

CUANDO EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL ESTÁTICO ES INSUFICIENTE PARA EVALUAR COMPORTAMIENTOS

María H. Peralta^a, Leonel O. Pico^a, Raúl Bacchiarello^a y Valeria Tridone^a

*^aProyecto de investigación “Teorías y modelos para el análisis de estructuras y de mecanismos”,
Facultad de Ingeniería, UNCPBA, Avda. de Valle 5737, 7400 Olavarría, Argentina,
mperalta@fio.unicen.edu.ar, <http://www.fio.unicen.edu.ar>*

Palabras clave: análisis estático, análisis dinámico, alcances, casos de estudio.

Resumen. En el presente trabajo se expone la experiencia realizada por los autores, en el marco de trabajo del grupo de investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, referida a la evaluación de casos de estructuras con diferentes destinos, diseñadas mediante análisis estáticos, que presentan comportamientos indeseables y/o inadmisibles en servicio. El objetivo es, a partir de los casos que se muestran (y otros que han sido motivo de trabajos previos), y el análisis de las causas de las situaciones que se presentan, arribar a conclusiones respecto al tipo de análisis requerido en el diseño para evitar comportamientos inadecuados y que han motivado y motivan intervenciones que dan muestra de la necesidad de, por lo menos, reflexionar y establecer algunas pautas para los diseñadores de estructuras sobre el tema. En el trabajo se presentan estudios de casos en dos líneas de trabajo: 1. Análisis realizados en estructuras que involucran entresijos de gran flexibilidad y/o destinos que implican cargas vivas elevadas y, 2. Análisis de edificio industrial con instalaciones de máquinas que, en servicio, presenta vibraciones no adecuadas. La experiencia indica que hay casos en los que la información que aporta el análisis estático no es suficiente para evaluar el comportamiento real y, por lo tanto, es necesaria la evaluación dinámica para evitar la necesidad de intervenciones posteriores a la ejecución, a partir de los cuales se plantean algunas pautas a efectos de realizar un aporte para los diseñadores.

Keywords: Static Analysis, Dynamic Analysis, scopes, study cases.

Abstract. The experience carried out by the authors is exposed, within the framework of the research group of the Faculty of Engineering of the National University of the Center of the Province of Buenos Aires, referred to the evaluation of cases, designed through static analysis, of structures with different destinations that present undesirable and/or inadmissible behaviors. The objective, from the cases that are shown (and others of previous works), and the analysis of the causes of the situations that are presented, to reach conclusions regarding the type of analysis required in the design to avoid inappropriate behaviors and that have motivated and motivate interventions that show the need to, at least, reflect and establish some guidelines for the designers of structures on the subject. Case studies are presented in two lines of work: 1. Analysis carried out in structures that involve highly flexible mezzanines and/or destinations that involve high live loads and, 2. Analysis of industrial building with machine installations that, in service, present inappropriate vibrations. Experience indicates that there are cases in which the information provided by the static analysis is not sufficient to evaluate the real behavior and, therefore, the dynamic evaluation is necessary to avoid the need for interventions, based on the results, which raise some guidelines for the purpose of making a contribution to designers.

1 INTRODUCCIÓN

En el diseño estructural, para casos corrientes de cargas de uso y tipologías con luces medias, el análisis estático se constituye en la vía adecuada. En el diseño de elementos sometidos a acciones de impacto o dinámicas y/o de grandes luces, la evaluación de la flexibilidad a efectos de evitar respuestas no deseadas para el confort o el servicio adquiere relevancia la evaluación de las características dinámicas. Por otro lado, las acciones y los análisis estáticos y dinámicos deben contemplarse en la evaluación y diseño de edificios industriales. Estas acciones se originan durante el desarrollo de los procesos involucrados según el destino y a la presencia de equipos. Las principales acciones dinámicas se deben a las vibraciones mecánicas originadas por los equipos industriales que pueden afectar al comportamiento estructural (Bathia, 2008; Bowles, 1988; Ercoli et al., 2015).

Los casos de estudio, diseñados mediante análisis estático, que se presentan y motivan el presente trabajo indican la necesidad de la evaluación dinámica en la etapa de diseño para evitar la necesidad de evaluaciones y/o intervenciones en la instancia de servicio por comportamientos indeseados.

Al respecto puede indicarse que las características dinámicas de las estructuras (Clough y Penzien, 1993), pueden usarse como indicadores de flexibilidad y/o del comportamiento bajo excitaciones dinámicas. Esto permite, mediante su evaluación en la etapa de diseño, la predicción de comportamientos inadecuados en servicio y de posible daño estructural progresivo en el tiempo. Para ello, existen normativas y criterios internacionales que establecen pautas que, atendidas en la instancia de proyecto, posibilitan garantizar la vida en servicio de las estructuras, según su destino de uso (Richart, 1970; Macinante, 1984; Rao 2018).

No obstante la prevención que puede significar realizar en la etapa de proyecto el análisis estructural que posibilite predicciones de comportamiento adecuadas, siempre es importante establecer un programa mínimo de conservación, que contemple inspecciones y trabajos de mantenimiento periódicos que permitan sostener en el tiempo asignado de vida útil una prestación acorde a la establecida (Husni, 2007). En esta etapa de servicio 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 para el análisis de la integridad estructural, siendo de mucha utilidad en estructuras que cambian de destino y/o tienen respuestas inadecuadas (Peralta et al., 2005; Peralta et al., 2008, Peralta et al, 2009).

2 CONTEXTO TEÓRICO Y PAUTAS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL

Las características dinámicas propias de las estructuras, modos y frecuencias de vibración, son indicadores del comportamiento estructural dinámico, incluyendo la posible afectación de la capacidad portante. Los parámetros involucrados en las estructuras son su masa m , su rigidez k y su amortiguamiento c , según la Ec. (1).

$$ma + cv + kx = F(t) \quad (1)$$

El comportamiento estructural se caracteriza determinando la respuesta estructural dinámica, obtenida mediante técnicas experimentales (en servicio) y/o numéricas (en proyecto o en servicio) y está dada en términos de aceleraciones y velocidades vibratorias. En estructuras en general, la evaluación se realiza comparando los resultados obtenidos del comportamiento con límites indicados por normativas y criterios internacionales (Richart et al., 1970; Rades, 1994). En este trabajo se adoptaron los criterios indicados establecidos en

normas internacionales (ISO 2372, 1974) que toman los valores expresados en unidades de aceleración, m/s^2 (rms, *root mean square*) y los niveles de velocidad vibratoria en mm/s (rms), relacionados con la frecuencia vibratoria y el daño sobre las estructuras. En la [Tabla 1 \(Rades, 1994\)](#) se muestra otro criterio concordante.

Rango	Velocidad rms (mm/s)	Efecto
I	menor que 2,5	no se produce daño
II	2,5 a 5,0	daño muy improbable
III	5,0 a 10,0	daño poco probable
IV	mayor que 10,0	daño posible; es necesaria la evaluación estructural

Tabla 1: Criterios de vibración.

Se adopta, según la [Tabla 1](#), que no se genera daño estructural cuando la velocidad vibratoria es menor que 10 mm/s (rms). Esto implica un aceptable comportamiento estructural según los criterios de referencia.

En el caso de edificios industriales el criterio de comportamiento adecuado es aquel que contempla el alejamiento de la condición de resonancia para lo cual se deben considerar las características de los equipos instalados.

3 CASOS DE ESTUDIO

3.1 Casos de estructuras que involucran entresijos de gran flexibilidad y/o destinos que implican cargas vivas elevadas

Se presentan cuatro de las estructuras de uso público analizadas a solicitud de la Municipalidad de Olavarría a saber: un gimnasio, dos salones bailables y un teatro.

En dichas estructuras se determinaron los espectros vibratorios que fueron obtenidos con un analizador espectral (FFT, *Fast Fourier Transform*) modelo CSI 1900 que cuenta con un acelerómetro piezoeléctrico modelo CSI 320. Se adoptaron los puntos de medición concordantes con el modo flexional de vibración. Se obtuvieron las amplitudes vibratorias y frecuencias predominantes (FFT) en la dirección flexional vertical. Las mediciones se efectuaron con las estructuras bajo carga estática y bajo la excitación que provocan personas saltando.

3.1.1 Gimnasio

La estructura del gimnasio posee un esquema de losas de hormigón armado apoyadas sobre vigas carteladas y columnas, que originalmente tenía otro destino. La [Figura 1](#) muestra el entresijo del gimnasio y la disposición de los sensores vibratorios. De acuerdo con las inspecciones visuales realizadas, la estructura no presenta signos de deterioros a la vista que justifiquen especial atención en determinado sector al efectuar las mediciones.



Figura 1: Entrepiso de gimnasio y mediciones efectuadas.

3.1.2 Salón bailable 1

Este caso corresponde también a un cambio de destino. La estructura de entrepiso de este salón bailable, que se observa en [Figura 2](#), presenta un esquema diferenciado en dos sectores: una zona recientemente incorporada al edificio, metálica con entablonado de madera, y otra de hormigón armado, correspondiente al edificio original, revestida con cielorraso y piso.



Figura 2: Entrepiso del local bailable 1 y detalle de zona metálica.

3.1.3 Salón bailable 2

En la [Figura 3](#) se muestra la estructura del entrepiso del local bailable formado por vigas de madera con diferentes rigideces por tramos apoyadas sobre paredes de mampostería de ladrillos de antigua data. Se observa que el entrepiso posee un piso tipo flotante. Los tramos extremos poseen refuerzos de perfiles metálicos y el tramo central dispone de chapas que forran la parte inferior de las vigas de madera.



Figura 3: Entrepiso del local bailable 2 y vista de los refuerzos metálicos.

3.1.4 Teatro Municipal

La estructura del teatro analizada está formada por 19 reticulados apoyados sobre un muro trasero y por una viga transversal reticulada de 23 m de luz, con un voladizo (bandeja) que sirve de soporte de los palcos de 5 m de luz. La [Figura 4](#) muestra el esquema estructural y una vista de la bandeja del teatro donde se realizaron las mediciones vibratorias por su alta flexibilidad. Durante un evento musical se percibieron vibraciones por parte de los asistentes que motivaron, por parte del Municipio, solicitar la intervención que se presenta.

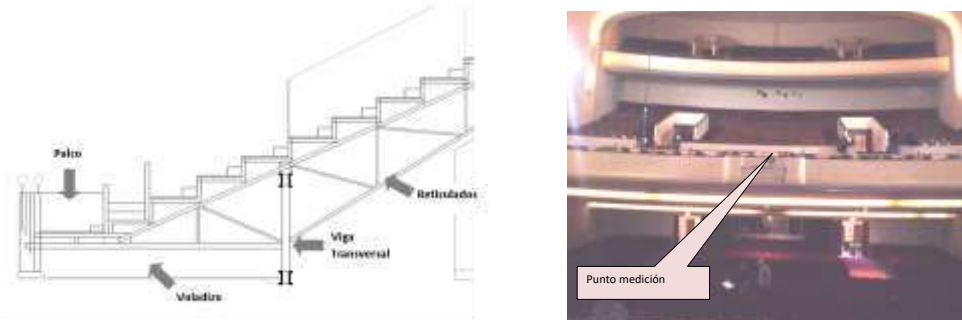


Figura 4: Entrepiso del Teatro Municipal y punto de medición.

3.1.5 Resultados de las mediciones y discusión

4.1 Gimnasio

La [Figura 5 a](#)) muestra los resultados de velocidad rms en mm/s en función de la frecuencia natural en Hz. De esta figura se puede inferir que la frecuencia natural predominante es 12,61 Hz y que la amplitud de velocidad es 0,576 mm/s.

4.2 Salón bailable 1

En la [Figura 5 b](#)) se muestra el espectro de vibraciones medidas. Los resultados indican que, en la zona metálica, la frecuencia predominante es 3,615 Hz y que la amplitud de velocidad máxima es 22,60 mm/s. Por su parte, en las zonas de hormigón armado, la velocidad máxima es menor que el límite de 10 mm/s establecido por Rades ([Tabla 1](#)).

4.3 Salón bailable 2

En la [Figura 5 c](#)) se muestra el espectro de vibraciones medidas. Los resultados medidos indican que la frecuencia predominante es 4,25 Hz y que la amplitud de velocidad máxima es 24,44 mm/s.

4.4 Teatro Municipal

La [Figura 5 d](#)) muestra el espectro vibratorio medido. Los resultados indican que la frecuencia natural es 4 Hz y que la máxima amplitud de velocidad es 19,95 mm/s.

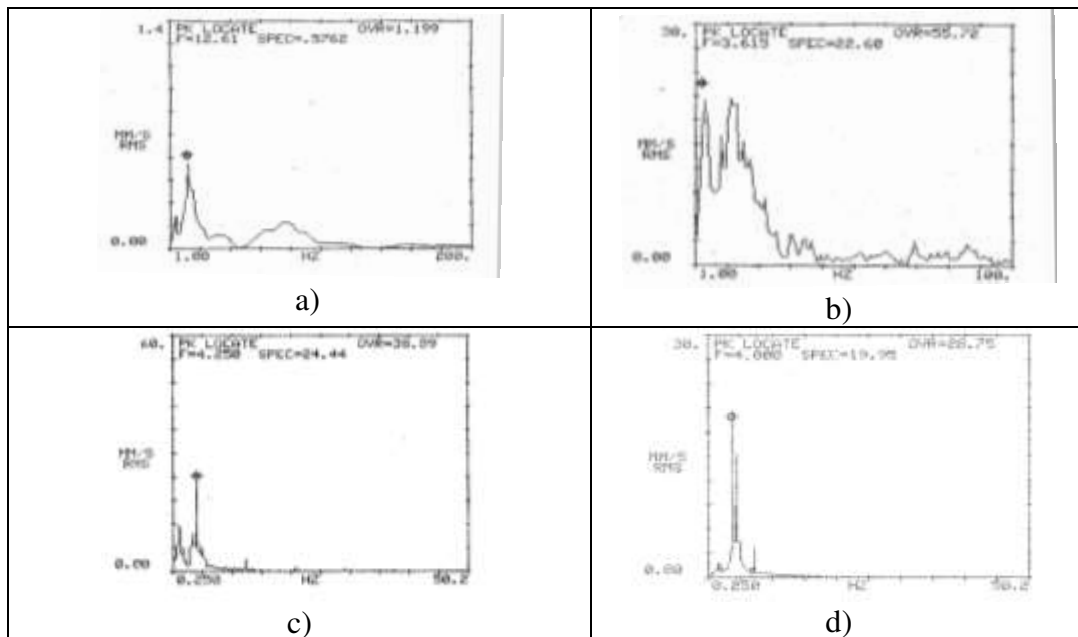


Figura 5: Velocidad en función de la frecuencia natural de: a) Gimnasio; b) Salón bailable 1; c) Salón bailable 2; d) Entrepiso del Teatro Municipal.

La [Tabla 2](#) muestra los resultados de las mediciones dinámicas obtenidas para las cuatro estructuras analizadas. Se muestran los resultados de frecuencia natural y de amplitudes vibratorias máximas de velocidad y el diagnóstico realizados en función del análisis considerando los límites vibratorios de la [Tabla 1](#). En el caso del gimnasio se puede afirmar que no existe deterioro estructural, dado que la frecuencia obtenida es mayor que 6 Hz y que la velocidad máxima es mucho menor que 10 mm/s. En cuanto a los salones bailables 1 y 2 y el Teatro Municipal se puede inferir que las mediciones efectuadas exceden los límites admisibles recomendados.

Estructura	Resultados dinámicos		Diagnóstico del comportamiento y patologías detectadas
	Frecuencia natural (Hz)	Velocidad (mm/s)	
Gimnasio	12,610	0,576	Comportamiento adecuado. No hay daño estructural. No es necesaria una intervención.
Salón bailable 1	3,615	22,60	Comportamiento inadecuado. Alta flexibilidad de la estructura. Existe posibilidad de daño estructural.
Salón bailable 2	4,250	24,44	
Teatro Municipal	4,000	19,95	

Tabla 2. Resultados dinámicos y diagnóstico de las estructuras analizadas.

De acuerdo con estos resultados, se realizaron las siguientes recomendaciones para las estructuras con comportamientos inadecuados:

- Efectuar relevamientos de las estructuras existentes que permitan identificar las secciones y materiales de los elementos que las constituyen.
- Proyectar y ejecutar refuerzos estructurales que permitan rigidizar convenientemente los entresijos para habilitar su uso para destinos que involucren las acciones de características dinámicas como las que corresponden a cada caso.

En base a las recomendaciones indicadas se tomaron las siguientes medidas:

- Salón bailable 1: Se inhabilitó el local para ese uso.

- Salón bailable 2: La zona metálica observada como fuera de los límites permitidos para la seguridad estructural fue restringida en su uso solo como lugar de estar.
- Teatro Municipal: Se realizó el relevamiento y posterior cálculo de refuerzos estructurales que, luego de materializados, permitieron arribar a un comportamiento dentro de los límites de uso seguro para la estructura.

3.2 Casos de estructuras de edificios industriales con instalaciones de máquinas que, en servicio, presentan vibraciones no adecuadas

El grupo de trabajo ha intervenido en varios casos de edificios industriales con problemas vibratorios en servicio. En el presente trabajo se presenta uno de los casos analizados que motivó una intervención.

3.2.1 Caso I: Edificio para trituradora en fábrica de cal

Se trata de la evaluación de las características dinámicas de la estructura existente de edificio de hormigón armado en una fábrica de cal, ubicada en la localidad de Treinta y Tres, Uruguay. Se trata de una estructura que forma parte del proceso de trituración secundaria en fábrica de cal. El edificio alberga una trituradora secundaria y su motor que transmiten vibraciones al nivel +177.500, tal lo indicado en la [Figura 6](#). Cabe aclarar que el diseño original por parte del comitente se realizó considerando solamente análisis estático. A partir de la puesta en marcha de los equipos se detectaron vibraciones en distintos puntos de la estructura fuera del rango considerado admisible de 10 mm/s, rms.



Figura 6: a) Vista general de la estructura durante la etapa de construcción; b) Vista de nivel 177.500 desde abajo

Se realizó el análisis dinámico de la estructura existente, para lo cual se dispuso de información, aportada por el comitente, referida a planos dimensionales y de armaduras y la referida al equipo que produce las vibraciones en dicha estructura. El comitente aportó datos de los equipos los cuales son: frecuencia de operación de eje excéntrico: 464 rpm (7,75 Hz), frecuencias de operación de eje secundario: 1215 rpm (20,25 Hz); peso de trituradora: 157,1 kN (total); 39,3 kN (en 4 puntos de descarga).

3.2.2 Análisis dinámico

Para evaluar el comportamiento dinámico se efectuó el análisis modal (formas modales y frecuencias) de la estructura existente en dos escenarios que se resumen a continuación:

- 1) Estructura existente sin cargas (peso propio solamente). Se analizaron los primeros 20 modos de vibración, algunos de los cuales se indican en la [Figura 7](#).

- 2) Estructura existente con cargas (peso propio + cargas de maquinarias + cargas de operación). Se analizaron los 20 primeros modos de vibración, algunos de los cuales se indican en la **Figura 8**.

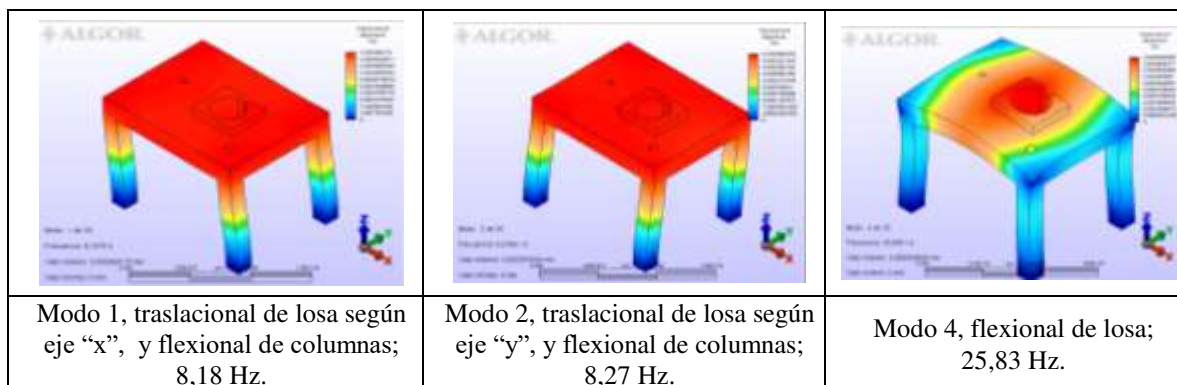


Figura 7. Frecuencias naturales en Hz y tipo de modo, para estructura existente sin cargas.

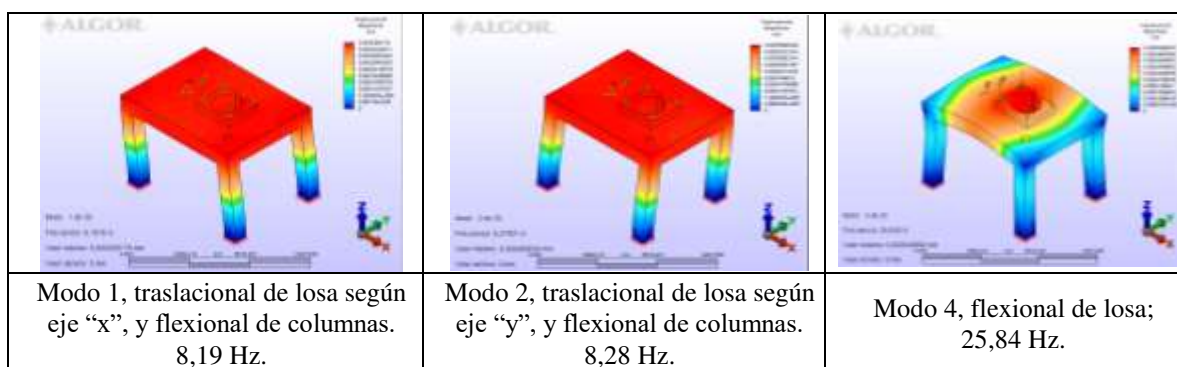


Figura 8. Frecuencias naturales en Hz y tipo de modo, para estructura existente con cargas.

3.2.3 Evaluación de los resultados del comportamiento dinámico

A partir de los resultados obtenidos para la estructura existente, según las **Figuras 7 y 8**, existen valores de frecuencias propias de la estructura, que se encuentran en el rango de operación de los equipos existentes sobre la losa de Nivel 177.500. En particular, son los correspondientes a los modos 1 y 2, traslacionales horizontales según los ejes "x" e "y" respectivamente, con valores de 8,18 y 8,27 Hz, respectivamente. Esta circunstancia implica que el conjunto estructura de hormigón armado + trituradora, en nivel 177.500, se halla en zona resonante. De acuerdo con los aspectos teóricos y las buenas prácticas de la dinámica, es conveniente apartar las frecuencias propias del conjunto estructura-maquinaria en $\pm 20\%$ del rango de operación de la máquina de 464 rpm o 7,75 Hz (6,20 a 9,30 Hz).

Sobre la base de lo expresado, se propone adecuación estructural con refuerzos de las columnas de esquina, con el objetivo de aportar rigidez y modificar la frecuencia de la estructura en los modos traslacionales según los dos ejes "x" e "y".

3.2.4 Propuesta de refuerzos estructurales y análisis dinámico de la estructura reforzada

En la **Figura 9 a)** se observa la vista general de la estructura con los refuerzos propuestos para las columnas de esquina y las dimensiones de las mismas, según detalle de **Figura 9 b)**. Los refuerzos de columnas son de hormigón armado, de sección 0,70 m x 0,50 m, con cuantía

mínima de armadura longitudinal y disposición de estribado mínimo según normativa. Dichos refuerzos deben conectarse a las columnas de esquina existentes (0,70 m x 0,70 m) en todo el perímetro, en toda su altura de piso y hasta el nivel inferior de la viga, como mínimo. La fundación de estos refuerzos se plantea en la platea existente. La calidad del hormigón será de similares características al empleado en la estructura existente, adoptándose para el análisis un H-25.

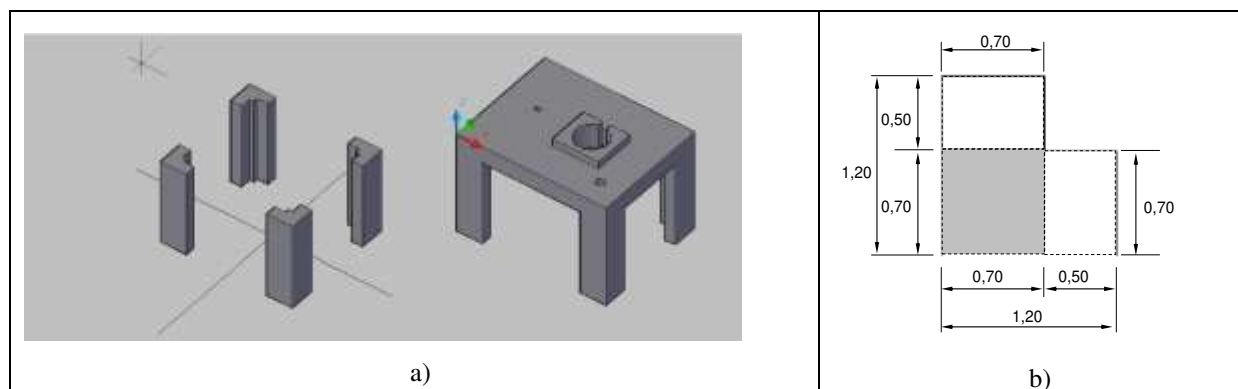


Figura 9: a) Vista general de los refuerzos planteados en las columnas de esquina; b) Refuerzo en las columnas.

Con todo lo anterior, se analizaron los 20 primeros modos de vibración considerando modelos numéricos computacionales lo cual permitió corroborar que la alternativa de adecuación de la estructura planteada permitió el alejamiento de la zona resonante del conjunto estructura-equipamiento contemplando, asimismo, la factibilidad técnica de su realización en el espacio físico disponible. La alternativa de adecuación de la estructura analizada mediante modelos numéricos computacionales *permite el alejamiento de la zona resonante del conjunto estructura-equipamiento*. Los valores de los modos 1 y 2 de 14,5 Hz y 14,89 Hz, respectivamente, *están fuera del intervalo de $\pm 20\%$ de la condición resonante, 6,2 a 9,3 Hz*. Las secciones de los refuerzos propuestos como adecuación estructural verifican las tensiones y deformaciones para el estado en servicio.

La propuesta definitiva de los refuerzos para las columnas de esquina y las dimensiones de las mismas se realizó de acuerdo a lo consensuado con el comitente sobre la base de la factibilidad técnica en función de las restricciones de espacio físico disponible por instalaciones ya existentes.

Los análisis realizados permitieron demostrar que la solución de intervención estructural planteada se presenta como adecuada con el objetivo de disminuir los niveles de vibración existentes actualmente y mejorar la prestación del conjunto estructura-equipamiento. En el comportamiento real de la estructura analizada, con las máquinas en funcionamiento simultáneamente, pueden producirse fenómenos de acople y/o influencia de las condiciones de montaje. Ellos no son contemplados en los modelos numéricos, lo cual puede implicar la necesidad de una evaluación posterior a la adecuación estructural, con mediciones dinámicas in situ en los puntos de interés de la estructura, lo cual puede llevar a ajustes de la adecuación estructural propuesta. Al momento de la presentación de este trabajo, la estructura ya fue intervenida y se corroboró la eficiencia de la propuesta realizada.

4 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos para los casos estudiados permiten destacar la validez de la evaluación dinámica complementaria a la estática del comportamiento estructural a partir de la

determinación de las características y sus respuestas dinámicas. Queda así de manifiesto la importancia y necesidad de la evaluación dinámica de las estructuras en la etapa de diseño para evitar comportamientos inadecuados durante su vida en servicio.

Los análisis efectuados permiten observar la importancia del uso de modelos tridimensionales que permiten una consideración más realista de la distribución de masas, rigideces y combinación de esfuerzos espaciales, permitiendo evaluar modos superiores de vibración que pueden provocar amplificaciones de desplazamientos en condiciones de resonancia.

Particularmente para el caso del edificio industrial analizado, la metodología de análisis utilizada permite plantear la solución de adecuación estructural indicada con el objetivo de disminuir los niveles de vibración existentes actualmente y mejorar la prestación del conjunto estructura-equipamiento.

Sobre la base de los resultados obtenidos y de los criterios consultados se puede afirmar que es recomendable que las estructuras posean rigideces tales que se relacionen con frecuencias naturales mayores que 6 Hz a fin de lograrse comportamientos dinámicos adecuados.

REFERENCIAS

- Bathia, K.G., *Foundations for Industrial Machines Handbook for Practising Engineers*, D-CAD Publishers, New Delhi, 2008.
- Bowles, J. E., *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill, inc. Fourth Edition, 1988.
- Clough, R. W.; Penzien, J. *Dynamics of Structures*. Second Edition, McGraw-Hill, Inc. 1993.
- Ercoli N.L., Peralta M.H., Pico L., *Analysis of the behavior of an industrial building with presence of vibrations due to machinery*, Proceedings of the 1st Pan-American Congress on Computational Mechanics Panacm 2015 and XI Argentine Congress on Computational Mechanics, Buenos Aires, Argentina, 27-29 April 2015.
- Husni, R. *Fallas y prevención en las estructuras de hormigón*. Revista Ingeniería Estructural. Año 15, n. 39. 2007.
- ISO 2372. *International Organization For Standardization. Mechanical Vibration of Machines with Operating Speeds from 10 to 200 rev/s. Basis for Specifying Evaluation Standards*. 1974.
- Macinante, J. A. *Seismic Mountings for Vibration Isolation*. Wiley, New York, 1984.
- Peralta, M.; 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.
- Rao, S. *Mechanical Vibrations*. Sixth Edition, Pearson Education, Prentice Hall, 2018.
- Richart, F. E., Hall, J.R., Woods, R.D., *Vibrations of soils and foundations*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1970.