

ANÁLISIS DE LAS VIBRACIONES DEL ENTREPISO DE UN TEATRO PARA EVALUAR SU COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

María H. Peralta^a, Raúl O. Bacchiarello^b, Norma L. Ercoli^a, Leonel Pico^a y Salvador La Malfa S.^c

^a Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería --
Olavarría- Bs.As. Argentina. E-mail: mperalta@fio.unicen.edu.ar. <http://www.fio.unicen.edu.ar>

^b Municipalidad de Olavarría, Bs. As. Argentina, e-mail: bacchiarelloraul@speedy.com.ar

^c UNS-Bahía Blanca- Profesional-CONICET-Instituto de Mecánica Aplicada-Argentina, e-mail:
gerencia@vibromax.com.ar

Palabras Clave: análisis estructural, vibraciones, evaluación

Resumen. 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 de interés para el análisis de la integridad de estructuras.

Las características dinámicas de las estructuras, pueden utilizarse como indicadores de su flexibilidad. Esto se justifica porque el daño estructural afecta a la rigidez original resultando así una mayor flexibilidad de la estructura y, consecuentemente, una mayor vulnerabilidad frente a las acciones dinámicas. Por lo indicado, la auscultación periódica de las características dinámicas permite detectar si existen cambios que permitan inferir daños y, en consecuencia, adoptar medidas correctivas para que la estructura continúe con las prestaciones establecidas en el proyecto y que no se afecte a la confortabilidad de los usuarios.

Los códigos vigentes establecen pautas para efectuar las mencionadas tareas de control con la finalidad de garantizar la vida en servicio de las estructuras, según el destino de las mismas. La prevención en la etapa de utilización debe orientarse a establecer un programa mínimo de conservación, disponer los recursos suficientes, realizar inspecciones y trabajos de mantenimiento periódicos que permitan sostener en el tiempo asignado de vida útil una prestación acorde a la establecida. 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 presenta el estudio teórico, numérico y experimental realizado sobre la estructura metálica de un teatro de Olavarría, Argentina. Este estudio consiste en la determinación de las frecuencias naturales, las amplitudes vibratorias de desplazamientos, velocidades y aceleraciones para la evaluación de la flexibilidad estructural. La evaluación permite diagnosticar el estado de la estructura antes y después del proyecto y la ejecución de refuerzos. Los resultados obtenidos por las diferentes vías muestran buena concordancia.

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 de interés para el análisis de la integridad de estructuras (Peralta y Ercoli, 2005; Peralta et al., 2008; Peralta et al., 2009).

Las características dinámicas de las estructuras (Clough y Penzien, 1993), pueden utilizarse como indicadores de su flexibilidad. Esta metodología permite la evaluación del comportamiento y del daño estructural debido a que éste, con el transcurso del tiempo, afecta a la rigidez original resultando así una mayor flexibilidad de la estructura y, consecuentemente, una mayor vulnerabilidad frente a las acciones dinámicas (Salawu, 1997; Ngwangwa et al., 2006). De acuerdo con los resultados de las mediciones, la auscultación periódica conduce a adoptar medidas correctivas que permitan que la estructura continúe con las prestaciones establecidas en el proyecto.

Los códigos en vigencia (ISO 1990) establecen pautas para efectuar las mencionadas tareas de control con la finalidad de garantizar la vida en servicio de las estructuras, según el destino de las mismas (Richart, 1970;). La prevención en la etapa de utilización debe orientarse a establecer un programa mínimo de conservación, disponer los recursos suficientes, realizar inspecciones y trabajos de mantenimiento periódicos que permitan sostener en el tiempo asignado de vida útil una prestación acorde a la establecida (Husni, 2007). El grado de deterioro observado en estructuras y/o la no confortabilidad de los usuarios, ha influido en la concientización de la importancia de un monitoreo y mantenimiento de estas estructuras.

En el presente trabajo se expone la experiencia realizada por los autores, en el marco de un Convenio entre la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires con la Secretaría de Obras Públicas de la Municipalidad de Olavarría. El objeto del mismo fue la intervención a partir de las tareas de evaluación, diagnóstico y propuesta de mantenimiento y/o reparaciones de estructuras de uso público, existentes en la ciudad de Olavarría. Particularmente, se requirió el análisis de la estructura resistente del Teatro Municipal de la ciudad a efectos de evaluar el comportamiento y determinar posibilidades de uso. El requerimiento se debió a la percepción de vibraciones durante la realización de espectáculos.

A tal fin se efectuaron estudios experimentales, teóricos y numéricos que contemplaron las mediciones vibratorias, en el primer entresquejo del teatro, en dos etapas.

En la primera etapa se realizaron los estudios en las condiciones originales de la estructura. A partir de ésta se proyectaron y ejecutaron refuerzos.

La segunda etapa fue efectuada luego de materializados los refuerzos recomendados para lograr un comportamiento adecuado. A partir de nuevas mediciones vibratorias pudo evaluar la efectividad de la solución de refuerzos estructurales adoptada.

2. PRIMERA ETAPA DE LA EVALUACIÓN

2.1 Mediciones Efectuadas

En Figura 1 se indica una vista del interior del teatro. El mismo consta de dos entresquejos y la planta baja.

Se efectuaron mediciones vibratorias en la zona central del sector de palcos del 1º entresquejo, destacado en Figura 2. Se evaluaron frecuencias naturales y amplitudes vibratorias.

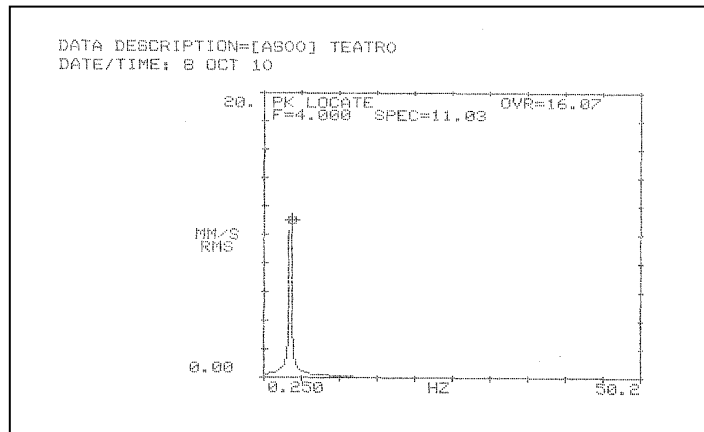


Figura 3. Frecuencia natural predominante: $F= 4,0$ Hz

2.1.2 Amplitudes Vibratorias

Posteriormente se procedió a efectuar mediciones de la respuesta dinámica del entrespiso, para lo cual se consideró la carga aportada por personas saltando a ritmo normal, Figura 4.

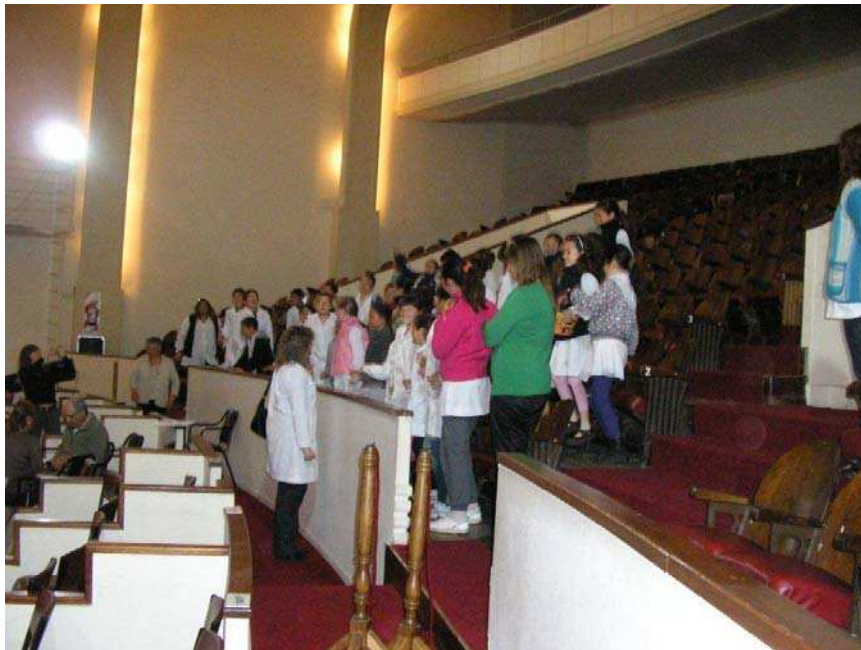


Figura 4. Mediciones efectuadas con personas saltando

En este caso se obtuvieron las amplitudes de la respuesta en velocidad en mm/s, rms. En Figura 5 se observa el correspondiente espectro de respuesta en velocidad del entrespiso.

Se observa que la amplitud máxima del espectro de respuesta en velocidad, para la carga indicada, es de 19,95 mm/s, rms.

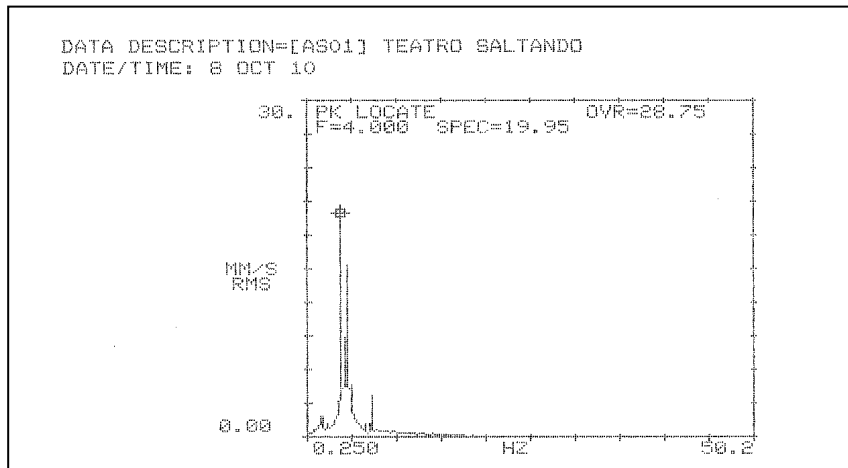


Figura 5. Amplitud máxima parte superior SPEC=19.95 mm/s,rms

2.2 Análisis de los Resultados de la Primera Etapa y Diagnóstico

Existen diversos criterios para determinar la idoneidad o no de una estructura los cuales deben tomarse como herramientas para realizar valoraciones sobre las construcciones a evaluar. Los criterios de aceptación de los valores de las vibraciones deben tener en cuenta los siguientes factores entre otros: calidad y características de los materiales, tipología del edificio, edad de la construcción. Los criterios de aceptación más convenientes como indicadores varían en función del rango de frecuencia. El límite para las vibraciones lo marca la velocidad de vibración para las frecuencias bajas. El criterio más realista es el que utiliza la velocidad rms. En la Figura 6 según Richart (Richart et al., 1970) y en la Tabla 1 según la norma ISO (ISO/TC 108/SC2/Wg3-9; Rades, 1994) se establecen los límites de velocidad permitidos por los cuales las amplitudes vibratorias no deberían superar el valor de 10 mm/s o 5 mm/s según el comportamiento estructural que se admita.

Los resultados obtenidos, 19,95 mm/s, muestran que las amplitudes vibratorias medidas exceden los rangos admisibles para la excitación considerada (personas saltando a ritmo normal).

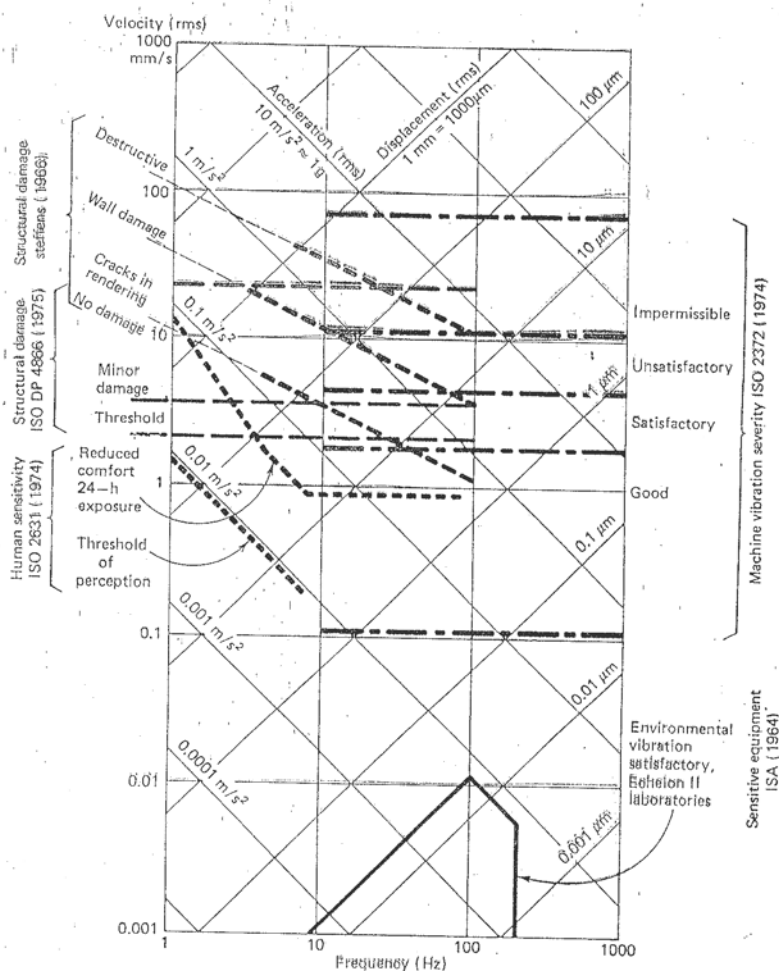


Figura 6. Límites vibratorios. (Richart et al, 1970)

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

Tabla 1. Límites vibratorios (Rades, 1994)

2.3. Diagnóstico y Recomendaciones

El estudio realizado permitió indicar que el entepiso presentaba un comportamiento flexible lo cual se traducía en amplitudes vibratorias fuera de los límites admisibles para las acciones dinámicas evaluadas

Por lo indicado se recomendó, luego de la primera etapa de análisis:

- Efectuar un relevamiento de la estructura existente que permita identificar la tipología

estructural y los materiales utilizados.

- Efectuar una verificación del comportamiento para acciones estáticas.
- Proyectar y ejecutar refuerzos estructurales que permitan rigidizar convenientemente al entrepiso para habilitar su uso para destinos que involucren acciones de características dinámicas y efectuar posteriormente la medición de amplitudes vibratorias.

3. RELEVAMIENTO ESTRUCTURAL

3.1 Tipología Estructural

El relevamiento oportunamente efectuado permite indicar que la estructura resistente estaba constituida por 19 reticulados apoyados en el muro trasero y por una viga transversal reticulada de 23 m de luz con un voladizo hacia el frente, soporte de los palcos, de 5 m de luz, tal lo indicado en Figura 7.

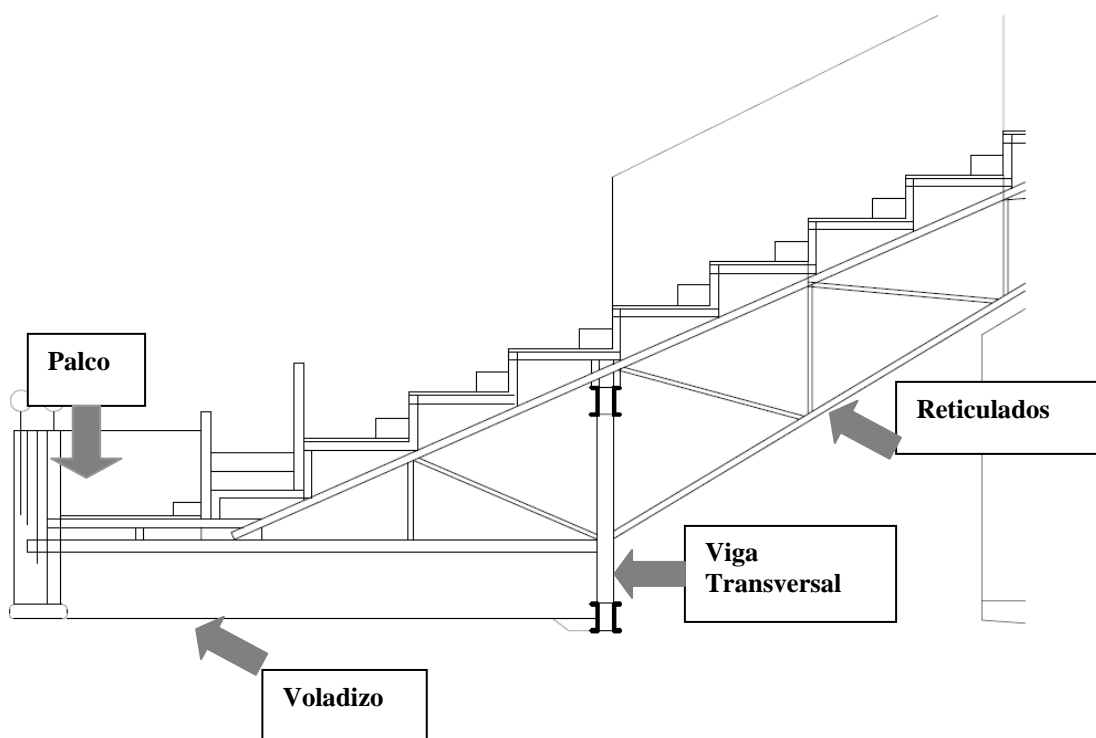


Figura 7. Tipología Estructural

4. ANÁLISIS ESTÁTICO

Para la realización del análisis estático se empleó el Método de los Elementos Finitos (Huebner et al. 1995). Se desarrollaron modelos numéricos espaciales utilizando elementos de tipo barra. Las condiciones de vínculos consideradas fueron apoyos sobre columnas de la viga transversal y empotramientos en un muro portante existente en el fondo del entrepiso para los reticulados. En la Figura 8 se muestran los modelos representativos de la estructura original. Se consideraron las cargas permanentes y sobrecargas de uso correspondientes para el análisis. Los resultados obtenidos permitieron observar la gran flexibilidad del voladizo otorgada, en parte, por su propia concepción y en parte por la flexibilidad de la viga de apoyo que trasladaba su flecha al voladizo incrementado la deflexión propia de éste.

4.1 Resultados del Análisis Estático

Esta etapa del estudio permitió analizar el comportamiento observándose los elementos que presentaban mayores deformaciones con vistas a proyectar los refuerzos necesarios para rigidizar el sistema.

Se obtuvo el desplazamiento máximo vertical en la viga transversal y en el voladizo. Cabe destacar que el desplazamiento máximo del voladizo incluye la de la viga transversal por arrastre de efectos.

Desplazamiento máximo absoluta vertical voladizo= 35,5mm

Desplazamiento máximo vertical transversal= 20,5mm

Desplazamiento máximo relativo del voladizo= 15 mm

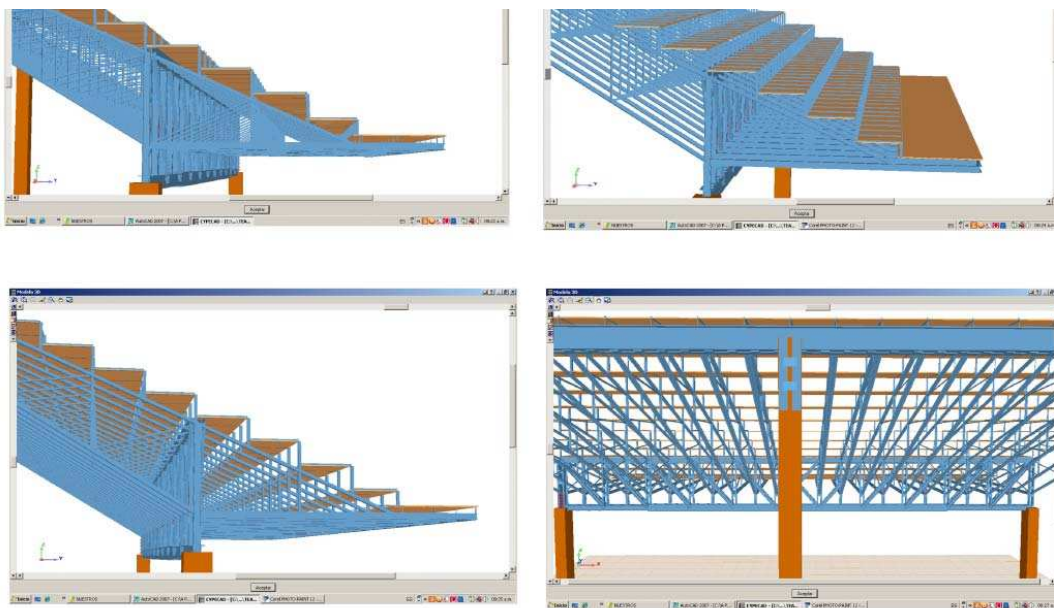


Figura 8. Modelos Analizados

El proyecto de los refuerzos se efectuó considerando el análisis estático que permitió observar el desplazamiento vertical en el voladizo y en la viga transversal que también presentó un desplazamiento lateral.

Para predecir el comportamiento dinámico se consideraron los conceptos teóricos indicados en el punto 5, que permiten determinar de manera aproximada la frecuencia fundamental a partir del desplazamiento máximo obtenido mediante análisis estático.

5 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La teoría de vibraciones permite hallar las características dinámicas de una estructura. La expresión de la frecuencia angular natural está dada por la Ec. 1.

$$\omega = 2\pi f \quad (1)$$

donde f es la frecuencia en Hz y ω se mide en rad/s.

Por un lado, el peso de una estructura está dado por la Ec. 2.

$$P = mg \quad (2)$$

donde P se mide en N, m es la masa en kg y g la aceleración de la gravedad en m/s^2 .

Admitiendo un comportamiento perfectamente elástico de la estructura, ésta se puede simular mediante un modelo masa-resorte, despreciando los efectos de amortiguación y considerando vibraciones libres. La Ec. 3 es la ecuación diferencial que representa el comportamiento de este modelo.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0 \quad (3)$$

Dividendo miembro a miembro por la masa, se obtiene la Ec. 4.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0 \quad (4)$$

donde el factor que acompaña a x es ω^2 , Ec. 5.

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (5)$$

La fuerza elástica P_k es la fuerza restitutiva del modelo masa-resorte, Ec 6.

$$P_k = kx \quad (6)$$

Planteando la igualdad entre la acción estática P y la fuerza elástica P_k , se obtiene la constante del sistema masa-resorte k , Ec. 7:

$$k = \frac{mg}{x} \quad (7)$$

donde x se mide en m. Combinando las Ecs 1, 5 y 7 y despejando la frecuencia natural, se obtiene una expresión que depende de la gravedad y del desplazamiento, Ec 8.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{x}} \quad (8)$$

Considerando el Sistema Internacional de Unidades (S.I.), $g=9,81 \text{ m/s}^2$ 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. 9.

$$f_{[Hz]} = 15,76 \sqrt{\frac{1}{x_{[mm]}}} \quad (9)$$

Se obtiene así una expresión práctica que permite estimar la frecuencia de un elemento estructural a partir de la evaluación del desplazamiento estático (Thomsom, 1981).

6 REFUERZOS PROYECTADOS

De acuerdo a los resultados obtenidos en los Análisis Estáticos previos se proyectaron y ejecutaron los refuerzos indicados en Figuras 9 y 10 en vista y planta respectivamente.

Por un lado se reforzaron los cordones inferior y superior de la viga transversal, Figura 11, con 2 UPN como se indica en las posiciones A y B para limitar la flecha vertical y los refuerzos E y F para limitar el desplazamiento lateral de la viga. Por otro lado se realizaron los refuerzos del voladizo indicados en las posiciones C, D, G, H, I.

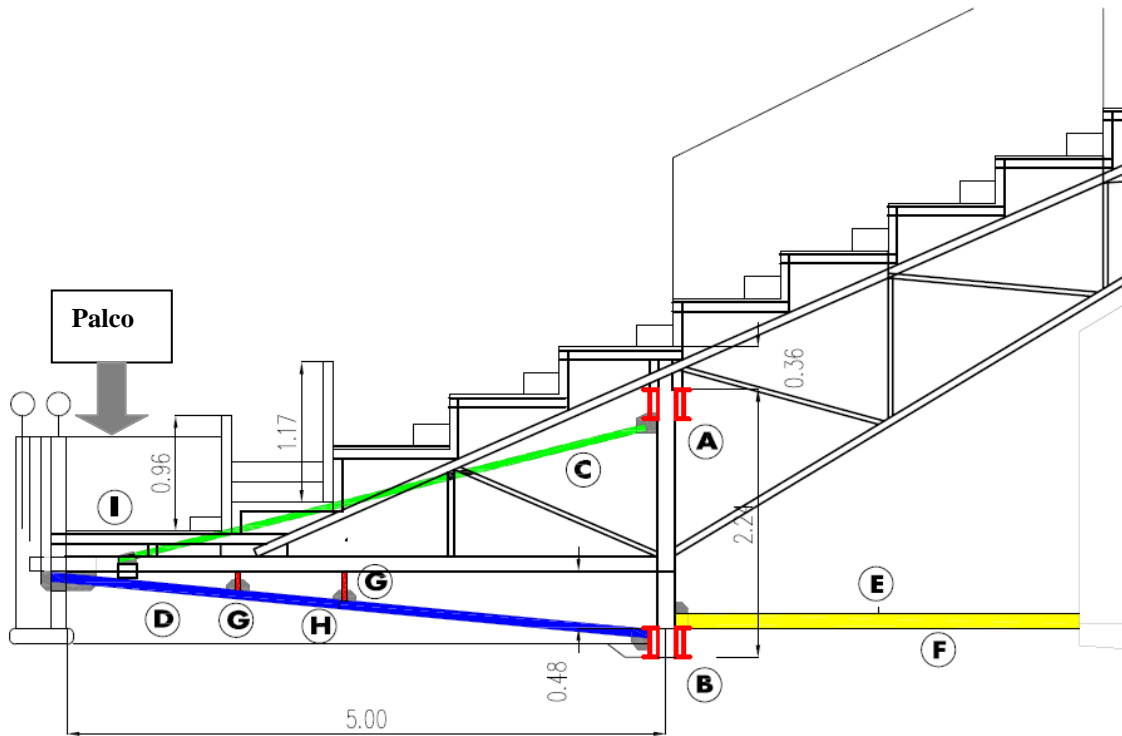


Figura 9. Vista de los Refuerzos proyectados.

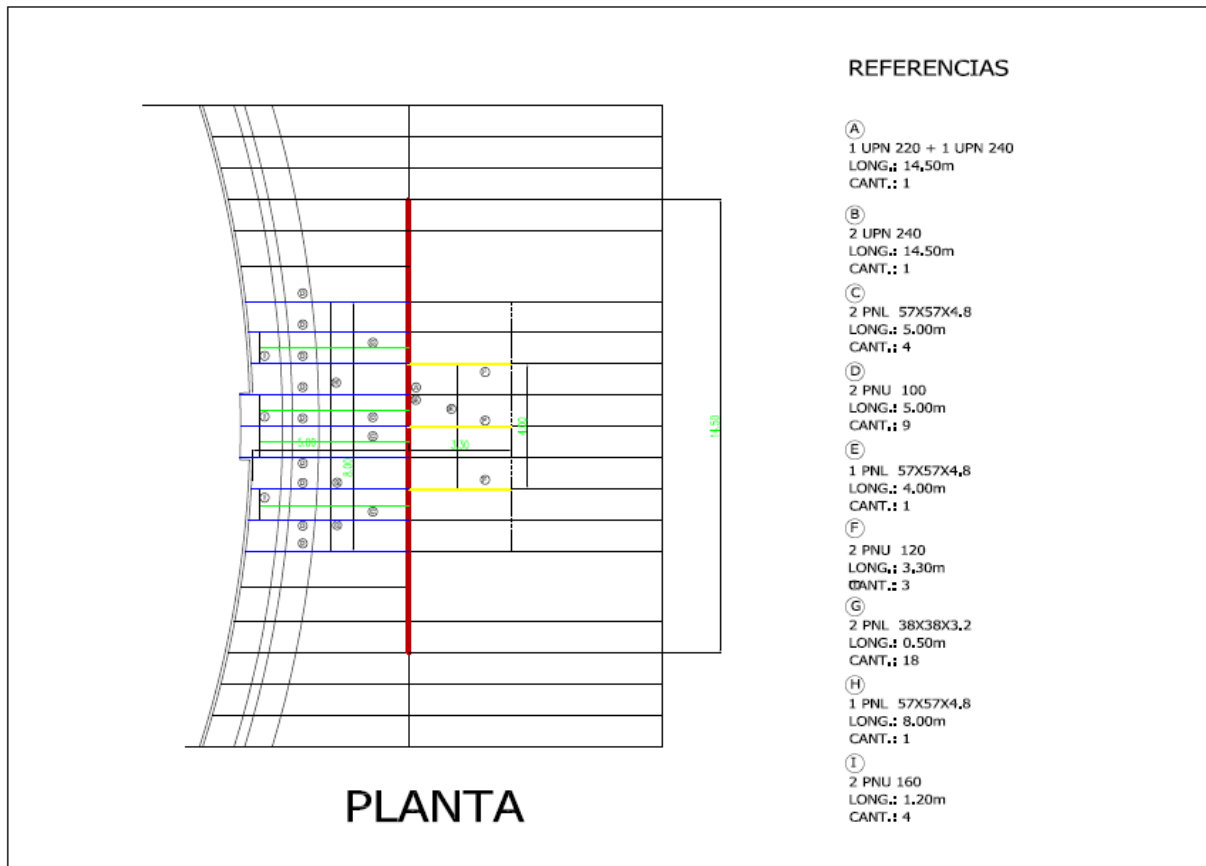


Figura 10. Planta de estructura con ubicación de los refuerzos proyectados (Ver Ref. en Fig. 9)



Figura 11. Viga transversal refuerzo ejecutado.

Se determinaron los desplazamientos estáticos mediante los modelos espaciales descriptos en 4.1 con los refuerzos indicados arrojando los siguientes valores:

Desplazamiento máximo absoluto vertical voladizo= 15,5 mm

Desplazamiento máximo vertical viga transversal= 6,0 mm

Desplazamiento máximo relativo del voladizo= 9,5 mm

7 ESTIMACIÓN TEÓRICA DE LAS FRECUENCIAS

Considerando la Ec. 9 se estimaron las frecuencias de la estructura considerando las flechas estáticas antes y después de la inclusión de los refuerzos proyectados a efectos de determinar la incidencia de los mismos en la frecuencia fundamental.

Tabla 1. Flechas estáticas y frecuencias antes y después de los refuerzos

	ANTES de los refuerzos			DESPUÉS de los refuerzos		
	Teórico	Numérico	Experimental	Teórico	Numérico	Experimental
x (mm)		15			9,5	
f (Hz)	4,069		4	5,11		4,95*

*Corresponde a la medición efectuada en la Segunda Etapa de la Evaluación

Los resultados indicados muestran la buena correlación entre los resultados de frecuencias estimados teóricamente y los experimentales.

8 SEGUNDA ETAPA DE LA EVALUACIÓN

8.1 Mediciones Efectuadas

De acuerdo a lo recomendado, posteriormente a la ejecución de los refuerzos indicados, se realizaron nuevamente las mediciones de las frecuencias y amplitudes vibratorias.

En Figura 12 se indica en corte, un croquis de los puntos de medición sobre la viga transversal en las direcciones X Y Z y sobre el palco en dirección vertical X.

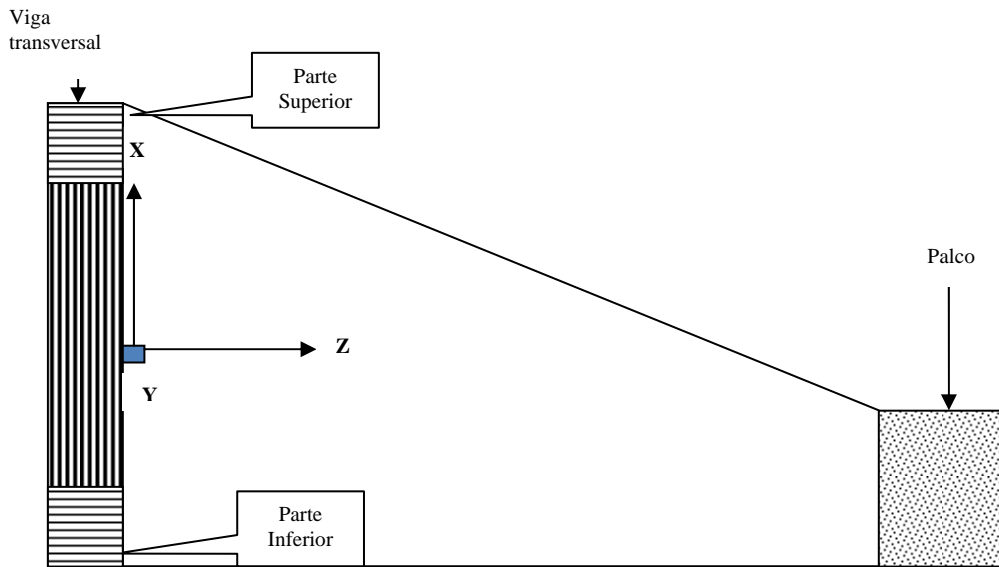


Figura 12. Puntos y direcciones de medición en la viga transversal y el palco

8.1.1 Frecuencias naturales

En la Figura 13 se indican los espectros vibratorios medidos en la parte delantera del palco en dirección X (vertical), en la primera etapa de la evaluación, previo a la rigidización, y en la segunda etapa posterior a la rigidización.

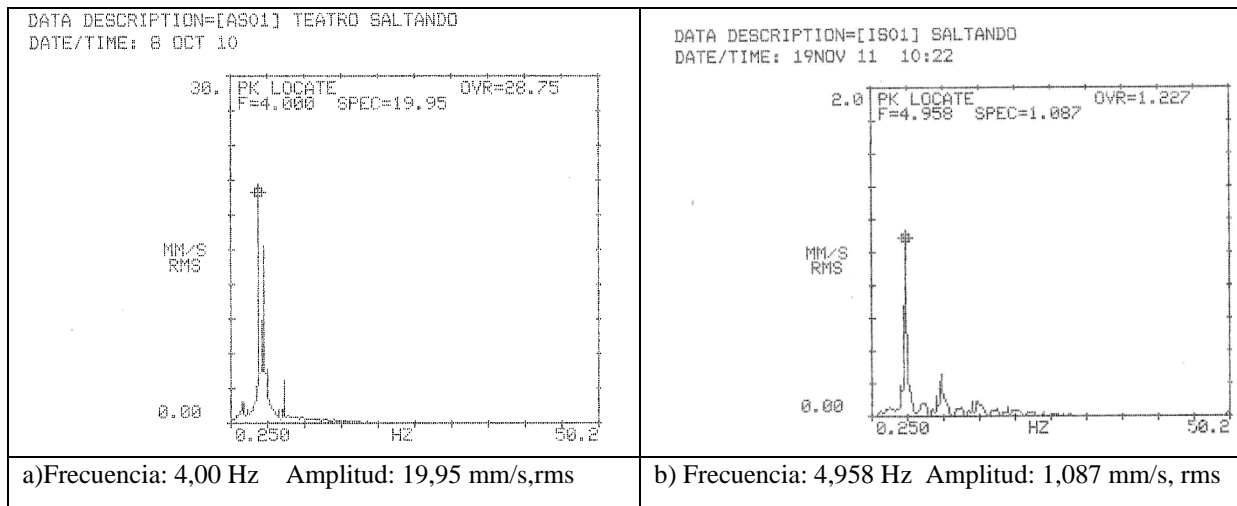


Figura 13. Espectros vibratorios: a) antes de rigidizar; b) después de rigidizar

Puede observarse que luego de la rigidización aportada por los refuerzos proyectados se produjo un incremento superior al 20 % en la frecuencia de oscilación (de 4,00 Hz a 4,95 Hz) y una notable disminución en la amplitud vibratoria de 19,95 mm/s a 1,087 mm/s. Cabe aclarar que, tanto la amplitud vibratoria como la frecuencia fueron obtenidas con gente saltando sobre el mismo.

8.1.2 Amplitudes vibratorias

Las gráficas de Figuras 14 y 15 corresponden a las amplitudes vibratorias medidas de la

parte superior e inferior de la viga transversal con gente saltando. Pueden observarse las distintas amplitudes en el tiempo en las tres direcciones simultáneamente, considerando las direcciones indicadas en Figura 13.

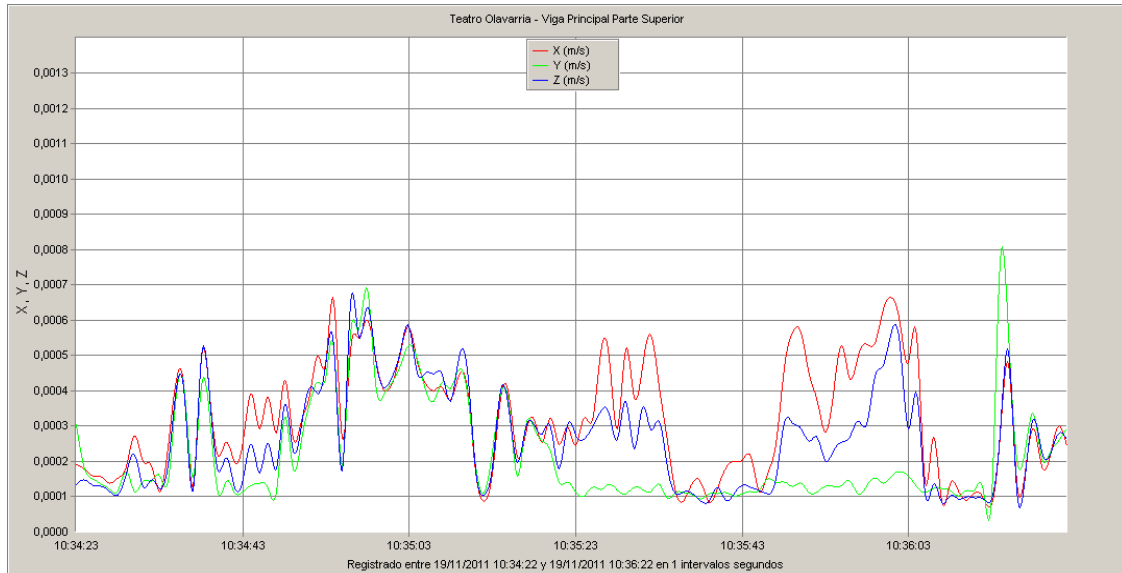


Figura 14. Amplitudes vibratorias en la parte superior de la viga transversal

En la Figura 14 puede destacarse un pico de mayor amplitud para la dirección Y de 0,0008 m/s, rms (equivalente a 0,8 mm/srms)

Luego en las direcciones Z y X los valores no superaron 0,0007 m/s.

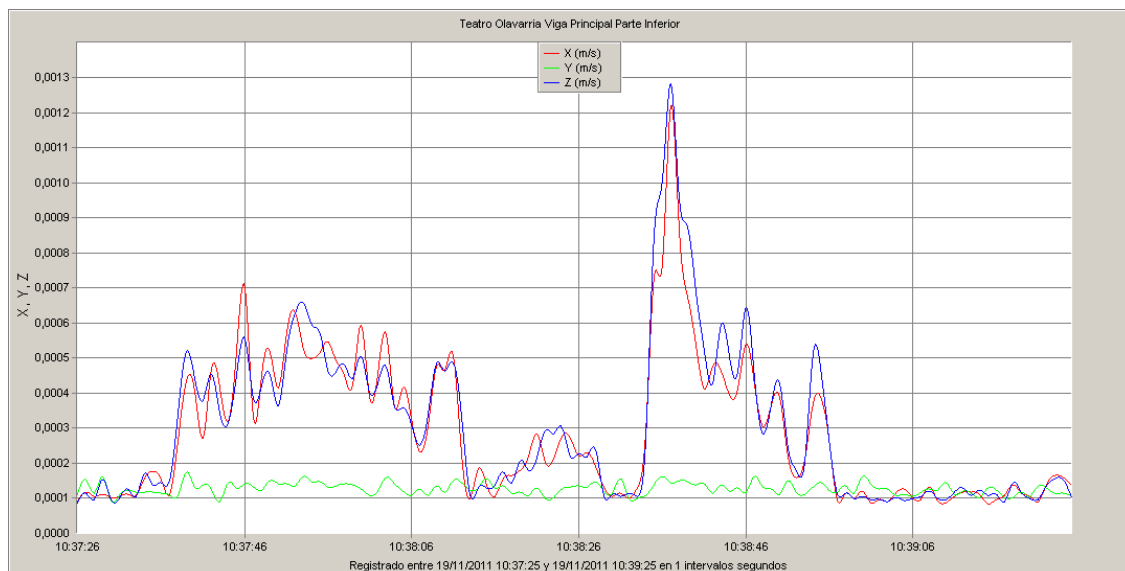


Figura 15. Amplitudes vibratorias en la parte inferior de la viga transversal

La Figura 15 muestra el resultado de la medición correspondiente a la parte inferior de la viga. Puede observarse que las direcciones X y Z son las que poseen mayor amplitud llegando a valores aproximados de 0,0013 m/s (equivalente a 1,3 mm/s).

Para el caso de la dirección Y prácticamente no posee movimiento.

8.2 Evaluación Final

En la Tabla 1 se resumen las frecuencias naturales y velocidades de vibración obtenidas en las dos etapas de estudio motivo del presente trabajo.

Tabla 2. Frecuencias naturales y velocidades de vibración de la estructura

Estructura	Frecuencia Natural [Hz]	Velocidad de Vibración, rms[mm/s]
Sin rigidizar	4,00	19,95
Rigidizada	4,95	1,087

Los resultados indicados en la Tabla 2 muestran la disminución de las velocidades de vibración, encuadrándose, luego de la ejecución de los refuerzos, el comportamiento estructural estudiado dentro de los límites admisibles lo cual indica la efectividad de los refuerzos ejecutados.

9 CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados obtenidos para el caso estudiado permiten destacar la validez de la evaluación del comportamiento estructural a partir de la determinación de las características y respuesta dinámica.

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

Se muestra también la validez predictiva de la expresión teórica utilizada para la evaluación de la frecuencia fundamental a partir de la flecha estática. Esto es de importancia dado la accesibilidad a herramientas que permiten efectuar el análisis estático y no así el análisis dinámico.

Por lo expuesto el análisis dinámico de las estructuras constituye una técnica apropiada para evaluar daño estructural y/o afectación de capacidad portante. Estas técnicas de análisis dinámico constituyen técnicas no destructivas muy prácticas en su aplicación por lo cual se hace recomendable su aplicación, fundamentalmente antes y después de una intervención.

Finalmente, puede indicarse la efectividad de los refuerzos ejecutados dada la disminución de las amplitudes vibratorias mostradas.

REFERENCIAS

- Clough, R. W. and Penzien, J. *Dynamics of Structures*. Second Edition, McGraw-Hill, Inc. 1993.
- Huebner, K. H., Thornton, Earl A. and Byrom, Ted G. *The Finite Element Method for Engineers*, Third Edition, John Wiley and Sons, Inc. 1995.
- Husni, R., Fallas y prevención en las estructuras de hormigón. *Revista Ingeniería Estructural*. Año 15, n. 39. 2007.
- Ngwangwa, H.M., Heyns, P.S., Van Tonder, F., Assessment of structural damage using operational time responses and finite element simulation. *Journal of Sound and Vibration*, 296:23-46, 2006.
- Peralta, M. and Ercoli, 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. 2005.
- Peralta, M., Ercoli, N., Pico, L., Bacchiarello, R., La Malfa, S., Correa, L., Análisis Numérico y Experimental de Vibraciones para la Evaluación del Comportamiento de un Puente.

- Mecánica Computacional*, Vol. XXVII, pp. 2033-2052. 2008.
- Peralta, M., Ercoli, N., Pico, L., La Malfa, S., Utilización de Técnicas Experimentales Dinámicas en la Evaluación de Estructuras. 8° EIPAC, *Encuentro de Investigadores y Profesionales Argentinos de la Construcción*, Mendoza, Argentina. 2009.
- Rades, M., *Vibration Limits for Industrial Buildings. The Shock and Vibration Digest*, v. 26, n. 3. 1994.
- ISO Standard, *Evaluation and Measurement of Vibrations in Buildings*, ISO/TC 108/SC2/Wg3-9.
- ISO Standard, *Evaluation and measurement for vibration in buildings. Part 1: Guide for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings*. BS 7385-1: ISO 4866:1990.
- Richart F.E. Jr., Hall, J.R. Jr and Woods, R.D., *Vibrations of soils and foundations*. Prentice Hall. 1970.
- Salawu, O.S., Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Engineering Structures*, 19(9):718-723, 1997.
- Thomsom, W., *Theory of Vibrations with Applications*. Prentice-Hall Inc., 1981.