

Análisis modal de un puente peatonal en arco de madera de *Eucalyptus Grandis*

Ailin M.L. Alegre^{a*}, Diego A. García^b

^aAlumna del Departamento de Ingeniería Civil, Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^bDocente del Departamento de Ingeniería Civil, Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.
e-mails: ailin.alegre95@gmail.com, garciadiego@fio.unam.edu.ar

Resumen

En el presente trabajo se presenta el análisis modal de un puente peatonal en arco hecho de madera de *Eucalyptus grandis*, a través de un modelo computacional desarrollado en el entorno del Método de los Elementos Finitos (MEF). Se pretende estudiar la variabilidad en las frecuencias naturales producida por la variación en las propiedades materiales. La madera proviene de una especie cultivada en la Mesopotamia Argentina la cual es una de las aceptadas para el uso estructural en el país a través del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601. Las piezas de este material utilizadas dentro del ámbito de la Ingeniería Civil presentan una gran variabilidad en sus propiedades en relación a otros materiales de uso estructural. Se determinará la variación de las frecuencias naturales del puente peatonal para distintas combinaciones de propiedades materiales. Se compararán los resultados obtenidos del modelo numérico con resultados obtenidos en forma analítica para estudiar el grado de ajuste entre las dos soluciones obtenidas. Las frecuencias de vibración constituyen un parámetro de suma importancia para el estudio del comportamiento estructural de sistemas sometidos a cargas dinámicas ya que ayudan a determinar los niveles de confort que sentirán los ocupantes de la misma.

Palabras Clave – Puente peatonal, Análisis modal, Frecuencias naturales, *Eucalyptus grandis*.

1. Introducción

El siguiente informe se enmarca dentro del trabajo de investigación del Departamento de Ingeniería Civil de Facultad de Ingeniería de Oberá denominado: “*Modelización computacional y propagación de incertidumbres en la dinámica de puentes peatonales de madera*”. Particularmente trata sobre el estudio de las propiedades modales de la estructura, sus frecuencias naturales y sus modos de vibración.

La madera es proveniente de un árbol cultivado en la Mesopotamia Argentina, dicha especie es una de las aceptadas para el uso estructural en el país a través del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601[1]. Las piezas de este material utilizadas dentro del ámbito de la Ingeniería Civil presentan una gran variabilidad en sus propiedades en relación a otros materiales de uso estructural tal como se ha demostrado en García [2]. Debido a estos factores, la cuantificación de la influencia de las propiedades materiales en la respuesta estructural es de interés dentro del ámbito del diseño estructural. Agregado a ello, las estructuras de madera de uso civil sometidas a acciones dinámicas suelen presentar condiciones de utilización no admisibles para el confort humano, debido a la baja densidad del material obteniéndose estructuras de poco peso en relación a otros materiales. Las mismas pueden presentar niveles de aceleración que producen molestias en el confort de las personas. En muchos casos estas condiciones de uso resultan más restrictivas desde el punto de vista del diseño estructural que las impuestas por las condiciones de resistencia.

En relación a los puentes peatonales, a partir de lo sucedido durante la inauguración del Puente del Milenio en Londres, el estudio de este tipo de estructuras se ha vuelto un tema de interés creciente dentro del ámbito de la ingeniería estructural. En Strogatz *et al.* [3], se menciona que una de las posibles causas del fenómeno de resonancia fue la sincronización entre el flujo de peatones y las características dinámicas propias de la estructura lo cual llevo a excitarla de tal manera que las condiciones de seguridad se vieron seriamente involucradas. Con el fin de garantizar la estabilidad y serviciabilidad de este tipo de estructuras, el modelado numérico de las mismas surge como una herramienta de fundamental importancia. En este contexto, modelos numéricos de puentes peatonales de madera sometidos a cargas determinísticas desarrollados utilizando programas comerciales de elementos finitos se presentan en [4]-[5]. En los mismos se comparan los valores de aceleración obtenidos con los límites establecidos en las normas de diseño estructural, los cuales suelen no cumplirse. Además, la normativa internacional presenta apartados muy puntuales para el estudio específico de puentes peatonales de madera, marcando de esta forma las singularidades que presenta la utilización de este material en este tipo de estructuras [6].

En García *et al.* [7] se presenta el estudio del comportamiento dinámico de un puente peatonal de madera bajo cargas determinísticas y en García *et al.* [8] bajo cargas estocásticas producidas por el tránsito de peatones individuales en el primer caso y de múltiples peatones en el último caso. En dichos trabajos se consideró la variabilidad en las propiedades estructurales y su influencia en la respuesta dinámica. En ambas situaciones se ha demostrado que la consideración de la variabilidad en las propiedades materiales puede conducir a condiciones de utilización no satisfactorias para los transeúntes. Además, en García [2] se presenta un modelo numérico/estocástico aplicable al modelado de vigas laminadas de *Eucalyptus grandis* las cuales son utilizadas como vigas principales en puentes peatonales de madera.

En este trabajo se presenta un modelo numérico de un puente peatonal de madera. En primer lugar, se realizará un análisis modal de la estructura considerando las propiedades del material para dos calidades distintas. De este análisis modal se obtendrán las frecuencias naturales y los modos de vibración. Las frecuencias naturales son importantes porque con ellas se definen el límite entre estructuras flexibles y rígidas según la reglamentación en vigencia [1]. Como resultado del presente trabajo se estudiarán aquellas condiciones en las cuales la estructura puede caer dentro de un grupo u otro. Luego, en trabajos futuros se estudiará la respuesta dinámica en términos de aceleraciones máximas ante la excitación producida por el tránsito peatonal. En la normativa internacional los niveles de confort están definidos por estas dos variables, la frecuencia natural de la estructura y el nivel de aceleración que en la misma se produce [7].

2. Materiales y Métodos

En el presente informe se analizará un puente peatonal de madera laminada de *Eucalyptus grandis*, el cual posee forma de arco y sus dimensiones generales son 30 metros de longitud y 1,8 metros de ancho. Los datos del puente parten de una investigación presentada en la XXXVII Jornadas Sudamericanas de ingeniería estructural [9]. Su estructura principal compuesta de dos arcos simplemente apoyados y el tablero; cada arco está conformado por 2 vigas de 15 metros y el tablero conformado por 13 riostras superiores ubicadas de forma transversal a las vigas sobre las cuales se ubica el piso. En la Tabla 1 se muestra las secciones de cada elemento, material y separación. En la Fig. 1 se muestra un esquema del puente peatonal.

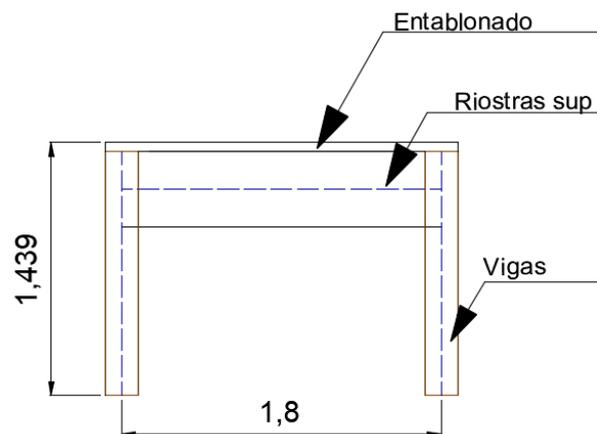


Fig. 1. Esquema estructural del puente peatonal.

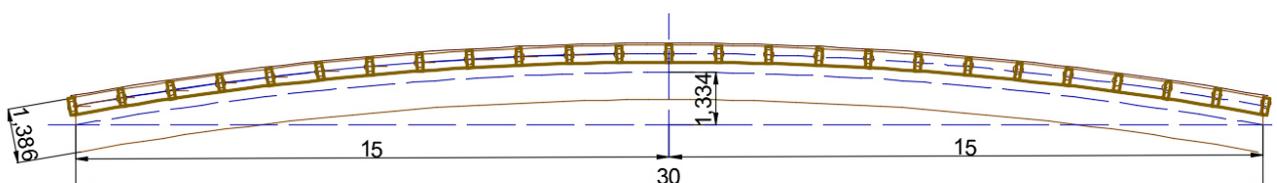


Fig. 2. Vista Lateral

Tabla 1. Elementos y dimensiones del puente peatonal.

Elemento	Madera	Separación (m)	Canto (mm)	Altura (mm)	N° Laminas
Riostras Sup.	MLE	1,19	138	429	13
Piso-Tablas	Aserradas	-	132	53	-

Mediante un software de dibujo se representó el puente peatonal, tal como se observa en la Fig.2 (*vista lateral*), dividiendo en segmentos las vigas de acuerdo con la separación entre riostras superiores. Para poder modelar la estructura de manera más sencilla en el software de cálculo se obtuvieron las posiciones de los puntos que conforman los segmentos en el software de dibujo. La modelación de la estructura se realizó con dos tipos de calidades de madera distintas para posteriormente comparar la diferencia que se produce en los resultados.

Con los datos adquiridos se procedió a la modelación del mismo con los siguientes pasos:

- Modelación estructura del puente:
 - Se crearon los puntos con la ubicación extraída del software de dibujo.
 - Con elementos Frame se unieron los mismos, representando de esta manera los arcos principales de la estructura.
 - Luego, se unieron ambos arcos con elementos Frame. Estas uniones representan la ubicación de las riostras superiores.
- Configuración de secciones: De acuerdo a lo especificado en la Tabla.1
 - Frame sections: Vigas y Riostras superiores
 - Area sections: Tablero
- Configuración de Materiales: Tabla 2

Las propiedades materiales utilizadas para modelar numéricamente estos elementos en el software SAP2000 14 fueron obtenidas del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601[1]. Se analizó una opción considerando piezas de madera de mayor calidad con una densidad de 420kg/m^3 y otra opción considerando piezas de madera de menor calidad con una densidad de 390kg/m^3 . Teniendo en cuenta que el material a trabajar tiene la particularidad de ser ortótropo, se definió los siguientes parámetros correspondientes a las propiedades mecánicas de las piezas:

Tabla 2a. Propiedades de los materiales piezas de alta calidad

Caso 1-Alta Calidad					
<i>Piezas Aserradas</i>			<i>Piezas Laminadas</i>		
Densidad	420,000	kg/m^3	Densidad	420,000	kg/m^3
Emedio=E1	10300,000	N/mm^2	Emedio=E1	11200,000	N/mm^2
u	0,420		u	0,420	
E2=E3	686,667	N/mm^2	E2=E3	746,667	N/mm^2
U12=U13	0,425		U12=U13	0,425	
U23	0,670		U23	0,670	
G12=G13	643,750	N/mm^2	G12=G13	700,000	N/mm^2
G23	205,589	N/mm^2	G23	223,553	N/mm^2

Tabla 2b. Propiedades de los materiales piezas de menor calidad

Caso 2 -Menor Calidad			
<i>Piezas Aserradas</i>		<i>Piezas Laminadas</i>	
Densidad	390,000 kg/m ³	Densidad	390,000 kg/m ³
Emedio=E1	6000,000 N/mm ²	Emedio=E1	6700,000 N/mm ²
u	0,420	u	0,420
E2=E3	400,000 N/mm ²	E2=E3	446,667 N/mm ²
U12=U13	0,425	U12=U13	0,425
U23	0,670	U23	0,670
G12=G13	375,000 N/mm ²	G12=G13	418,750 N/mm ²
G23	119,760 N/mm ²	G23	133,733 N/mm ²

4. Asignando material y sección a los correspondientes elementos, desplazando y rotando las riostras se concluye con la modelización del arco biarticulado.

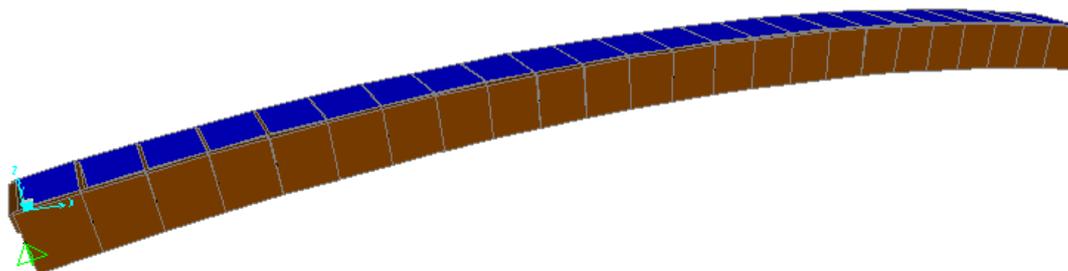


Fig. 3. Modelo en software

Por otro lado, para obtener las frecuencias naturales a partir de los modelos simplificados se utilizó la Ecuación 1, [10]. La expresión corresponde a la frecuencia natural del primer modo vertical/radial de la pasarela, vincula las dimensiones del arco como así también sus propiedades.

$$\omega_1^{vert} = \sqrt{1 + \frac{\pi^4 r_z^2}{\alpha^4 R^2}} = \sqrt{\frac{E I_z}{m R^2 r^2}} \quad (1)$$

Siendo I_z la inercia de los arcos según el eje fuerte de las secciones, r_z radio de giro respectivo, α el sector del ángulo y R radio de curvatura de la pasarela.

3. Resultados Numéricos

Particularmente en el trabajo se hizo hincapié en la frecuencia fundamental de vibración vertical. A continuación, presenta los resultados obtenidos del análisis modal del modelo estructural realizado en el software comercial. Luego, los mismos se comparan con los resultados obtenidos de la aplicación de la Ecuación (1):

- Mediante el Software

Una vez desarrollado el modelo numérico en el software de la estructura, se prosiguió a determinar sus frecuencias naturales y sus modos de vibración. Analizando como trabaja la estructura con los materiales descritos en el paso 3 *Configuración de Materiales*.

Tabla. 3. Frecuencias de la estructura para cada los tres primeros modos de vibración.

Modos	Caso 1	Caso2	Diferencia
	Frecuencia Hz		%
1	7,5746	5,8665	22,550366
2	11,328	8,764	22,634181
3	23,514	18,209	22,561027

- Las frecuencias varían de acuerdo a las propiedades del material, cuanto mayor sea la relación entre el modulo de elasticidad y la densidad se incrementará la frecuencia.
- La estructura que presenta mayor frecuencia posee un mayor nivel de confort de acuerdo a la normativa.
- La diferencia porcentual que existe en el modo de vibración 1 entre los casos analizados es de 22,55%, obteniéndose mayor frecuencia en el caso 1 en el cual se utilizan piezas de madera de mayor calidad.

A continuación se presentan los modos de vibración y su correspondiente frecuencia natural para el caso1 de Madera de alta calidad.



Fig. 4. Modo 1: Frecuencia: 7,57 Hz.

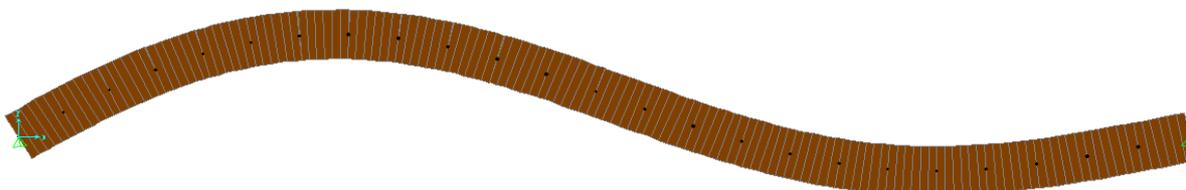


Fig. 5. Modo 2: Frecuencia: 11,33 Hz.

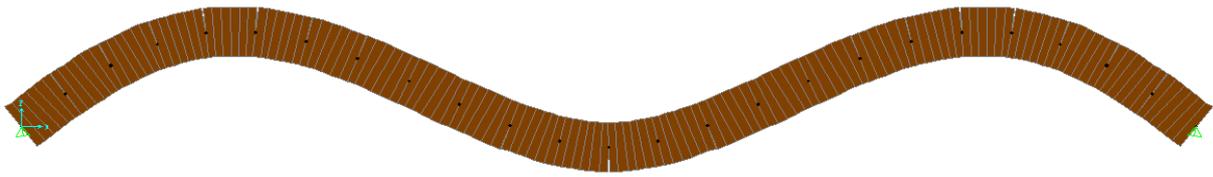


Fig. 6. Modo 3: Frecuencia: 23,51 Hz.

- Mediante la aplicación de la Ecuación 1:
Para determinar la frecuencia fundamental de vibración en cada uno de los casos considerados se emplean los datos de la Fig.7

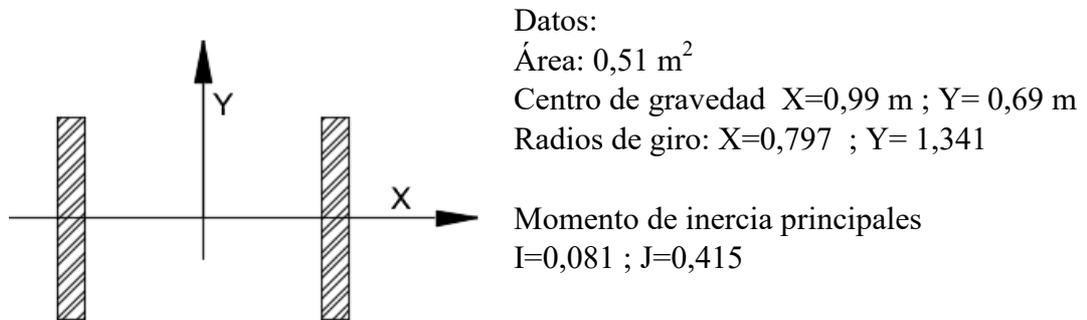


Fig. 7. Datos conjuntos de riestras superiores

Tabla. 4. Frecuencias de la estructura para el primer modo de vibración. Caso1 izquierda, caso2 derecha.

Datos-Elementos Vigas Caso 1		
ρ	420	kg/m ³
α	0,348888889	rad
R	85	m
E	11200000000	N/m ²
I _z	0,415	m ⁴
r _z	1,34	m ³
Área	0,51	m ²
m	214,2	kg/m
w ₁	44,15	
ω_{nat}	7,03	Hz

Datos-Elementos Vigas Caso 2		
ρ	390	kg/m ³
α	0,348888889	rad
R	85	m
E	6700000000	N/m ²
I _z	0,415	m ⁴
r _z	1,34	m ³
Área	0,51	m ²
m	198,9	kg/m
w ₁	35,44	
ω_{nat}	5,64	Hz

Tabla. 5. Resumen de resultados de la frecuencia para el primer modo de vibración

<i>Modo</i>	Caso 1	Caso 2
<i>1</i>	Frecuencia Hz	
Software	7,5746	5,8665
Ecuación	7,03	5,64
Diferencia %	7,19	3,81

Al analizar la frecuencia natural del primer modo de vibración por dos métodos distintos, se observó una diferencia porcentual de 7,19% para el caso 1 y 3,81 % para el caso 2. Uno de los motivos por lo que pudo darse esta discrepancia entre los métodos es que la ecuación es una simplificación que considera únicamente los arcos trabajando como conjunto; en cambio el software permite un análisis exhaustivo de la situación pudiendo considerar las otras partes del puente con sus respectivas propiedades.

4. Conclusiones

Mediante el estudio del comportamiento modal de una estructura peatonal de madera, se pudo determinar la influencia en las frecuencias naturales de vibración que puede ejercer la variación de las propiedades materiales. En este caso se analizaron dos extremos considerando piezas de madera de mayor y menor calidad. Se puede establecer el rango de variación esperable de la frecuencia natural lo cual es importante para el estudio del comportamiento dinámico de este tipo de estructuras. Las frecuencias naturales halladas para la combinación de cada material, poseen una alta probabilidad de generar condiciones de falta de confort en los transeúntes según lo establecido en el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601 al tener una frecuencia natural menor a 8 Hz.

En los próximos trabajos se debe incluir el tránsito peatonal, para determinar en forma concreta los niveles de aceleración vertical que producen las fuerzas ejercidas por el caminar de las personas. Este trabajo es un punto inicial para el estudio del comportamiento dinámico de puentes peatonales de madera. El conjunto de la fuerza dinámica con los resultados expuestos de las frecuencias naturales permitirá, en futuros trabajos, determinar los niveles de confort según la normativa vigente nacional e internacional vigente.

5. Referencias

- [1] Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)- Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC), Buenos Aires; 2016.
- [2] García D.A. (2017). "Modelos numérico-estocásticos de elementos estructurales de madera de eucaliptus grandis". Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/3422>
- [3] Strogatz S.H., Abrams D.M., McRobie A., Eckhardt B. y Ott E. (2005). "Theoretical mechanics: Crowdsynchrony on the Millennium Bridge". Nature, 438(7064), 43-44.
- [4] De Alcântara Segundinho P.G. y Dias, A.A. (2009). "Vibration theoretical analysis on timber pedestrian bridges". Science and Engineering Journal, 18 (1-2), 1-10.
- [5] Baño V., Vivas J., Rodríguez S. y Crews K. (2012) "Numerical and experimental analysis of the vertical vibrations on several designs of timber footbridges". World Conference on Timber Engineering.
- [6] EUROCODE 5, 2004, "Design of timber structures. Part 2: Bridges", European Committee for Standardization, London, UK.

- [7] García D.A., Rosales M.B. y Sampaio R. (2016). “Dynamic behavior of timber footbridges with stochastic mechanical properties”. Proceedings of the 3rd International Symposium on Uncertainty Quantification and Stochastic Modeling, UNCERTAINTIES 2016.
- [8] García D.A., Rosales M.B. y Sampaio R. (2017). “Dynamic behavior of timber footbridges with uncertain mechanical properties and stochastic walking loads”. Proceedings of the XVII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics - DINAME 2017.
- [9] Domenech L. y Vanesa B. “Análisis dinámico de un puente peatonal arco bi-articulado de madera laminada encolada “, XXXVII Jornadas sudamericanas de ingeniería estructural, Asunción, Paraguay, 2016.
- [10] Bachmann, H., and Ammann, “Vibrations in structures: Induced by Man and Machines. Zurich, Switzerland: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)”. W. ,1987.