

Análisis dinámico de un puente peatonal de madera de *Eucalyptus grandis*

E. Maximiliano Galván^{a*}, Diego A. García^b y Tomás D. Rodríguez^b

^a Alumno de la Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC), Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^b Docente de la Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC), Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

e-mails: maxiemg95@hotmail.es , garciadiego@fio.unam.edu.ar

Resumen

En este trabajo se presenta el estudio de la interacción peatón-estructura en un 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 estudiar la variación de las aceleraciones ante distintos escenarios de carga y de propiedades materiales. La madera proveniente de 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 sus respectivas distribuciones de probabilidad. Se determinará la variación de las aceleraciones en el centro del puente peatonal para distintas combinaciones de propiedades materiales y cantidad de peatones que pasan por el mismo. Las aceleraciones constituyen un parámetro de 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 –Aceleración, *Eucalyptus grandis*, Puente peatonal, Interacción peatón-estructura.

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 la interacción peatón-estructura, las aceleraciones máximas producidas y el tiempo en el que las mismas se producen, para poder determinar así el nivel de confort.

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 normal que las define. Luego, se modelarán los peatones para poder analizar la interacción entre estos y la estructura con el objetivo de encontrar la variación de aceleraciones en el centro de la misma, teniendo en cuenta el tiempo en el que los peatones caminan sobre el puente. De esta manera se determinan las aceleraciones máximas ante la excitación producida por el tránsito peatonal y con la normativa internacional se determinará el nivel de confort de los transeúntes [7].

1. Materiales y Métodos

Se analizó un puente peatonal de madera laminada de *Eucalyptus grandis* el cual está conformado por 3 vigas longitudinales de 13,2m de longitud, con una sección de 0,15m x 0,60m y por 5 vigas transversales de 1,2 m de longitud con la misma sección. El tablero del puente, está formado por un entablonado de espesor 1 ½” [8]-[9]. Para modelar estos elementos se utilizó el software ABAQUS/CAE 6.14-5. En la Fig. 1 se muestra un esquema del puente peatonal.

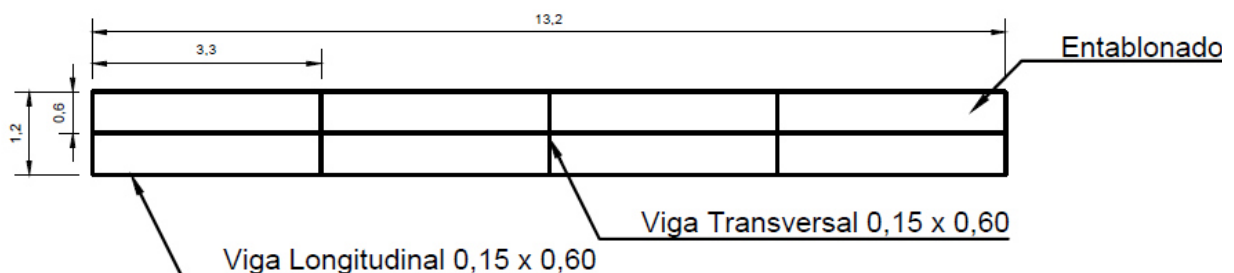


Fig. 1. Esquema estructural del puente peatonal.

Las vigas del puente conforman la estructura resistente y fueron creados a través de elementos vigas (beam), en cuanto el entablonado fue creado a partir de elementos placas (Shell). Como la madera presenta una gran variabilidad en sus propiedades mecánicas, se analizaron las aceleraciones en la estructura, teniendo en cuenta las distintas combinaciones de módulo de elasticidad y densidad, basándose en la distribución de probabilidad normal de cada una.

Estos datos fueron obtenidos por el Reglamento argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601 [1]. Los datos usados fueron:

Módulo de elasticidad para vigas (laminadas):

- Percentil 0.05: 9000MPa

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

Módulo de elasticidad para entablonado (aserrado):

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

Módulo de elasticidad para vigas (laminadas):

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

Después de haber creado estos materiales se procedió a analizar las frecuencias naturales de la estructura para las distintas combinaciones de materiales, teniendo un total de 27 combinaciones, observando así aquellas que pueden generar frecuencias naturales que determinan una estructura rígida o flexible.

Una vez hecho el análisis modal, se procedió a empezar a modelar a los peatones sobre la estructura. Este modelado se basa en que la fuerza de paso de una persona caminando depende del tiempo y se puede representar a partir de la siguiente Serie de Fourier:

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

Donde P es el peso de la persona y se consideró una persona de peso promedio de 70 kg, α es el coeficiente dinámico y φ es el ángulo de fase del armónico i . Estos dos últimos se obtuvieron de la siguiente tabla:

Tabla 1. Valores de coeficientes dinámicos y ángulos de fase armónica

| Harmonic i | $i f_s$ Hz | α_i | Φ_i | |
|--------------|------------|------------|----------|----------|
| | | | WL1 | WL2 |
| 1 | 1.6-2.2 | 0.5 | 0 | 0 |
| 2 | 3.2-4.4 | 0.2 | $\pi/2$ | $\pi/2$ |
| 3 | 4.8-6.6 | 0.1 | $\pi/2$ | π |
| 4 | 6.4-8.8 | 0.05 | $\pi/2$ | $3\pi/2$ |

Fuente: *Dynamic behaviour of a timber footbridge with uncertain material properties under a single deterministic walking load.* Diego A. García,^b Marta B. Rosales,^d Rubens Sampaio^e

A partir de esto, se pudo crear cargas dinámicas en el programa para poder representar a los peatones en el modelo. Se tiene en cuenta que el tiempo para que un peatón cruce el puente es de 8,9 segundos aproximadamente considerando una velocidad de 1,5 m/s. Una vez obtenidos los resultados del programa, se analizaron las aceleraciones y deformaciones producidas en el punto medio del puente debido al tránsito de peatones. A partir del análisis de frecuencias acumuladas pudimos obtener gráficos de aceleraciones en función del tiempo, lo cual nos ayuda a ver en qué porcentaje del tiempo, el puente cuenta con aceleraciones mayores a las admitidas para el confort.

Por último, se varió el amortiguamiento de la estructura teniendo en cuenta la matriz de amortiguamiento de Rayleigh:

➤ La matriz de amortiguamiento de Rayleigh se define como:

$$\mathbf{c} = a_0 \cdot \mathbf{m} + a_1 \cdot \mathbf{k} \Rightarrow \zeta_i = \frac{a_0}{2 \cdot \omega_i} + \frac{a_1}{2} \cdot \omega_i \quad \text{Amortiguamiento del modo } i.$$

Los coeficientes a_0 y a_1 se calculan a partir del factor de amortiguamiento modal de dos modos de vibración conocidos:

$$\frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{Bmatrix} \quad \text{Si } \zeta_i = \zeta_j = \zeta \Rightarrow \begin{cases} a_0 = \zeta \cdot \frac{2 \cdot \omega_i \cdot \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \\ a_1 = \zeta \cdot \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \end{cases}$$

Entonces, a partir de las frecuencias naturales se pueden obtener los coeficientes de amortiguamiento para el modelado del amortiguamiento en la estructura. Cabe destacar que, para este paso, se buscó obtener el número equivalente de personas que transitan por el puente. Este valor se obtiene de analizar la densidad de peatones y los amortiguamientos posibles. Para esto se proponen densidades de peatones entre 0,1 y 0,8 peatones/m² y amortiguamientos ξ entre 0,01 y 0,07. Para resumir, el número equivalente de peatones utilizados para este análisis será:

$$N_{eq} = 10,8 \sqrt{N \xi} \quad (2)$$

Donde N_{eq} es la cantidad de peatones que caminando en forma sincronizada, producen el mismo efecto dinámico en la estructura que un grupo de N peatones que caminan libremente. Los valores de N fueron obtenidos por el producto entre el área del puente y la densidad determinada. Para ejemplificar, cuando se utilizó 8 peatones en el modelo, en realidad están pasando por el puente entre 8 y 13 personas.

A continuación, se presentan los resultados de los análisis realizados en el software y se analiza el confort que sienten los peatones al transitar por la estructura.

2. Resultados Numéricos

En primer lugar, se analizaron las frecuencias naturales de la estructura para las distintas combinaciones de las propiedades mecánicas de la madera. Los resultados obtenidos para una densidad media fueron:

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 | M1 | 5,256 | 5,256 | 5,257 |
| | | M2 | 13,789 | 13,799 | 13,810 |
| | | M3 | 19,193 | 20,797 | 20,799 |
| | 13400 MPa | M1 | 6,413 | 6,414 | 6,414 |
| | | M2 | 16,816 | 16,825 | 16,833 |
| | | M3 | 20,417 | 23,380 | 25,375 |
| | 17800 MPa | M1 | 7,391 | 7,392 | 7,392 |
| | | M2 | 19,375 | 19,383 | 19,391 |
| | | M3 | 21,255 | 24,451 | 26,923 |

Los 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 módulos de elasticidad de las vigas y densidad, la variación de la frecuencia para los distintos valores del módulo de elasticidad del entablonado es muy baja, ya que el entablonado no produce un gran aporte en el soporte de la estructura. Por último, para una misma combinación de los módulos de elasticidad del entablonado 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.

Se observa en los resultados obtenidos, que 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. Se obtuvo a partir de una ecuación de probabilidad de variables aleatorias, el siguiente gráfico en el cual se presentan las frecuencias con su probabilidad de ocurrencia:

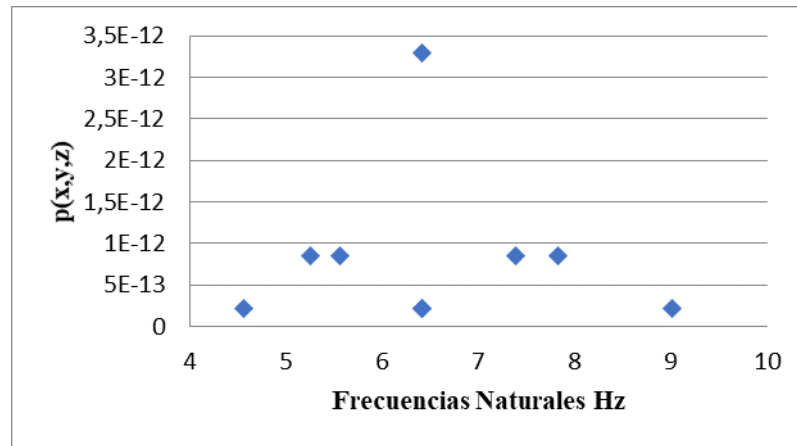


Fig. 2. Frecuencias fundamentales de vibración vertical y probabilidad conjunta de combinación de las propiedades materiales.

Luego de haber obtenido las frecuencias naturales, se procedió a analizar la interacción entre peatón y estructura, analizando las aceleraciones que se producen en el punto medio del puente peatonal. Se analizó la estructura cuando sobre ella caminan 1, 2, 3, 4, 6 y 8 peatones y a partir de las aceleraciones obtenidas se analizó el nivel de confort de la estructura para las distintas combinaciones.

A continuación, se dará un ejemplo de cómo se trabajó con las tablas de frecuencia y los gráficos:

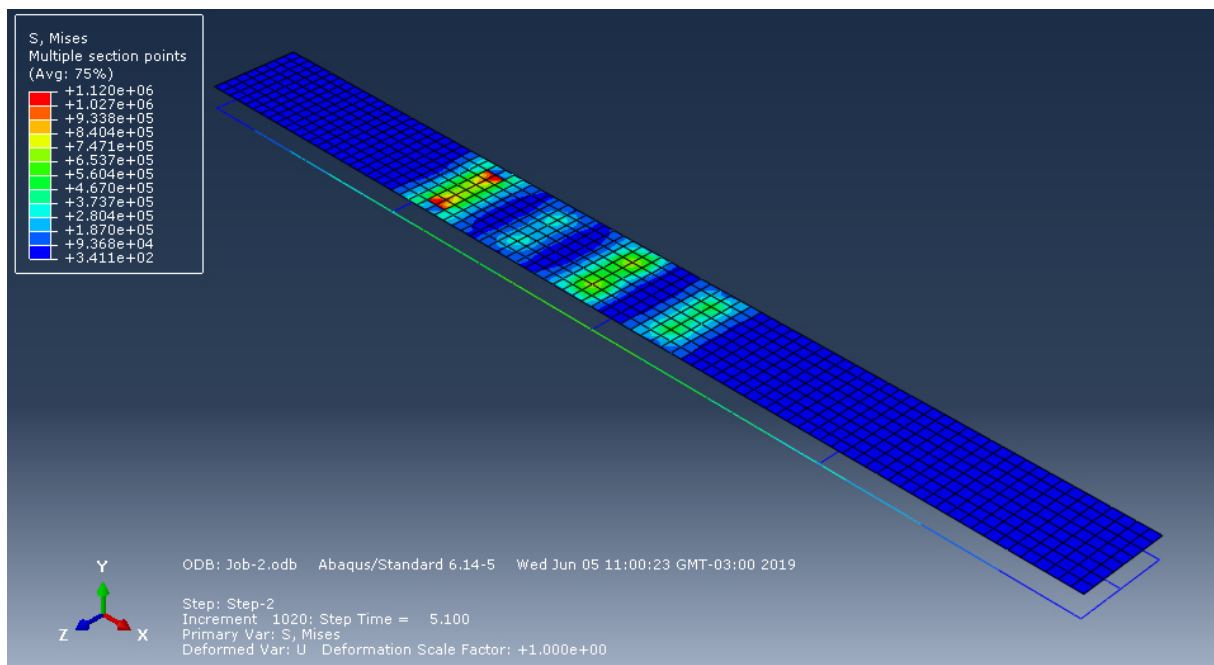


Fig. 3: 8 Peatones modelados caminando sobre el puente peatonal

- **Tabla N°3. Frecuencias acumuladas de aceleraciones para 4 personas caminando sobre el puente, D:640kg/m³ y E=13400MPa**

| ACELERACIÓN DE PUENTE CON 4 PERSONA (E=13400MPa) | | | | | |
|--|--------------|------------|----------------------|--------------------------|------------------------------------|
| Intervalos de clase | Media | Frecuencia | Frecuencia Acumulada | Porcentaje de Frecuencia | Porcentaje de Frecuencia acumulada |
| 0.00 - 0.14 | 0.07 | 74 | 196 | 38% | 100% |
| 0.14 - 0.28 | 0.21 | 35 | 122 | 18% | 62% |
| 0.28 - 0.42 | 0.35 | 26 | 87 | 13% | 44% |
| 0.42 - 0.56 | 0.49 | 23 | 61 | 12% | 31% |
| 0.56 - 0.70 | 0.63 | 20 | 38 | 10% | 19% |
| 0.70 - 0.84 | 0.77 | 11 | 18 | 6% | 9% |
| 0.84 - 0.98 | 0.91 | 3 | 7 | 2% | 4% |
| 0.98 - 1.12 | 1.05 | 2 | 4 | 1% | 2% |
| 1.12 - 1.26 | 1.19 | 1 | 2 | 1% | 1% |
| 1.26 - 1.40 | 1.33 | 1 | 1 | 1% | 1% |
| | TOTAL | 196 | 196 | 100% | 100% |

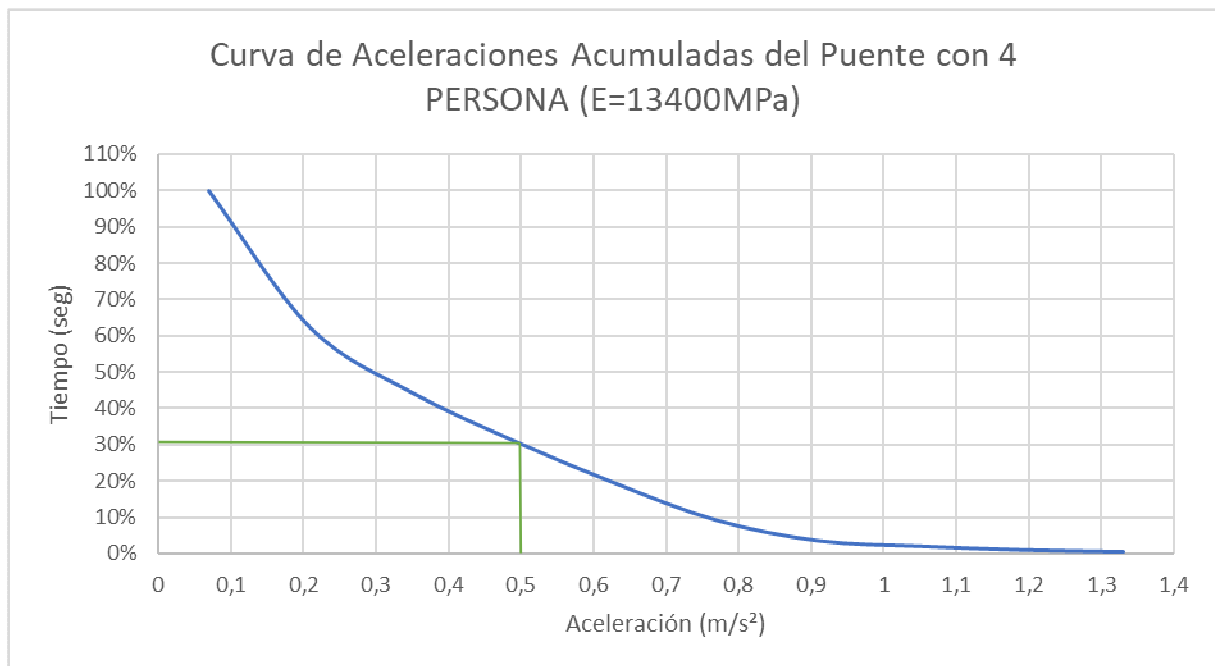


Fig. 4. Curva aceleración en función del tiempo. Indica que el 30% del tiempo se tienen aceleraciones mayores a las que producen un máximo confort en el peatón.

Teniendo en cuenta los rangos de aceleraciones, se utilizaron los siguientes rangos de confort:

- Si la estructura tiene aceleraciones menores que 0,5m/s² tiene un nivel de confort máximo.
- Si la estructura tiene aceleraciones entre 0, 5m/s² y 1m/s² tendrá un nivel de confort moderado.
- Si la estructura tiene aceleraciones entre 1m/s² y 2,5m/s² tendrá un nivel de confort mínimo.
- Si la estructura tiene aceleraciones mayores que 2,5m/s² tiene un nivel de confort inadmisibles.

En la siguiente tabla se representa la clasificación de la estructura, donde si el color es blanco presenta condiciones de máximo confort, si es verde presenta condiciones moderadas, amarillo condiciones mínimas y si es rojo las condiciones de confort son inadmisibles para los peatones.

Tabla N°4: Nivel de confort de la estructura para distintos peatones y propiedades mecánicas

| N° de Personas | Combinaciones de Propiedades Mecánicas | | | | | | | | |
|----------------|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| | E: 9000MPa | | | E: 13400MPa | | | E: 17800MPa | | |
| | D: 430 kg/m ³ | D: 640 kg/m ³ | D: 850 kg/m ³ | D: 430 kg/m ³ | D: 640 kg/m ³ | D: 850 kg/m ³ | D: 430 kg/m ³ | D: 640 kg/m ³ | D: 850 kg/m ³ |
| 1 | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | |

Finalmente se analizaron los mismos datos anteriormente mostrados, pero calculando el número equivalente de personas que dependen del amortiguamiento y densidad de peatones; y cambiando los valores de amortiguamiento de la estructura. El número equivalente de personas se muestra a continuación:

Tabla N°5: Número equivalente de personas para el puente

| Área del Puente | | | Amortiguamiento ξ | | | | | | |
|------------------------------------|----------------------|----|-----------------------|------|------|------|------|------|------|
| Densidad[peatones/m ²] | 15.84 m ² | | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
| | 0.1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 |
| | 0.2 | 4 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 |
| | 0.3 | 5 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 | 7 |
| | 0.4 | 7 | 3 | 5 | 5 | 6 | 7 | 7 | 8 |
| | 0.5 | 8 | 4 | 5 | 6 | 7 | 7 | 8 | 9 |
| | 0.6 | 10 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | 0.7 | 12 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 10 |
| | 0.8 | 13 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |

Cabe destacar que, este número equivalente sirve para modelar el puente con menos personas, de las que realmente pasan, teniendo el mismo efecto. Es decir, para la combinación de un amortiguamiento de 0,03 y de 0,7 de densidad, se pueden modelar 8 personas, pero realmente están pasando por el puente 12. A continuación se mostrarán el nivel de servicio del puente para los distintos amortiguamientos:

Tabla N°6: Nivel de confort de la estructura para distintos tipos de amortiguamientos. Densidad: 640kg/m³ E: 13.400MPa

| N° de Personas | Amortiguamiento | | | | | | |
|----------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|
| | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | |

Frecuencias naturales usadas 1 y 3

| N° de Personas | Amortiguamiento | | | | | | |
|----------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|
| | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | |

- **BLANCO:** Nivel de confort máximo
- **VERDE:** Nivel de confort moderado
- **AMARILLO:** Nivel de confort mínimo
- **ROJO:** Nivel de confort inadmissible
- **TACHADO:** No corresponde el análisis

3. Conclusiones

Respecto a lo que se refiere a las frecuencias naturales, se observa que la frecuencia natural de 6,41 Hz tiene la mayor probabilidad de ocurrir y también nos muestra como la estructura tiene una tendencia a tener frecuencias menores a 8 Hz siendo así una estructura que pueda generar situaciones de falta de confort en los peatones, es decir que tiene gran probabilidad de ser una estructura flexible.

En cuanto a las aceleraciones se observa que la estructura tiene 5 combinaciones que generan condiciones inadmisibles para el confort humano. Profundizando sobre estos resultados, es claro que para las columnas 1, 4, 6 y 8 de la Tabla 4 se presentan las peores condiciones de la estructura, y esto tiene fundamento en que, para las combinaciones 4, 6 y 8 la frecuencia de paso de los peatones es muy próxima a la frecuencia natural de la estructura, generando una sincronización entre los peatones y la estructura, excitándola de mayor manera y generando mayores aceleraciones. En cuanto a la columna 1, la combinación del módulo de elasticidad y densidad dada, generalmente genera bajas condiciones de confort en las estructuras. En la siguiente tabla se observa lo anteriormente dicho:

Tabla N°7: Comparación entre frecuencia natural de la estructura y frecuencia de paso de los peatones.

| N° de Personas | Combinaciones de Propiedades Mecánicas | | | | | | | | |
|--|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| | E: 9000MPa | | | E: 13400MPa | | | E: 17800MPa | | |
| | D: 430 kg/m ³ | D: 640 kg/m ³ | D: 850 kg/m ³ | D: 430 kg/m ³ | D: 640 kg/m ³ | D: 850 kg/m ³ | D: 430 kg/m ³ | D: 640 kg/m ³ | D: 850 kg/m ³ |
| 1 | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | |
| Frecuencia Natural de la estructura | 6.413 | 5.256 | 4.561 | 7.824 | 6.413 | 5.565 | 9.018 | 7.391 | 6.414 |
| Frecuencia de Paso peatonal | 5.700 | 5.700 | 3.800 | 7.600 | 5.700 | 5.700 | 7.600 | 7.600 | 5.700 |
| Diferencia entre Frecuencia Natural y Frecuencia de Paso | 0.713 | -0.444 | 0.761 | 0.224 | 0.713 | -0.135 | 1.418 | -0.209 | 0.714 |

En la tabla anterior se muestran las frecuencias naturales obtenidas en la estructura para una combinación de propiedades mecánicas determinada y las frecuencias de paso que más se aproximan a la frecuencia natural, teniendo en cuenta los 4 primeros armónicos de paso de las personas. Esas Frecuencias son: 1.90 Hz, 3.80 Hz, 5.70 Hz, 7.60 Hz.

Finalmente, se observa que, para los amortiguamientos analizados, se mejoran las condiciones de confort de la estructura. Esto denota un comportamiento esperado, ya que cuando mayor sea el amortiguamiento, más rápido se disipan los efectos de sincronización mejorando las condiciones de confort ya que en el puente no se registran niveles altos de aceleración. Las condiciones de confort con cualquier amortiguamiento son máximas hasta 6 personas, para 8 personas esas condiciones son moderadas y para más peatones las condiciones tienen una alta probabilidad de no ser admisibles.

4. 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*.