

# REPRODUCCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS DE UN MODELO SECCIONAL RÍGIDO

Marighetti, Jorge O.<sup>a,\*</sup>; Gomez, Maximiliano<sup>a</sup>; Rodriguez, Juan M.<sup>a,b</sup>; De Bortoli, Mario E.<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratorio de Aerodinámica, Facultad de Ingeniería, Av Las Heras 727, Resistencia (Chaco), Argentina

<sup>b</sup> Carrera del Personal de Apoyo, CONICET, Facultad de Ingeniería, Av Las Heras 727, Resistencia (Chaco), Argentina

\*E-mail Autor: jomaringha@gmail.com

## Resumen

Las estructuras lineales sometidas a cargas de viento son susceptibles de vibrar en oscilaciones caracterizadas por periodos y frecuencias fundamentales, donde las fuerzas inerciales generadas por el movimiento pueden resultar mayores que las fuerzas aerodinámicas inducidas por el viento incidente [1,2]. Cuando las fuerzas fluctuantes provocadas por el viento tienen frecuencias cercanas a las fundamentales de la estructura se produce el efecto de resonancia. En este caso, cargas fluctuantes de pequeña magnitud pueden generar oscilaciones de gran amplitud o aceleración, incluso con efectos destructivos, como se reporta el colapso estructural del puente Tacoma Narrows en 1940 [3]. Comportamientos estructural no-lineal y cargas viento aleatorias dificultan encontrar soluciones analíticas cerradas, debiendo recurrir a herramientas de análisis experimentales y de identificación de respuestas [4].

En el presente trabajo se presenta la construcción y calibración de un modelo seccional de un tramo del tablero de puente construido en escala geométrica 1:50 para ensayos en el túnel de viento del Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería (UNNE) [5], reproduciéndose en escala, la distribución de masa, amortiguamiento y rigidez estructural, basadas en leyes de semejanza (Teoría de Modelos) [6,7]. Las mediciones se realizaron con una balanza dinámica construida para tal fin, con dos grados de libertad desacoplados, reproduciendo las frecuencias fundamentales de oscilación de sustentación y angular alrededor del eje longitudinal del modelo dinámico, con una escala de frecuencia de 50/3 [8,9]. Para identificar los modos fundamentales de vibración, se adquieren, almacenan y procesan registros temporales de aceleración en ambos GDL [10,11]. Los resultados, comparados con el prototipo y la bibliografía especializada, permiten iniciar los ensayos de modelos sometidos a cargas de viento no estacionarias.

**Keywords:** Modelos seccionales, propiedades dinámicas, frecuencias fundamentales, identificación, túnel de viento.

## 1. Introducción

Las estructuras civiles, de bordes cortantes, esbeltas y flexibles, sometidas a cargas de viento son susceptibles de vibrar en oscilaciones caracterizadas por periodos y frecuencias fundamentales, donde fuerzas inerciales generadas por el movimiento pueden resultar mayores que fuerzas aerodinámicas inducidas por el viento [1,2]. En tableros de puente, las velocidades fluctuantes, generadas por turbulencia contenida en el viento, inducen vibraciones a la estructura diversas amplitudes y frecuencias. Éstas, se originan en fuerzas dinámicas provenientes de inestabilidades del escurrimiento y alteraciones del campo de velocidades por la presencia de la estructura y topografía del sitio. La separación del flujo en la estructura, desprendimientos de vórtices (vortex shedding), martillamiento (buffeting), flujo de reataque, entre otros, son consecuencia de esas alteraciones en el campo de velocidades. Cargas de pequeña magnitud generan oscilaciones de gran amplitud o aceleración, incluso con efectos destructivos, como se reporta el colapso estructural del puente Tacoma Narrows (1940) [3].

Considerando el comportamiento estructural no-lineal y cargas de viento no estacionarias, los ensayos en túnel de viento de modelos estructurales reducidos, resultan un método confiable para evaluar y caracterizar los fenómenos de interacción fluido-estructura. El análisis dimensional y leyes de semejanza (Teoría de los Modelos) permiten escalar las características geométricas, cinemáticas y dinámicas del prototipo al modelo.

Los modelos seccionales rígidos de tableros de puente con la reproducción de parámetros dinámicos estructurales, dan resultados satisfactorios en el análisis de las respuestas dinámicas de estructuras sometidas a la acción del viento atmosférico. Aunque rígidos, simulan propiedades dinámicas, que permiten la reproducción de primeros modos fundamentales de vibración, amortiguamiento y la masa inercial del prototipo. Requerimientos de semejanza reproducen también características medias y turbulentas del escurrimiento de aire, semejanza geométrica de la estructura.

Métodos con modelos numéricos, mediante el uso de computadoras, permiten la determinación de estados tensionales en análisis de la interacción fluido estructura; sin

embargo, el comportamiento del fenómeno limita sus alcances. De igual manera, los programas de diseño y simulación en 3D permiten diseñar y simular comportamientos de objetos o interacción de estos. Estas herramientas nos permiten un análisis previo del fenómeno de interacción fluido-estructura para analizar su comportamiento y obtener datos e información para el diseño y construcción de modelos utilizados en ensayos en túnel de viento.

En el presente trabajo se evalúan las características dinámicas de un tablero puente atirantado, estructura civil de bordes cortantes, esbeltos y flexibles, para la construcción de un modelo seccional de dos grados de libertad desacoplados y una balanza adecuada a ensayos dinámicos en túnel de viento. Ésta, permitirá medir los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de los movimientos de sustentación y movimientos torsionales. Asistido por programas de simulación 3D, previamente se simula un modelo de tablero de puente seccional, escala geométrica 1:50, del prototipo, donde se reproducen parámetros estructurales dinámicos de masa y rigidez, basados en leyes de semejanza (Teoría de Modelos). El modelo físico, construido en base a los resultados simulados, es ensayado en túnel de viento del Laboratorio de Aerodinámica, Facultad de Ingeniería (UNNE), donde se calibra la balanza dinámica, representando las características estructurales del tablero del puente “Guamá”, río Guama, Cuba. Esta permitirá reproducir los modos de frecuencia fundamentales del modelo, en los grados de libertad permitidos al modelo. Para identificar los modos fundamentales de vibración, se adquieren, almacenan y procesan registros temporales de aceleración en ambos GDL [10,11]. Los resultados, comparados con el prototipo y la bibliografía especializada, permiten iniciar ensayos de modelos sometidos a cargas de viento no estacionarias.

## 2. Balanza dinámica para estudio dinámico de tablero seccional

En estructuras civiles tales como los tableros de puentes; estructuras de bordes cortantes, esbeltos y flexibles; son analizados los efectos estáticos como dinámicos del viento. Para analizar el comportamiento dinámico de los modelos seccionales reducidos de tableros de puente, en túnel de viento, se desarrollan la balanza portante del modelo y las técnicas experimentales.

### 2.1. Modelo ideal de balanza

La balanza dinámica, como se ve en la Figura 1, es configurada como un sistema soporte con ocho resortes de masa  $m$  ligados a un sólido rígido indeformable de masa  $M$ .

Son considerados dos grados de libertad: el desplazamiento del centro de masa del sistema, y la rotación en torno a su eje de simetría longitudinal.

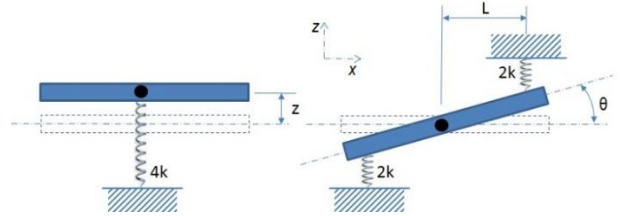


Fig. 1. Configuración del modelo de la balanza dinámica para la simulación.

Las ecuaciones de movimientos de los dos grados de libertad considerados, son descriptos por la Ec.1 y Ec. 2, siguientes,

$$\frac{d^2z}{dt^2} + 2\zeta\omega \frac{dz}{dt} + x\omega^2 = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + 2\gamma\omega_r \frac{d\theta}{dt} + \omega_r^2\theta = 0 \quad (2)$$

Donde,  $\omega$  es la frecuencia angular de desplazamiento,  $\omega_r$  la frecuencia angular de rotación, y  $z$  es el desplazamiento en el eje de sustentación (a lo largo de  $z$ ) y  $\theta$  la de la rotación

En ausencia de fuerzas de rozamiento, las frecuencias naturales del sistema están dadas por la Ec. 3 y Ec. 4.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{8k}{M + \frac{8m}{3}}} \quad (3)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{8L^2k}{I}} \quad (4)$$

Donde la masa efectiva de los resortes es evaluada. El momento de inercia total es dado por la Ec. 5:

$$I = I_0 + \frac{8}{3}mL^2 \quad (5)$$

### 2.2. Similitud y correspondencia de escala

El diseño de la balanza dinámica con que se estudiara el comportamiento dinámico del modelo sometido a cargas de viento se consideran las siguientes semejanzas [12]:

*Semejanza geométrica:* requiere que el modelo y el prototipo sean de la misma forma, con una relación constante de 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:* cuando dos flujos tienen distribuciones

de fuerza 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 del análisis basados en el uso del teorema Pi de Buckingham [15] conducen a la elección del número de Reynolds y coeficientes 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”, Río Guamá, Cuba y el modelo, se obtienen tres relaciones de escala [13]: la escala de longitudes y escala de velocidades. Esta elección se basó en las velocidades simuladas y dimensiones del túnel de viento de capa límite de la UNNE.

Se definen, en consecuencia,

a. Escala de longitud:

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

Donde,  $\lambda_L$  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,  $\lambda_v$  es el factor de escala de velocidad,  $V_m$  es la velocidad en modelo,  $V_p$  es la velocidad en el prototipo,  $t_m$  es el tiempo en el modelo y  $t_p$  es el tiempo en el prototipo.

La elección de factores de escala determinan las siguientes escalas:

c. Escala de masa:

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

Donde,  $\lambda_m$  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,  $\lambda_T$  es el factor de escala de tiempo.

e. Escala de frecuencia:

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

Donde,  $\lambda_f$  es el factor de escala de frecuencia,  $f_m$  es la frecuencia de modelo y  $f_p$  es la frecuencia del prototipo.

La frecuencia del modelo dependerá del momento de inercia de masa del mismo y de la constante elástica de los resortes utilizados en la balanza dinámica. Resortes más rígidos determinarían frecuencias más altas.

a. Escala de momento de inercia de masa:

El factor de correspondencia de escala para el momento de inercia de masa se obtiene mediante la ecuación:

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

Donde,  $\lambda_{Im}$  es el Factor de escala de momento de inercia de masa,  $\lambda_p$  es el Factor de escala de masa específica, definido como el cociente entre la masa específica del modelo y prototipo.

En las semejanzas estructurales se consideran la igualdad de los siguientes parámetros adimensionales entre el modelo y prototipo:

a- Elasticidad: relación entre la fuerza elástica de la estructura y la fuerza de inercia del aire:  $E/\rho.V^2$ , donde E es el módulo de deformación longitudinal del material;

b- Inercia: relación entre la fuerza de inercia de la estructura y del aire:  $\rho_e/\rho$ , donde  $\rho_e$  es la masa específica de la estructura;

c- Viscosidad (número de Reynolds): relación entre fuerzas de inercia y fuerzas viscosas debidas al aire:  $U.D/v$ , donde v es la viscosidad cinemática del aire;

d- Amortiguamiento estructural: relación entre la energía disipada por ciclo y la energía total de oscilación:  $\zeta$ .

## 3. Resultados

### 3.1. Diseño del modelo

Previamente, se diseñó la estructura para el montaje del modelo seccional de tablero puente, la cual debe adaptarse a las dimensiones y características del túnel de viento “Jacek P. Gorecki” de la Facultad de Ingeniería UNNE. Éste, es un túnel de capa límite de circuito abierto, con una longitud total es de 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, con una velocidad máxima en vacío de 23 m/s (82,5 km/h).

Una vez diseñada la estructura portante del modelo seccional, asumiendo como estructura prototipo una sección del tablero del puente “Guamá”, río Guama, Cuba. La cuerda es de 17,3 m, su mayor altura corresponde a una longitud de 1,2 m [14]; considerando las dimensiones del túnel de viento, el modelo seccional a ensayar para la simulación, empleando una escala de 1:50, tiene 2 m de longitud, con una cuerda de 0,35 m y una altura máxima de 0,030 m. Para la simulación, se establecen los vínculos, se define 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.

En Tabla 2 se resumen las propiedades dinámicas del prototipo del tablero de puente “Guamá”, Río Guamá, Cuba y del modelo seccional reducido para el ensayo en túnel de viento de la UNNE. Teniendo en cuenta las propiedades dinámicas del modelo se calculan las dimensiones y ubicación de los apoyos elásticos, que se implementarán en la balanza dinámica.

TABLA 2. Propiedades dinámicas de prototipo y modelo seccional dinámico del tablero de puente

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

Un conjunto de cuatro pares de resortes de tracción, con constante de rigidez  $k = 5000$  N/m, son implementados de acuerdo con las distancias previamente calculadas con una pre-tensión de 200 N.

En la Figura 2 se ve la representación de la estructura soporte de la balanza dinámica y el modelo seccional de tablero puente en su ubicación de ensayo.

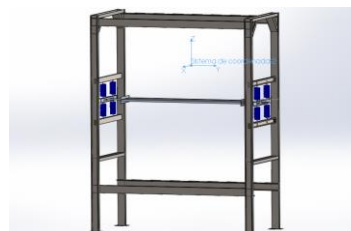


Fig. 2. Estructura de la balanza dinámica con el modelo reducido de tablero puente.

En Figura 3 se observa sistema de modificación de las frecuencias naturales del modelo rigidizado por resortes.

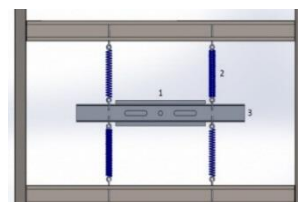


Fig. 3. Esquema del sistema de rigidización del modelo seccional con resortes axiales.

### 3.2. Simulaciones

Considerando el modelo con masa de 21,3 Kg y momento de inercia (por unidad de longitud)  $I = 0,31$  kg $m^2$ /m, de tablero puente, se observan cinco modos de frecuencias simulados, cuyos valores son mostrados en Tabla 3.

TABLA 3 – 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

En Figura 4 se muestran las simulaciones de los modos 1 y modo 3, compatibles con los grados de libertad del modelo, sustentación y torsión en el eje longitudinal.

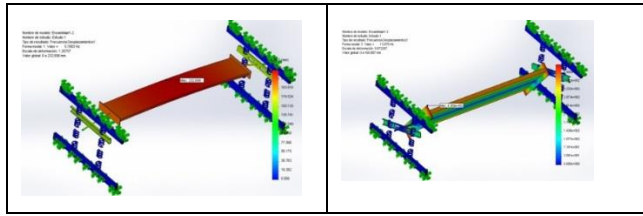


Fig. 4. Modos 1 y 3 simulados por FEM compatibles con los grados de libertad del modelo.

### 3.3. Obtención de frecuencias

Las mediciones se realizaron con una 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 realizó con dos acelerómetros Isotron-Endvevco 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 5.

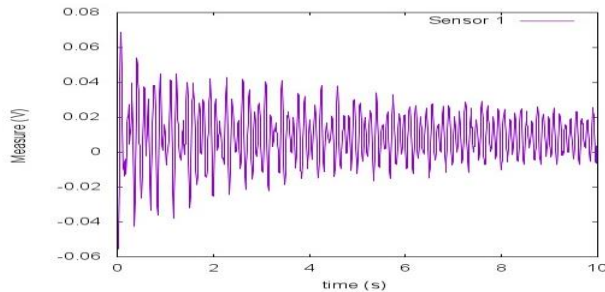


Fig. 5. Señales instantáneas del acelerómetro para el registro de respuestas vibratorias.

En Figura 6 se identifican como modos combinados de tres de los modos normales del sistema, con una frecuencia natural de 8,9 Hz para el grado de libertad traslacional.

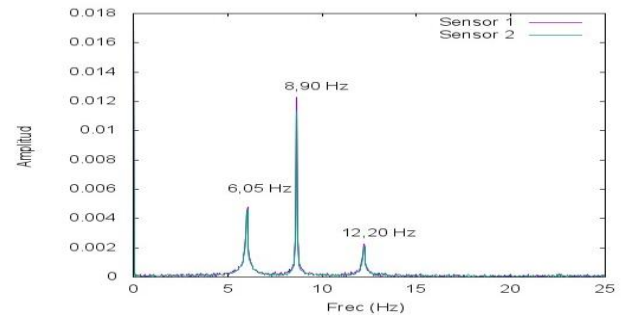


Fig. 6. Espectro de señales del registro de los acelerómetros

## 4. Conclusiones

Se evaluaron características dinámicas de un modelo de tablero puente para ensayos en túnel de viento de dos grados de libertad desacoplados en una balanza adecuada a ensayos dinámicos. El modelo físico, construido en base a los resultados simulados, fue ensayado para reproducir los modos de frecuencia fundamentales, en los grados de libertad del modelo.

Los registros de vibraciones mostraron una muy buena aproximación de la frecuencia simulada (5,8 Hz en el Modo 1) en el GL traslacional (sustentación), para los obtenidos en ensayos experimentales (8,6 Hz en el Modo 1). Sin embargo, se observan un grado de acoplamiento con los modos torsional, mostrados en el espectro de frecuencias de Figura 5. Aproximaciones más cercanas y desacoplamiento de los modos, es posible con una adecuada distribución de masas y momento de inercia del tablero de puente.

## Agradecimientos

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

## Referencias

- [1] T. V. Lawson, Wind effects on buildings Vol. I. Design Applications, Applied Science Publishers Ltd., London (2005).
- [2] E. Simiu, R. H. Scanlan, Wind Effects on Structures, 2nd Ed., Jhon Wiley & Son Publication, New York, USA (2006).
- [3] T.A. Wyatt, Bridge aerodynamics 50 Years after Tacoma Narrows-part I: Tacoma Narrows Failure and After, JWEIA, Vol 40 (1992), 317-326.
- [4] R. Scanlan, Bridge Aerilasticity: Present State and Future Challenges, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, V 36 (1990), 63-74.
- [5] 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.
- [6] 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).
- [7] R. H. Scanlan, J. Tomko, Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivates, Journal of Engineering Mechanics Division, Proceedings. ASCE, December (1971) 1717-1737.
- [8] R. Kargarmoakhar, A. Gan Chowdhury, P.A. Irwin, Effects of Gap Width on Twin-Deck Bridge Aerodynamics, Civil and Environmental Engineering/ Internationa Hurricane Research Center, Florida International University, Miami, USA (2015).
- [9] 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
- [10] Yang, C., Random vibration of structures, John Wiley & Sons (1986)
- [11] BALDASANO, J.M.; GASSÓ, S.;COLINA, F.G.. *Diseño asisitido por ordenador (CAD). Evolución y perspectivas de futuro en los proyectos de Ingeniería*. XVII Congreso Nacional de Ingeniería de Proyectos - Murcia (2001)
- [12] KLAUS OLIVEIRA, M.G., *Desenvolvimento de um suporte flexível para ensaios de modelos aeroelásticos em túnel de vento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) , Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (2003)
- [13] Lisandra Fraga Limas, Determinacao da Influencia de Secoes Transversais na Resposta Dinaminca de Pontes a traves de Ensaio em Túnel de Vento e Identificacao de Sistemas, Tese, Doutor em Emgenharia, Porto Alegre, Brasil, 2007.
- [14] Pijush K. Kundu and Ira M. Cohen; Fluid Mechanics 4<sup>th</sup> Edition, Elsevier (2008)