

Análisis Modal De Un Puente Peatonal De Madera De *Eucalyptus Grandis*

Maximiliano Galván^{a*}, Diego A. García^b

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

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

maxiimg95@hotmail.es, garcyadiago@fio.unam.edu.ar

Resumen

En el presente trabajo se presenta el análisis modal de un modelo de puente peatonal de madera de *Eucalyptus grandis* a través de un modelo computacional desarrollado en el entorno del Método de los Elementos Finitos (MEF) mediante un software comercial. Se pretende cuantificar la propagación de incertidumbres de los parámetros considerados estocásticos sobre el comportamiento modal del mismo. La madera proveniente esta especie de árbol cultivado en la Mesopotamia Argentina 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. La variabilidad en las propiedades materiales se representará mediante los valores de las mismas seleccionadas de su respectiva distribución de probabilidad. Se determinara la variación de las frecuencias naturales del puente peatonal para distintas combinaciones de propiedades materiales. Las frecuencias de vibraciones 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 estructura.

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

1. Introducción

Este trabajo 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 este trabajo trata sobre el estudio de las propiedades modales de la estructura, sus frecuencias naturales y sus modos de vibración.

La madera proveniente de la especie de árbol *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia Argentina 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 esta variabilidad en las propiedades materiales en la respuesta estructural es de interés dentro del ámbito del diseño estructural. Sumado 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, con lo cual se obtienen 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]-[6]. 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 [7].

En García *et al.* [8] se presenta el estudio del comportamiento dinámico de un puente peatonal de madera bajo cargas determinísticas y en García *et al.* [9] 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 según la distribución de probabilidad normal que las define. 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 y se estimará la probabilidad de que ello suceda en base a la variabilidad de las propiedades materiales. 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

El puente peatonal de 13.2 m de longitud está conformado por 3 vigas longitudinales de madera laminada de *Eucalyptus grandis* con una sección transversal de 0.15m x 0.60m y por 5 vigas transversales de madera laminada de *Eucalyptus grandis* de igual sección transversal, que conforman la estructura resistente del puente. El tablero del puente está formado por un entablado de 0.0375m de espesor de madera de *Eucalyptus grandis* que servirá como apoyo para los peatones que circulen sobre el puente [8]-[9]. Las propiedades materiales utilizadas para modelar numéricamente estos elementos en el software ABAQUS/CAE 6.14-5 fueron obtenidas del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601 [1]. En la Fig. 1 se muestra un esquemadel puente peatonal.

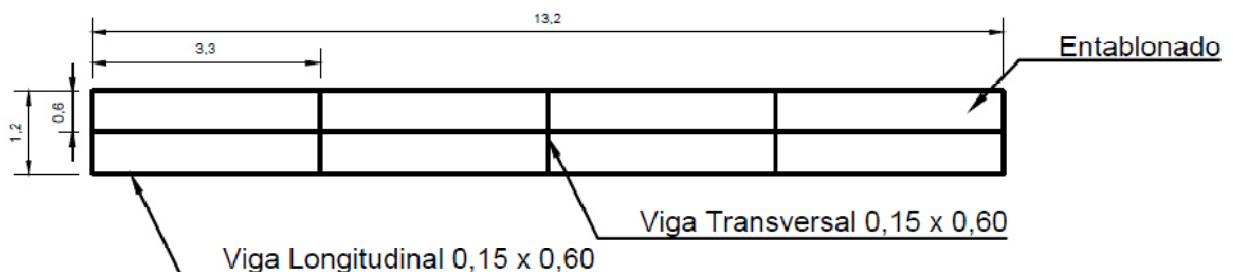


Fig. 1. Esquema estructural del puente peatonal.

Para el modelado de la estructura en el software las vigas longitudinales y transversales fueron modeladas a través de elementos viga, formando un panel de 3.30m x 0.60m y luego generando un patrón lineal para así darle las dimensiones generales del puente. Respecto a la partición del elemento, se dividió a las vigas longitudinales en 88 partes de 0,15m cada uno. Esta partición se adapta al mallado correspondiente de las vigas. En cuanto a las propiedades utilizadas para las vigas laminadas, se utilizaron los siguientes valores del módulo de elasticidad:

- Percentil 0.05: 9000MPa
- Valor Medio: 13400MPa
- Percentil 0.95: 17800MPa

El entablonado del tablero del puente está modelado con elementos placa (Shell) de 0.15m x 0.15m y luego con un patrón lineal se generan los 704 elementos necesarios para poder cubrir las dimensiones totales del puente. Los valores del módulo de elasticidad utilizados para la madera del entablonado que conforma el tablero del puente fueron los siguientes:

- Percentil 0.05: 8100MPa
- Valor Medio: 12000MPa
- Percentil 0.95: 15900MPa

Estos valores son menores a los anteriores dado que se trata de piezas aserradas de *Eucalyptus grandis*. Estos elementos se generaron de esta manera, porque con el mallado simple no permitía la unión en todos los puntos entre los elementos vigas con los elementos placas en la instancia de interacción. Una vez generados los elementos descritos anteriormente, se procede a la instancia de ensamblaje y de interacción. En el ensamblaje se combinan las vigas con el entablonado en un mismo espacio y de esta manera puede generarse una interacción entre ellos. Esta interacción se genera a través de elementos Multi Point Constraints (MPC) Tie en cada nudo generado anteriormente. Una vez generado estos elementos, ambas estructuras actuarán en conjunto en las uniones correspondientes. Respecto a la vinculación de la estructura, se considera la misma como simplemente apoyada. Para determinar las frecuencias naturales de la estructura se prepara un step para este modo y se consideran un total de 27 combinaciones entre los distintos valores del módulo de elasticidad de las vigas laminadas, los valores del módulo de elasticidad del entablonado del tablero y los siguientes valores de densidad del material:

- Percentil 0,05: 430 kg/m³
- Valor Medio: 640kg/m³
- Percentil 0.95: 850kg/m³

3. Resultados Numéricos

Una vez desarrollado el modelo numérico en el software y luego de haber realizado un estudio de convergencia se procede a realizar el análisis modal de la estructura para obtener las frecuencias naturales y modos de vibración para las 27 combinaciones de propiedades materiales establecidas en la sección anterior. En la Fig. 2 se observa el primer modo de vibración vertical de la estructura con su correspondiente frecuencia natural y en la Fig. 3 el primer modo de vibración lateral con su correspondiente frecuencia natural. Estos son los modos fundamentales de vibración vertical y lateral respectivamente. Particularmente en el trabajo se hará hincapié en la frecuencia fundamental de vibración vertical. En este caso se utilizó la siguiente combinación de propiedades materiales:

- Módulo de Elasticidad de las vigas longitudinales y transversales: 17800MPa
- Módulo de Elasticidad del Entablonado: 15900MPa
- Densidad: 850kg/m³

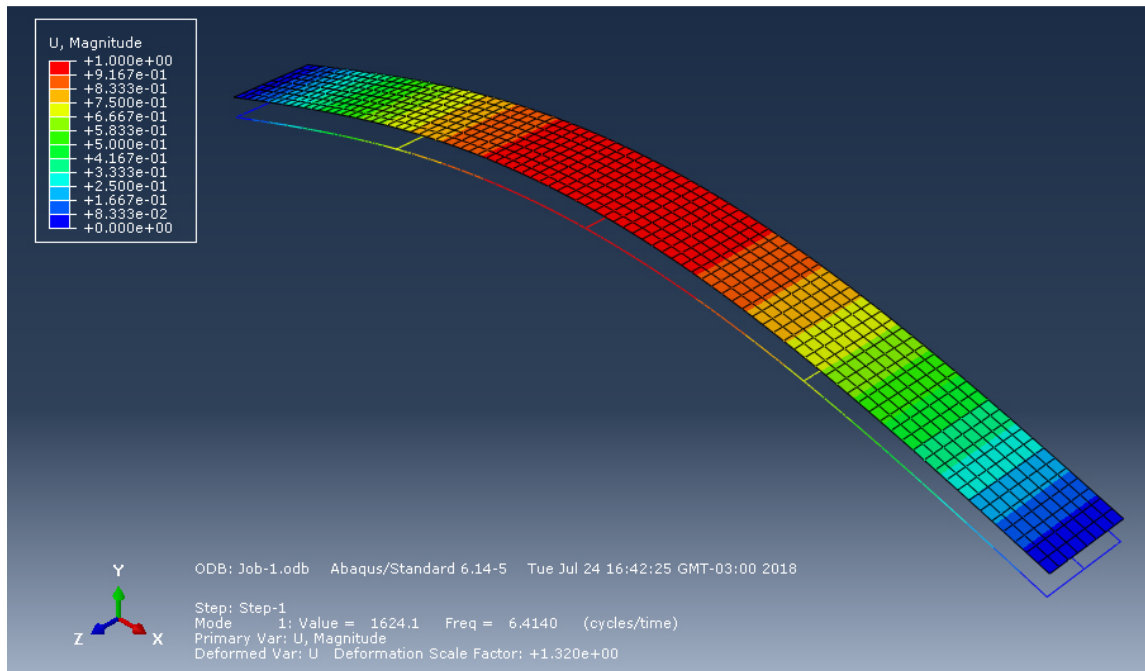


Fig. 2. Modo 1: Frecuencia: 6.41 Hz.

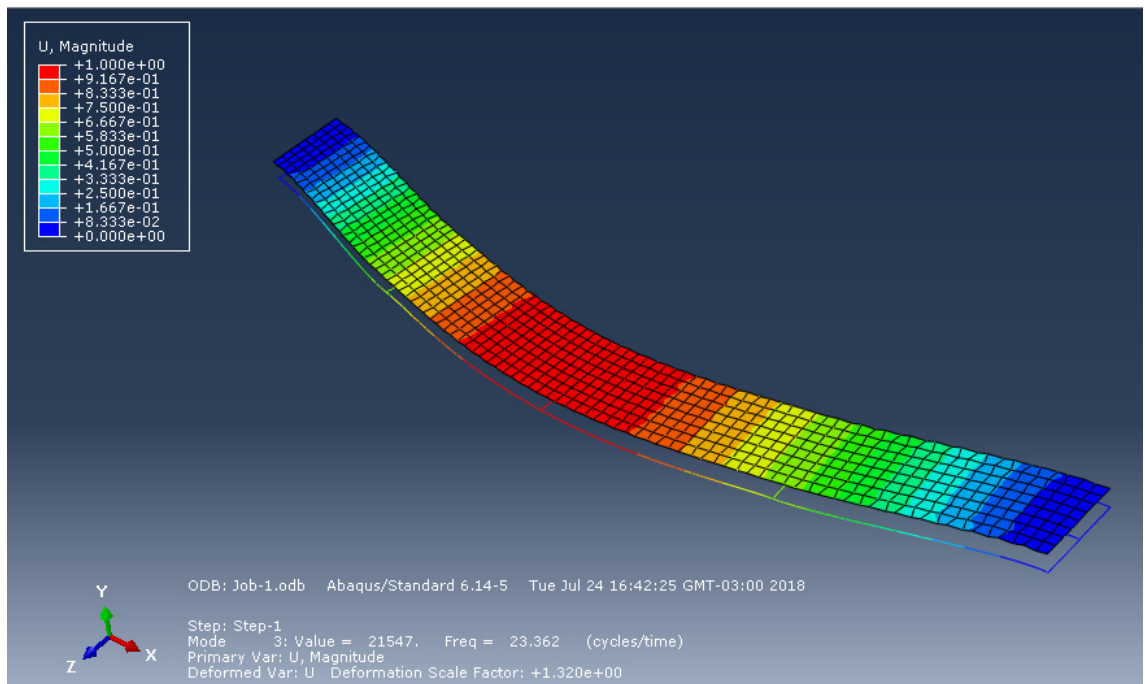


Fig.3. Modo 3: Frecuencia: 23.36 Hz.

Generando las 27 combinaciones establecidas, se obtuvieron los siguientes resultados, para las primeras tres primeras frecuencias naturales de la estructura. El estudio que sigue se enfocara en la frecuencia fundamental de la estructura. En la Tabla 1 se presentan los resultados considerando una densidad de masa de 430 kg/m³, en la Tabla 2 para una densidad de masa de 60 kg/m³ y en la Tabla 3 para una densidad de masa de 850 kg/m³.

Tabla 1. Frecuencias para Densidad 430 kg/m³

Densidad: 430kg/m ³		Módulo de Elasticidad Entablonado		
		8100 MPa	12000 MPa	15900 MPa
Módulo de Elasticidad Vigas	9000 MPa	6,412	6,413	6,413
		16,822	16,835	16,847
		23,415	25,372	25,374
	13400 MPa	7,824	7,824	7,825
		20,515	20,526	20,537
		24,908	28,523	30,958
	17800 MPa	9,017	9,018	9,018
		23,637	23,647	23,657
		25,931	29,830	32,846

Tabla 2. Frecuencias para Densidad 640 kg/m³

Densidad: 640kg/m ³		Módulo de Elasticidad Entablonado		
		8100 MPa	12000 MPa	15900 MPa
Módulo de Elasticidad Vigas	9000 MPa	5,256	5,256	5,257
		13,789	13,799	13,810
		19,193	20,797	20,799
	13400 MPa	6,413	6,414	6,414
		16,816	16,825	16,833
		20,417	23,380	25,375
	17800 MPa	7,391	7,392	7,392
		19,375	19,383	19,391
		21,255	24,451	26,923

Tabla 3. Frecuencias para Densidad 850 kg/m³

Densidad: 850kg/m ³		Módulo de Elasticidad Entablonado		
		8100 MPa	12000 MPa	15900 MPa
Módulo de Elasticidad Vigas	9000 MPa	4,561	4,561	4,561
		11,965	11,974	11,983
		16,654	18,046	18,048
	13400 MPa	5,565	5,565	5,565
		14,591	14,599	14,607
		17,716	20,287	22,019
	17800 MPa	6,414	6,414	6,414
		16,812	16,819	16,826
		18,444	21,217	23,362

Se pueden observar que resultados responden a lo esperado, ya que para igual combinación de módulos de elasticidad pero distintas densidades, las frecuencias disminuyen a medida que la densidad aumenta. Si observamos una misma combinación de los módulos de elasticidad de las vigas y la densidad, la variación de la frecuencia para los distintos valores del módulo de elasticidad del entablado es muy baja, ya que el entablado no produce un gran aporte en el soporte de la estructura. Por último, para una misma combinación de los módulos de elasticidad del entablado y la densidad, se puede observar que al aumentar el módulo de elasticidad de las vigas, aumenta la frecuencia de la estructura, debido a que estas presentan la estructura resistente del puente.

Como puede observarse en los resultados obtenidos, la primera frecuencia natural de la estructura varía entre 4.561 Hz y 9.018 Hz. Esta frecuencia es de suma importancia porque determina si la estructura se puede considerar como rígida, cuando su frecuencia fundamental de vibración es mayor de 8 Hz o como flexible cuando su frecuencia fundamental es menor. Por lo tanto para determinadas combinaciones materiales esta estructura puede caer dentro de una u otra clasificación. Las estructuras flexibles son más susceptibles a las cargas dinámicas que actúan sobre ellas pudiendo generar condiciones de falta de confort en los ocupantes de las mismas. Utilizando la Ecuación 1, se puede determinar la probabilidad de ocurrencia de las combinaciones de propiedades materiales utilizadas, considerando independencia entre ellas y que las mismas provienen de una distribución de probabilidad normal:

$$p(x, y, z) = p(x)p(y)p(z) \quad (1)$$

En donde $p(x)$ es la probabilidad de la variable aleatoria x , $p(y)$ es la probabilidad de la variable aleatoria y y $p(z)$ es la probabilidad de la variable aleatoria z . Estas variables representan al Módulo de Elasticidad de las vigas, al Módulo de Elasticidad del Entablado y a la densidad de masa, respectivamente. Utilizando esta expresión se determinó que la frecuencia natural de 6.414 Hz de la Tabla 2 es la que tiene una mayor probabilidad de ocurrencia. En la Fig. 4 se muestran las frecuencias naturales obtenidas y la probabilidad de las combinaciones de propiedades materiales seleccionadas. Se observa que la frecuencia natural 6.414 Hz también se obtuvo en la Tabla 3 pero con una menor probabilidad para las propiedades materiales planteadas. Del gráfico también se tiene como conclusión que hay una alta probabilidad para la estructura de tener una frecuencia natural de vibración vertical menor a 8 Hz y de esta manera ser susceptible a generar situaciones de falta de confort en los transeúntes.

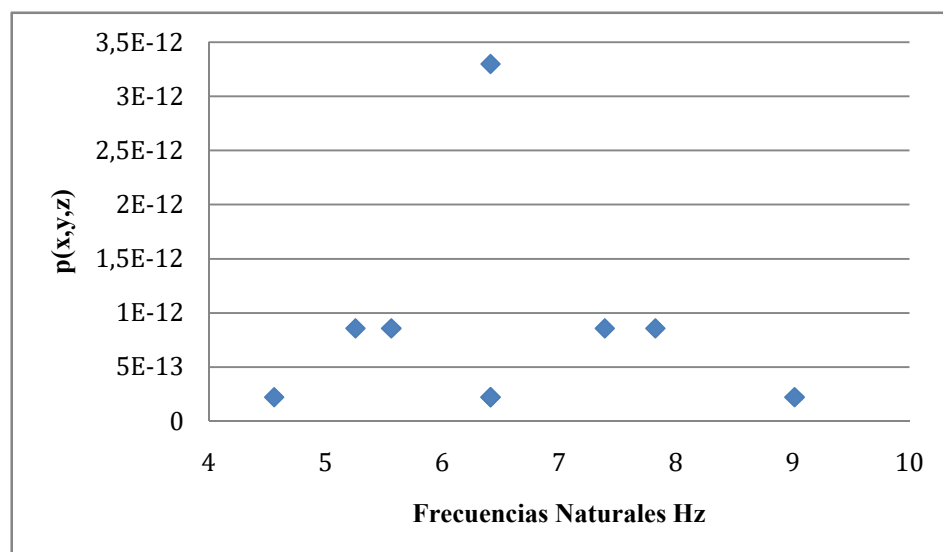


Fig. 4. Frecuencias fundamental de vibración vertical y probabilidad conjunta de combinación de las propiedades materiales.

4. Conclusiones

Se realizó el estudio del comportamiento modal de una estructura peatonal de madera con el objetivo de estudiar, en forma simple, la influencia en las frecuencias naturales de vibración que puede ejercer la variación en las propiedades materiales. Se determinó el rango de variación esperable en la frecuencia natural lo cual es importante para el estudio de su comportamiento dinámico.

Se determinaron las probabilidades conjuntas de ocurrencia de las 27 combinaciones planteadas de propiedades materiales estableciendo que la estructura tiene 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.

Trabajos futuros deben incluir la representación de la fuerza ejercida por el caminar de las personas para determinar en forma concreta los niveles de aceleración vertical que se producen en la misma debido al tránsito peatonal. Este parámetro en conjunto con las frecuencias naturales aquí estudiadas permitirán determinar los niveles de confort según la normativa vigente y las probabilidades de que se cumplan los mismos. Los resultados presentados en este trabajo constituyen un punto de partida para el estudio del comportamiento dinámico de puentes peatonales de madera.

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 eucalyptus 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: Crowd synchrony 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] Domenech L.D., Severi M., Baño V. y Morquio A.A. (2016) “Dynamic analysis of a two-hinge glulam arch footbridge”. XXXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural.
- [6] 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*.
- [7] EUROCODE 5, 2004, “Design of timber structures. Part 2: Bridges”, European Committee for Standardization, London, UK.
- [8] 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*.
- [9] 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*.