

ESTUDIO DE LA RESPUESTA DINAMICA DE UN PUENTE PEATONAL DE MADERA

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.
ailin.alegre95@gmail.com, garciadiego@fio.unam.edu.ar

Resumen

En el actual trabajo se presenta el estudio de la respuesta dinámica 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 el comportamiento dinámico de la estructura en términos de aceleraciones máximas ante la excitación producida por el tránsito peatonal. La madera empleada, 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 incidencia de las propiedades del material en las aceleraciones producidas por el tránsito peatonal. Las aceleraciones en conjunto con las frecuencias naturales del puente peatonal, permiten obtener los niveles de confort que sentirán los ocupantes de la misma.

Palabras Clave – Puente peatonal, Frecuencias naturales, Respuesta dinámica, *Eucalyptus grandis*, Confort

1. Introducción

El siguiente informe se enmarca dentro del trabajo de investigación del Departamento de Ingeniería Civil de Facultad de Ingeniería de Oberá denominado: “*Análisis Modal De Un Puente Peatonal De Madera De Eucalyptus Grandis*”. Particularmente trata sobre el estudio de la dinámica del puente cuando por el mismo circula un peatón.

La madera proveniente de la especie *Eucalyptus grandis* 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 una primera etapa de la investigación [9], se presentó un modelo numérico de un puente peatonal de madera. Realizando un análisis modal obteniendo 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 se

obtuvieron aquellas condiciones en las cuales la estructura puede caer dentro de un grupo u otro. En esta segunda etapa de trabajo 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

2.1. Puente peatonal

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 XXXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural [10]. 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. La estructura está formada por piezas de madera aserrada y piezas de Madera Laminada Encolada (MLE). En la Fig. 1 se muestra un esquema del puente peatonal.

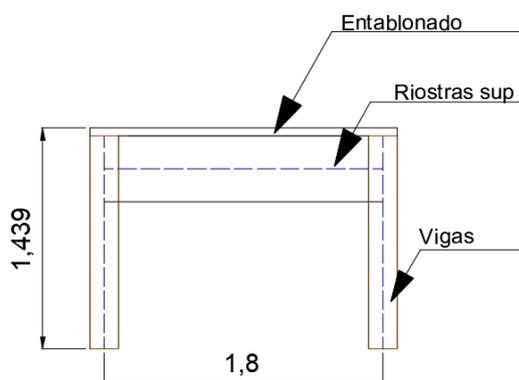


Fig. 1. Esquema estructural del puente peatonal.

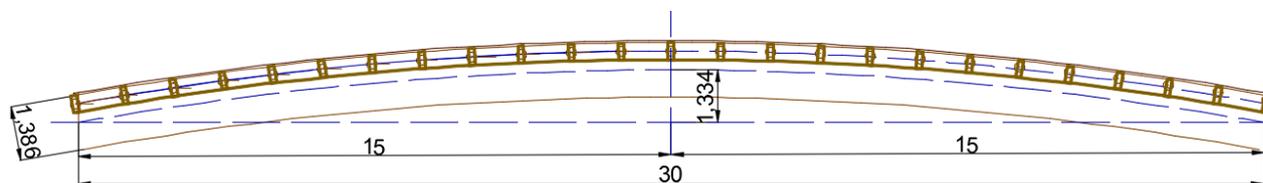


Fig. 2. Vista Lateral

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	-

2.2. Modelo numérico

Mediante un software de dibujo se representó el puente peatonal, tal como se observa en la Fig.2(vista lateral), para posteriormente representarlo en un software de cálculo estructural. 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]. La modelación de la estructura se realizó con tres tipos de calidades de madera distintas para posteriormente comparar la diferencia que se produce en los resultados. Se analizó una madera de alta calidad de densidad 420 kg/m^3 , otra de menor calidad con densidad 390 kg/m^3 y como promedio ponderado se obtuvo calidad intermedia. Teniendo en cuenta que el material a trabajar tiene la particularidad de ser ortótropo, se definieron los parámetros correspondientes para cada caso de análisis presentados a continuación:

Tabla.2. Propiedades de los materiales

Caso 1-Alta Calidad			
<i>Piezas Aserradas</i>		<i>Piezas Laminadas</i>	
ρ	420,00 kg/m^3	ρ	420,00 kg/m^3
Emedio=E1	10300,00 N/mm^2	Emedio=E1	11200,00 N/mm^2
E2=E3	686,67 N/mm^2	E2=E3	746,67 N/mm^2
U12=U13	0,43	U12=U13	0,43
U23	0,67	U23	0,67
G12=G13	643,75 N/mm^2	G12=G13	700,00 N/mm^2
G23	205,59 N/mm^2	G23	223,55 N/mm^2
Caso 2 -Menor Calidad			
<i>Piezas Aserradas</i>		<i>Piezas Laminadas</i>	
ρ	390,00 kg/m^3	ρ	390,00 kg/m^3
Emedio=E1	6000,00 N/mm^2	Emedio=E1	6700,00 N/mm^2
E2=E3	400,00 N/mm^2	E2=E3	446,67 N/mm^2
U12=U13	0,43	U12=U13	0,43
U23	0,67	U23	0,67
G12=G13	375,00 N/mm^2	G12=G13	418,75 N/mm^2
G23	119,76 N/mm^2	G23	133,73 N/mm^2
Caso 3 -Calidad intermedia			
<i>Piezas Aserradas</i>		<i>Piezas Laminadas</i>	
ρ	405,00 kg/m^3	ρ	405,00 kg/m^3
Emedio=E1	8150,00 N/mm^2	Emedio=E1	8950,00 N/mm^2
E2=E3	543,33 N/mm^2	E2=E3	596,67 N/mm^2
U12=U13	0,43	U12=U13	0,43
U23	0,67	U23	0,67
G12=G13	509,38 N/mm^2	G12=G13	559,38 N/mm^2
G23	162,67 N/mm^2	G23	178,64 N/mm^2

en donde, ρ es densidad, E es el módulo de elasticidad longitudinal para cada una de las direcciones consideradas, G es el módulo de elasticidad transversal para cada una de las direcciones consideradas y U es el coeficiente de Poisson. Al considerarse las propiedades del material en la dirección 2 igual a las propiedades en la dirección 3, se ha reducido el modelo de material ortótropo a un modelo transversalmente isótropo.

2.3 Fuerza ejercida por el tránsito peatonal

Para el análisis de la respuesta dinámica se utilizó un modelo de carga compuesto de la carga propia del peso del peatón y una combinación de fuerzas armónicas representadas a través de series de Fourier:

$$F(t) = P \left[1 + \sum \alpha_i * \cos(2\pi i f_s t + \phi_i) \right] \quad (1)$$

en donde: P es el peso del individuo, considerado frecuentemente igual a 700 N; α_i es el coeficiente dinámico de la componente i de la fuerza armónica, i es el número de orden del armónico; f_s es la frecuencia del paso y ϕ_i es el ángulo de fase del armónico. Los valores considerados para cada uno de estos parámetros son presentados en la *Tabla. 3* [2]. Este modelo de carga es frecuentemente empleado en el diseño estructural para la verificación de los requerimientos de serviceabilidad. Cabe mencionar, que se trata de un modelo de carga que simula el tránsito peatonal de un individuo, con velocidad de paso constante, a lo largo de la estructura.

Tabla.3. Parámetros

Armónico i	$i f_s$ Hz	α_i	Φ_i
			Modelo de carga 1
1	1.6-2.2	0.5	0
2	3.2-4.4	0.2	$\pi/2$
3	4.8-6.6	0.1	$\pi/2$
4	6.4-8.8	0.05	$\pi/2$

- Determinación de la frecuencia de paso

$$f_s = \frac{\text{frecuencia Natural}}{\text{Armónico}} \quad (2)$$

- La velocidad de paso

$$V_p = 0.75 * f_p \quad (3)$$

- Luego se determinó el tiempo que tarda un peatón en pasar el puente

$$t = \frac{\text{Long. total}}{V_p} \quad (4)$$

Como parámetro comparativo en la *Tabla 4* se presentan las aceleraciones que garantizan distintos niveles de confort [2].

Tabla.4. Rango de aceleraciones para distintos niveles de confort

<i>NIVELES DE CONFORT</i>	<i>Rango de aceleraciones (m/s²)</i>
Maximo	0-0,5
Medio	0,5-1
Minimo	1-2,5
Inadmisible	>2,5

- Cantidad máxima de personas que pueden circular por el puente para no llegar a un nivel de confort inadmisibile

$$n = \left(\frac{\text{Aceleración Inadmisibile}}{\text{Aceleración máx producida}} \right)^2 = \left(\frac{2,5 \text{ m/s}^2}{A_{máx}} \right)^2 \quad (5)$$

3. Resultados Numéricos

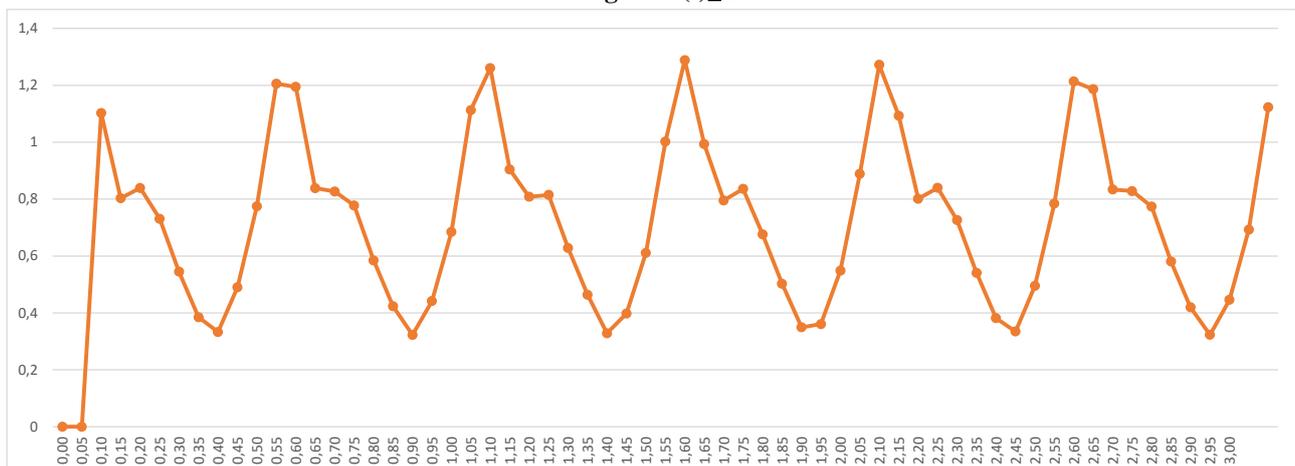
Con los datos obtenidos en la *Tabla.5* se representó la fuerza ejercida por el tránsito peatonal F(t), se puede observar un ejemplo en la *Fig. 3*.

Tabla.5. Datos preliminares

Datos	
Pmed	0,74 N
L	30,16 m
fs	1,95 Hz
V	1,47 m/s
t	20,52 seg

en donde, Pmed es la carga ejercida por el peatón, L es el desarrollo del puente, fs es la frecuencia de paso, V es la velocidad de paso y t es el tiempo de paso.

Fig. 3. F(t)_Caso 2



A continuación, se presentan los resultados del análisis dinámico del puente al incorporar la carga producida por un peatón para los tres casos. En primer lugar, se determinan las frecuencias naturales manteniendo constantes las propiedades mecánicas, según el caso, y cambiando la densidad de los materiales *Tabla.5*.

Tabla. 5. Frecuencias naturales (Hz), para distintos valores de densidad (kg/m³) y de propiedades mecánicas.

Casos	Densidades	Frecuencias naturales					
		1	2	3	4	5	6
1	420	8,04	14,86	25,08	41,16	56,46	76,19
	405	8,19	15,13	25,54	41,92	57,5	77,56
	390	8,35	15,42	26,03	42,72	58,59	79,06
2	420	6,33	11,65	19,75	32,32	44,42	59,83
	405	6,34	11,68	19,8	32,41	44,53	59,99
	390	6,37	11,9	19,74	32,99	44,76	61,07
3	420	7,19	13,23	22,44	36,79	50,5	68,1
	405	7,33	13,52	22,85	37,46	51,43	69,35
	390	7,46	13,78	23,29	38,18	52,41	70,67

Etiquetas de acuerdo CIRSOC 601 [1]

	Falta de confort ≤ 8 Hz
--	-------------------------

En segundo lugar, se presentan los valores de aceleraciones conseguidas manteniendo las propiedades mecánicas y densidades constantes modificando el amortiguamiento estructural *Tabla. 6*. Para este análisis se consideró una densidad de 390 kg/m³ dado que representa la condición más desfavorable en términos de las aceleraciones que se pueden obtener. Una densidad mayor aumenta las fuerzas inerciales provocando una disminución de las aceleraciones.

Tabla. 6. Aceleraciones max. (m/s²) producidas para una densidad 390 (kg/m³) , variando los casos y amortiguamiento.

Casos	Amortiguamiento			
	0,01	0,03	0,05	0,07
1	0,86	0,81	0,81	0,81
2	1,12	0,94	0,88	0,86
3	0,92	0,89	0,88	0,86

Etiquetas de acuerdo a rango de aceleraciones *Tabla 4*

	Maximo
	Medio
	Minimo
	Inadmisible

Finalmente, en la Tabla 7, se presenta el rango de peatones que pueden producir condiciones mínimas de confort, Tabla 4 (1 a 2,5 m/s²) [2]. Para una cantidad de peatones mayor al límite superior de dicho rango, estaríamos en una condición de confort inadmisible.

Tabla. 7. Cantidad de personas que pueden circular sin experimentar un confort inadmisible

Casos	Amortiguamiento			
	0,01	0,03	0,05	0,07
1	[2-8]	[2-9]	[2-9]	[2-9]
2	[1-4]	[2-7]	[2-8]	[2-8]
3	[2-7]	[2-7]	[2-8]	[2-8]

4. Análisis de resultados

Las frecuencias naturales del primer modo de vibración presentadas en la *Tabla.5*, 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 [1] al tener una frecuencia natural menor ó igual a 8 Hz. Se observa que, a menor calidad de la madera utilizada, más propensa se encuentra la estructura a experimentar falta de confort de acuerdo a lo establecido en [1]. La disminución en los valores de densidad si bien aumentan la frecuencia natural de la estructura, tiende a disminuir las fuerzas inerciales produciéndose mayores aceleraciones. Por lo tanto, en los análisis posteriores se trabajó con la menor densidad.

En los resultados presentados en la *Tabla 6*, se puede distinguir, que al variar las propiedades mecánicas de los materiales y mantener fijo el valor de densidad se producen las mayores aceleraciones para las piezas de menor calidad. En general, se ha demostrado que no existe una correlación muy fuerte entre la densidad y las propiedades mecánicas en la especie *Eucalyptus grandis* [1-2], cuestión que si ocurre en otras especies de uso estructural. En la tabla se puede observar cómo disminuyen las aceleraciones con el aumento del amortiguamiento, y que en las piezas de mayor calidad la influencia del amortiguamiento fue casi constante a partir de un valor igual a 0.03.

Sin embargo, de acuerdo a la *Tabla.4*. se puede clasificar las aceleraciones obtenidas para un peatón individual de acuerdo al confort. De manera general, se puede observar un confort medio de acuerdo a las aceleraciones, aunque se observan algunos valores para los cuales la estructura presentaría un confort mínimo. Esta disminución en el confort se presenta cuando las propiedades mecánicas de los materiales caso 2 y el amortiguamiento, son bajos.

En cuanto a la cantidad de peatones que puede circular en el puente dentro del rango de aceleraciones que produce una condición de confort mínima, el límite superior del rango conduciría a un confort inadmisibles, *Tabla.7* se puede concluir analizando las propiedades mecánicas, la densidad y el amortiguamiento:

- La cantidad mínima de peatones se presenta en el caso 2, el cual es el caso más desfavorable de los parámetros nombrados. De manera contraria, la cantidad máxima se da para varias situaciones en el caso 1 con niveles de amortiguamiento mayores
- De manera general para cualquier combinación, el tránsito de 2 ó más peatones conducirá a condiciones de confort mínimas.
- En el caso 1 (mayor calidad de material) pueden circular hasta 9 peatones en condiciones de mínimo confort sin llegar a condiciones inadmisibles.
- En los casos 2 y 3 pueden llegar a circular 7 peatones en condición de confort mínimo sin llegar a condiciones inadmisibles.

Correlacionando los datos obtenidos en la *Tabla.5*, *Tabla.6* y *Tabla.7*. Se puede decir, que a pesar de que el caso 1 presenta frecuencias naturales apenas superiores a 8 Hz, el tránsito peatonal puede igualmente conducir a condiciones de confort mínimas e inadmisibles. Los casos 2 y 3 que tienen frecuencias naturales menores a 8 Hz, necesitan explícitamente de una verificación dinámica [1]. Se recomienda evaluar la zona de implantación del puente para saber cuántas personas transitarían por el mismo a fin de optar la solución más conveniente.

5. Conclusiones

Mediante el análisis dinámico del puente considerando únicamente la carga de un peatón, se pudo determinar en forma concreta los niveles de aceleración vertical que produce la fuerza ejercida por el caminar de las personas. El conjunto de la fuerza dinámica con los resultados expuestos de las frecuencias naturales, permitió determinar los niveles de confort según la normativa vigente.

Dando como resultado que en el caso 1 (mayor calidad de material) si bien presenta frecuencias naturales apenas superiores a 8 Hz, el tránsito peatonal puede igualmente conducir a condiciones de confort mínimas e inadmisibles. De manera general para cualquier combinación, el tránsito de 2 o más peatones conducirá a condiciones de confort mínimas. En el caso 1 pueden circular hasta 9 peatones en condiciones de mínimo confort sin llegar a condiciones inadmisibles. En los casos 2 y 3 pueden llegar a circular 7 peatones en condición de confort mínimo sin llegar a condiciones inadmisibles.

Si bien se consideró una densidad baja para el análisis de aceleraciones (con baja probabilidad de ocurrencia), dado que constituye la condición más desfavorable, los límites de cantidad de peatones presentados para los rangos de confort, aseguran con una probabilidad alta que cumpliéndolos no se llegaría a niveles de confort inadmisibles. Esto dado que en la práctica existe una alta probabilidad de obtener piezas con mayor densidad que la utilizada, lo que disminuiría los niveles de aceleración. Sin embargo, se recomienda evaluar la zona de implantación del puente para saber cuántas personas transitarían por el mismo a fin de optar la solución más conveniente.

6. 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: 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] Ailin M.L. Alegre y Diego A. García (2019) “Análisis Modal De Un Puente Peatonal De Madera De Eucalyptus Grandis”
- [10] Domenech Leandro y Vanesa Baño. “Análisis dinámico de un puente peatonal arco bi-articulado de madera laminada encolada”, XXXVII Jornadas sudamericanas de ingeniería estructural, Asunción, Paraguay, 2016.