

Evaluación mediante técnicas de dinámicas y propuesta de intervención de la estructura de un teatro

Assessment of the Structure of a Theater with Dynamic Techniques and Subsequent Intervention Proposal on It

María Haydée Peralta^a, Leonel Osvaldo Pico^b, Norma Luján Ercoli^c, Raúl Bacchiarello^d,
Salvador La Malfa^e

^{a, b, c, d} *Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.*

^e *Vibromax S.R.L. Bahía Blanca, Argentina.*

Recibido el 5 de enero de 2021; aceptado el 26 de mayo de 2021

RESUMEN

En este trabajo se muestran los análisis realizados sobre la estructura resistente de un entresuelo del Teatro Municipal de la ciudad de Olavarría, Argentina. Su objetivo es la evaluación del comportamiento, su diagnóstico y la propuesta de intervención mediante la realización de refuerzos de la estructura resistente del teatro debido a la percepción de vibraciones indeseadas durante la realización de espectáculos.

Para ello, se efectuaron mediciones vibratorias y predicciones a partir de análisis numéricos estáticos, en el entresuelo del teatro en dos etapas. La primera etapa se realizó en las condiciones originales de la estructura y la segunda etapa luego de la inclusión de refuerzos estructurales recomendados para lograr un comportamiento adecuado. Las mediciones determinadas fueron frecuencias naturales, amplitudes vibratorias de desplazamientos, velocidades y aceleraciones. Los resultados obtenidos, que muestran buena concordancia entre las metodologías teórica, numérica y experimental, se compararon con las pautas internacionales disponibles que permiten determinar el estado de la estructura.

Las evaluaciones efectuadas permiten indicar que el análisis dinámico constituye una adecuada técnica de evaluación y diagnóstico de estructuras. Esto permite establecer el grado de seguridad del comportamiento en servicio y la adopción de decisiones en cuanto a la necesidad de intervenciones si correspondiera.

2022 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L. Licencia de uso *Creative Commons* (CCBY-NC-ND 3.0).

PALABRAS CLAVE: vibraciones, evaluación, diagnóstico, intervención, comportamiento estructural.

ABSTRACT

This work shows the analyses carried out on the resistant structure of a floor for boxes of the Municipal Theater of the city of Olavarría, Argentina. Its objective is the behavior evaluation, its diagnosis and the intervention proposal by reinforcing the resistant structure of the theater due to the perception of unwanted vibrations during the performance of shows.

For this, vibratory measurements and predictions were made from static numerical analyses, in two stages. The first stage was carried out under the original conditions of the structure and the second stage after the inclusion of recommended structural reinforcements to achieve adequate performance. The measurements were natural frequencies, vibratory amplitudes of displacements, speeds and accelerations. The results obtained, which show good agreement between the theoretical, numerical and experimental methodologies, were compared with the available international guidelines that allow determining the state of the structure.

The evaluations carried out indicate that dynamic analysis constitutes an adequate technique for evaluating and diagnosing structures. This allows to establish the degree of safety of in-service behavior and a evaluation appropriate for required interventions.

2022 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L. Creative Commons License (CC BYNC-ND 3.0).

KEYWORDS: vibrations, evaluation, diagnosis, intervention, structural behavior.

* Persona de contacto / *Corresponding author*.
Correo-e / *email*: mperalta@fio.unicen.edu.ar (María Haydée Peralta).

1. INTRODUCCIÓN

La medición y el análisis de vibraciones son utilizados en conjunto con otras técnicas para la evaluación del comportamiento estructural, constituyendo esta metodología una herramienta útil para el análisis de la integridad estructural [1, 2, 3].

Las características dinámicas de las estructuras [4], pueden usarse como indicadores de su flexibilidad. Esto permite la evaluación del comportamiento, por un lado, y del daño estructural progresivo en el tiempo si lo hubiere. Este daño afecta a la rigidez inicial y origina una mayor flexibilidad de la estructura y, por consiguiente, causa una mayor vulnerabilidad frente a las acciones dinámicas. La inspección periódica conduce a adoptar medidas correctivas para que la estructura continúe con las prestaciones establecidas en el proyecto original.

Los códigos de diseño estructural establecen pautas para efectuar las mencionadas tareas de control con la finalidad de garantizar la vida en servicio de las estructuras, según su destino [5, 6, 7]. La prevención en la etapa de utilización debe establecer un programa mínimo de conservación. En este programa se deben disponer los recursos suficientes y realizar inspecciones y trabajos de mantenimiento periódicos que permitan sostener en el tiempo asignado de vida útil una prestación acorde con la establecida [8]. El grado de deterioro observado en estructuras que incluyen, en el peor de los casos, a los colapsos ocurridos ha influido en la concientización de la importancia de un monitoreo y mantenimiento de estas estructuras.

En este trabajo se muestran los análisis realizados sobre el Teatro Municipal de la ciudad de Olavarría, Argentina. Su objetivo es la evaluación del comportamiento, su diagnóstico y la realización de reparaciones de la estructura resistente del teatro debido a la percepción de vibraciones indeseadas durante la realización de espectáculos.

Para ello, se efectuaron mediciones vibratorias, en el entrepiso del teatro en dos etapas. La primera etapa de medición se realizó en las condiciones originales de la estructura y la segunda etapa luego de la inclusión de refuerzos estructurales recomendados para lograr un comportamiento adecuado. Los resultados obtenidos indican que el análisis dinámico constituye una adecuada técnica de evaluación y diagnóstico de estructuras destinadas a uso público. Esto permite establecer el grado de seguridad del comportamiento en servicio y la adopción de decisiones en cuanto a la necesidad de intervenciones si correspondiera.

2. METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS

2.1 Fundamentos Teóricos

La teoría de vibraciones permite hallar las características dinámicas de una estructura. Admitiendo un comportamiento perfectamente elástico de la estructura, esta se puede simular mediante un modelo masa-resorte, despreciando los efectos de amortiguación y considerando vibraciones libres. La ec. 1 es

la ecuación diferencial que representa el comportamiento de este modelo,

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = 0 \quad (1)$$

donde k/m es el cuadrado de la frecuencia angular natural ω . La fuerza elástica kx es la fuerza restitutiva del modelo masa-resorte. Planteando la igualdad entre la acción estática dada por el peso mg y la fuerza elástica, se obtiene la constante k del sistema masa-resorte, dada por la ec. 2.

$$k = \frac{mg}{x} \quad (2)$$

Admitiendo que la frecuencia natural es $f = \omega/(2\pi)$ y combinando las ecs. 1 y 2, se obtiene una expresión que depende de la gravedad y del desplazamiento, dada por la ec. 3.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{x}} \quad (3)$$

Considerando el Sistema Internacional de Unidades (S.I.), donde $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ y adoptando que el desplazamiento x se mida en mm, como es usual en los casos de la ingeniería práctica, se obtiene una expresión simplificada para la frecuencia natural fundamental en Hz, ec. 4.

$$f_{[\text{Hz}]} = 15,76 \sqrt{\frac{1}{x_{[\text{mm}]}}} \quad (4)$$

Esta expresión permite estimar la frecuencia natural fundamental de un elemento estructural a partir de la evaluación del desplazamiento estático [8]. Esta expresión práctica es útil para establecer el orden de magnitud de la frecuencia natural fundamental de un sistema estructural.

2.2 Evaluación del comportamiento estructural a través de vibraciones mecánicas

Los niveles aceptables de vibración [7] se especifican en términos de la respuesta de un sistema de un grado de libertad no amortiguado que experimenta vibración armónica. Los límites se muestran en un gráfico, llamado nomograma de vibración, que muestra las variaciones de amplitudes de desplazamiento, de velocidad y de aceleración en función de la frecuencia natural fundamental de vibración. Para el movimiento armónico, el desplazamiento, la velocidad y la aceleración están dados por las ecs. 5, 6 y 7, respectivamente.

$$x(t) = X \text{ sen } \omega t \quad (5)$$

$$v(t) = \dot{x}(t) = \omega X \text{ cos } \omega t = 2\pi f X \text{ cos } 2\pi f t \quad (6)$$

$$a(t) = \ddot{x}(t) = -\omega^2 X \text{ cos } \omega t = -(2\pi f)^2 X \text{ sen } 2\pi f t \quad (7)$$

donde X es la amplitud del desplazamiento. Las amplitudes del desplazamiento (X), la velocidad ($v_{\text{máx}}$) y la aceleración ($a_{\text{máx}}$) están relacionadas por las ecs. 8 y 9.

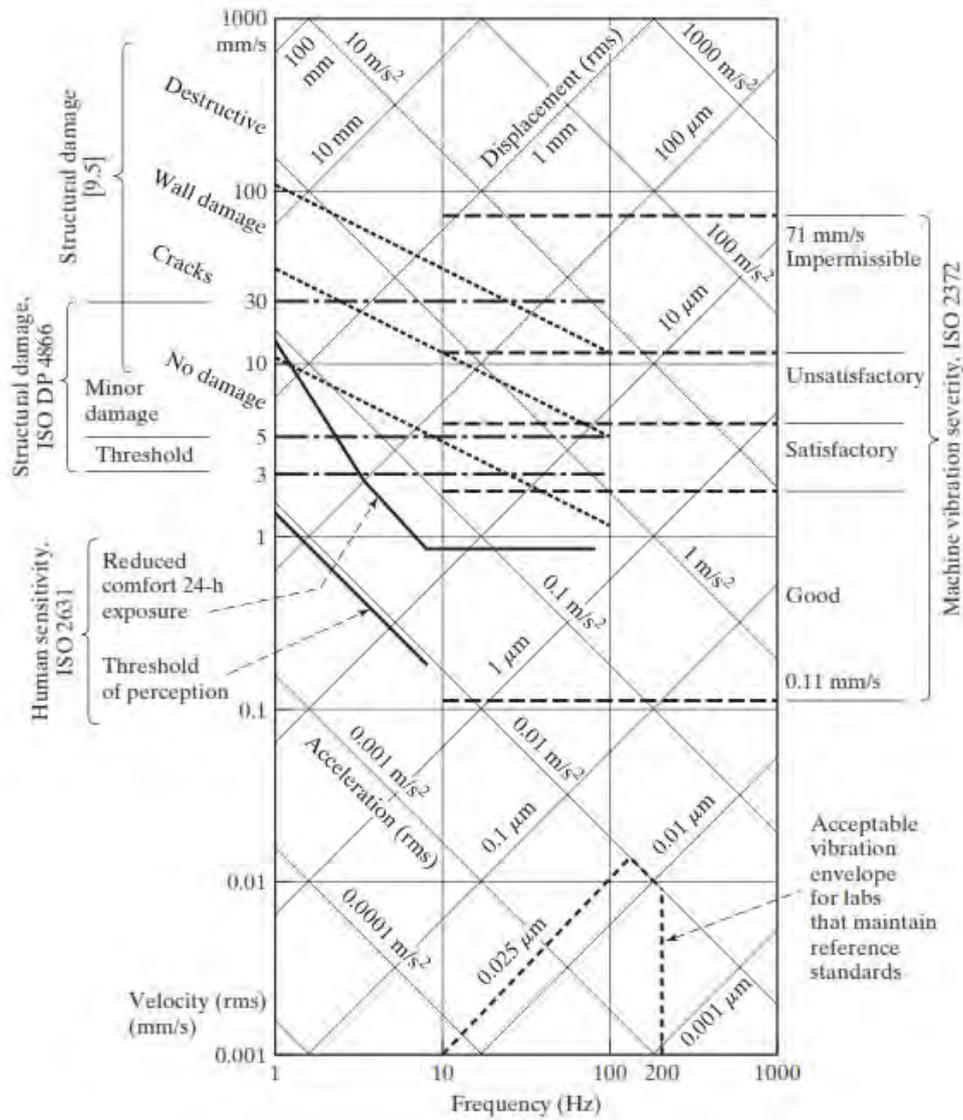


Figura 1. Nomograma de vibraciones [5].

$$v_{m\acute{a}x} = |2\pi f X| \quad (8)$$

$$a_{m\acute{a}x} = |-(2\pi f)^2 X| = 2\pi f v_{m\acute{a}x} \quad (9)$$

Para linealizar las ecs. 8 y 9 se aplican los logaritmos, resultando las ecs. 10 y 11, respectivamente.

$$\ln v_{m\acute{a}x} = \ln |2\pi f X| = \ln 2\pi f + \ln X \quad (10)$$

$$\ln a_{m\acute{a}x} = \ln |-(2\pi f)^2 X| = \ln |2\pi f v_{m\acute{a}x}| = \ln 2\pi f + \ln v_{m\acute{a}x} \quad (11)$$

Cuando se despeja la amplitud de la velocidad máxima de la ec. 11 se obtiene la ec. 12.

$$\ln v_{m\acute{a}x} = -\ln 2\pi f + \ln a_{m\acute{a}x} \quad (12)$$

Se puede observar que para un valor constante de desplazamiento ($\ln X$, ordenada al origen), la ec. 10 representa la velocidad máxima en función de la frecuencia con pendiente positiva, +1. Similarmente, para un valor constante de aceleración

($\ln a_{m\acute{a}x}$, ordenada al origen), la ec. 12 muestra la velocidad máxima en función de la frecuencia con pendiente negativa, -1. Estas ecuaciones se pueden graficar en un nomograma de vibraciones tal como el mostrado en la figura 1. Así, con los límites impuestos por los códigos, normativas y bibliografía de referencia [5, 6, 9, 10, 11, 12, 13] se establecen criterios de diagnóstico del comportamiento estructural y mecánico para diferentes destinos y usos. Por su parte, la figura 2 [14] muestra un criterio adicional de evaluación en función de la amplitud de velocidad vibratoria. En el criterio de Rades, [14], se adopta como límite de velocidad rms (*root mean square* / media cuadrática) 10 mm/s, independientemente de la frecuencia, para establecer la necesidad de evaluación estructural por posibles daños.

2.3 Evaluación de la sensibilidad humana

Las normativas fijan valores admisibles de velocidades y aceleraciones que puede soportar el ser humano durante un determinado tiempo de exposición. Se considera que con valores

Range	rms velocity, mm/s	Effect
I	below 2.5	damages not possible
II	2.5-5.0	damages very improbable
III	5.0-10.0	damages not probable
IV	over 10	damages possible stress check necessary

Figura 2. Límites vibratorios [14].

de aceleraciones por debajo de los umbrales admisibles casi todas las personas pueden estar expuestas a ciclos de vibración con un riesgo mínimo al dolor de espalda, efectos adversos en ella y otros malestares. Estos valores deben usarse como guías para el control de la exposición a la vibración del cuerpo entero, aunque debido a la susceptibilidad individual no puedan contemplarse como una separación definida entre los niveles seguros y los peligrosos. La figura 3 muestra el sistema de coordenadas biodinámicas utilizado para la evaluación de sensibilidad humana ante las vibraciones. Las componentes a_x , a_y , a_z indican las aceleraciones en las direcciones de los ejes x , y , z , respectivamente. El eje x representa la dirección pies-cabeza, el eje y muestra la dirección derecha- izquierda y el eje z indica la dirección espalda-pecho.

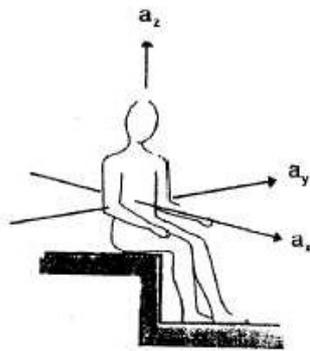


Figura 3. Sistema de coordenadas biodinámicas para medir las vibraciones, adaptado según Res. 295/03.

Es importante aclarar que en los casos donde se encuentra involucrada la permanencia del ser humano, con tiempo de exposición mayor que 24 hs, la Res. 295/03 basada en la norma ISO 2631 [10] considera que son nocivas las frecuencias comprendidas entre 4 y 8 Hz para la dirección x (pies-cabeza). Según Bertero *et al.* [11], las aceleraciones rms mayores que 0.6% g (0.06 m/s²) inducen molestias severas a las personas.

Por tal motivo, las personas no deberían exponerse en sitios donde el piso se mueve dicha cantidad de ciclos por segundo, ya que entraría en resonancia algún órgano generando diversos malestares.

2.4 Descripción de la estructura y metodología utilizada

El teatro analizado en este trabajo está formado por una planta baja y dos entresijos, con una capacidad total de 600 butacas. En la figura 4 se muestra una vista del interior del teatro donde se observan los dos entresijos y la planta baja.

Durante las funciones teatrales, las vibraciones indeseadas se detectaban en el primer entresijo. Por este motivo, los análisis del presente trabajo se efectuaron en la zona central del

sector de palcos de este entresijo, como se ilustra en la figura 5, indicándose con el punto 1 el sector de la medición.



Figura 4. Vista de los entresijos del teatro.

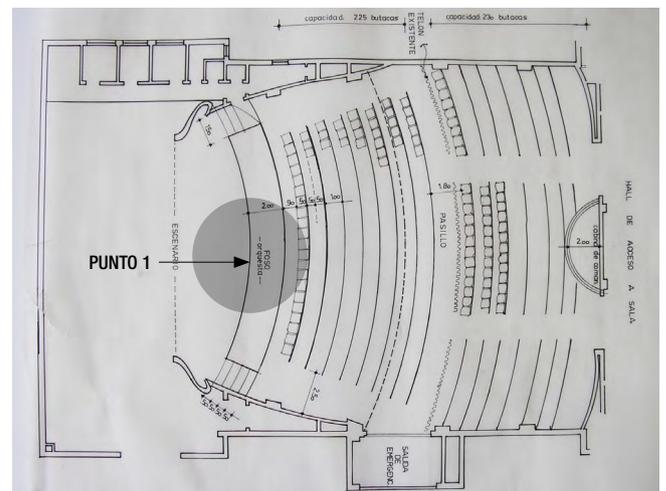


Figura 5. Planta del entresijo analizado con el sector y el punto 1 de medición.

Para evaluar el comportamiento estructural del entresijo afectado se realizaron las siguientes tareas:

- 1) Análisis dinámico y diagnóstico del comportamiento de la estructura original sin refuerzos.
- 2) Relevamiento y análisis estático para la evaluación de la flexibilidad estructural.
- 3) Modificación de la estructura con refuerzos y análisis estático.
- 4) Análisis dinámico y diagnóstico del comportamiento de la estructura reforzada.

3.

ANÁLISIS REALIZADOS, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis dinámico y diagnóstico del comportamiento de la estructura original sin refuerzos

El análisis dinámico consistió en obtener las frecuencias naturales y amplitudes vibratorias mediante un acelerómetro triaxial y adquirente de datos ubicados sobre el piso del entresijo afectado, en el punto 1 de la figura 5.

Para provocar la excitación de la estructura se aplicaron cargas dinámicas correspondientes a personas saltando un breve período, de manera de lograr vibraciones libres y determinar así la frecuencia natural del sistema estructural del entrepiso. La [figura 6](#) muestra una vista del palco del entrepiso durante la medición en el punto 1.



Figura 6: Vista del palco durante la medición en el punto 1.

La [figura 7](#) muestra el espectro vibratorio medido en el punto 1. Los resultados obtenidos indican que la frecuencia natural es 4 Hz y que la máxima amplitud de velocidad es 19,95 mm/s, rms.

Con estos resultados de frecuencia y de velocidad, de acuerdo con lo establecido en el nomograma de la [figura 1](#) se puede diagnosticar que la estructura del entrepiso presenta deterioro y daños menores [5, 9]. Complementariamente, según el criterio de la [figura 2](#) [13], la estructura se ubica en el rango IV fuera de los límites admisibles, presentando posible daño estructural.

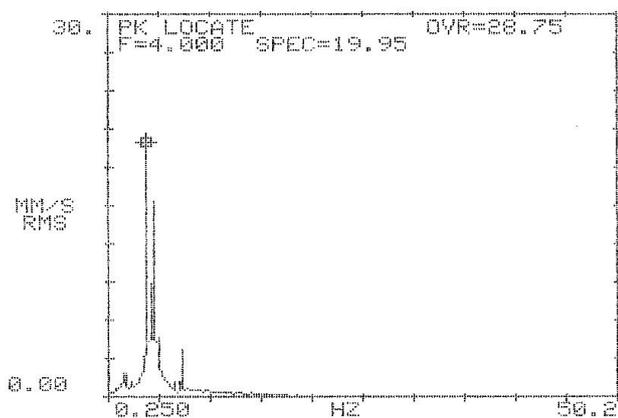


Figura 6: Vista del palco durante la medición en el punto 1.

3.2 Relevamiento y Análisis Estático para la Evaluación de la Flexibilidad Estructural

En virtud de los resultados obtenidos y del diagnóstico del comportamiento inadecuado, es necesario evaluar la estructura mediante análisis estático, para determinar la flexibilidad del sistema estructural. Para ello, en primer lugar se realizó un relevamiento de la estructura, inspeccionando por medio de cateos y consulta de planos de referencia. El relevamiento permitió

identificar la tipología estructural y los materiales empleados. A partir de esto, se pudo determinar que la estructura del primer entrepiso está constituida por 19 reticulados apoyados sobre un muro trasero y por una viga transversal reticulada de 23 m de luz con un voladizo que sirve de soporte de los palcos de 5 m de luz, como se muestra en la [figura 8](#).

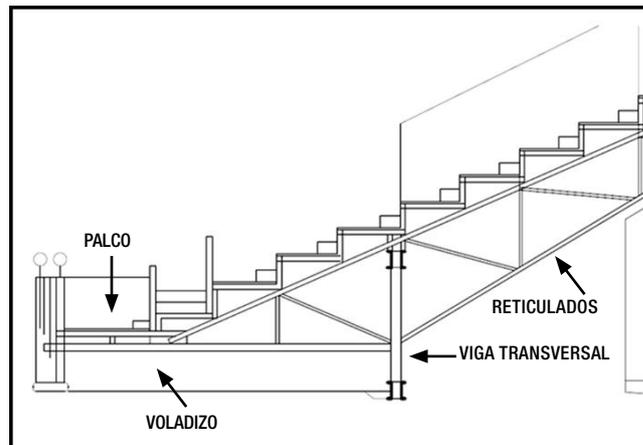


Figura 8. Estructura resistente del entrepiso inferior analizado.

A partir del relevamiento de la estructura metálica existente, se generó un modelo de la misma en software de elementos finitos, utilizando elementos tipo viga, como se muestra en [figura 9](#). Con respecto a las cargas para la resolución estática se consideró el peso propio y la sobrecarga de uso correspondiente a teatros y cines con asientos fijos sujetos al piso, uniforme 3 kN/m² con un coeficiente de impacto de 1,5, según la normativa vigente en Argentina, CIRSOC 101 [15], [tabla 4.1](#) y Art. 4.6.2. Los resultados de la resolución estática, en términos de la deformación de la estructura se muestran en [figura 10](#) y en la [tabla 1](#) los valores de desplazamiento en voladizo y viga transversal. En particular, el valor del desplazamiento máximo del voladizo de 15 mm es indicador de una gran flexibilidad, debido a que la relación luz del voladizo/desplazamiento es 5000 mm /15 mm = 333. Por otra parte, con este valor de desplazamiento, utilizando la [ec. 4](#) se puede estimar que la frecuencia natural fundamental es 4.069 Hz. Este valor es muy próximo al obtenido por las mediciones experimentales, 4 Hz.

La elevada flexibilidad del voladizo se debe en parte a su propia tipología estructural y en parte a la flexibilidad de la viga transversal de apoyo que traslada su flecha al voladizo. El análisis estático permitió evaluar el comportamiento global de la estructura, observándose los elementos que presentaban mayores deformaciones y, en consecuencia, proyectar los refuerzos necesarios para rigidizar el sistema.

El desplazamiento relativo vertical del voladizo se toma respecto a la posición deformada de la viga transversal y el Desplazamiento vertical total del voladizo se toma respecto a su posición indeformada inicial.

3.3 Propuesta de intervención de la estructura con refuerzos y análisis estático

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis estático anterior, utilizando la normativa vigente en Argentina CIRSOC 301 [16], se proyectaron y ejecutaron los refuerzos

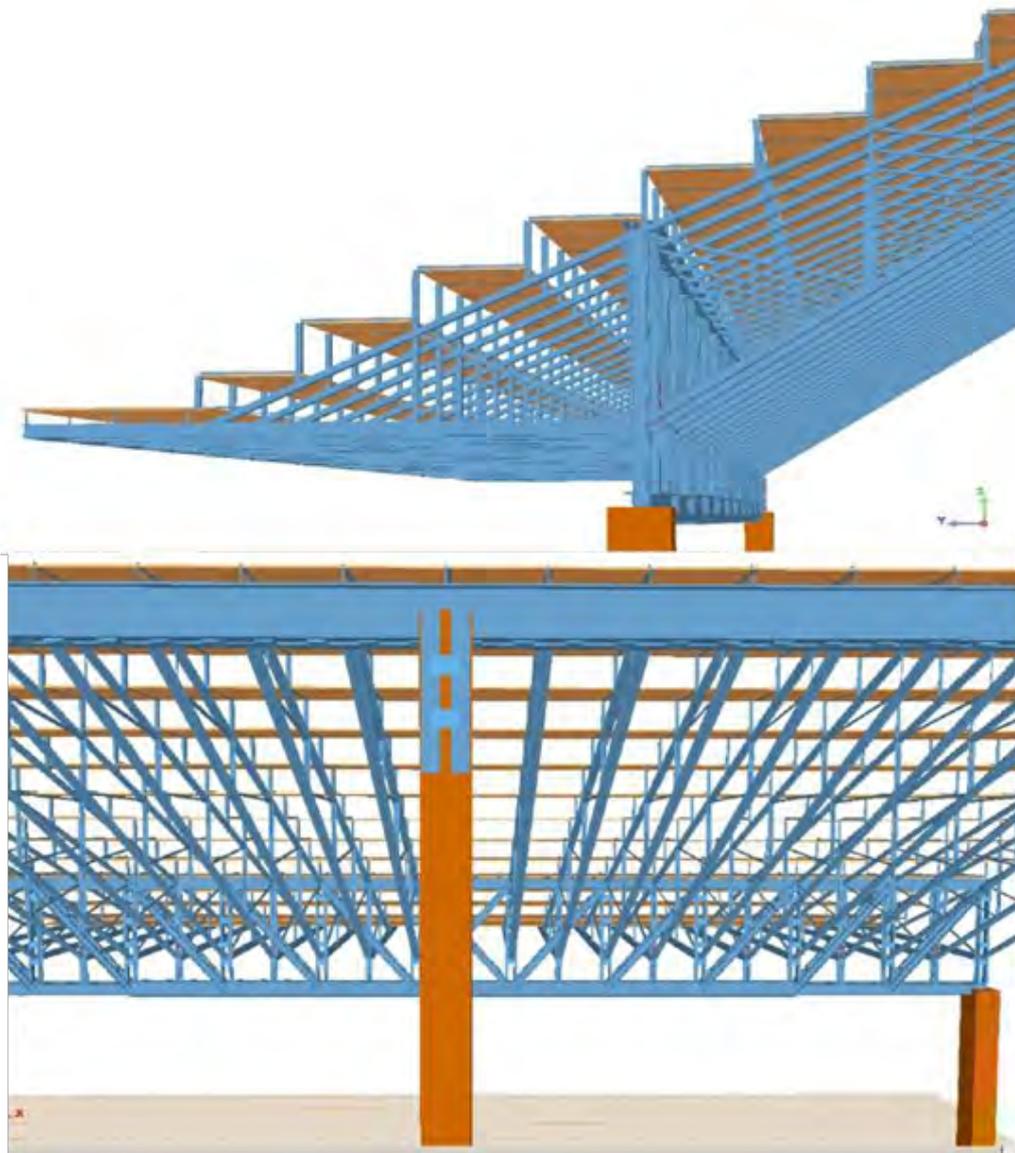


Figura 9. Modelos de elementos finitos de la estructura del teatro.

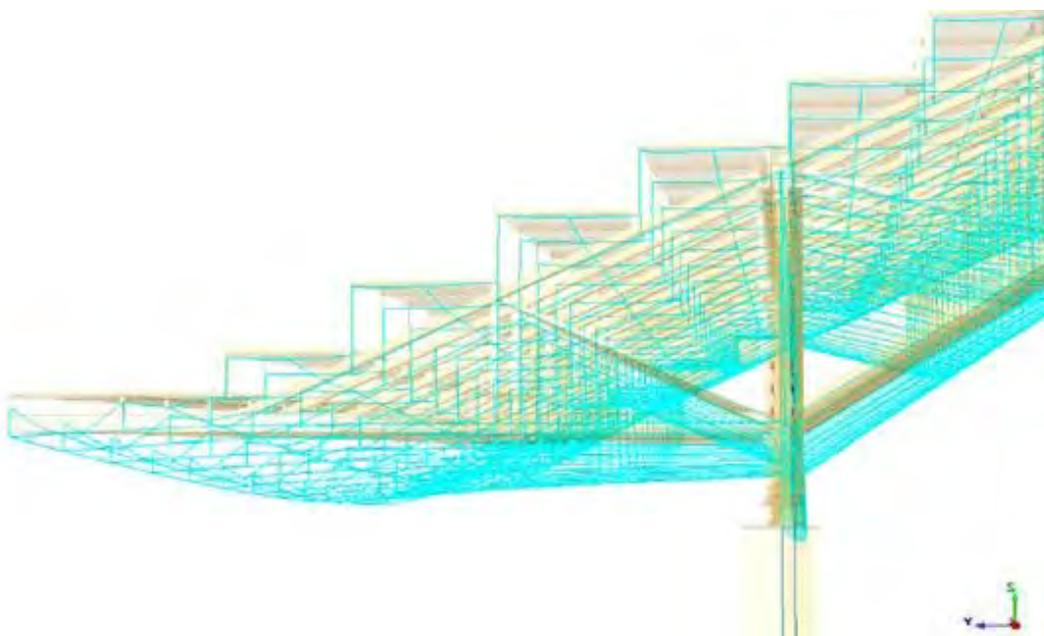


Figura 10. Deformada de la estructura

TABLA 1.

Desplazamientos máximos de la viga y del voladizo antes de las modificaciones con refuerzos.

Desplazamiento vertical de la viga transversal	Desplazamiento vertical relativo del voladizo	Desplazamiento vertical total del voladizo
20,5 mm	15 mm	35,5 mm

indicados en la tabla 2 y en las figuras 11 y 12. En las figuras 13 y 14 se muestran los refuerzos realizados. La viga transversal se reforzó con 2 UPN para limitar el desplazamiento vertical, como se indica en las posiciones A y B. Esta viga también se reforzó con perfiles indicados en las posiciones E y F para limitar la flecha horizontal. Por otra parte, el voladizo se reforzó con perfiles indicados en las posiciones C, D, G, H, I.

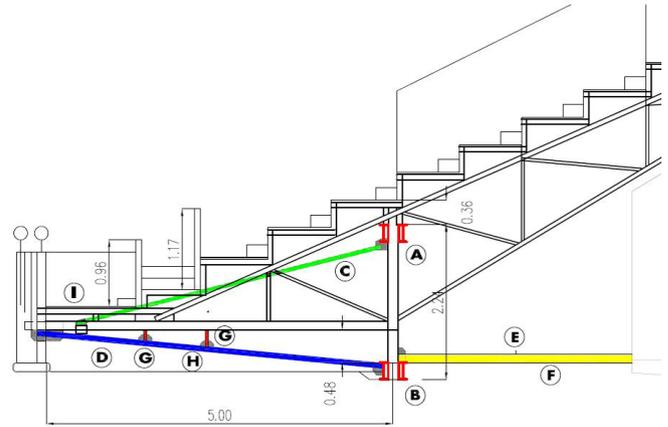


Figura 11. Corte de la estructura con los refuerzos proyectados.

TABLA 2.

Refuerzos estructurales utilizados.

Posición	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Tipo de perfil	1 UPN 220 + 1 UPN 240	2 UPN 240	2 LPN 57x57x4,8	2 UPN 100	1 LPN 57x57x4,8	2 UPN 120	2 LPN 38x38x3,2	2 LPN 57x57x4,8	2 UPN 160
Longitud (m)	14.50	14.50	5.00	5.00	4.00	3.30	0.50	8.00	1.20
Cantidad	1	1	4	9	1	3	18	1	4

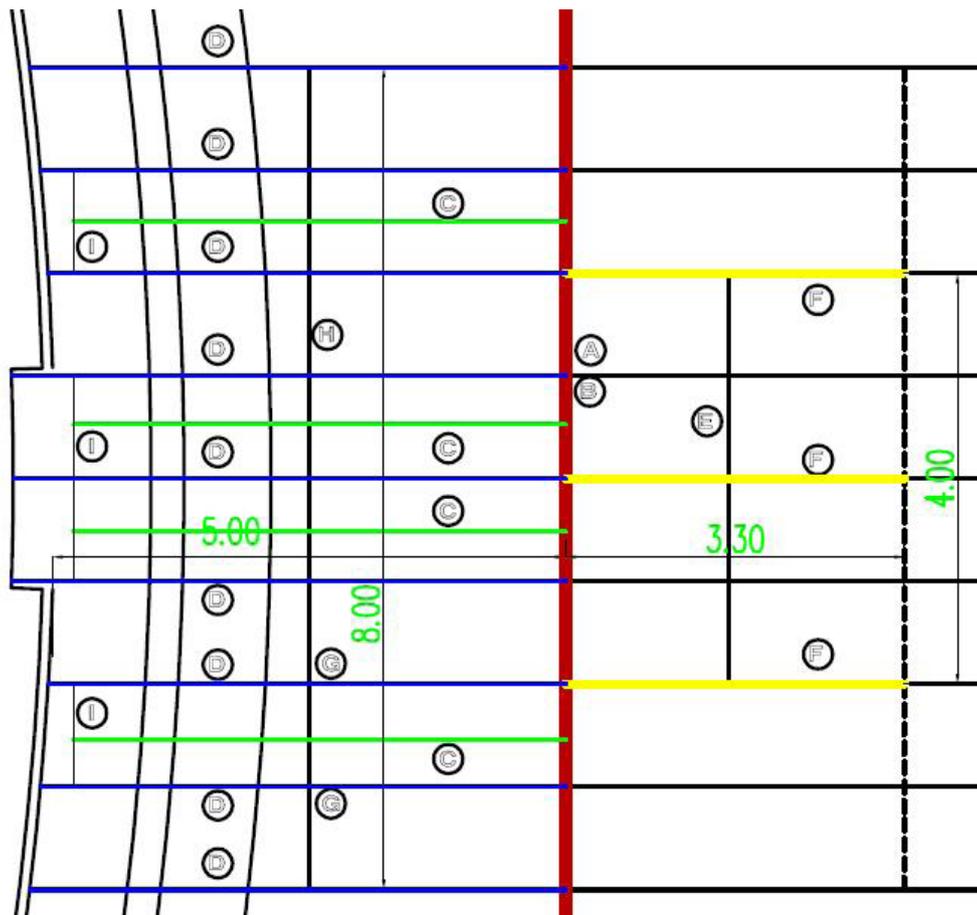


Figura 12. Planta de la estructura con los refuerzos proyectados.



Figura 13. Vista de la viga transversal entre las butacas del teatro



Figura 14. Detalle de la viga transversal con el refuerzo

Luego de la inclusión de los refuerzos, se realizó el análisis estático con modelos de elementos finitos utilizando el mismo marco normativo y por lo tanto las mismas cargas que las utilizadas en el análisis de la estructura sin reforzar. Los resultados obtenidos se indican en la [tabla 3](#). Se puede observar la notable disminución de los valores de desplazamientos de la viga transversal y del voladizo.

En particular, el valor del desplazamiento máximo relativo del voladizo (9.5 mm) es indicador de la reducción de la flexibilidad, debido a que la relación luz del voladizo / desplazamiento es $5000 \text{ mm} / 9.5 \text{ mm} = 526$. Por otra parte, con este valor de desplazamiento, utilizando la [ec. 4](#) se puede estimar que la frecuencia natural fundamental luego de la inclusión de los refuerzos es 5.11 Hz.

TABLA 3. Desplazamientos máximos de la viga y del voladizo después de las modificaciones con refuerzos.

Desplazamiento vertical de la viga transversal	Desplazamiento vertical relativo del voladizo	Desplazamiento vertical total del voladizo
6.0 mm	9.5 mm	15.5 mm

El desplazamiento relativo vertical del voladizo se toma respecto a la posición deformada de la viga transversal y el desplazamiento vertical total del voladizo se toma respecto a su posición indeformada inicial.

3.4 Análisis dinámico y diagnóstico del comportamiento de la estructura reforzada

Una vez realizados los refuerzos estructurales, se efectuó el análisis dinámico de la estructura. En este caso, a los puntos de interés adaptados en la etapa de evaluación de estructura existente, se sumaron puntos en sectores sobre la viga transversal reforzada, en el cordón superior (punto 2) e inferior (punto 3), tal como se muestra en la [figura 15](#), para evaluar la sensibilidad humana mediante análisis de velocidades en las direcciones X, Y, Z. Para provocar la excitación de la estructura se aplicaron cargas dinámicas correspondientes a personas saltando de manera similar a lo indicado en el análisis dinámico inicial de la estructura original.

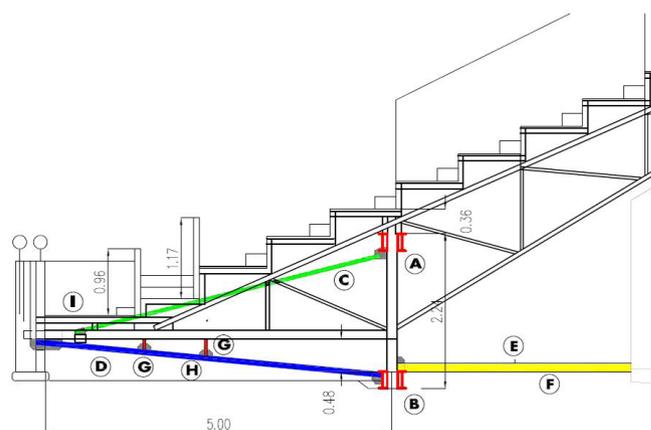


Figura 15. Detalle de la estructura reforzada con la ubicación de las direcciones X, Y, Z y los puntos de medición

En la [figura 16](#) se muestra el espectro vibratorio de la velocidad en función de la frecuencia luego de la realización de los refuerzos estructurales. Los resultados obtenidos indican que la frecuencia natural de la estructura modificada es 4.958 Hz y que la máxima amplitud de velocidad es 1.087 mm/s, rms. En consecuencia, se puede afirmar que luego de la rigidización con refuerzos, la frecuencia aumentó un 24% y que la amplitud de velocidad disminuyó un 95%. Es de notar que el valor de 4.958 Hz obtenido por medición es próximo al determinado teóricamente con la [ec. 4](#), de 5.11 Hz. Esto permite validar la estimación teórica de la frecuencia natural a partir del desplazamiento estático.

Finalmente, los resultados obtenidos de frecuencia y velocidad están dentro de los límites fijados por los criterios del nomograma de la [figura 1](#) y de la [figura 2](#). Por lo tanto, es posible diagnosticar que la estructura modificada cumple con los requisitos exigidos de comportamiento estructural adecuado.

Las [figuras 17](#) y [18](#) muestran las amplitudes de velocidad en función del tiempo de las partes superior (punto 2) e inferior (punto 3), respectivamente, de la viga transversal. Pueden observarse las distintas amplitudes en las tres direcciones X, Y, Z indicadas en la [figura 15](#). En la [figura 17](#) se destaca la máxima amplitud para la dirección Y de 0.0008 m/s, (0.8 mm/s), rms. Luego, en las direcciones Z y X los valores no superan 0,0007

m/s. Por su parte, en la [figura 18](#) se observa que las direcciones X y Z son las que poseen mayor amplitud, con valores aproximados de 0.0013 m/s (1.3 mm/s), rms. Luego, la velocidad en dirección Y es prácticamente nula.

En correspondencia, la aceleración máxima registrada es 0.04 m/s², rms, en el punto 3 y en la dirección X, por debajo del nivel admisible de sensibilidad humana, que se encuentra en torno a 0.6% g (0.06 m/s²) [11].

En consecuencia, según los criterios del nomograma de la [figura 1](#), los valores de velocidad y de aceleración no superan los límites admisibles de confort humano para una exposición de 24 hs [10] (ISO 2631, 1974) en la frecuencia de 5.11 Hz.

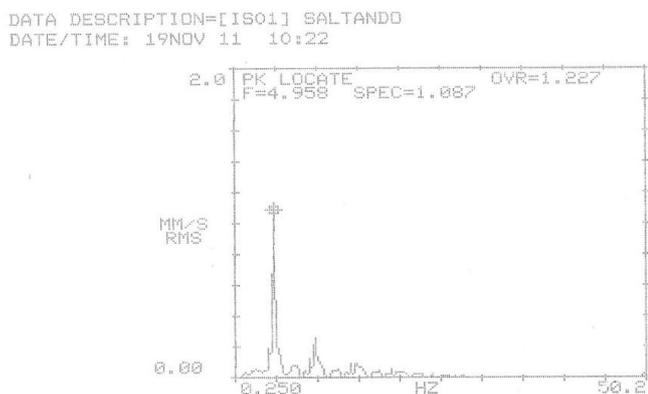


Figura 16: Velocidad en función de la frecuencia natural del entrepiso después de la intervención.

4. CONCLUSIONES

El proyecto y ejecución de refuerzos estructurales permitió la rigidización del entrepiso para habilitar su uso con acciones

dinámicas, dentro de los rangos admisibles de comportamiento estructural y de sensibilidad humana, establecidos por las normativas de diseño. En particular, se pudo observar que los valores de velocidad y de aceleración no superan los límites admisibles de confort humano para una exposición de 24 hs en la frecuencia de 5.11 Hz.

Asimismo, queda de manifiesto la importancia de la evaluación dinámica de las estructuras en la etapa de diseño para evitar comportamientos inadecuados durante su uso.

Los resultados obtenidos para el caso estudiado permiten destacar la validez de las pautas de comportamiento estructural basadas en las características dinámicas.

La determinación de la frecuencia natural fundamental a partir del desplazamiento estático fue validada y permite una buena estimación del comportamiento dinámico.

Por lo expuesto, el análisis dinámico de las estructuras constituye una técnica apropiada para evaluar daño estructural y/o afectación de la capacidad portante. Esta metodología de análisis dinámico constituye una técnica no destructiva muy práctica en su aplicación, lo cual la hace recomendable fundamentalmente antes y después de una intervención.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Peralta, M. and Ercoli (2005) N. Measuring the Dynamic Properties to Detect Structural Damage. IV International ACI/CANMET. *Conference of Quality of Concrete Structures and Recent Advances in Concrete Materials and Testing*. Olinda, Pernambuco State. Brazil. Sesión VII Non Destructive Test. pp. 463-475.
- [2] Peralta, M.; Ercoli, N.; Pico, L.; Bacchiarello, R.; La Malfa, S.; Correa, L. (2008) Análisis Numérico y Experimental de Vibraciones para la Evaluación del Comportamiento de un Puente. *Mecánica Computacional*, Vol. XXVII, pp. 2033-2052.
- [3] Peralta, M.; Ercoli, N.; Pico, L.; La Malfa, S. (2009) Utilización de Técnicas Experimentales Dinámicas en la Evaluación de Estructuras. 8o EIPAC, *Encuentro de Investigadores y Profesionales Argentinos de la Construcción*, Mendoza, Argentina.

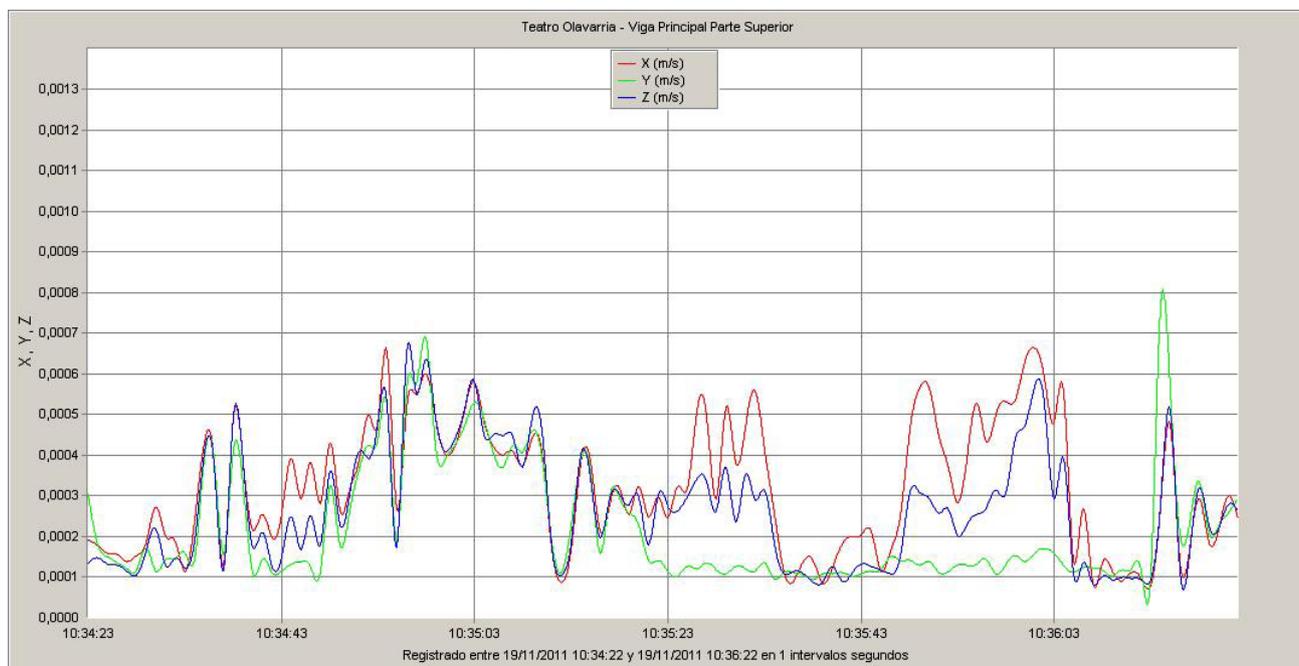


Figura 17. Amplitudes de velocidad en la parte superior de la viga transversal (punto 2).

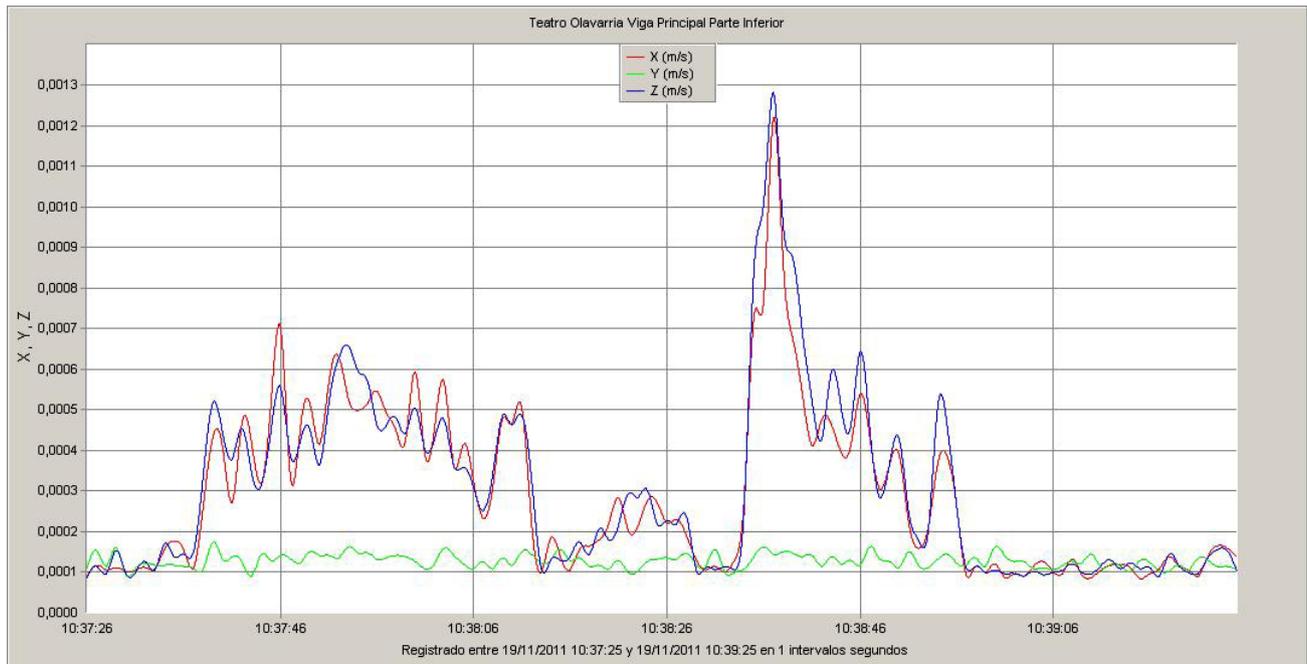


Figura 18. Amplitudes de velocidad en la parte inferior de la viga transversal (punto 3).

- [4] Clough, R. W. and Penzien, J. (1993) *Dynamics of Structures*. Second Edition, McGraw-Hill, Inc.
- [5] Richart F.E. Jr., Hall, J.R. Jr and Woods, R.D. (1970) *Vibrations of soils and foundations*. Prentice Hall.
- [6] Macinante, J. A. (1984) *Seismic Mountings for Vibration Isolation*. Wiley, New York.
- [7] Rao, S.(2018) *Mechanical Vibrations*. Sixth Edition, Pearson Education, Prentice Hall.
- [8] Husni, R. (2007) Fallas y prevención en las estructuras de hormigón. *Revista Ingeniería Estructural*. Año 15, n. 39.
- [9] ISO DP 4866. (1975) Evaluation and Measurement of Vibration in Buildings. Draft proposal. *International Organization for Standardization*.
- [10] ISO 2631. (1974) Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration. *International Organization for Standardization*.
- [11] Bertero, R., Lehmann, A., Verri, A., Vaquero, S., Mussat, J. (2010) Vibraciones en edificios cercanos originadas por espectáculos musicales en estadios. *XXI Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*. Buenos Aires, Argentina.
- [12] ISO 2372. (1974) Mechanical Vibration of Machines with Operating Speeds from 10 to 200 rev/s. Basis for Specifying Evaluation Standards. *International Organization for Standardization*.
- [13] Steffens, R. J. (1966) Some aspects of structural vibration. *Proceedings of the Symposium on Vibrations in Civil Engineering*. B. O. Skipp (ed.). Butterworths. London.
- [14] Rades, M. (1994) Vibration Limits for Industrial Buildings. *The Shock and Vibration Digest*, v. 26, n. 3.
- [15] CIRSOC 101/05. (2005) Reglamento Argentino de Cargas permanentes y Sobrecargas Mínimas de Diseño para Edificios y otras Estructuras. CIRSOC, Centro de Investigación de los Reglamentos nacionales de Seguridad para las Obras Civiles. INTI. Buenos Aires.
- [16] CIRSOC 301/05. (2005) Reglamento Argentino de Estructuras de Acero para Edificios. CIRSOC, Centro de Investigación de los Reglamentos nacionales de Seguridad para las Obras Civiles. INTI. Buenos Aires.

Fuente de financiación

El presente trabajo ha sido financiado por la Municipalidad de Olavarría y la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires- [Acuerdo FIO UNICEN-Municipalidad de Olavarría Res. CAFI 008/11].