetros micro-electro mecánicos (MEMS por sus siglas en inglés) de alta velocidad integrados ( $\pm 2 \text{ g}$  o  $\pm 10 \text{ g}$ ) y un sensor de temperatura interno. Las lecturas combinadas de los acelerómetros producen una salida de aceleración triaxial. El nodo tiene una resolución de 12 bits con un ancho de banda de medición de 0 a 500 Hz. El nodo puede iniciar una sesión de datos en la memoria interna y transmitir en tiempo real, los datos son sincronizados en una amplia gama de frecuencias de muestreo y los intervalos.

Los principales componentes de los acelerómetros empleados y sus intervalos de trabajo se resumen en la siguiente Tabla.

**Tabla 2.1 Características de los acelerómetros**

<b>General</b>	
Sensores Integrados	Triaxiales MEMS acelerómetro, 3 canales La temperatura interna, 1 canal
Capacidad de almacenamiento de datos	2 M bytes (hasta 1.000.000 de puntos de datos, tipo de datos dependiente)
<b>Canales acelerómetro</b>	
Rango de medición	$\pm 2 \text{ g}$ ó $\pm 10 \text{ g}$ norma
Ancho de banda acelerómetro	0 Hz a 500 Hz
Exactitud	10 m g
Resolución	12 bits
<b>Canal de temperatura integrado</b>	
Rango de medición	-40 ° C a 70 ° C
La precisión y la resolución	$\pm 2$ ° C (a 25 ° C) típico, 12 bit
<b>Muestreo</b>	
Modos de muestreo	Sincronizada, bajo ciclo de trabajo, registro de datos
Frecuencias de muestreo	Muestreo continuo: 1 muestra / hora 512 Hz ráfaga de muestreo periódico: 32 Hz a 4096 Hz (1 canal) Registro de datos: 32 Hz a 4096 Hz (1 canal)
La sincronización entre los nodos	$\pm 32$ microsegundos
<b>Parámetros de operación</b>	
Radiofrecuencia (RF) Portadora transceptor	2.405 a 2.470 GHz de espectro ensanchado de secuencia directa con más de 14 canales,
Rango de enlace de RF bidireccional	70 m y 2 km línea de visión con el ajuste de la potencia de RF
Protocolo de comunicación RF	IEEE 802.15.4
La descarga de datos por radiofrecuencia	4.5 minutos para descargar la memoria completa
Temperatura de funcionamiento	- 20 ° C a + 60 ° C (rango de temperatura ampliado disponible con la batería de encargo / recinto, -40 C a + 85 ° C solo electrónica)
Límite de aceleración	500 g (g alta opción disponible)
<b>Especificaciones físicas</b>	
Dimensiones	58 mm x 43 mm x 21 mm con lengüetas de montaje
Peso	40 gramos
Calificación ambiental	Uso de interior (IP65 / 66 recintos disponibles)
Material de la caja	Plástico ABS

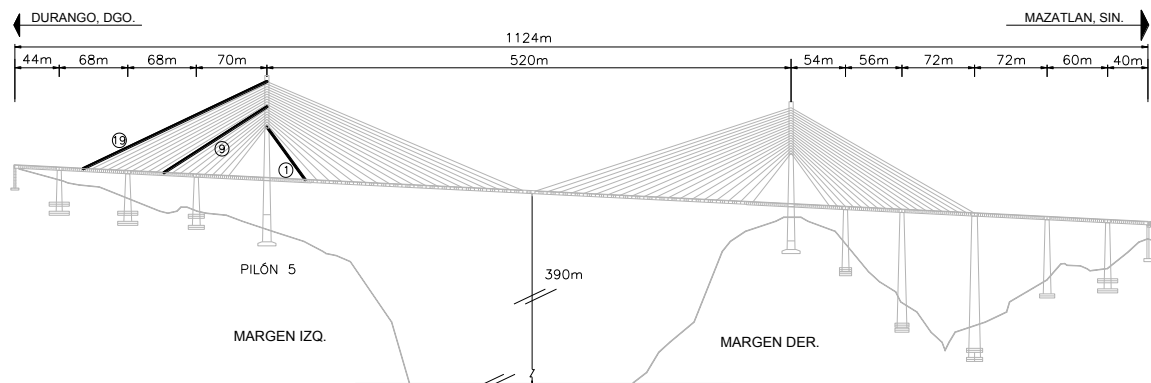
La Figura 2.7 muestra imágenes de los sensores, las bases para su colocación en los tirantes y el dispositivo de comunicación inalámbrica empleados en las pruebas.



**Figura 2.7. Acelerómetros: (a) sensores y bases para su colocación en los tirantes; (b) dispositivo de comunicación inalámbrica**

## 2.5 Descripción de las pruebas

Debido a una situación logística, sólo se contó con un día para realizar las pruebas. Se optó por seleccionar tres tirantes: uno corto, uno mediano y uno largo. La ubicación de los tirantes seleccionados se presenta en la Figura 2.8.



**Figura 2.8. Ubicación de los tirantes instrumentados y probados**

Los tirantes seleccionados se encuentran conectados al Pilón 5, en la dirección Durango. Los Tirantes 9 y 19 se ubican del lado Tierra y el Tirante número 1 del lado Agua. Las características generales de los tirantes seleccionados se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 2.2 Características de los tirantes probados**

Tirante No.	N° torones	Longitud (m)	$\phi$ Funda (m)	Masa (Kg)	Área efect. (mm <sup>2</sup> )	Tensión (kN)	Inclinación $\alpha$ (°)
1	27	65.11	0.26	2502.03	2620.47	2284.95	54
9	26	122.16	0.32	4567.23	2593.06	2475.20	33
19	38	202.22	0.37	10688.16	3776.64	3866.76	25

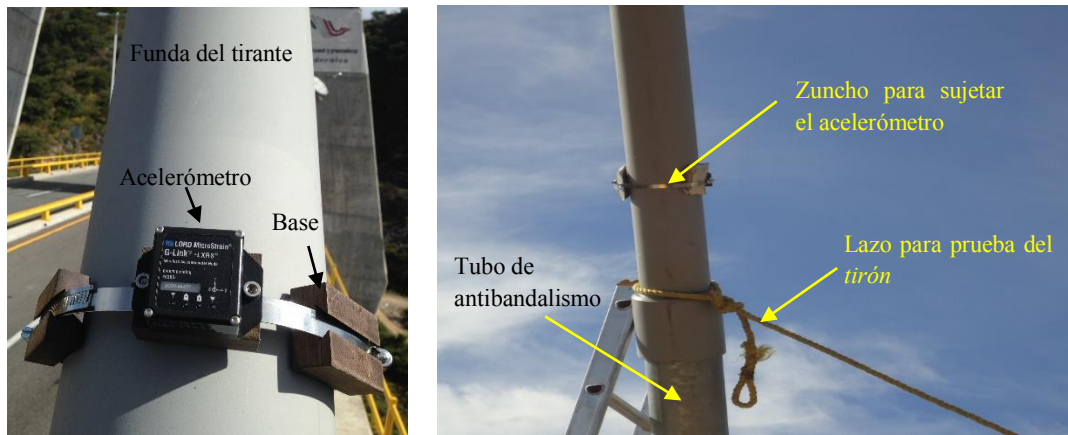
La Figura 2.9 muestra una foto panorámica de la zona de trabajo.



**Figura 2.9. Vista panorámica de la zona de trabajo.**

### 2.5.1 Instalación de los acelerómetros en los tirantes

Se colocó un acelerómetro aproximadamente a 1 m del tubo de antibandalismo de los tirantes, aproximadamente a 5 m por encima del tablero del puente. El acelerómetro fue sujeto a la funda del tirante con ayuda de bases y un zuncho. El acelerómetro fue orientado de tal manera que el eje 1 de éste fuera paralelo al eje del tirante, y los ejes 2 y 3 del acelerómetro perpendiculares a éste. Justo por arriba del tubo de antibandalismo se colocó un lazo con el cual se realizó la prueba del tirón (descrita más adelante). Las Figuras 2.10 a 2.13 muestran algunos detalles de la colocación de los acelerómetros en los tirantes probados.



**Figura 2.10 Acercamiento a acelerómetro instalado y sujeto con sistema mecánico: (a) vista superior; (b) vista inferior**

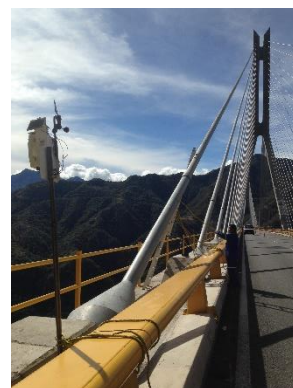




*Figura 2.11 Instalación de acelerómetro en el Tirante 1 y de estación meteorológica*



*Figura 2.12 Instalación de acelerómetro en el Tirante 9 y de estación meteorológica*



*Figura 2.13 Instalación de acelerómetro en el Tirante 19 y de estación meteorológica*

### 2.5.1 Prueba del tirón

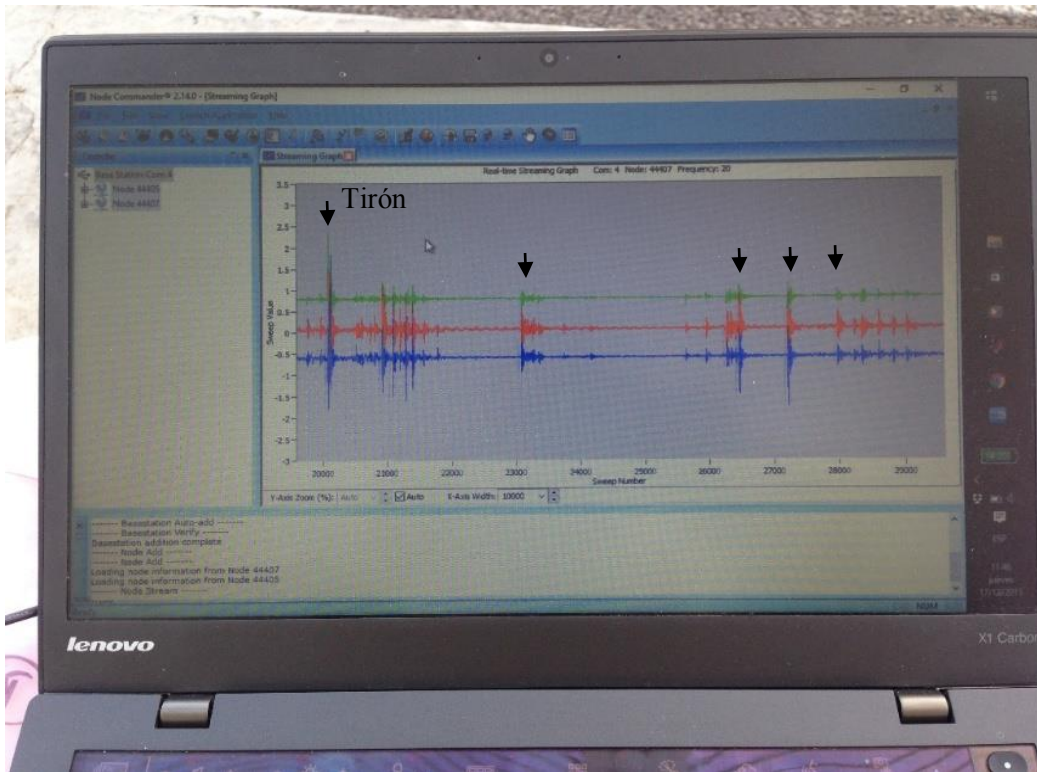
Esta prueba consiste en inducir una excitación en el tirante mediante un tirón al lazo sujeto a éste. El tirón puede ser hecho por una persona, mediante dispositivos mecánicos como un tirfor o con la ayuda de una grúa. Para las pruebas realizadas, el tirón fue realizado por una persona. Las siguientes figuras muestran la prueba del tirón en los tirantes probados.



*Figura 2.14 Prueba del tirón en los puentes probados*

Se observa en la Figura 2.14 que los tirantes fueron excitados en las direcciones mostradas. Los tirones eran periódicos, lo cual permitió registrar la aceleración en el tirante, en la ubicación del tirante. La siguiente figura ilustra el registro de la aceleración al realizar la prueba del tirón de manera periódica.





*Figura 2.15 Registro de aceleraciones en el sistema de registro (con flecha se muestran algunos puntos del registro en donde se aplicó el tirón)*

# 3.

## CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS TIRANTES INSTRUMENTADOS

Con la finalidad de realizar el procesamiento de las señales registradas en las pruebas, las siguientes secciones presentan algunos aspectos básicos de análisis espectral y métodos de análisis, los cuales fueron empleados para determinar las frecuencias de vibrar de los tirantes.

### 3.1. Aspectos básicos de análisis espectral

El método espectral descompone una señal como una suma de un conjunto de series de componentes periódicos con propiedades específicas. En general, al análisis espectral se le llama análisis en el dominio de la frecuencia, ya que la frecuencia es una medida para representar ciclos, es el número de ciclos por unidad de tiempo. En ocasiones, la frecuencia también es interpretada como el número de muestras registradas por segundo y se mide en Hertz (Hz).

#### 3.1.1 Transformada de Fourier

En el análisis espectral, la transformada de Fourier es una herramienta fundamental. Entre otras aplicaciones, la transformada de Fourier mapea a una señal en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. La gráfica que se obtiene de la señal en el dominio de la frecuencia es conocida como espectro.

#### 3.1.2 Aplicaciones de la Transformada de Fourier

La rama de la matemática que estudia la transformada de Fourier y sus generalizaciones es denominada análisis armónico (Bendat y Piersol, 2010).

Se aplica la transformada de Fourier para:

- Analizar contenido de frecuencia de las señales.
- Determinar cómo cambia la amplitud y las fases de las señales sinusoidales cuando estas pasan a través de un sistema lineal e invariante en el tiempo.
- Analizar el comportamiento armónico de una señal.

También, la transformada de Fourier tiene muchas aplicaciones en la ingeniería, especialmente para la caracterización frecuencial de señales y sistemas lineales. Es decir, la transformada de Fourier se utiliza para conocer las características frecuenciales de las señales y el comportamiento de los sistemas lineales ante estas señales.

### 3.1.3 Función de correlación

La correlación es una herramienta matemática utilizada frecuentemente en el procesamiento de señales (Bendat y Piersol, 2010). La función de correlación se define como la correlación cruzada de la señal consigo misma. La función de correlación resulta de gran utilidad para encontrar patrones repetitivos dentro de una señal, como por ejemplo, la periodicidad de una señal enmascarada bajo el ruido o para identificar la frecuencia fundamental de una señal que no contiene dicha componente, pero aparecen numerosas frecuencias armónicas de esta.

### 3.1.4 Espectro de Fourier

La función  $f(t)$  queda definida por una constante e infinitas funciones coseno que reciben el nombre de armónicos, siendo de orden  $n=1$  el primer armónico, de frecuencia igual a la frecuencia fundamental y el resto de frecuencias superiores. La función  $f(t)$  puede escribirse en términos de la serie de Fourier como:

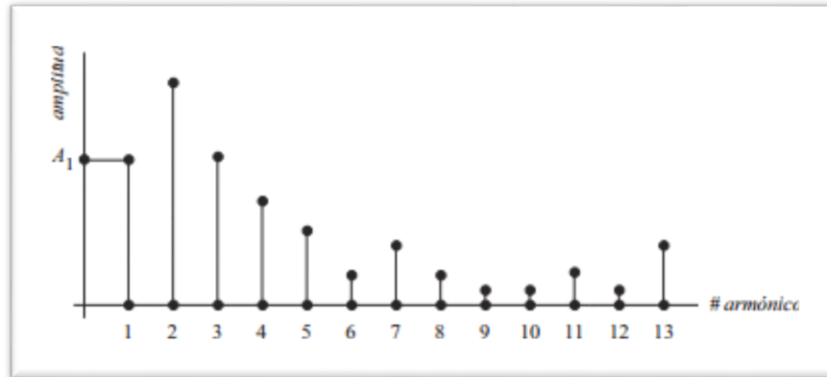
$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n \cos(n\omega_1 t + \phi_n) \quad (3.1)$$

donde  $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$  y  $\phi_n = -\arctg \frac{b_n}{a_n}$ .

El análisis de los espectros, permite estudiar la influencia de cada armónico en la composición de la función periódica. Si las ondas periódicas no contienen discontinuidades y es de aspecto suave, el espectro de amplitudes está formado por líneas que decrecen rápidamente.

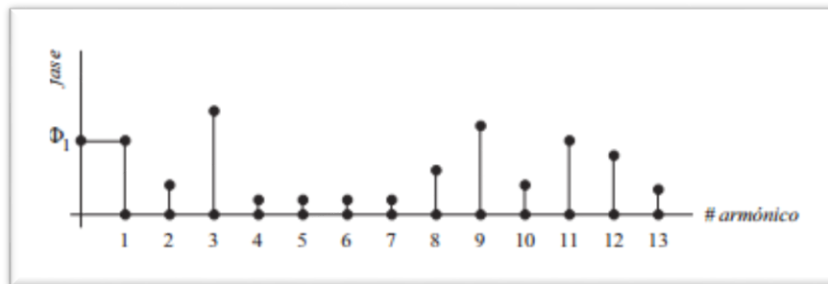
Sabiendo que la frecuencia fundamental de una onda es  $f(t)$  es  $\omega_1$ , solamente se requiere la amplitud ( $A_n$ ) y la fase ( $\phi_n$ ) de cada una de las parciales para construir la onda. El conjunto de estos valores ( $\{(A_1, \phi_1), (A_2, \phi_2), (A_3, \phi_3), \dots\}$ ) se llama espectro. El espectro puede presentarse en términos de amplitud o fase, como se describe a continuación.

- **Representación frecuencia-amplitud.** Recibe el nombre de *espectro de amplitud* de la serie trigonométrica de Fourier. Corresponde a una representación de líneas verticales a la frecuencia del armónico y de longitud igual a su amplitud, como se muestra en la Figura 3.1.



**Figura 3.1. Espectro de amplitud**

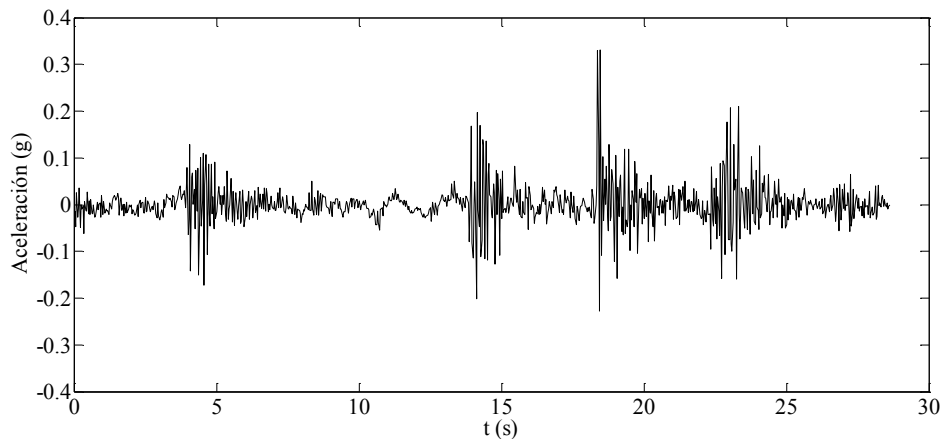
- **Representación frecuencia-fase.** Recibe el nombre de *espectro de fase* de la serie trigonométrica de Fourier y su representación gráfica se muestra en la Figura 3.2.



**Figura 3.2. Espectro de fase**

### 3.2 Identificación de frecuencias de los tirantes probados

La Figura 3.3 muestra un segmento de un registro típico obtenido en las pruebas de los tirantes estudiados. Se observa en esta figura que es complicado inferir los valores de las frecuencias o periodos asociados con los modos de vibrar del tirante.



**Figura 3.3. Segmento de un registro típico obtenido en la prueba de los tirantes**

Para identificar las frecuencias de los tirantes probados se empleará el análisis espectral, más específicamente se determinarán los espectros de amplitudes de Fourier a partir de los registros de aceleración. El procedimiento para obtener los espectros de amplitudes de Fourier consistió en dividir el registro de aceleraciones de un tirante en  $N$  segmentos. Para cada uno de los segmentos:

- 1) Se realizó un filtrado con un filtro Butterworth pasa bandas de orden 4. Esto se realizó con un programa de MATLAB. El filtrado permite descartar valores de frecuencias que no son de interés para el estudio.
- 2) Se determinó la transformada rápida de Fourier (FFT) con un programa de MATLAB. El resultado de la FFT fue empleado para calcular el espectro de amplitudes de Fourier y las frecuencias asociadas con cada amplitud.
- 3) Los  $N$  espectros de amplitudes de Fourier calculados fueron promediados para suavizar el espectro final.
- 4) La frecuencia asociada con la amplitud máxima identificada en el espectro de amplitudes de Fourier fue comparada con los valores de frecuencias de vibrar de los tirantes calculadas de manera analítica con la siguiente ecuación.

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (3.2)$$

donde  $n$  es el número de frecuencia de interés,  $L$  es la longitud del tirante en metros,  $T$  es la tensión estática en metros y  $m$  es la masa por unidad de longitud del tirante. Los valores de estos parámetros se muestran en la Tabla 2.2.

Si la frecuencia natural es identificada mediante pruebas experimentales, la expresión (3.2) también puede ser empleada para estimar la tensión del cable. Para el cálculo de la tensión, la ecuación (3.2) puede ser reescrita como:

$$T = m(2Lf)^2 \quad (3.3)$$

donde  $n$  ha sido tomada como 1 (frecuencia fundamental).

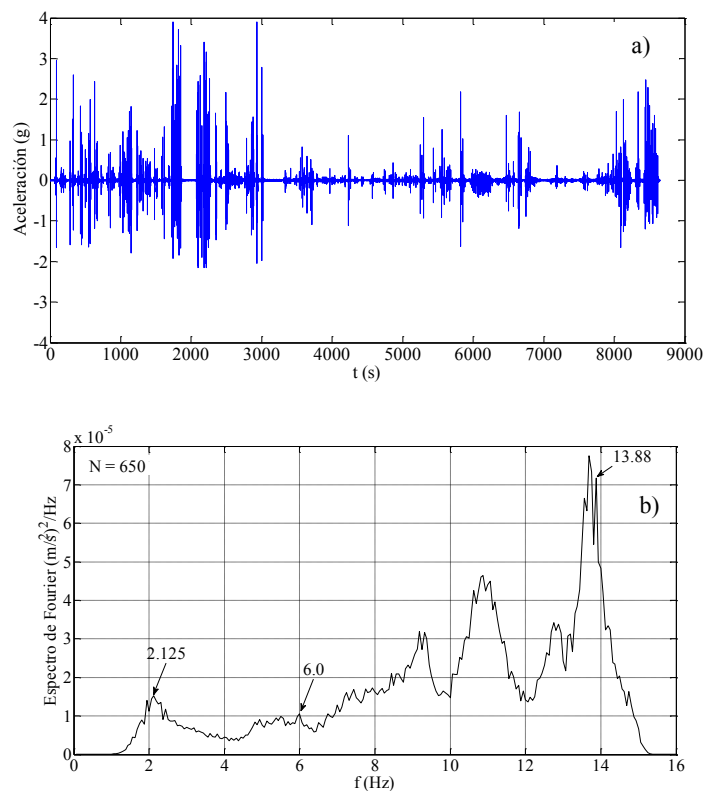
# 4.

## Comparación de resultados

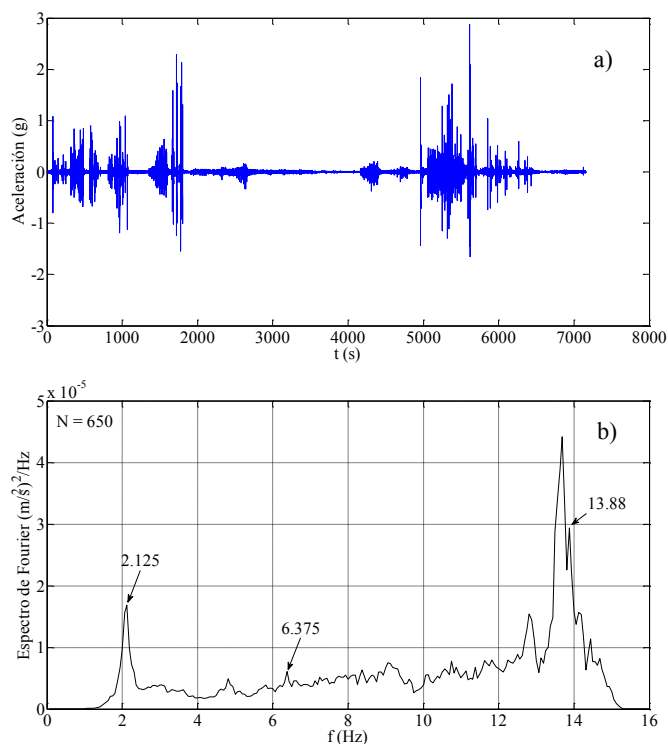
### 4.1 Identificación de frecuencias fundamentales de los tirantes probados

#### 4.1.1 Resultados del tirante 1

Las Figuras 4.1 a 4.3 presentan los registros de aceleración y el espectro de amplitudes de Fourier obtenido de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 3.2.



**Figura 4.1 Representación gráfica de la prueba 1: a) Aceleración; b) Espectro de Fourier (sólo se indican las frecuencias que coinciden con las frecuencias calculadas analíticamente)**



**Figura 4.2 Representación gráfica de la prueba 2: a) Aceleración; b) Espectro de Fourier (sólo se indican las frecuencias que coinciden con las frecuencias calculadas analíticamente)**

Se observa en las Figuras 4.1 y 4.2 que las frecuencias identificadas son consistentes con las obtenidas analíticamente. La comparación de estas frecuencias se resume en la Tabla 4.1.

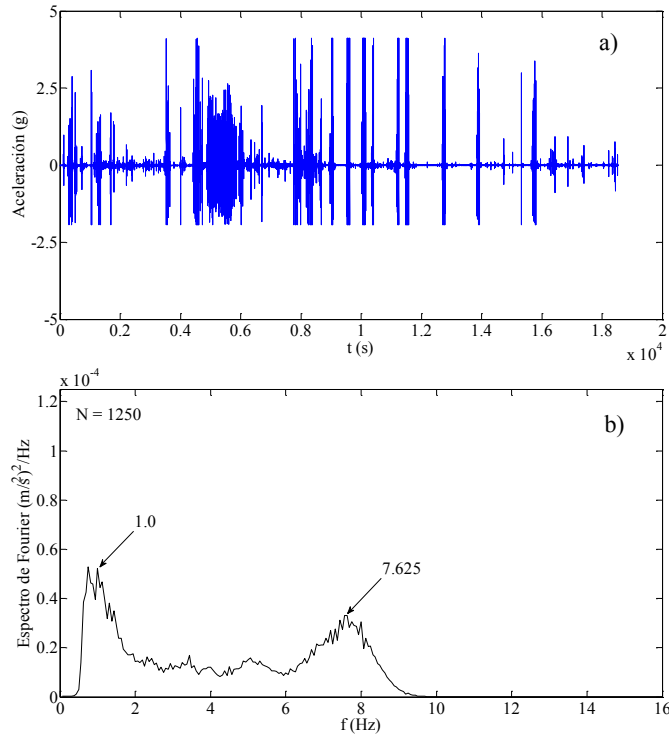
**Tabla 4.1 Comparación de frecuencias analíticas y experimentales del tirante 1**

Frecuencia (Hz)	1	2	3	4	5	6	7
Analítica	2.04	4.08	6.12	8.16	10.19	12.23	14.27
Prueba 1	2.125	-	6	-	-	-	13.88
Prueba 2	2.125	-	6.375	-	-	-	13.88

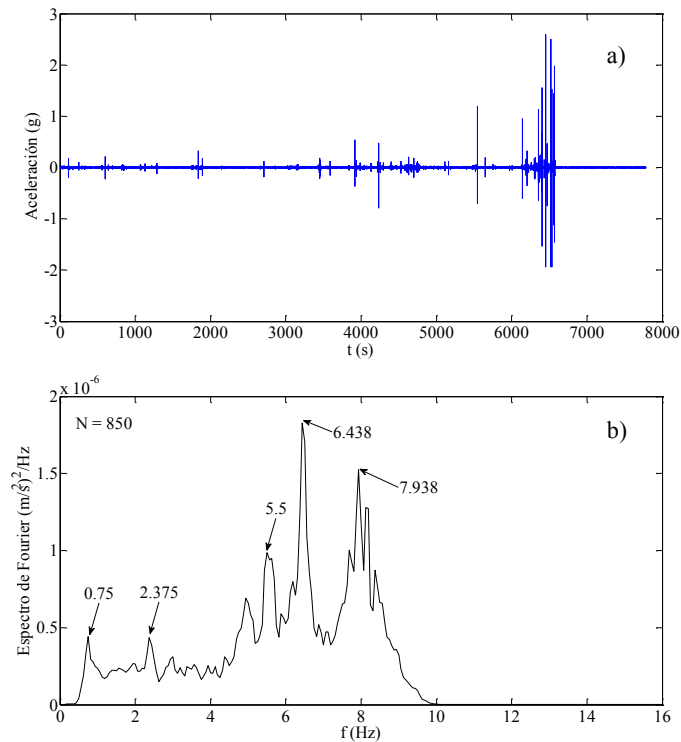
Se observa de la Tabla 4.1 que la frecuencia fundamental identificada en ambas pruebas es muy similar a la obtenida analíticamente, con un error relativo de 4%. Además se lograron identificar frecuencias de modos superiores.

#### 4.1.2 Resultados del tirante 9

Las Figuras 4.3 a 4.4 presentan los resultados de aceleración y espectro de Fourier para cada una de las pruebas realizadas al tirante 9.



**Figura 4.3 Representación gráfica de la prueba 9: a) Aceleración; b) Espectro de Fourier (sólo se indican las frecuencias que coinciden con las frecuencias calculadas analíticamente)**



**Figura 4.4 Representación gráfica de la prueba 2: a) Aceleración; b) Espectro de Fourier (sólo se indican las frecuencias que coinciden con las frecuencias calculadas analíticamente)**



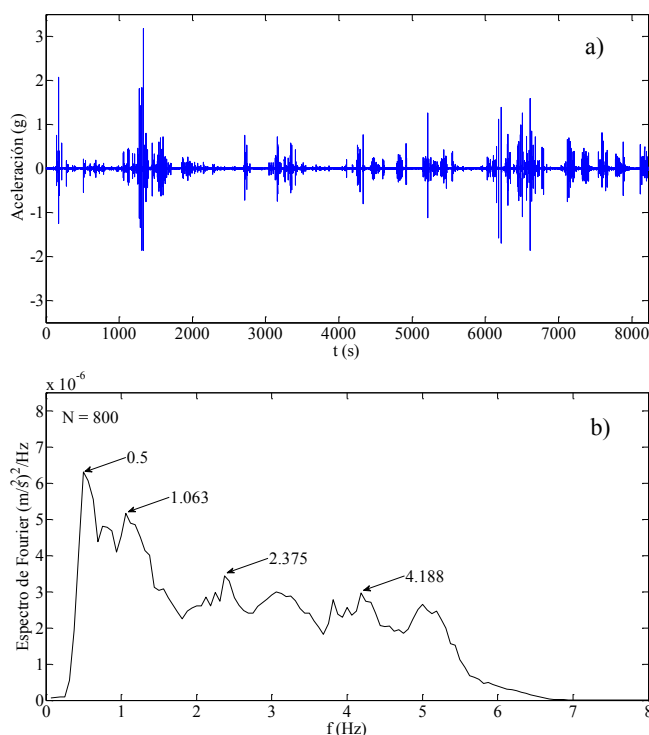
Se observa en las Figuras 4.3 y 4.4 que las frecuencias identificadas son consistentes con las obtenidas analíticamente, en particular, la prueba 2 del tirante 9 permitió identificar de manera satisfactoria frecuencias de modos superiores. La comparación de estas frecuencias se resume en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2 Comparación de frecuencias analíticas y experimentales del tirante 9**

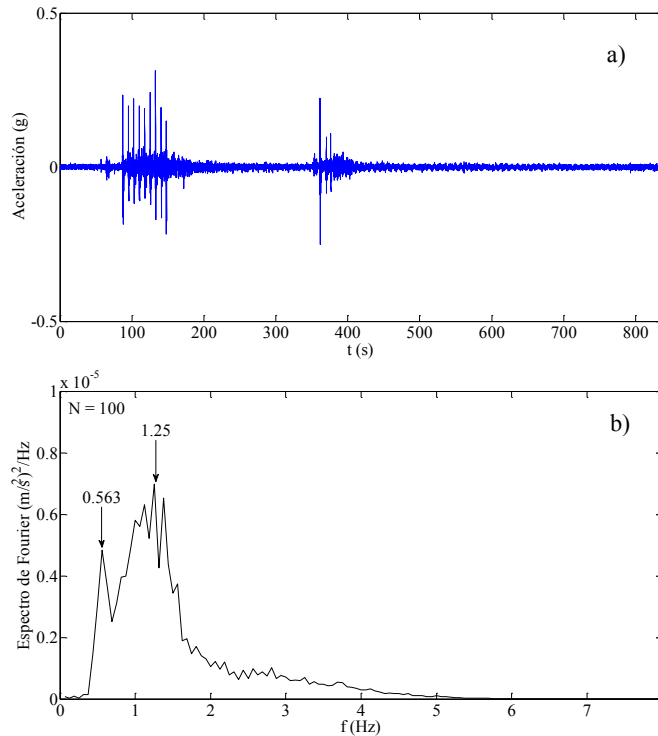
Frecuencia (Hz)	1	2	3	4	5	6	7
Analítica	1.11	2.22	3.33	4.44	5.55	6.66	7.76
Prueba 1	1	-	-	-	-	-	7.625
Prueba 2	0.75	2.375	-	-	5.5	6.438	7.938

#### 4.1.2 Resultados del tirante 19

Las Figuras 4.5 a 4.6 presentan los resultados de aceleración y espectro de Fourier para cada una de las pruebas realizadas al tirante 19.



**Figura 4.5 Representación gráfica de la prueba 1: a) Aceleración; b) Espectro de Fourier (sólo se indican las frecuencias que coinciden con las frecuencias calculadas analíticamente)**



**Figura 4.6 Representación gráfica de la prueba 2: a) Aceleración; b) Espectro de Fourier (sólo se indican las frecuencias que coinciden con las frecuencias calculadas analíticamente)**

Se observa en las Figuras 4.5 y 4.5 que las frecuencias identificadas son similares con las obtenidas analíticamente. La comparación de estas frecuencias se resume en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3 Comparación de frecuencias analíticas y experimentales del tirante 19**

Frecuencia (Hz)	1	2	3	4	5	6	7
Analítica	0.63	1.26	1.90	2.53	3.16	3.79	4.42
Prueba 1	0.5	1.063	-	2.375	-	-	4.188
Prueba 2	0.563	1.25	-	-	-	-	-

## 4.2 Cálculo de la tensión con base en la frecuencia natural identificada

Con base en la ecuación (3.3) y con las frecuencias fundamentales identificadas de cada tirante, en la Tabla 4.4 se presenta una comparación de las tensiones reportadas del proyecto y las estimadas.

*Tabla 4.4 Comparación de las tensiones reportadas del proyecto y las estimadas*

Tirante	T <sub>proyecto</sub> (kN)	T <sub>prueba</sub> (kN)	% error
1	2.66E+06	2.89E+06	8.61%
9	2.71E+06	2.20E+06	18.72%
19	3.43E+06	2.72E+06	20.58%

Se observa en la Tabla 4.4 que las tensiones reportadas del proyecto son mayores a las estimadas con base en la frecuencias identificadas.

### 4.3 Discusión de resultados

Las frecuencias identificadas de las pruebas son similares a las calculadas analíticamente, en particular la frecuencia natural. Además de la primer frecuencia de vibrar, también fue posible identificar frecuencias de modos superiores de los tirantes. Durante la identificación de la frecuencias se observó un grado importante de incertidumbre (i.e., ruido en la señal), que impidió, en algunos casos, la identificación más precisa de las frecuencias. Esta incertidumbre podría deberse a que durante las pruebas el puente permaneció en operación.

Con respecto a la comparación de tensiones, se observó que las tensiones reportadas en proyecto son mayores a las estimadas con base en la frecuencia natural de los tirantes probados. Esta diferencia podría deberse a que durante el uso cotidiano del puente, el cual inició en 2012, los tirantes podrían haberse retensado (redistribución de fuerzas).

# 5.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se estudió el comportamiento de tres tirantes del Puente Baluarte, ubicado en la frontera de los estados de Sinaloa y Durango, México. Se realizaron pruebas de vibración forzada en los tirantes para registrar aceleraciones, a partir de las cuales se identificaron frecuencias de vibrar y tensiones. Más específicamente, las siguientes conclusiones pueden ser establecidas:

- Durante la identificación de la frecuencias se observó un grado importante de incertidumbre (i.e., ruido en la señal), que impidió, en algunos casos, la identificación más precisa de las frecuencias. Esta incertidumbre podría deberse a que durante las pruebas el puente permaneció en operación.
- El análisis espectral y en particular la transformada de Fourier es muy útil para la identificación de frecuencias mediante la obtención de espectros de amplitud.
- La tensión reportada del proyecto en los tirantes estudiados es mayor que la obtenida con base en las frecuencias identificadas. Esto puede deberse al constante funcionamiento de los tirantes por el paso diario de vehículos.

Para estructuras de gran importancia, como el caso del puente Baluarte, se recomienda realizar pruebas experimentales en sus elementos principales con la finalidad de identificar sus propiedades dinámicas y a partir de éstas evaluar la salud estructural de la estructura y en su caso sugerir medidas de corrección para mejorar el comportamiento del puente.

Para futuras pruebas en los tirantes se recomienda emplear al menos dos sensores de aceleración por tirante. Esto permitirá reducir incertidumbres en la identificación de frecuencias.

# BIBLIOGRAFÍA

- Bendat, J.S. y Piersol, A.G. (2010). **“Random Data: Analysis and Measurement Procedures”**, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, USA, 604 pp.
- Hikami, Y. y Shiraishi, N. (1987). **“Rain-wind induced vibrations of cables stayed bridges”**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 29, Issues 1-3, August 1988, Pages 409-418.
- Kostov, K. (2009). **“Bridge Aerodynamics: Aeroelastic Instability of Stay Cables”**, pp. 20-26, 58-65.
- Kumarasena, S., Jones, N., Irwin, P. y Taylor, P. (2007). **“Wind-induced vibration of stay cables”**. FHWA, USA.
- Macdonald J.H.G, Dietz M.S, Neild S.A et al. (2010). **“Generalised modal stability of inclined cables subjected to support excitations”**. Journal of Sound and Vibration, 329: 4515-4533.
- Matsumoto, M., Yagi, T., Goto, M., y Sakai, S. (2003). **“Rain-wind-induced vibration of inclined cables at limited high reduced wind velocity region”**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 91, Issues 1-2, January 2003, Pages 1-12.
- Miyata, T., Hitoshi, Y. y Hojo, T. (1994). **“Experimental study on aerodynamic characteristics of cables with patterned surfaces”**. Journal of Structural Engineering.
- Saito, T., Matsumoto, M., y Kitazawa, M. (1994). **“Rain-wind excitation of cables on cable-stayed Higashi-Kobe bridge and cable vibration control”**. Proceedings of Conference on Cable-Stayed and Suspension Bridges, Pages: 507-514.

## REFERENCIAS WEB

- Diana Sánchez Mustieles (2012), **“Exposición “Las naves MACOSA: espacios industriales rehabilitados”**. **Proyectos Final de Carrera de los alumnos de la escuela de diseño Barreira.**”, Patrimonio Industrial Arquitectónico, <http://patindustrialquitectonico.blogspot.mx/2012/02/exposicion-las-naves-macosa-espacios.html>
- <http://www.viajejet.com/puentes-atirantados/>
- WatchDog 2000 Series weather Stations, <http://www.warensortiment.de/bedienung/ba-wetterstation-watchdog-eng.pdf>
- Lord User Manual, **“G-link-LXRS**, [http://files.microstrain.com/G-LinkUserManual\(8500-0002\).pdf](http://files.microstrain.com/G-LinkUserManual(8500-0002).pdf)