

Evaluación de estructura sometida a vibraciones de máquinas

Ing. Norma Luján Ercoli¹

Mg. Ing. María Haydee Peralta²

Dr. Ing. Leonel Osvaldo Pico³

RESUMEN

El diseño de estructuras de edificios industriales es complejo por la presencia de equipos que generan vibraciones. A menudo, es necesario evaluar edificios existentes que, en condiciones de servicio, presentan respuestas vibratorias indeseadas.

El abordaje requiere un análisis integral para cuantificar los niveles vibratorios y justificar la toma de decisiones con intervenciones en la estructura y/o máquina, tendientes a amortiguar los efectos de los niveles vibratorios detectados. El presente trabajo corresponde a tareas de asesoramiento y transferencia al medio productivo de la zona de Olavarría. Se evalúa un edificio de una planta cementera, con equipos de zaranda y trituradora instalados, que presenta vibraciones indeseadas.

Palabras claves: Estructuras, Máquinas, Vibraciones, Análisis Dinámico

ABSTRACT

The design of industrial buildings structures is a complex process due to the existence of vibrating machinery. Sometimes there is a need to evaluate existing structures which presents inappropriate vibrations under service conditions.

The evaluation requires a full analysis to quantify the vibration levels and justify the decisions to be taken in order to reduce the effects of vibrations measured. This present paper addresses the evaluation and following advices related to the undesired vibrations detected in a building supporting a crusher and a vibrating screen located in a cement plant facilities in Olavarría, Buenos Aires.

¹Facultad de Ingeniería.

Email: nercoli@fio.unicen.edu.ar

²Facultad de Ingeniería.

Email: mperalta@fio.unicen.edu.ar

³Facultad de Ingeniería.

Email: lpico@fio.unicen.edu.ar

Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

INTRODUCCION

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 [1], [2], lo cual requiere una visión integral de la interacción del conjunto máquina-estructura, que en algunos casos puede extenderse al suelo de fundación [3], [4], [5].

El origen de las vibraciones mecánicas y sus efectos sobre los componentes estructu-

rales merece ser analizado y requiere de mediciones experimentales para su validación. Para el diseño adecuado de edificios industriales debe considerarse la respuesta global [6], [7].

Existen dos formas para lograr un comportamiento estructural adecuado: por un lado desintonizar la estructura afectada por vibraciones y por otro, actuar sobre el vínculo máquina-estructura, a través del diseño del sistema de aislación, modificando la transmisibilidad [8].

En todo problema de vibraciones se pueden identificar tres componentes esenciales: 1) La maquinaria en funcionamiento y la fuente que origina las vibraciones. 2) La estructura de soporte de la maquinaria (piso, fundación, bancada, etc.). 3) 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 [4] y [5]
- Intervención estructural-mecánica, sobre el vínculo entre máquina y fundación, con aislamiento de vibraciones y modificación de transmisibilidad [6]

En este trabajo se muestra el análisis de un edificio industrial en servicio, emplazado en una planta de producción de cemento, destinado al proceso de clasificación y trituración de piedra caliza por medio de una zaranda y trituradora con tolva. Durante las tareas de mantenimiento predictivo-proactivo, con mediciones experimentales de las vibraciones en la estructura y de las maquinarias, se de-

tectaron niveles de vibraciones inadecuadas, tanto de las maquinarias como en las estructuras sobre las 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 la estructura se obtuvieron los modos propios de vibración y sus frecuencias. Se analizó la respuesta de los entresijos, 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 internacionales. [6] y [7].

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 [9], según la Ecuación (1):

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

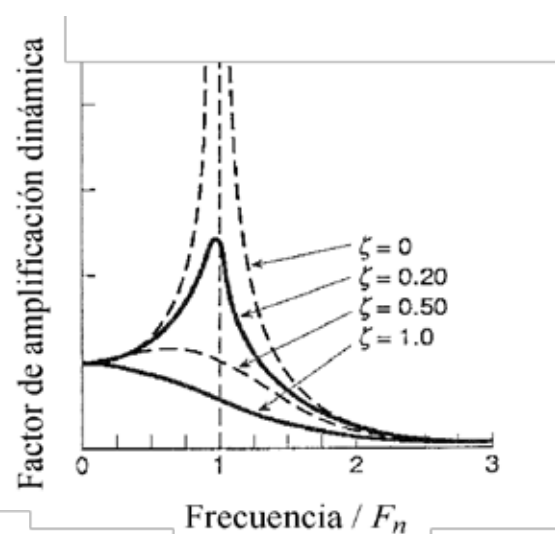


Figura 1: Factor de amplificación dinámica en función de la frecuencia fundamental.

En la Figura 1 puede apreciarse el importante rol del amortiguamiento y de la relación frecuencia de la excitación y frecuencia fundamental en la respuesta a través de la variación del Factor de Amplificación Dinámica.

El comportamiento estructural se evalúa mediante la respuesta estructural dinámica, obtenida mediante técnicas experimentales y/o numéricas, y 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. En este trabajo se adoptaron los criterios establecidos en normas internacionales (ISO, DIN) que se indican en la Figura 2, [6]. 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 que dichos niveles pueden ocasionar sobre las estructuras. La Tabla 1, [7], muestra otro criterio concordante con lo indicado en Figura 2.

Tabla 1: Criterios de vibración [7].

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

Según la Figura 2 y la Tabla 1, se adoptó como valor aceptable de comportamiento que no genera daño estructural cuando la velocidad vibratoria es menor que 10 mm/s (rms) y/o la aceleración es menor que $0,1 m/s^2$.

APLICACIÓN A EDIFICIO INDUSTRIAL EN SERVICIO CON EQUIPOS DE ZARANDA Y TRITURADORA INSTALADOS

La estructura analizada es de hormigón armado porticada espacialmente, construida con hormigón elaborado, según se observa en Figura 3. Se detectaron vibraciones muy importantes en distintos puntos de los entrepisos que sirven de apoyo a los equipos mecánicos.

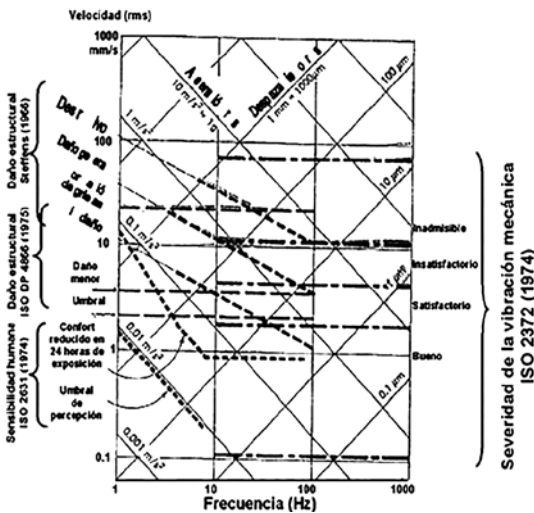


Figura 2: Criterios de evaluación de daño por acciones dinámicas [6].



Figura 3: Vista general de la estructura del edificio

Según la documentación técnica proporcionada por el comitente, Figura 4, 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.

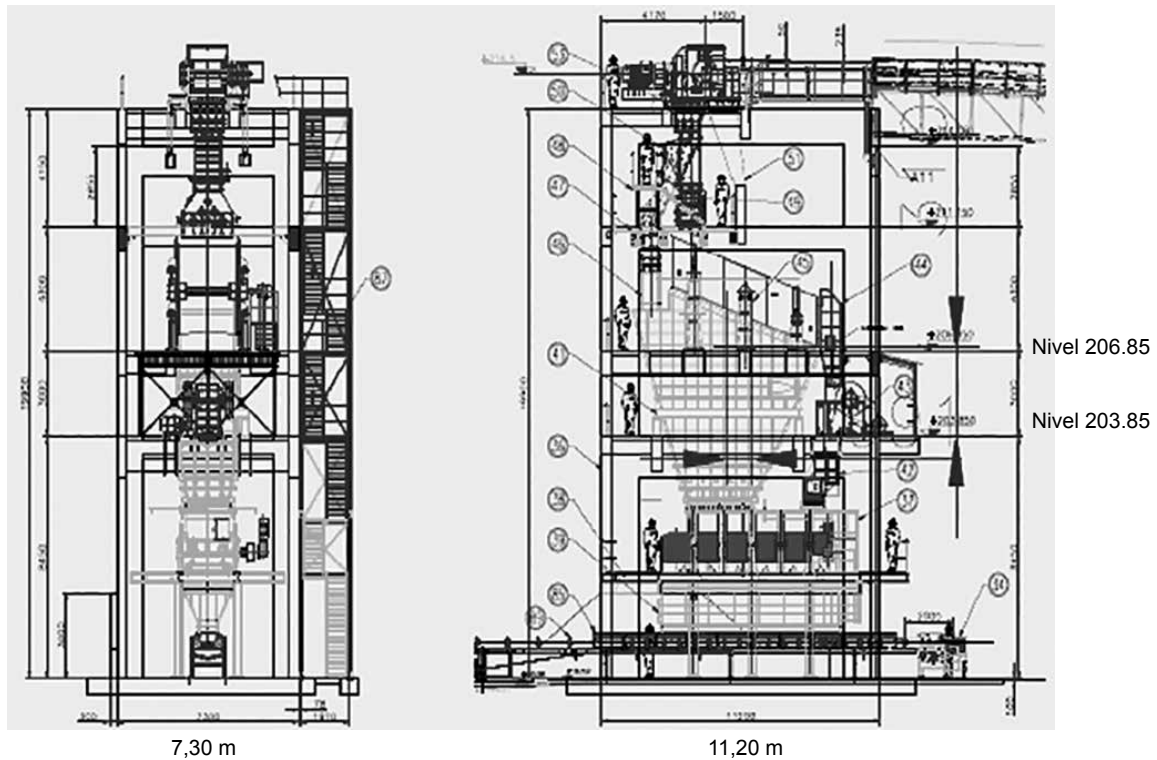


Figura 4: Tipología estructural en altura y ubicación de los sistemas mecánicos.

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 entresijos con losas llenas de hormigón armado apoyadas sobre vigas, con amplios sectores de aberturas exigidos 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 entresijo 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 [10]. Los materiales utilizados son hormigón H-30 y acero ADN 420. En el nivel 206.850, la zaranda se apoya sobre el entresijo 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.

En la Figura 5 puede observarse la instrumentación de las mediciones experimentales utilizando técnicas dinámicas no destructivas. Se realizaron mediciones de velocidades y aceleraciones en diferentes puntos de interés cuyos resultados fueron de valores superiores a los adoptados como admisibles en Figura 2 del presente trabajo y según lo mostrado en la Tabla 2 y en la Figura 5.

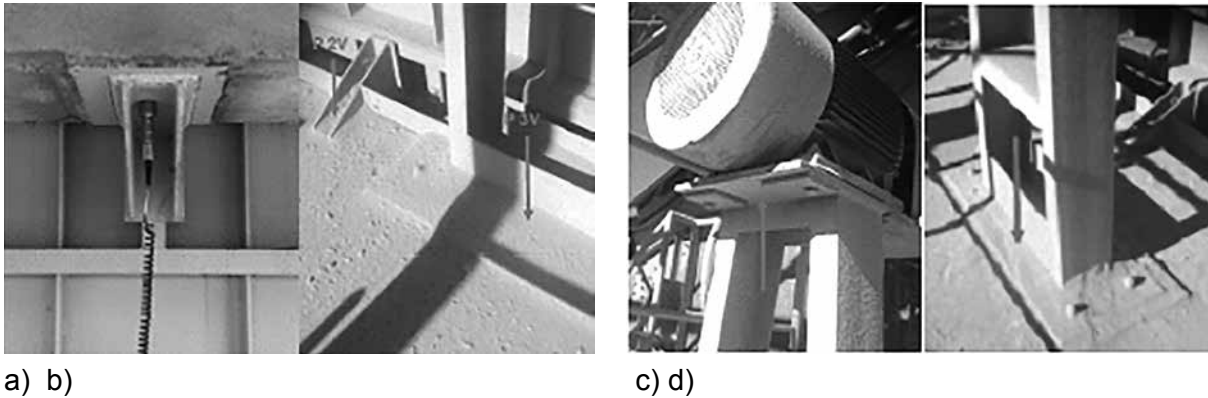


Figura 5: Ubicación de los puntos de mediciones experimentales de las vibraciones.
a) P1V; b) P2V-P3V; c) P4V; d) P5V.

Tabla 2: Puntos de medición y valores experimentales de velocidades vibratorias.

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

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 6. Se analizó mediante software disponible [11], obteniendo las características dinámicas, modos y frecuencias de vibración de la estructura del edificio para las siguientes condiciones de carga con probabilidad de ocurrencia durante la vida en servicio del edificio:

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

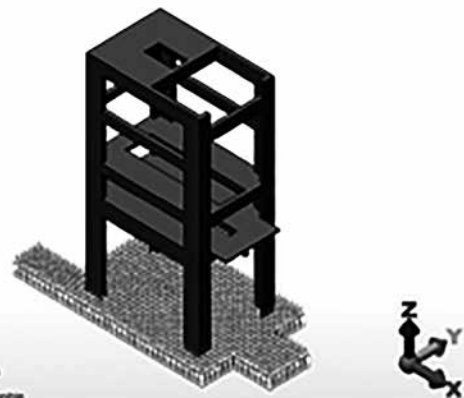


Figura 6. Modelo numérico para el análisis de elementos finitos.

RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 3 se indican los resultados obtenidos en términos de frecuencias naturales para cada uno de los 12 modos de vibración del edificio y en la Figura 7 se muestra el primer modo de vibración, para las condiciones a), b) y c) consideradas.

Tabla 3: Frecuencias naturales en Hz.

Modo	Estructura			Tipo de modo de vibración
	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

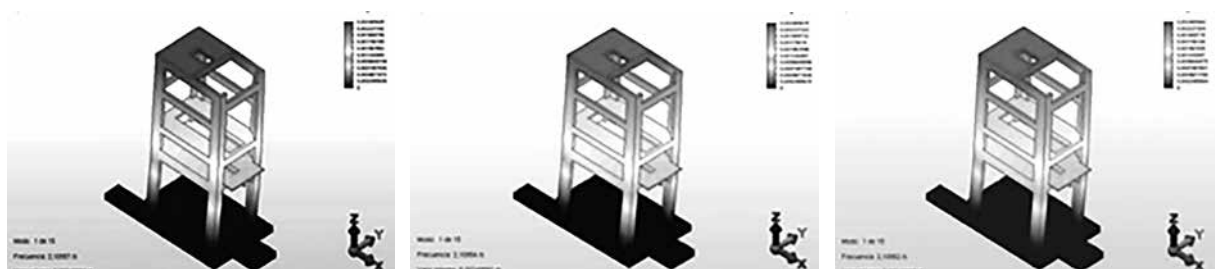


Figura 7: Primer modo de vibración. Condiciones a, b y c

Determinación de las características dinámicas de los entresijos en los que se encuentran los equipos instalados

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 encuentran instaladas 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 de:

a) Entresijos sin máquinas (para ambos niveles).

b) Entresijos con máquinas (para ambos niveles).

c) Entresijos con máquinas y tolva llena (para el nivel 203.850).

En Tablas 4 y 5 se indican los resultados obtenidos para los primeros modos de vibración de cada uno de los entresijos para las 3 condiciones analizadas. En Figuras 8 y 9 se muestra el primer modo de vibración para cada entresijo respectivamente.

Tabla 4: 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)	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

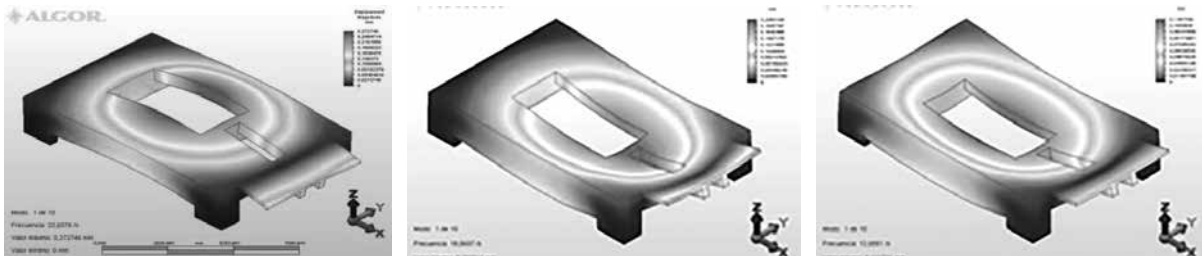


Figura 8: Primer modo de vibración del entpiso de nivel 203.850.



Tabla 5: Frecuencias naturales en nivel de zaranda (206.850), 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

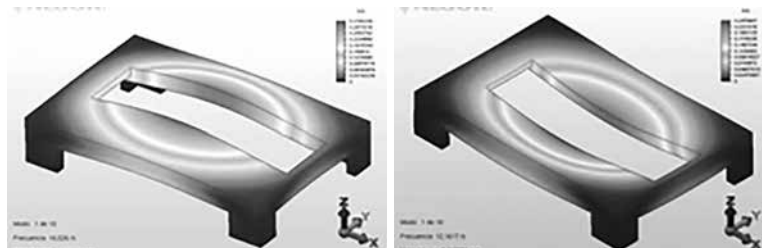


Figura 9: Primer modo de vibración del entpiso de nivel 206.850.

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 10 y 11 se muestran los desplazamientos en mm y las tensiones máximas principales en N/mm² para los niveles 203.850 y 206.850, respectivamente.

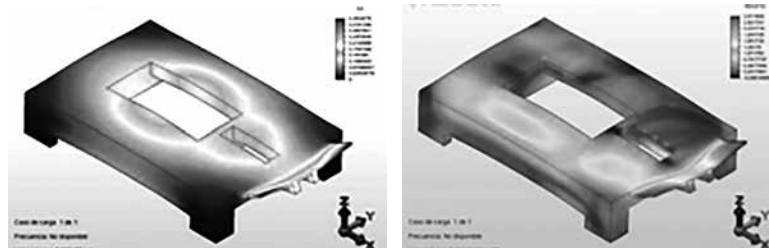


Figura 10: Desplazamientos y tensiones del nivel 203.850.

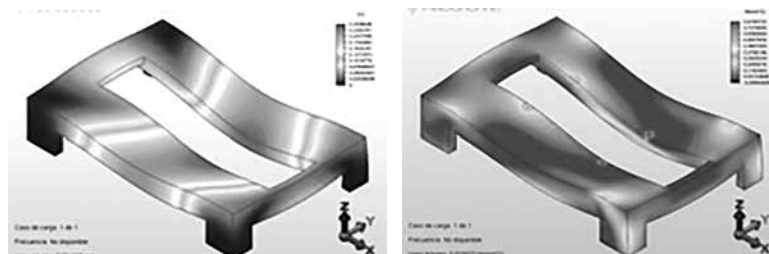


Figura 11: Desplazamientos y tensiones del nivel 206.850.

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), que presentan importantes discontinuidades geométricas y zonas de alta flexibilidad, los primeros modos presentaron frecuencias con valores cercanos a las frecuencias de la excitación de trituradora y zaranda. Esta situación permite suponer que se producirán, en servicio, amplitudes vibratorias por encima de los valores admisibles en los criterios internacionales [6] y [7]. Lo indicado fue contrastado con las mediciones experimentales.

CONSIDERACIONES FINALES

La medición y el análisis de vibraciones, como técnica dinámica no destructiva, utilizada en conjunto con otras técnicas, constituyen una herramienta de interés para evaluar daño estructural y/o afectación de la capacidad

portante de las estructuras durante su vida en servicio. Estas técnicas son 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 y combinación de esfuerzos espaciales permitiendo evaluar modos superiores de vibración que pueden provocar amplificaciones de desplazamientos en resonancia.

Los resultados obtenidos permiten inferir que podrían presentarse escenarios con amplificación de desplazamientos y velocidades no adecuados. Contando con 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 por lo cual se recomienda definir la adecuación de la estructura y/o la colocación

de montajes anti vibratorios para obtener el comportamiento estructural adecuado.

Cabe mencionar, asimismo, que 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 implica 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. Esto posibilitará realizar posteriores ajustes a las adecuaciones propuestas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] Bathia, K.G., *Foundations for Industrial Machines Handbook for Practising Engineers*, D-CAD Publishers, New Delhi, 2008.

[2] 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.

[3] 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.

[4] Van Koten, H., Vibrations of machine foundations and surrounding soil, *Heron Journal*, 57:1:1-26, 2012.

[5] 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.

[6] Richart, F. E., Hall, J.R., Woods, R.D., *Vibrations of soils and foundations*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1970.

[7] Rades, M., Vibration Limits for Industrial Buildings, *The Shock and Vibration Digest*, 26:3, 1994.

[8] Garrido, H., Curadelli, O., Ambrosini, D., Equivalencia entre sistemas de control de vibraciones pasivos y semiactivos, *Mecánica Computacional*, Vol. XXXII, pp. 2153-2174, 2013.

[9] Clough, R. W., Penzien, J., *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, Inc. Second Edition, 1993.

[10] CIRSOC 201-2005, *Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón, 2005- IN-TI-CIRSOC*.

[11] Algor Software V.20.3, *Finite Element Analysis Software*, 2007.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección de Ingeniería de Cementos Avellaneda S.A. por facilitar el uso de datos e información contenida en el presente trabajo.