

Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería - 2021

Tomo I. Compilación.

- | Agrimensura, geodesia y ciencias de la tierra y el mar
- | Desarrollo tecnológico social. Vinculación universidad, empresa y estado
- | Ejercicio profesional de la ingeniería
- | Innovación y emprendedorismo en ingeniería
- | Empresas y servicios de ingeniería
- | Ingeniería forense
- | Forestal, agronomía y alimentos
- | La ingeniería y el COVID-19
- | Obras y proyectos de ingeniería
- | Tecnología de la información y comunicación
- | Ferroviaria, automotriz, naval y transporte



Editores: Luis Fernández Luco | Cristina Vázquez | Alejandra Acuña Villalobos | Guillermo Lombera | Roberto Giordano Lerena

Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería

Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería: 2021 : tomo I /
compilación de Luis Fernandez Luco ... [et al.]. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires :
Luis Fernandez Luco, 2022.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga.

ISBN 978-987-88-7243-8

Obra Completa 978-987-88-7180-6

1. Ingeniería. I. Fernandez Luco, Luis, comp. II. Título.
CDD 620.00982

ISBN 978-987-88-7243-8



Análisis del comportamiento aeroelástico de estructuras en túnel de viento con modelos reducidos

Marighetti, Jorge O.^a; Gómez, Maximiliano^b, De Bortoli, Mario E.^a

^a Laboratorio de Aerodinámica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste

^b Becario EVC-CIN / Lab. de Aerodinámica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste
maximiliano.gomez290893@gmail.com

Resumen

Las estructuras civiles esbeltas con bordes cortantes sometidas a cargas de viento pueden vibrar en diversos grados de libertad en función de sus modos y frecuencias fundamentales de oscilación. Cuando las frecuencias de las cargas fluctuantes provocadas por el viento son cercanas a estos valores se produce el efecto de resonancia, donde incluso cargas fluctuantes de pequeña magnitud pueden generar respuestas oscilantes de gran amplitud, a veces con efectos destructivos como lo observado en el colapso del puente Tacoma Narrows (Estados Unidos, 1940)[1].

Este trabajo plantea el desarrollo y optimización de técnicas experimentales de identificación en conjunto con modelos de mecánica computacional que permitan la caracterización y cuantificación de fenómenos de la interacción de fluidos escurriendo sobre cuerpos oscilantes, de bajo aspecto aerodinámico y de bordes cortantes, realizado a través de ensayos de modelos a escala reducida en túnel de viento de estas estructuras, manteniendo leyes de semejanza geométrica, cinemática y dinámica entre modelos y prototipos.

Con el uso de programas de diseño y simulación, se desarrolla un modelo seccional de un tablero puente bajo cargas de viento, medido en una balanza dinámica, reproduciendo dimensiones del puente Guamá, Río Guamá, Cuba.

Resultados obtenidos de la simulación permiten implementar el modelo físico en el túnel de viento *Jacek P. Gorecki* del Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería (UNNE)[2], donde se reproducen frecuencias modales independientes, correspondientes a los desplazamientos vertical (sustentación) y de torsión alrededor del eje longitudinal respectivamente, comparando los resultados obtenidos en ambos métodos y con los de bibliografía disponible.

Abstract

Slender, shear-edged civil structures subjected to wind loads can vibrate in varying degrees of freedom, in fundamental modes and frequencies of oscillation. Fluctuating frequencies contained in the wind, even small magnitude fluctuating loads, generate large amplitude oscillating responses.

This work proposes the development and optimization of experimental identification techniques complemented with computational mechanics models, which allow the characterization, quantification and deepening of knowledge of the phenomena caused by the interaction of fluids flowing over oscillating bodies with cutting edges. The study is based on tests of reduced scale models of these structures in atmospheric wind tunnels, maintaining the laws of geometric, kinematic and dynamic similarity between model and prototype.

With the use of design and simulation software, a sectional model of a bridge deck under wind loads, supported on a dynamic measuring balance, was previously developed and modeled according to real bridge dimensions. The implementation of the physical model of the bridge deck in the Jacek P. Gorecki wind tunnel of the Aerodynamics Laboratory, Faculty of Engineering (UNNE), reproduces the geometrical and dynamic configuration of the fundamental modal shapes of vibration in two degrees of freedom, corresponding to the vertical displacement (lift) and torsion around the longitudinal axis. Measurements of critical velocity, longitudinal and torsional displacements, frequencies and modes of the mass scaled model, stiffness and damping, show concordant results compared with those observed in prototype and specialized literature.

Palabras clave: Frecuencias de vibración, modos de vibración, túnel de viento, tableros de puente.

INTRODUCCIÓN

La inestabilidad del escurrimiento atmosférico y las alteraciones del campo de velocidad del viento por la presencia de estructuras y la topografía del sitio provocan cargas que resultan del impacto simultáneo de masas de aire sobre su superficie, desplazándose en un campo de velocidades medias e instantáneas no uniformes. Estas velocidades de naturaleza fluctuante inducen vibraciones en la estructura de diversas amplitudes y frecuencias originadas por fuerzas dinámicas[3,4].

Por otro lado, estructuras donde una de sus dimensiones geométricas es de varios órdenes mayor respecto a otras presentan un alto grado de sensibilidad dinámica a efectos inducidos por el viento. Un conocido accidente que generó la profundización de estudios sobre los efectos dinámicos, por acción del viento, es el puente Tacoma Narrows, en los Estados Unidos (1941); este colapso ocurrió a una velocidad de viento mucho menor a la velocidad de diseño prevista.

El análisis dinámico de modelos reducidos, en ensayos en túnel de viento y el análisis dimensional aplicado a estos estudios, resultan métodos confiables para conocer el comportamiento dinámico de estructuras civiles sometidas a la acción del viento atmosférico, permitiendo obtener parámetros adimensionales y respuestas que permitirán ser extrapolados al prototipo. Los modelos seccionales rígidos

utilizados para los ensayos son de bajo costo y permiten obtener resultados satisfactorios en el análisis de las respuestas dinámicas de dichas estructuras, diseñados para simular propiedades dinámicas, son vinculados a una balanza dinámica, de manera que permita la reproducción a escala de sus primeros modos fundamentales de vibración y frecuencia, el amortiguamiento estructural y la masa inercial, reproducidos de las magnitudes a escala de las magnitudes del prototipo. Los requerimientos de semejanza para el estudio del comportamiento dinámico en túnel de viento tienen en cuenta la semejanza de las características medias y turbulentas del flujo de aire, semejanza geométrica de la estructura, semejanza de las fuerzas aerodinámicas, semejanza de las fuerzas inerciales, de rigidez y de amortiguamiento[5,6].

Actualmente existen métodos con modelos numéricos que, mediante el uso de computadoras, permiten la determinación de estados tensionales en análisis de la interacción fluido estructura. Sin embargo, el comportamiento no lineal de las estructuras, los materiales empleados, sometidos a la acción de cargas no estacionarias y aleatorias, limitan sus alcances. Las diferencias entre las hipótesis teóricas y el comportamiento real hacen necesario recurrir a ensayos estructurales, en escala real (prototipo) o con modelos reducidos

en túneles de viento. Actualmente, gran parte de las investigaciones en dinámica estructural son extractadas de experimentos desarrollados en túneles de viento, ya sea para aplicación en desarrollos analíticos y numéricos, como para la obtención de valores aplicables directamente al diseño

Otras herramientas muy utilizadas son los programas de diseño y simulación en 3D, ya hace décadas se utilizan los ordenadores para diseñar todo tipo de objetos. En paralelo al desarrollo de estas aplicaciones de diseño asistido por ordenador, se han desarrollado también otras de simulación, modelización y manufactura de productos. Esta evolución ha ido paralela al aumento de la capacidad de proceso y a la facilidad de uso de los ordenadores, permitiendo un análisis previo y más económico del fenómeno de estudio para analizar su comportamiento. A través de los mismos, permiten obtener parámetros que pueden aplicarse en la construcción de modelos y en la realización de ensayos en el campo experimental.

En el presente trabajo, se evalúan las características dinámicas de un tablero puente atirantado (obenques), estructura civil de bordes cortantes, esbeltos y flexibles, para la construcción de un modelo seccional de dos grados de libertad desacoplados, vinculados a una balanza dinámica, adecuada a ensayos dinámicos en túnel de viento. Mediante el uso de programas de diseño y simulación 3D, se realiza una simulación del seccional implementado, empleando modelos a escala reducida y criterios de semejanza de la teoría de modelos y análisis dimensional, reproducidos de las dimensiones del puente Guamá, en Pinar del Río, Cuba.

Con los resultados obtenidos, se implementa el modelo físico para ensayos en túnel de viento Jacek P. Gorecki del Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería (UNNE), reproduciendo los modos de frecuencia fundamentales en los grados de libertad permitidos al modelo, correspondientes a los desplazamientos vertical y de torsión alrededor del eje longitudinal respectivamente,

desacoplando los otros modos de manera tal que el análisis experimental se lleve a cabo contemplando sólo dos grados de libertad. Los resultados obtenidos por ambos métodos son comparados con valores del prototipo y la bibliografía especializada.

DESARROLLO

En una instancia inicial, se lleva a cabo una revisión bibliográfica general de estudios experimentales en túnel de viento vinculados con problemas dinámicos en estructuras de interés. Posteriormente, sirven como guía para el modelado y ensayo del modelo reducido, analizando viabilidad de construcción de un modelo seccional de tablero puente, esbelto, de bajo aspecto aerodinámico y de bordes cortantes, para ensayos dinámicos.

El modelo a construir está basado en el diseño del puente atirantado Guamá, río Guamá, Pinar del Río, Cuba, del cual se cuenta con bibliografía y resultados de ensayos, permitiendo contrastar los valores obtenidos, reproduciendo parámetros estructurales, masa, rigidez y amortiguamiento, según leyes de semejanza (Teoría de Modelos).

Diseño de la balanza dinámica

Para analizar el comportamiento dinámico del modelo seccional reducido del tablero puente en túnel de viento se diseña, en conjunto con las técnicas experimentales, una balanza portante del modelo que permitiese medir movimientos torsionales y verticales periódicos[7].

En primer término, esta estructura debe adaptarse a las dimensiones y características del túnel de viento Jacek P. Gorecki de la Facultad de Ingeniería (UNNE), el cual es un túnel de capa límite de circuito abierto, de longitud total 39,65 m. La cámara de ensayo tiene 2,4 m de ancho x 1,8 m de alto x 22,8 m de largo, y produce una velocidad máxima en vacío de 25 m/s [90 km/h].

La balanza dinámica es configurada como un sistema soporte con ocho resortes de masa (m) y constante elástica (k) ligados a un sólido rígido

indeformable de masa (M): el modelo seccional (ver figura 1). Son considerados dos grados de libertad: el desplazamiento vertical (z) del centro de masa del modelo según su eje de sustentación, y la rotación (θ) en torno a su eje de simetría longitudinal.

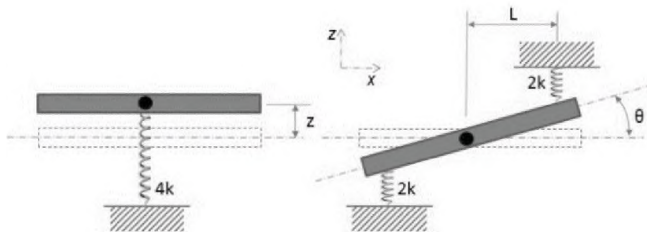


Figura 1 - Modelos físicos de la balanza.

En ausencia de fuerzas de rozamiento, las frecuencias naturales de los grados de libertad vertical f_z y de giro f_θ , respectivamente, están dadas por:

$$f_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{8k}{M + \frac{8m}{3}}}$$

$$f_\theta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{8L^2 k}{I}}$$

Donde L es la longitud entre vínculos del tablero y el momento de inercia total es dado por:

$$I = I_0 + \frac{8}{3} mL^2$$

Donde I_0 es el momento de inercia del tablero respecto al eje longitudinal.

Las ecuaciones de movimiento para los dos grados de libertad (GDL) de interés en el modelo están dadas por las expresiones:

$$m \ddot{z} + K_1(x - l_1 \theta) + K_2(x + l_2 \theta) = 0 \quad (1)$$

$$I_0 \ddot{\theta} - K_1 l_1(z - l_1 \theta) + K_2 l_2(z + l_2 \theta) = 0 \quad (2)$$

donde m es la masa del modelo, k_1 y K_2 son las constantes del resorte que suspenden el modelo, x y z son las coordenadas traslacionales y θ la coordenada rotacional.

El centro de masa del modelo coincide con el eje de rotación.

Similitud y correspondencia de escala

En el diseño de la balanza dinámica se consideran las siguientes semejanzas:

- *Semejanza geométrica*: el modelo y el prototipo son de la misma forma geométrica, guardando una relación constante entre las dimensiones correspondientes:

- *Semejanza cinemática*: las velocidades en puntos correspondientes están en la misma dirección y se relacionan en magnitud por un factor de escala constante. Esta similitud requiere que los regímenes de flujo sean los mismos en el modelo y en el prototipo.

- *Semejanza dinámica*: los escurrimientos tienen distribuciones de fuerzas tales que tipos idénticos de fuerzas son paralelos y se relacionan en magnitud por medio de un factor de escala constante en todos sus puntos.

No se pueden cumplir simultáneamente con todos los criterios de semejanza para modelos no triviales. La elección de parámetros adimensionales para el análisis basados en el uso del teorema Pi de Buckingham conducen a la elección del número de Reynolds y del coeficiente de presión C_p como variables adimensionales representativas, asociados a los coeficientes de arrastre y sustentación, C_D y C_L .

Las relaciones entre las características geométricas y dinámicas del prototipo del tablero de puente Guama y el modelo permiten obtener dos relaciones de escala, basadas en las velocidades simuladas y dimensiones del túnel de viento de capa límite de la UNNE, definiéndose:

a. Escala de longitud:

$$\lambda_L = \frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{50}$$

Donde, λ_L es el factor de escala de longitud, L_m es la longitud del modelo y L_p es la longitud del prototipo.

b. Escala de velocidad:

$$\lambda_v = \frac{V_m}{V_p} = \frac{1}{3}$$

Donde λ_v es el factor de escala de velocidad, V_m es la velocidad en modelo y V_p es la velocidad en el prototipo. La elección de estos factores de escala determinan los siguientes parámetros:

c. Escala de masa:

$$\lambda_m = \frac{m_m}{m_p} = \lambda_L^2 = \frac{1}{2500}$$

Donde λ_m es el factor de escala de masa, m_m es la masa del modelo y m_p es la masa del prototipo.

d. Escala de tiempo:

$$\lambda_T = \frac{\lambda_L}{\lambda_v} = \frac{3}{50}$$

Donde λ_T es el factor de escala de tiempo.

e. Escala de frecuencia:

$$\lambda_f = \frac{1}{\lambda_T} = \frac{50}{3}$$

Donde λ_f es el factor de escala de frecuencia.

Cabe destacar que la frecuencia del modelo depende del momento de inercia de masa del mismo y de la constante elástica de los resortes utilizados en la balanza dinámica. Resortes más rígidos determinan frecuencias más altas.

f. Escala de momento de inercia de masa:

$$\lambda_{Im} = \lambda_p \cdot \lambda_L^5$$

Donde λ_{Im} es el factor de escala de momento de inercia de masa, λ_p es el factor de escala de masa específica, definido como el cociente entre la masa específica del modelo y prototipo.

Como hipótesis simplificativa, las semejanzas estructurales se consideran de la igualdad de los siguientes parámetros adimensionales entre el modelo y prototipo:

I- Elasticidad

II- Inercia

III- Viscosidad (número de Reynolds)

IV- Amortiguamiento estructural

En Tabla 1 se resumen las propiedades dinámicas escaladas del prototipo del tablero de puente y del modelo seccional reducido. Teniendo en cuenta las propiedades dinámicas del modelo se calculan las dimensiones y

ubicación de los apoyos elásticos, que se implementan en la balanza dinámica.

Tabla 1 - Propiedades dinámicas de prototipo y modelo seccional dinámico del tablero de puente

	Prototipo	Modelo
F_z (frecuencia de sustentación)	0,424 Hz	≈ 7 Hz
F_θ (frecuencia de torsión)	0,792 Hz	$\approx 13,2$ Hz
F_θ/F_z	1,87	1,89
m (masa por unidad de longitud)	26500 Kg/m	21,2 kg/m
I (momento de inercia por longitud)	992500 Kgm ² /m	0,318 Kgm ² /m

De esta forma, con la ayuda de programas de simulación 3D, se diseñan y simulan: el modelo de tablero puente, y la balanza para estudios dinámicos, siendo posible encontrar los modos y las magnitudes de las frecuencias fundamentales del modelo físico reproduciendo las propiedades dinámicas entre modelos y prototipos.

Diseño del modelo

Paralelo al diseño de la estructura y tomando como prototipo una sección del puente Guamá, cuyas características son una cuerda de 17,3 m, la superficie a barlovento tiene una altura de 1,2 m. En consideración a las dimensiones del túnel de viento, el diseño del modelo seccional utilizado para la simulación con una escala geométrica de 1:50, resulta en un modelo de 2 m de longitud (L), con una cuerda de 0,35 m y una altura máxima de 0,3 m en la superficie frontal. (ver Figura 2).

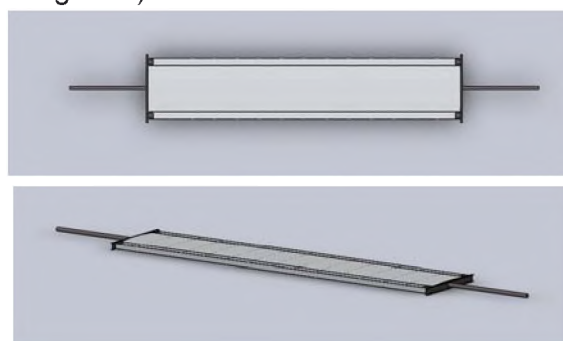


Figura 2 – Modelo seccional del tablero puente: vista superior y vista isométrica

En la Figura 3 se ve la estructura portante y el modelo seccional de tablero puente suspendido por resortes.



Figura 3 – Estructura funcional de la balanza dinámica y modelo suspendido

La vinculación modelo-balanza dinámica, muestra un conjunto de cuatro pares de resortes de tracción, de una constante $k = 5000 \text{ N/m}$ cada uno, son implementados de acuerdo con las distancias previamente calculadas (ver Figura 4).

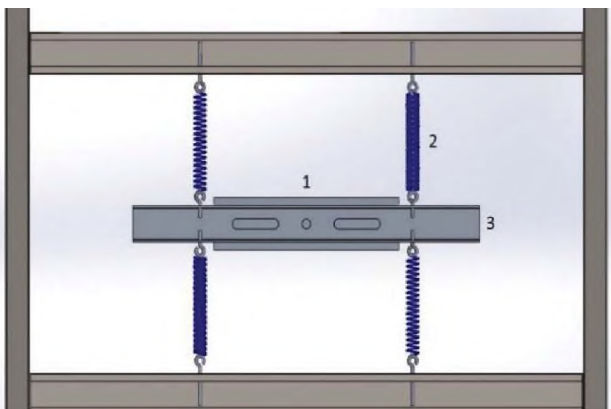


Figura 4 - Esquema de sustentación del modelo con resortes:

1. Modelo
2. Apoyo Elástico
3. Perfil central de aluminio: conectado al modelo y a resortes.

Simulación computacional

Después de establecer las sujeciones, y determinar un mallado sólido basado en curvatura con un tamaño máximo de elementos de 40 mm y en tamaño mínimo de 5 mm, cuya calidad es de elementos cuadráticos de alto

orden, se procede a ejecutar la simulación (ver Figuras 5, 6 y 7).



Figura 5 – Modelo mallado según el Método del Elemento Finito

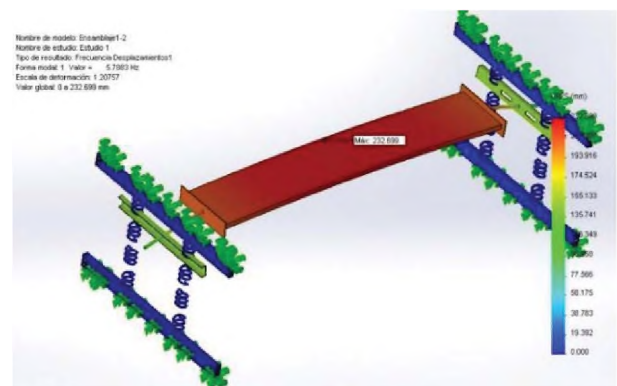


Figura 6 – Forma Modal 1

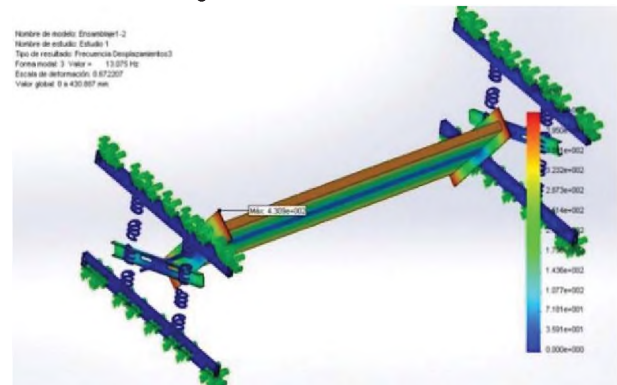


Figura 7 – Forma Modal 3

Figuras 6 y 7 – Desplazamientos en modos 1 y 3, reproducidos experimentalmente según los grados de libertad vertical y torsional, respectivamente.

Con fines prácticos se reduce la estructura a la sección donde está ubicado el puente, considerando que los perfiles de la estructura portante son totalmente rígidos. Esto es posible ya que la estructura que rodea el puente es rígida, no es así en el caso del perfil central en el cual está sujeto el puente, el cual es considerado

en principio libre de vínculos, exceptos los resortes. De esta manera, se podrán deducir analíticamente los primeros modos de frecuencia fundamentales de vibración del modelo.

Considerando el modelo con masa de 21,3 Kg y momento de inercia (por unidad de longitud) $I = 0,31 \text{ kgm}^2/\text{m}$, observamos cinco modos de frecuencias simulados, con valores agrupados en Tabla 2.

Tabla 2 – Formas modales y frecuencias

Modos	Rad/seg	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)
1	36,369	5,7883	0,17276
2	69,515	11,064	0,090386
3	82,15	13,075	0,076484
4	111,46	17,74	0,056371
5	208,41	33,169	0,030149

Ensayo real del modelo seccional

En etapa de ensayos del modelo seccional del tablero puente en túnel de viento, para determinar las cargas provocadas por el viento, se simula la condición de capa límite atmosférica siguiendo criterios de semejanza entre modelo y prototipo establecidos a partir de la teoría de modelos y el análisis dimensional, según los cuales las características del flujo incidente tienen que mantener semejanza con el viento natural incidente en la estructura real, y el modelo debe guardar una semejanza geométrica con la estructura real.

Los coeficientes aerodinámicos se determinan con viento de característica preponderantemente estacionario, uniforme y turbulento. Los coeficientes de presiones se determinan mediante las diferencias de la altura del líquido manométrico de un multimanómetro de alcohol y sensores electrónicos para medición de presiones fluctuantes.

Se miden presiones medias (temporales) en la superficie exterior del modelo reducido por medio de tomas de presión estática para

determinar coeficientes de presión local correspondientes a las tomas.

Los ensayos se realizan con viento incidiendo desde $0^\circ \pm 45^\circ$, a intervalos de 5° para cada tablero ensayado. Con los datos de las mediciones, para cada dirección de viento analizada, se determinaron los coeficientes de fuerza global, momento de volcamiento, momento torsor, punto de aplicación y dirección de la fuerza resultante.

En la determinación de las características del escurrimiento en el túnel de viento, se realizan mediciones de las velocidades medias y fluctuaciones de velocidad con tubos de Pitot-Prandtl y micromanómetro, tipo Betz.

Para el análisis de las velocidades fluctuantes se utiliza un anemómetro de hilo caliente Dantec 56C con una placa de adquisición de datos Computer Board PCI-DAS 1602/16 y los registros se procesan con software desarrollado en este laboratorio.

Obtención de frecuencias

Las mediciones se realizan con la balanza dinámica con dos grados de libertad desacoplados, reproduciendo frecuencias fundamentales de oscilación en sustentación y angular alrededor del eje longitudinal del modelo dinámico, con una escala de frecuencia de 50/3.

El registro de vibraciones se realiza con dos acelerómetros Isotron-Endveco 102 conectados a 0,31 m del eje geométrico del tablero puente. En el soporte exterior, la posición equidistante del eje longitudinal se eligió con el objetivo de discriminar los modos de torsión que pudieran presentarse espuriamente en el momento de darle al sistema la amplitud inicial de oscilación. Se agregó lastre (masa) al eje del tablero según requerimientos de escala. Al medir solo el modo de oscilación vertical, que se corresponde al Modo 1 de la simulación, se registraron aceleraciones con muestras de 20 segundos, con una tasa de adquisición de 100 Hz, obteniéndose señales como se observan en figura 8.

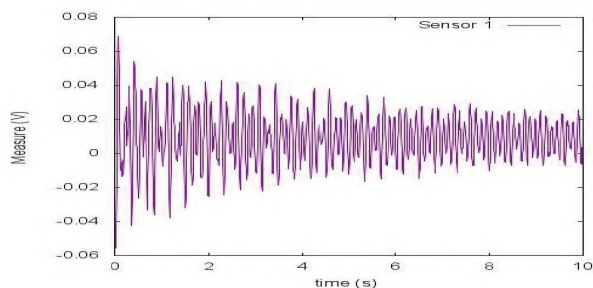


Figura 8 – Señales instantáneas de uno de los acelerómetros

En la figura 9 se identifican los modos combinados de tres de los modos normales del sistema, con una frecuencia natural de 8,9 Hz para el grado de libertad traslacional.

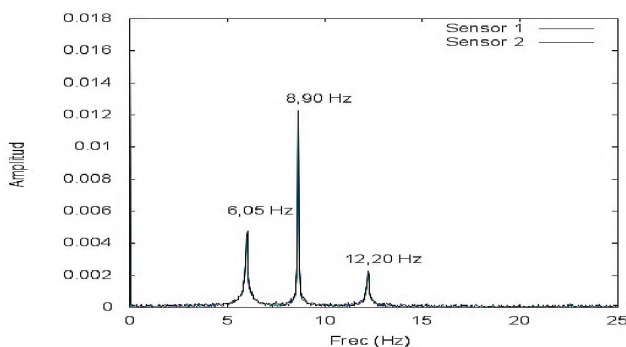


Figura 9 – Espectro de señales del registro de los acelerómetros

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los registro de vibraciones realizados con los acelerómetros muestran una frecuencia natural en el Modo 1 en el grado de libertad traslacional (sustentación) de 8,9 Hz, cercano al valor calculado analíticamente (7 Hz) pero alejado de la frecuencia de sustentación obtenida por software (5,78 Hz)

Se observó además un grado de acoplamiento indeseado entre el modo torsional y otros modos fundamentales no considerados en el estudio, mostrados en el espectro de frecuencias de la figura 9.

Aproximaciones más cercanas y el desacoplamiento de los modos no deseados, son posibles con una adecuada distribución de masas y momento de inercia del tablero de puente.

Para lograr un mejor desacople de los modos fundamentales de interés y al mismo tiempo brindar mayor estabilidad a la estructura de la balanza dinámica, se está trabajando en modificaciones sobre la estructura construida que permitan lograr una mayor rigidez, permitiendo a la vez reducir la longitud entre apoyos del modelo.

AGRADECIMIENTOS

Este grupo de investigación agradece a Batriz Iturri, Técnico del Laboratorio de Aerodinámica.

REFERENCIAS

- [1] T.A. Wyatt, Bridge aerodynamics 50 Years after Tacoma Narrows-part I: Tacoma Narrows Failure and After, JWEIA, Vol 40 (1992), 317-326.
- [2] A. R. Wittwer, S. V. Möller, "Characteristics of the low speed wind tunnel of the UNNE", J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 84 (3), pp. 307-320, 2000.
- [3] T. V. Lawson, Wind effects on buildings Vol. I. Design Applications, Applied Science Publishers Ltd., London (2005).
- [4] E. Simiu, R. H. Scanlan, Wind Effects on Structures, 2nd Ed., Jhon Wiley & Son Publication, New York, USA (2006).
- [5] K. Matsuda, K. Kato, Y. Tamai, K. Misawa, I. Ikeda, Experimental Study on Aerodynamic Vibrations of a Bracing Member with a Rectangular Cross Section of The Long-Spanned Truss Bridge, Department of Civil and Architectural Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu Fukuoka, Yokogawa Bridge Corp., Osaka, Japan Daiwa House Industry Co., Ltd., Hiroshima, Japan (2015).
- [6] R. H. Scanlan, J. Tomko, Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivates, Journal of Engineering Mechanics Division, Proceedings. ASCE, December (1971) 1717-1737.
- [7] J. Marighetti, A. Wittwer, M. De Bortoli, B. Natalini, M. Paluch, M. Natalini, Fluctuating and mean pressure measurements on a stadium covering in wind tunnel, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 84 (2000) 321-328