

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL EN SERVICIO DE EDIFICIOS CON MAQUINARIAS: ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL

María H. Peralta, Leonel O. Pico, Norma L. Ercoli y Raúl Bacchiarello

*Docentes del Área Estructuras, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Av. Del Valle 5737, Olavarría,
Argentina, mperalta@fio.unicen.edu.ar, <http://www.fio.unicen.edu.ar>*

Palabras clave: análisis estructural, vibraciones, evaluación dinámica, adecuación estructural.

Resumen. El comportamiento de estructuras de edificios industriales es complejo debido a la diversidad y naturaleza de los procesos involucrados y a la presencia de equipos y maquinaria que pueden generar vibraciones indeseadas que afectan la integridad estructural. Este trabajo muestra estudios dinámicos numéricos y experimentales realizados sobre dos edificios industriales de fábricas de cemento y de cal. Las estructuras son porticadas y constan de entresijos donde se ubican una trituradora primaria y zarandas vibratorias. Las mediciones experimentales en el estado de servicio detectaron niveles de vibración inadecuados. Se desarrollaron modelos computacionales a partir de los cuales se realizó el análisis dinámico, mostrando que las maquinarias provocan resonancia en su estructura soporte. Para solucionar este problema, se plantearon adecuaciones estructurales con refuerzos, los cuales permitieron disminuir las vibraciones en las estructuras.

1 INTRODUCCIÓN

El diseño de edificios industriales requiere un adecuado conocimiento de su comportamiento estructural frente a acciones estáticas y dinámicas. Estas acciones están asociadas a la diversidad de los procesos involucrados según el destino y a la presencia de equipos, con la finalidad de tener una respuesta estructural adecuada durante la vida en servicio. En particular, 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, Peralta y Pico, 2015), lo cual requiere una visión integral de la interacción del conjunto máquina-estructura, que en algunos casos puede extenderse al suelo de fundación (Ercoli y Gamondi, 2000; Van Koten, 2012; Stuardi, Massa y Giró, 2006).

El origen de las vibraciones mecánicas y sus efectos sobre los componentes estructurales requiere mediciones experimentales para su validación. El diseño adecuado de edificios industriales requiere considerar la respuesta global para el mejoramiento del desempeño estructural (Richart et al., 1970; Rades, 1994).

Existen dos formas posibles para lograr un comportamiento estructural adecuado: por un lado desintonizar la estructura afectada por las vibraciones y por otro, actuar sobre el vínculo máquina-estructura a través del diseño del sistema de aislación, modificando la transmisibilidad (Garrido, Curadelli y Ambrosini, 2013). En todo problema de vibraciones se pueden identificar tres componentes esenciales:

- La maquinaria en funcionamiento y la fuente que origina las vibraciones.
- La estructura de soporte de la maquinaria (piso, fundación, bancada, etc.).
- El montaje antivibratorio interpuesto entre la maquinaria y la estructura.

Las formas de intervención para mitigar problemas de vibraciones dependen de las condiciones de operación y limitaciones constructivas. Las opciones son las siguientes:

- Intervención puramente mecánica, sobre la fuente que produce las vibraciones (máquina o mecanismo) minimizando la generación de fuerzas vibratorias, por ejemplo a través del control del balanceo del rotor.
- Intervención puramente estructural, sobre la estructura afectada por vibraciones. Las opciones posibles con el objetivo de desintonizarla son: modificación de su masa o rigidez para cambiar sus frecuencias naturales, y/o incremento del amortiguamiento para minimizar la amplitud de las oscilaciones (Van Koten, 2012; Stuardi, Massa y Giró, 2006).
- Intervención estructural-mecánica, sobre el vínculo entre máquina y fundación, con aislamiento de vibraciones y modificación de transmisibilidad (Richart et al., 1970).

En este trabajo se muestra el análisis de dos edificios industriales en servicio, emplazados uno en una planta de producción de cal y el otro en una fábrica de cemento, destinados al proceso de clasificación y trituración de piedra caliza por medio de una zaranda y trituradora con tolva. En ambos edificios se realizaron tareas de mantenimiento predictivo-proactivo, con mediciones experimentales de las vibraciones en las estructuras y en las maquinarias instaladas. En las mediciones efectuadas en ambos edificios se detectaron vibraciones inadecuadas, tanto de las maquinarias como en las estructuras sobre la que apoyan los equipos. Se analizaron estas problemáticas teniendo en cuenta las premisas anteriores, para

desarrollar una intervención estructural-mecánica y lograr un comportamiento adecuado. Desde el punto de vista estructural, a través del análisis numérico computacional de las estructuras se obtuvieron los modos propios de vibración y sus frecuencias. Se analizó la respuesta de los entrepisos, formados principalmente por losas de hormigón armado, sobre los que se apoyan las máquinas con sus correspondientes cargas dinámicas. Los resultados obtenidos permitieron evaluar el comportamiento estructural en condiciones de servicio y adoptar decisiones correctivas, de acuerdo con los estándares normativos (Richart et al., 1970; Rades, 1994).

2 MARCO TEÓRICO Y PAUTAS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL

Las características dinámicas, 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 (Clough y Penzien, 1993), según la Ec. (1):

$$ma + cv + kx = F(t). \tag{1}$$

El comportamiento estructural se determina mediante la respuesta estructural dinámica, obtenida mediante técnicas experimentales y/o numéricas dada en términos de aceleraciones y velocidades vibratorias. La evaluación se realiza comparando los resultados obtenidos de las mediciones “in situ” con los límites indicados por normativas y criterios internacionales (Richart et al., 1970; Rades, 1994). En este trabajo se adoptaron los criterios establecidos en normas internacionales (ISO, DIN) que se indican en la Figura 1, según Richart et al. (1970). Se observa que los valores expresados en unidades de aceleración, m/s^2 y los niveles de velocidad vibratoria en mm/s , (rms), están relacionados con la frecuencia vibratoria y el daño sobre las estructuras. En Tabla 1 (Rades, 1994) se muestra otro criterio concordante.

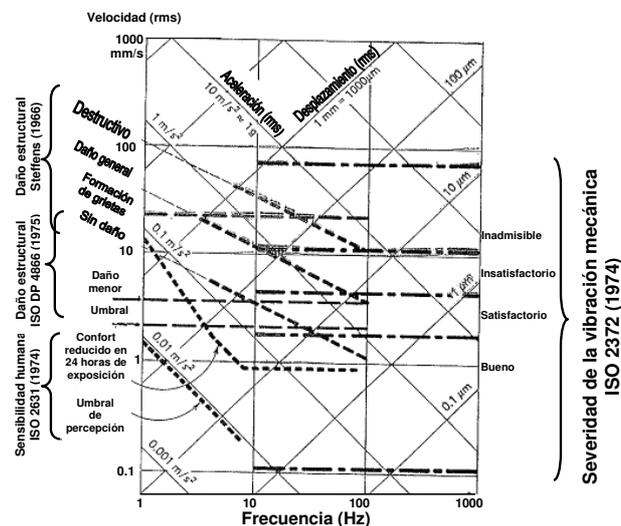


Figura 1: Criterios de evaluación de daño por acciones dinámicas, según Richart et al. (1970).

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 según Rades (1994).

Según la Figura 1 y la Tabla 1, se adoptó como valor aceptable de comportamiento que no genera daño estructural cuando se considera que la velocidad vibratoria es menor que 10 mm/s (rms), la aceleración es menor que 0,1 m/s².

3 DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS ANALIZADOS

3.1 Caso I: Edificio para trituradora en fábrica de cal

Se trata de una estructura existente que forma parte del proceso de trituración primaria en una fábrica de cal. El edificio alberga diversos equipos mecánicos, en particular un alimentador Grizzly que transmite vibraciones al nivel 178.600, expresado en mm respecto al nivel medio del mar. Es una estructura porticada espacialmente de hormigón armado en sus primeros niveles y metálica en los niveles superiores, como se muestra en las Figuras 2, 3a y 3b. A partir de la puesta en marcha de los equipos se detectaron vibraciones en distintos puntos de la estructura fuera del rango admisible de 10 mm/s, rms.



Figura 2: a) Vista general de la estructura durante la etapa de construcción; b) Vista del nivel 178.600 durante la instalación de los equipos de zaranda.

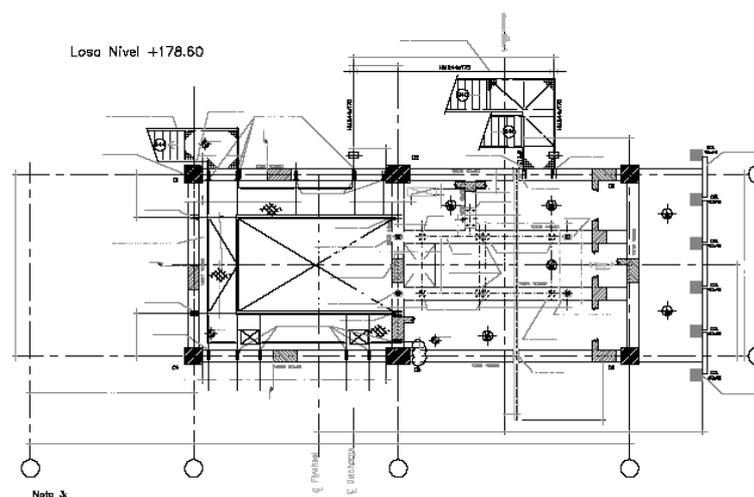


Figura 3a: Plano de planta de la estructura.

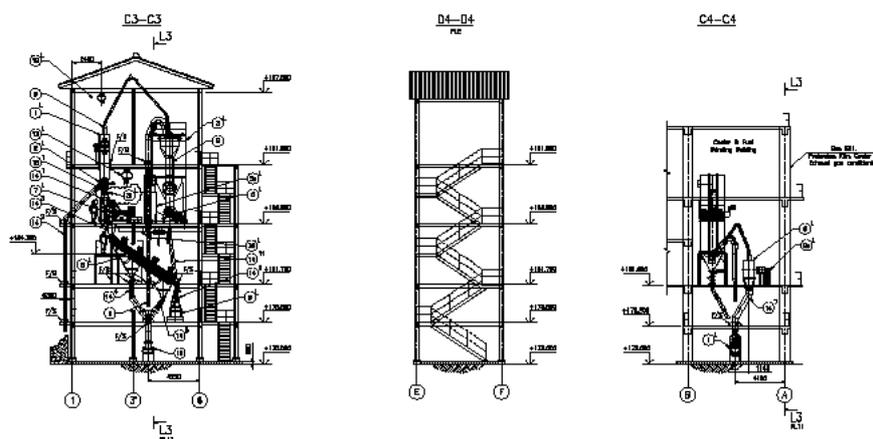


Figura 3b: Planos de planta y de corte de la estructura.

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. Los datos de los equipos son:

Características del motor sobre nivel 178.600:

- Potencia: 37 kW.
- Carga vertical: 4 kN (nodo 5).
- Frecuencia de operación: 1500 rpm (25 Hz).

Características del alimentador acarreador sobre nivel 178.600:

- Cargas estáticas verticales: 35 kN (nodo 2); 6 kN (nodo 3); 41 kN (nodo 4).
- Cargas dinámicas verticales: ± 8 kN (nodo 2); ± 1 kN (nodo 3); ± 11 kN (nodo 4).
- Frecuencia de operación: 800 rpm (13,33 Hz).

3.1.1 Análisis dinámico de la estructura existente

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:

- Estructura existente sin cargas (peso propio solamente). Se analizaron los primeros 20 modos de vibración según se indican en la Tabla 2 y en las Figuras 4 a 6.
- Estructura existente con cargas: peso propio + cargas de maquinarias + cargas sobre acarreador + carga de tolva al 70 %. Se analizaron los 20 primeros modos de vibración según se indican en la Tabla 3 y en las Figuras 7 a 10.

Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	2,78	Flexional global (por columnas) y traslacional horizontal de entrepisos según eje y
2	3,17	Flexional global (por columnas) y traslacional horizontal de entrepisos según eje x
3	3,87	Torsional global según eje z
4	5,48	Flexional de columnas de lado filtro
5	7,05	Flexional de columnas y vigas de lado filtro
6	10,33	Flexional de columnas y vigas de lado filtro
7	14,20	Flexional de entrepisos de niveles 178.600 y 187.700
8	14,70	Flexional de columnas y vigas de lado filtro
9	15,46	Flexional de entrepiso de nivel 187.700
10	16,85	Flexional de columnas de lado tolva, torsional de entrepiso de sector tolva y flexional de entrepiso de nivel 178.600.
11	17,57	Flexional de losa de nivel 178.600
12	18,98	Flexional de losa de nivel 187.700
13	20,67	Flexional de columnas y vigas de lado filtro
14	21,14	Flexional de losa de nivel 187.700
15	26,22	Flexional de columnas y vigas de lado filtro
16	26,79	Flexional de losa de nivel 178.600
17	27,90	Flexional de columnas de lado filtro
18	28,37	Flexional de losas de niveles 178.600 y 187.700 y tolva
19	29,04	Flexional de vigas de nivel 178.600
20	30,31	Flexional de losa de nivel 178.600 y columnas

Tabla 2: Frecuencias naturales en Hz y tipo de modo, para estructura existente sin cargas.

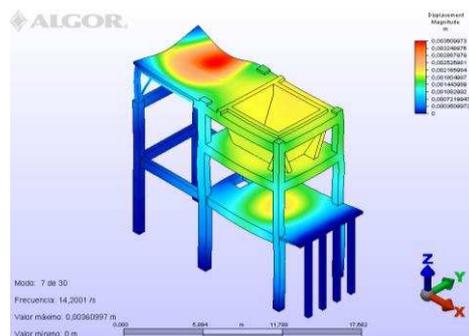


Figura 4: Modo 7, flexional de losas de niveles 178.600 y 187.700; 14,20 Hz.
Estructura existente sin carga.

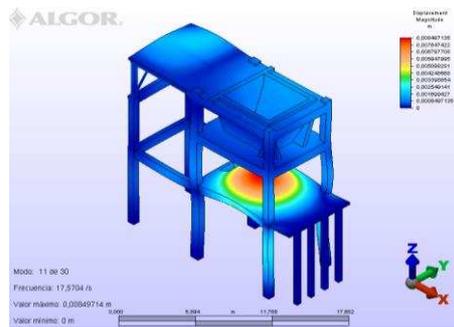


Figura 5: Modo 11, flexional de losa de nivel 178.600; 17,57 Hz. Estructura existente sin carga.

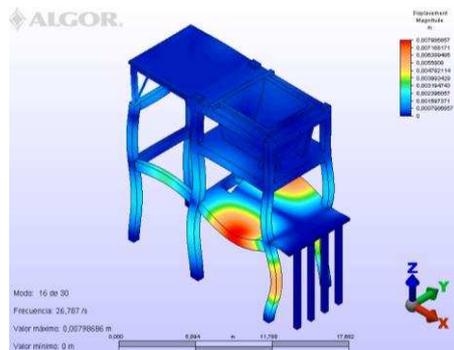


Figura 6. Modo 16, flexional de losa de nivel 178.600; 26,79 Hz. Estructura existente sin carga.

Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	2,78	Flexional global (por columnas) y traslacional horizontal de entresijos según eje y
2	3,17	Flexional global (por columnas) y traslacional horizontal de entresijos según eje x
3	3,87	Torsional global según eje z
4	5,48	Flexional de columnas y vigas de lado filtro
5	7,05	Flexional de columnas y vigas de lado filtro
6	10,33	Flexional de columnas y vigas de lado filtro
7	12,14	Flexional de losa de nivel 178.600 (primer modo)
8	14,07	Flexional de entresijos de niveles 178.600 y 187.700 (primer modo)
9	14,70	Flexional de columnas y vigas de lado filtro
10	15,12	Flexional de losa de nivel 187.700
11	16,59	Flexional de columnas de lado tolva, torsional de entresijo de sector tolva y flexional de entresijos de niveles 178.600 y 187.700
12	18,32	Flexional de losa de nivel 187.700
13	20,66	Flexional de columnas y vigas de lado filtro
14	21,12	Flexional de losa de nivel 187.700
15	23,14	Flexional de losa de nivel 178.600 (segundo modo)
16	26,19	Flexional de columnas y vigas de lado filtro
17	27,32	Flexional de entresijos de niveles 178.600 y 187.700 (segundo modo)
18	27,95	Flexional de columnas y vigas de lado filtro
19	28,67	Flexional de losa de nivel 178.600 y columnas
20	29,09	Flexional de columnas y vigas de lado filtro

Tabla 3: Frecuencias naturales en Hz y tipo de modo, para estructura existente con cargas.

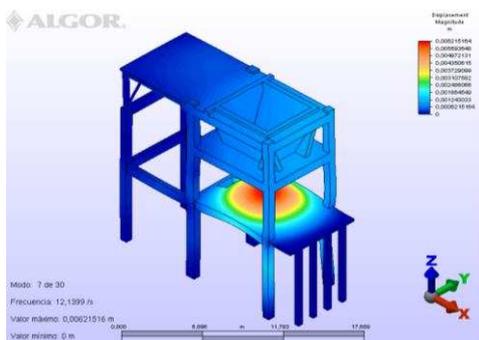


Figura 7: Modo 7, flexional de losa de nivel 178.600 (primer modo); 12,14 Hz. Estructura existente con carga.

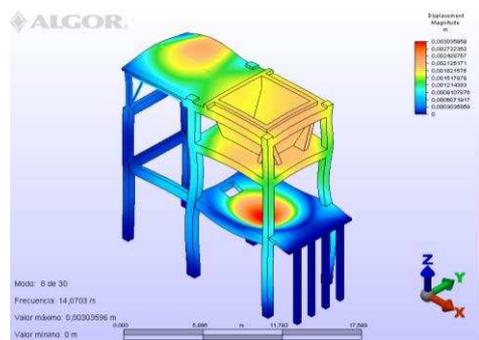


Figura 8: Modo 8, flexional de entresijos de niveles 178.600 y 187.700 (primer modo); 14,07 Hz. Estructura existente con carga.

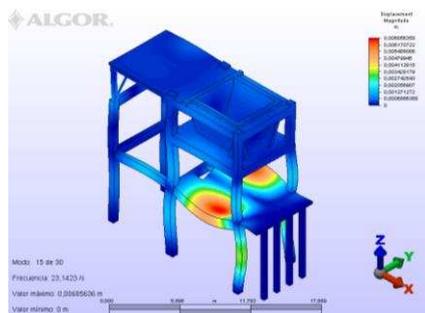


Figura 9. Modo 15, flexional de losa de nivel 178.600 (segundo modo); 23,14 Hz. Estructura existente con carga.

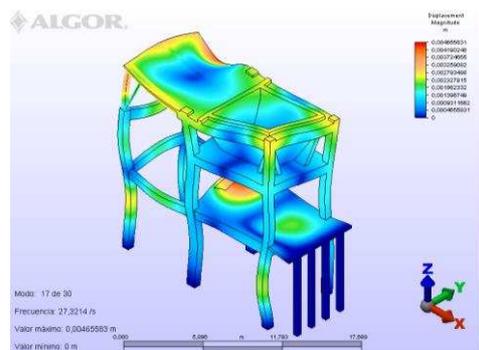


Figura 10. Modo 17, flexional de entresijos de niveles 178.600 y 187.700 (segundo modo); 27,32 Hz. Estructura existente con carga.

3.1.2 Análisis dinámico de la estructura existente

A partir de los resultados obtenidos para la estructura existente, según las Tablas 2 y 3, existen valores de frecuencias propias de las losas de los niveles 187.700 y 178.600 que se encuentran en el rango de operación de los equipos existentes, destacados con negrita y fondo gris en dichas tablas. Ellos corresponden a los modos 7, 11 y 16 de Tabla 2 (Figuras 4 a 6) y a los modos 7, 8, 15 y 17 de Tabla 3 (Figuras 7 a 10). Esta circunstancia implica que el conjunto estructura-equipos alimentador acarreador, en el nivel 178.600, se halla en zona resonante.

Sobre la base de lo expresado, se propuso una adecuación estructural con refuerzos de vigas, columnas y arriostramientos metálicos y su correspondiente análisis dinámico para determinar los modos y frecuencias propias de la estructura con refuerzos. Según las prácticas usuales de la ingeniería, se adoptó que las frecuencias propias del conjunto estructura-maquinaria se alejen preferentemente en $\pm 20\%$ del rango de operación de la máquina de 800 rpm o 13,3 Hz (10 a 16 Hz).

3.1.3 Propuesta de refuerzos estructurales y análisis dinámico

En la Figura 11 se ilustra la vista general de la estructura con los refuerzos propuestos. La propuesta de refuerzos contempló en el nivel 187.700 la colocación de vigas de 800 mm de altura en todo su perímetro. Se plantearon diagonales de refuerzo entre los niveles, a saber IPN 280, según se muestra en la Figura 11. Adicionalmente, se reforzó el nivel de la losa 178.600 con vigas UPN 260, según se detalla en la Figura 12, por debajo de la estructura existente de entrepiso. Se agregaron puntales IPN 500 hasta el nivel de fundación sobre una base de hormigón y se sugirieron diagonales de apoyo y arriostramiento, según lo mostrado en la Figura 13. Con todo lo anterior, se analizaron los 33 primeros modos de vibración, según se indican en la Tabla 4.

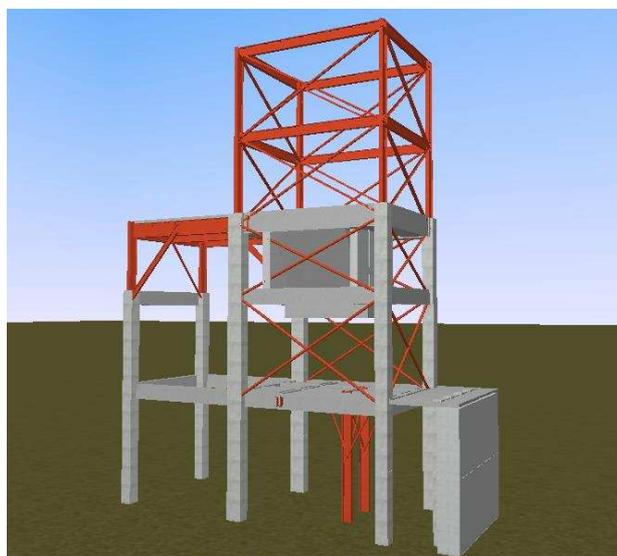


Figura 11: Vista general de los refuerzos planteados.

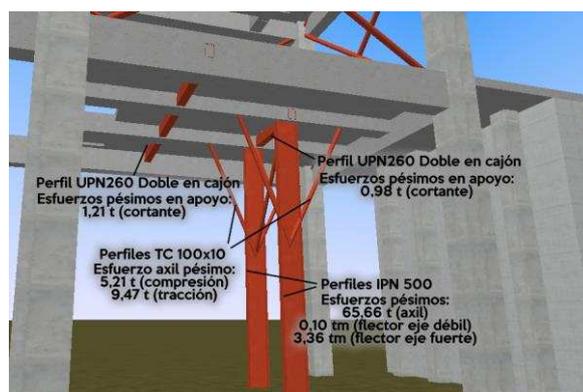


Figura 12: Vista de los refuerzos planteados en el nivel 178.600.

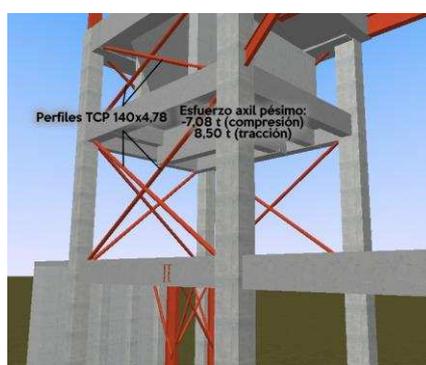


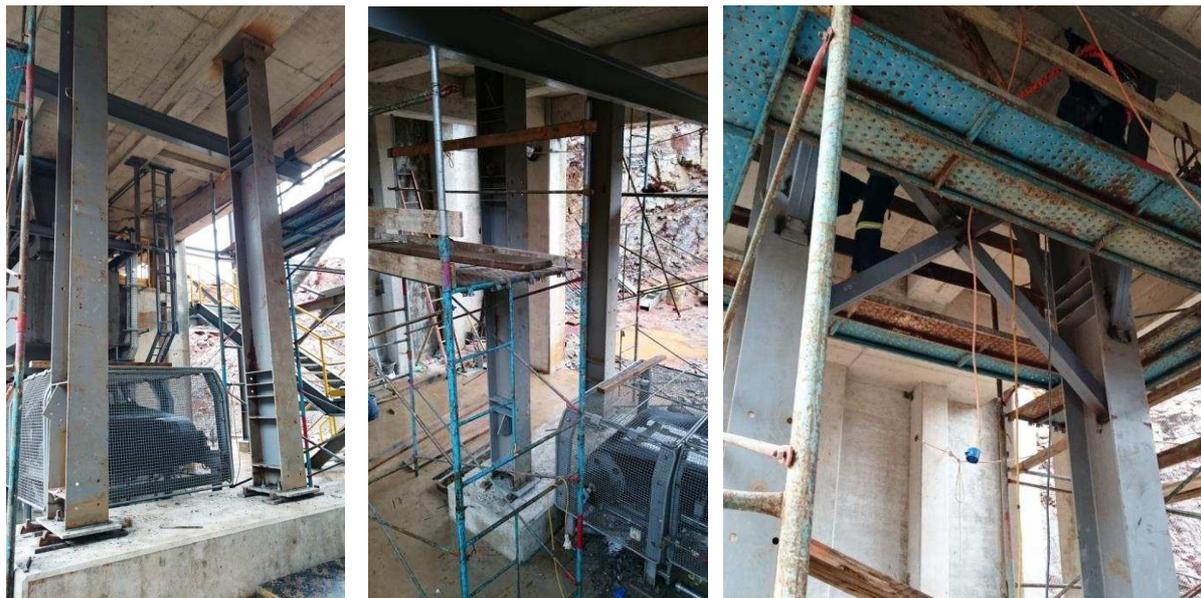
Figura 13: Vista de diagonales de refuerzo.

Modo	Frecuencia (Hz)	Tipo de modo
1	2,93	Flexional global (por columnas) y traslacional horizontal de entrepiso de nivel 187.700 según eje y.
2	4,57	Flexional global (por columnas) y traslacional horizontal de entrepiso de nivel 187.700 según eje x.
3 y 4	4,90	Flexional. Se activan diagonales de rigidización.
5	5,40	Torsional según eje z.
6 y 7	5,82	Flexional. Se activan diagonales de rigidización.
8	6,58	Flexional de columnas y vigas de lado filtro.
9	6,74	Flexional. Se activan diagonales de rigidización.
10	7,68	Flexional de columnas y vigas de lado filtro.
11	8,59	Flexional. Se activan diagonales de rigidización.
12	11,97	Flexional de columnas y vigas de lado filtro.
13	13,66	Flexional de sector tolva.
14	14,41	Flexional de columnas y vigas de lado filtro.
15	15,83	Flexional de columnas y vigas de lado filtro.
16	16,68	Flexional de losa de nivel 187.700 (primer modo).
17	17,96	Flexional global en columnas de sector tolva y columnas de losa 178.600.
18 a 23	19,52	Se activan diagonales de rigidización.
24	19,79	Flexional de losas de niveles 178.600 y 187.700.
25	20,77	Flexional de columnas y vigas de lado filtro.
26	21,37	Flexional de losa de nivel 187.700.
27 a 32	23,12	Se activan diagonales de rigidización.
33	26,13	Flexional de columnas y vigas de lado filtro.

Tabla 4: Frecuencias naturales en Hz y tipo de modo, para estructura rigidizada y cargada.

3.1.4 Análisis de los resultados obtenidos para la estructura con refuerzos propuestos

La alternativa de adecuación de la estructura planteada con modelos numéricos computacionales en el ítem 3.1.3 permite el alejamiento de la zona resonante del conjunto estructura-equipamiento y contempla la factibilidad técnica de su realización en el espacio físico disponible. Las secciones de los refuerzos propuestos como adecuación estructural verifican las tensiones y deformaciones para el estado en servicio, cuyos valores significativos condicionan el posterior diseño de las uniones. En las Figuras 14 a 16 se muestran la materialización de los refuerzos propuestos en la estructura existente



Figuras 14, 15 y 16: Ejecución de refuerzos estructurales.

3.2 Caso II: Edificio para trituradora y zaranda en fábrica de cemento

3.2.1 Descripción de la estructura analizada

La estructura analizada es de hormigón armado porticada espacialmente, construida con hormigón elaborado, según se observa en Figura 17. Se detectaron vibraciones muy importantes en distintos puntos de los entrepisos que sirven de apoyo a los equipos mecánicos.



Figura 17: Vista general de la estructura del edificio de trituradora secundaria y zaranda y su emplazamiento en la fábrica de cemento.

La documentación técnica proporcionada por el comitente se muestra en la Figura 18, donde se observa que las dimensiones en planta son 11,20 m x 7,30 m, con columnas en cada esquina. La altura total del edificio es 19,90 m. La estructura posee una cubierta de hormigón armado con un sector donde descargan los apoyos de una cinta transportadora de alimentación de piedra caliza. El edificio consta de tres niveles de entrepisos con losas llenas de hormigón armado apoyadas sobre vigas, con amplios sectores de aberturas exigidas por los equipos a instalar. El edificio se funda mediante una platea rígida de hormigón armado, de espesor 0,60 m, en el nivel 195.490 mm respecto al nivel medio del mar. El nivel de entrepiso 203.850 corresponde al apoyo de trituradora y tolva, mientras que el nivel 206.850 a la descarga del equipo de zaranda. El diseño y cálculo estructural se realizó según [CIRSOC 201/05](#). Los materiales utilizados son hormigón H-30 y acero ADN 420. En el nivel 206.850, la zaranda se apoya sobre el entrepiso de losa de hormigón armado en cuatro puntos con acciones estáticas y dinámicas de 10,42 kN y de +1,372 kN, respectivamente. Los datos característicos del motor impulsor son: potencia de 30 kW y velocidad de 996 rpm (15 Hz). La trituradora y la tolva se encuentran en el nivel 203.850. La velocidad del motor impulsor es 960 rpm (15 Hz). La tolva se apoya en 4 puntos sobre la losa, con 110 t de peso total de la tolva llena de material.

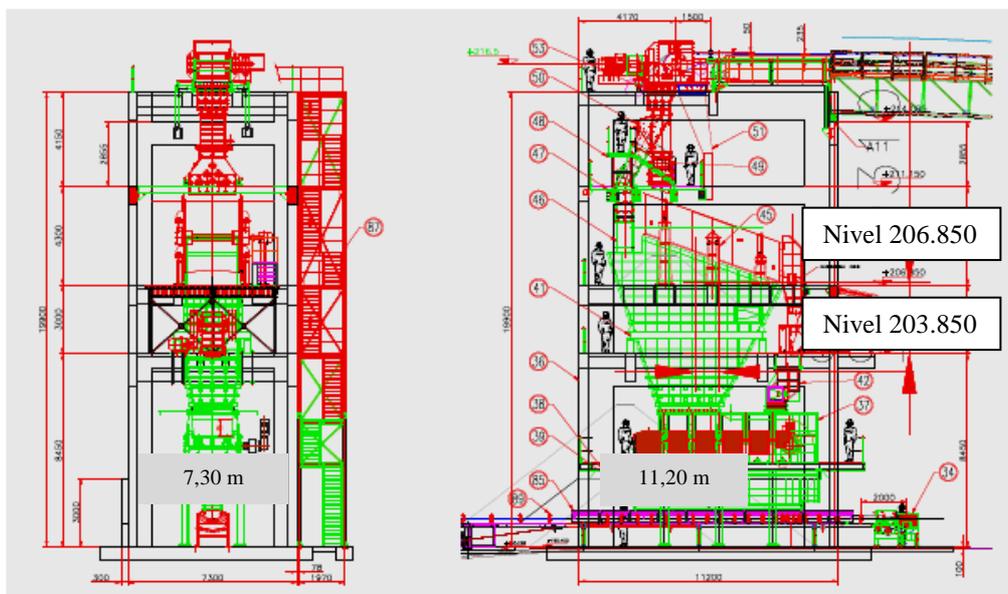


Figura 18: Tipología estructural en altura y ubicación de los sistemas mecánicos.

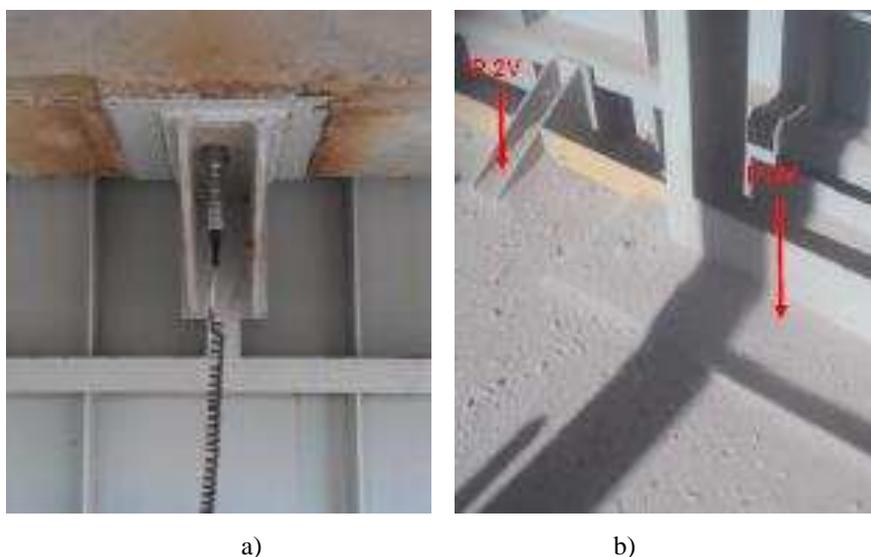
En la Figura 19 puede observarse la instrumentación de las mediciones experimentales. Se realizaron mediciones de velocidades y aceleraciones en diferentes puntos de interés cuyos resultados fueron de valores superiores a los adoptados como admisibles e indicados en el ítem 2 del presente trabajo, según lo mostrado en la Tabla 5 y en la Figuras 20 a), b), c) y d).



Figura 19: Mediciones experimentales de las vibraciones en la estructura.

Punto de medición	Características	Frecuencia (cpm)	Frecuencia (Hz)	Velocidad pico (mm/s)	Velocidad rms (mm/s)
P1V	Posición 1 vertical	960	16	16,8	11,9
P2V	Posición 2 vertical	960	16	14,5	10,2
P3V	Posición 3 vertical	960	16	18,5	13,1
P4V	Posición 4 vertical	960	16	18,7	13,3
P5V	Posición 5 vertical	960	16	18,6	13,2

Tabla 5: Puntos de mediciones y valores experimentales de velocidades vibratorias.

Figura 20: Ubicación de los puntos de mediciones experimentales de las vibraciones.
a) P1V; b) P2V-P3V

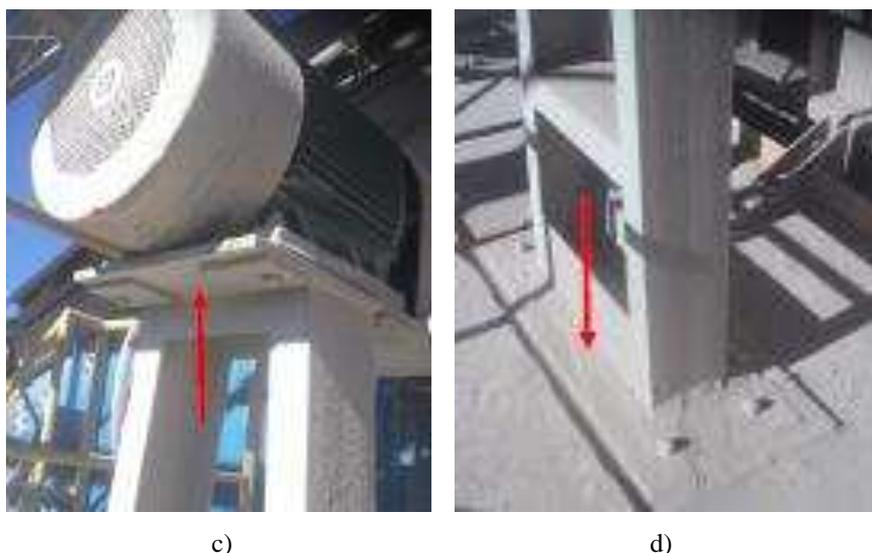


Figura 20: Ubicación de los puntos de mediciones experimentales de las vibraciones.
c) P4V; d) P5V.

3.2.2 Análisis numéricos

Se efectuó el análisis global para evaluar la incidencia de la instalación de los equipos de zaranda y de trituradora en el comportamiento estructural.

Se plantearon modelos numérico-computacionales del edificio de hormigón armado de dimensiones incluyendo la fundación sobre la platea de hormigón de 0,60 m de espesor, apoyada sobre suelo mejorado, con el agregado de clinker, de 4 m de espesor, Figura 21. Se analizó mediante software disponible (Algor Software, 2007), obteniendo las características dinámicas, los modos y las frecuencias de vibración de la estructura del edificio para las siguientes condiciones de carga con probabilidad de ocurrencia durante la vida en servicio operativa del edificio:

- Peso propio del edificio.
- Peso propio del edificio y de las masas de las máquinas y equipos correspondientes a los niveles de emplazamientos.
- Condición b), pero incorporando en el nivel 203.850 la masa correspondiente a la situación de tolva llena.

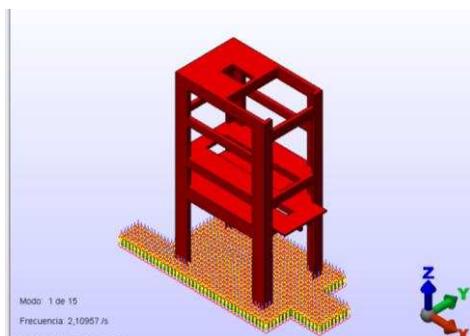


Figura 21. Modelo numérico para el análisis de elementos finitos.

3.3 Resultados obtenidos

En la Tabla 6 se indican los resultados obtenidos en términos de frecuencias naturales para

cada uno de los 12 modos de vibración del edificio para las 3 condiciones analizadas. Se indica además el tipo de modo para cada caso. En la Figura 22 se muestra el primer modo de vibración para las condiciones a), b) y c) consideradas.

Modo	Estructura			Tipo de modo de vibrar
	Sin máquinas (a)	Con máquinas (b)	Con máquinas y tolva llena (c)	
1	2,11	2,11	2,11	Flexional ménsula yz.
2	3,08	3,08	3,08	Flexional ménsula xz.
3	3,77	3,77	3,77	Torsional según z.
4	5,80	5,80	5,80	Flexional yz.
5	8,94	8,94	8,93	Flexional xz.
6	10,62	10,62	10,61	Flexional vigas (215.300 y 211.150).
7	11,20	11,20	11,20	Torsional según z.
8	15,04	13,97	13,14	Flexional vigas xy (211,150).
9	15,77	14,81	14,64	Flexional vigas xy (211,150).
10	16,00	15,62	14,81	Flexional xz vigas, losas y columnas.
11	18,38	15,64	15,63	Flexional xz vigas, losas y columnas.
12	19,44	16,62	15,67	Flexional yz vigas, losas y columnas.

Tabla 6: Frecuencias naturales en Hz.

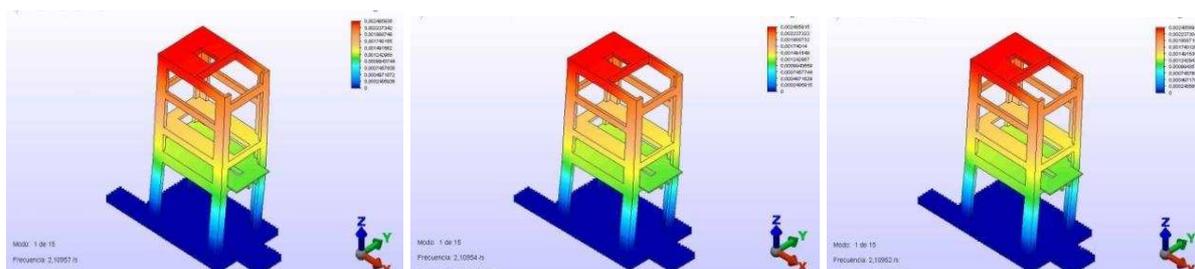


Figura 21: Primer modo de vibración.

3.3.1 Determinación de las características dinámicas de los entresijos en los que se instalarán las máquinas

Se plantearon modelos, para el posterior análisis por el Método de los Elementos Finitos, de los entresijos de hormigón armado de los niveles 203.850 y 206.850, donde se instalarán la trituradora y zaranda respectivamente. Las dimensiones fueron consideradas según planos incluyendo las discontinuidades geométricas correspondientes.

Se efectuó el análisis de las características dinámicas (modos y frecuencias de vibración) de cada entresijo, considerando los primeros 10 modos de vibración para las condiciones:

- Entresijos sin máquinas (para ambos niveles).
- Entresijos con máquinas (para ambos niveles).
- Entresijos con máquinas y tolva llena (para el nivel 203.850).

En Tablas 7 y 8 se indican los resultados obtenidos para los primeros modos de vibración de cada uno de los entresijos para las 3 condiciones analizadas. Se indica además el tipo de modo para cada caso. En Figuras 23 y 24 se muestra el primer modo de vibración para cada entresijo.

Modo	Estructura			Tipo de modo de vibrar
	Sin máquinas (a)	Con máquinas (b)	Con máquinas y tolva llena (c)	
1	22,60	18,56	12,06	Flexional vertical
2	25,71	25,61	15,00	Flexional horizontal
3	29,49	26,38	22,53	Flexional vertical voladizo
4	34,27	29,34	27,20	Flexional vertical voladizo
5	35,71	35,21	27,82	Flexional vertical
6	39,43	36,83	30,47	Flexional vertical voladizo
7	43,03	39,36	33,47	Flexional vertical voladizo

Tabla 7: Frecuencias naturales en el nivel de trituradora y tolva (203.850), en Hz.

Modo	Estructura		Tipo de modo de vibrar
	Sin máquinas (a)	Con máquinas (b)	
1	16,03	12,16	Flexional vertical
2	17,35	13,28	Flexional vertical
3	26,25	25,10	Flexional vertical
4	28,40	25,56	Flexional horizontal
5	33,51	28,05	Flexional vertical
6	35,98	28,25	Flexional vertical
7	37,83	34,75	Flexional vertical

Tabla 8: Frecuencias naturales en nivel de zaranda (206.850), en Hz.

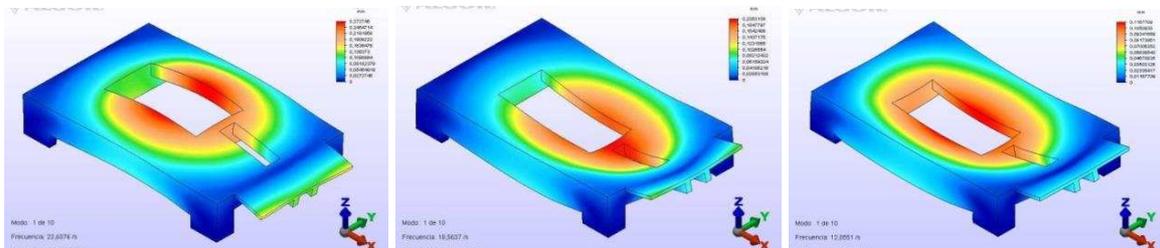


Figura 23: Primer modo de vibración del entpiso de nivel 203.850.

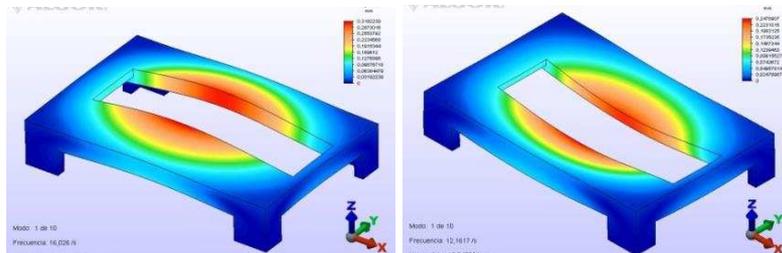


Figura 24. Primer modo de vibración del entpiso de nivel 206.850.

3.3.2 Evaluación de las respuestas en los niveles 203.850 y 206.850

Se consideraron los mismos modelos geométricos para el análisis que los utilizados en el punto anterior. En los puntos de aplicación de las maquinarias se aplicó la acción correspondiente con los datos disponibles de la carga dinámica en función de la frecuencia.

Se efectuó el análisis correspondiente evaluando deformaciones y tensiones.

En Figuras 25 y 26 se muestran los desplazamientos en mm y las tensiones máximas principales en N/mm^2 para los niveles 203.850 y 206.850, respectivamente.

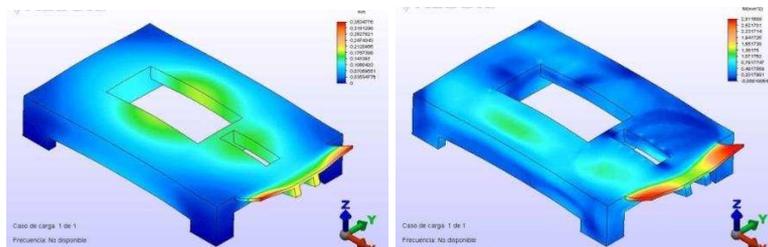


Figura 25: Desplazamientos y tensiones del nivel 203.850.

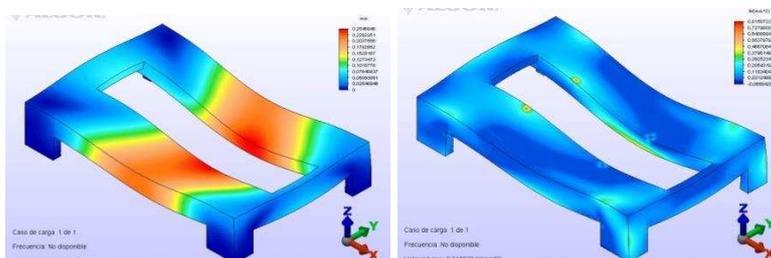


Figura 26: Desplazamientos y tensiones del nivel 206.850.

3.3.3 Análisis de resultados

La estructura global presentó algunos modos de vibración con frecuencias naturales cercanas a la frecuencia de la excitación de las máquinas. En el caso particular de los entresijos analizados (niveles 203.850 y 206.850), los primeros modos presentaron frecuencias con valores cercanos a las frecuencias de la excitación (trituradora y zaranda). Esta situación permite suponer que pueden producirse amplitudes vibratorias por encima de los valores admisibles en los criterios internacionales (Richart et al., 1970; Rades, 1994). En la evaluación de la respuesta de las losas que presentaron importantes discontinuidades geométricas (aberturas) y zonas de alta flexibilidad (voladizos) se observaron valores que indican comportamientos dinámicos próximos a los límites admisibles.

4 CONCLUSIONES

La medición y el análisis de vibraciones, como técnica dinámica no destructiva, utilizada en conjunto con técnicas numéricas con instrumentación de modelos computacionales, constituyen una herramienta de interés para evaluar daño estructural y/o afectación de la capacidad portante de las estructuras durante su vida en servicio. Estos métodos de análisis dinámico constituyen técnicas muy prácticas en su aplicación, fundamentalmente antes y después de una intervención.

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

Particularmente para el Caso I 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 estructural-equipamiento.

En el Caso II evaluado los resultados obtenidos del análisis numérico permiten inferir que podrían presentarse escenarios con amplificación de desplazamientos y velocidades no adecuados, en concordancia con los valores experimentales medidos en la estructura en servicio. A partir de los resultados de los estudios analíticos y de las mediciones in situ se pudieron analizar las condiciones de comportamiento estructural fuera de los límites establecidos por las normativas internacionales, y recomendar la adecuación de la estructura y/o la colocación de montajes anti vibratorios para obtener un comportamiento estructural adecuado en servicio.

Cabe mencionar que en el comportamiento real de las estructuras analizadas, 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 o incorporación de montajes antivibratorios con mediciones dinámicas in situ en los puntos de interés de la estructura. Esto posibilitará realizar posteriores ajustes a las adecuaciones propuestas.

REFERENCES

- Algor Software V.20.3, *Finite Element Analysis Software*, 2007.
- 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.
- CIRSOC 201-2005, *Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón*, 2005.
- Clough, R. W., Penzien, J., *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, Inc. Second Edition, 1993.
- Ercoli N., Gamondi L., Respuesta dinámica de fundaciones de máquinas con formas arbitrarias, *Actas del XV Congreso de Ingeniería Geotécnica, CAMSIG*, Buenos Aires, octubre de 2000.
- 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.
- Garrido, H., Curadelli, O., Ambrosini, D., Equivalencia entre sistemas de control de vibraciones pasivos y semiactivos, *Mecánica Computacional*, Vol. XXXII, pp. 2153-2174, 2013.
- Rades, M., Vibration Limits for Industrial Buildings, *The Shock and Vibration Digest*, 26:3, 1994.
- Richart, F. E., Hall, J.R., Woods, R.D., *Vibrations of soils and foundations*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1970.
- Stuardi, J.E., Massa, J.C., Giró, J.F., Modificación estructural de edificios para evitar problemas vibratorios, *Mecánica Computacional*, Vol. XXV, pp. 1615-1631, 2006.
- Van Koten, H., Vibrations of machine foundations and surrounding soil, *Heron Journal*, 57:1:1-26, 2012.