

MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE UN EDIFICIO DE EMBOLSADO DE HARINAS CON PROBLEMAS DE VIBRACIONES

NUMERICAL MODELING OF A FLOUR-PACKAGING BUILDING WITH VIBRATION ISSUES

Guido A. Valentini, Juan P. Ascheri y Oscar Möller

*Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Facultad Cs. Ex., Ingeniería y Agrimensura,
Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina,
guidov@fceia.unr.edu.ar*

Palabras clave: Dinámica estructural, Modos naturales de vibración, Calibración, Aisladores de vibración

Resumen. Se aborda un caso real de un edificio industrial de embolsado de harinas donde se han detectado vibraciones tras llevarse a cabo una ampliación de la planta que introdujo cambios estructurales. Se miden aceleraciones in situ y se contrastan los registros con límites de afectación a las personas. Se confecciona un modelo numérico de la estructura representando diferentes distribuciones de masa en el sistema, dadas por los productos almacenados en siete silos metálicos. Se calibra el modelo con nuevas mediciones, en las que se excita la estructura con una carga de impacto en la planta, esta vez con todos los equipos detenidos y los silos casi vacíos. Con el modelo calibrado se analiza la evolución de los modos de vibración en función de la altura de carga de producto ensilado y se evalúa la posibilidad de que ocurran fenómenos de resonancia con los equipos presentes. Se estudia la posibilidad de que un desmoronamiento de bóveda de harina afecte la seguridad estructural del edificio. Finalmente, se propone una intervención con aisladores de vibraciones y se representan estos elementos en el modelo, comparando la respuesta dinámica del sistema frente a acciones representativas de la maquinaria presente antes y después de la intervención.

Keywords: Structural dynamics, Natural modes of vibration, model calibration, vibration isolators

Abstract. A real case study of an industrial flour-packing building, where vibrations were detected after the building underwent a series of structural changes, is approached. On-site acceleration measurements are carried out during a typical operation day. The three-dimensional time-acceleration records are processed and compared with human exposure limits. A numerical model of the structure is developed, including different mass distribution possibilities given by flour products stored in seven steel silos. The model is calibrated with new measurements, exciting the building with a dynamic load when the silos are almost empty and the equipment is turned off. The calibrated model allows to study the evolution of the natural vibration modes varying the stored product height and to evaluate the possibility of resonance with the present equipment taking place. The potential collapse of a flour vault is also modelled to study the possible effects on the building's structural safety. Finally, an intervention using vibration isolators is proposed and simulated in the model, comparing its dynamic response in terms of displacements under the vibration equipment action before and after the intervention.

1 INTRODUCCIÓN

El edificio en estudio se ubica dentro de un predio industrial y se extiende casi 37 metros en altura. La construcción está plasmada con diferentes materiales y tecnologías de ejecución, predominando el hormigón armado como materialidad de la estructura. El edificio aloja siete silos cilíndricos de acero de casi 16 metros de altura, que posibilitan el almacenamiento de productos a granel (harinas de trigo) para su posterior fraccionamiento, embolsado y despacho a través de tolvas troncocónicas. Cada silo cuenta con un vibrador de descarga en la parte inferior de su tolva, equipo que funciona induciendo movimientos horizontales mediante el giro de una excéntrica (frecuencia de trabajo 15 Hz). En la parte superior de los silos se ubican filtros de manga con ventiladores centrífugos (frecuencia de trabajo 48,17 Hz).

La estructura resistente del edificio se compone esencialmente de pórticos de hormigón armado y de perfiles metálicos. El piso que recibe a los silos incluye vigas pretensadas y viguetas premoldeadas de hormigón. La continuidad del piso es interrumpida por aberturas que posibilitan la descarga de los silos.

2 MEDICIONES CON LA PLANTA EN OPERACIÓN

Se visita el edificio durante una jornada de operación normal de la planta para registrar las vibraciones percibidas tras una serie de medidas estructurales llevadas a cabo para aumentar la capacidad de producción de la planta. Se sitúan dos acelerómetros en el piso donde apoyan los silos, en los puntos 1 y 2 de la Figura 1, ubicados sobre las vigas principales del sector. Se registra la historia aceleración-tiempo en las tres direcciones.

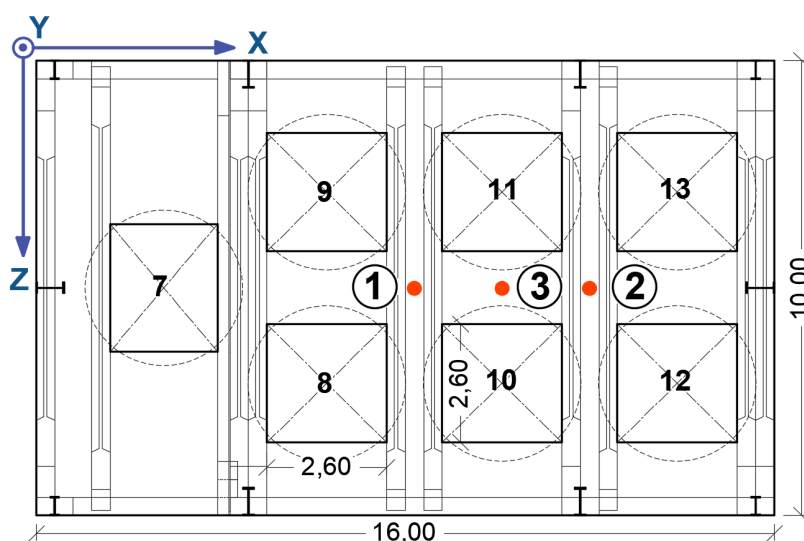


Figura 1: Planta general. Ubicación de puntos de medición e impactos. Dimensiones en metros.

Se determina el contenido de frecuencias de los registros mediante el módulo de la transformada de Fourier. También se descomponen los registros, que son de banda ancha, en bandas de frecuencias de tercio de octava y se calcula la aceleración eficaz para cada banda. Los valores obtenidos se comparan con valores básicos de la Norma IRAM 4078 Parte II, encontrándose que las vibraciones registradas están por debajo de los límites reglamentarios (Figura 2). Si bien esta normativa se focaliza en la afectación al trabajo de las personas y en este lugar no hay personas trabajando permanentemente, estos resultados pueden considerarse un primer indicador de que las vibraciones registradas no son de magnitud significativa.

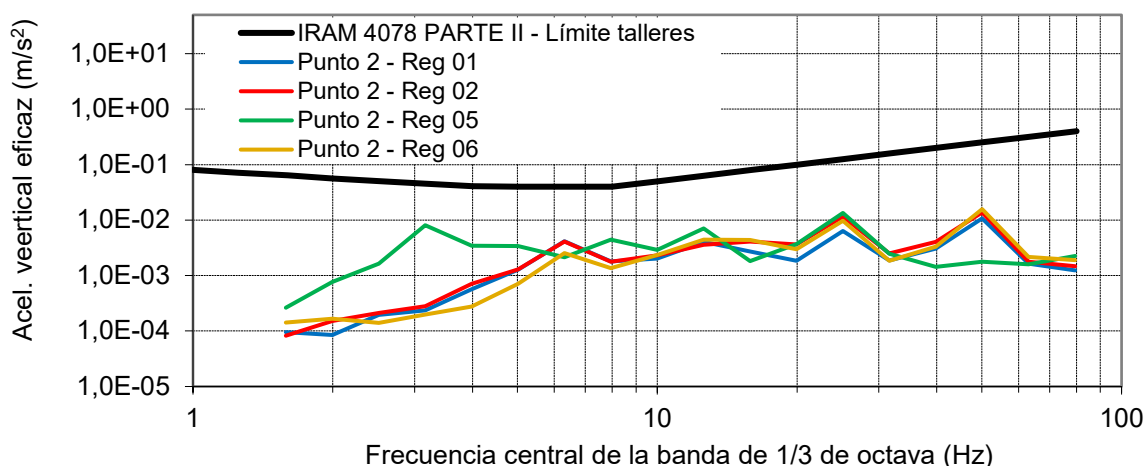


Figura 2: Aceleraciones eficaces medidas (punto 2) y comparación con normativa

3 MODELO NUMÉRICO DE LA ESTRUCTURA

La necesidad de determinar la respuesta dinámica de una estructura relativamente compleja con variación de la distribución espacial de masas merece y justifica el abordaje con un modelo numérico. Se emplea el software de análisis de estructuras basado en el Método de los Elementos Finitos, STAAD.Pro, para confeccionar un modelo numérico tridimensional (Figura 3), a partir de documentación gráfica disponible. Algunos detalles geométricos faltantes se miden en un reconocimiento in situ, mientras que otros, inaccesibles, deben ser estimados. Se resuelve aislar una parte del sistema estructural, representando con suficiente detalle el piso en donde se percibieron las vibraciones y su interacción con los silos y el resto del edificio. El modelo resultante consta de 3784 nodos, 2403 elementos de barra, 2924 elementos de placa y un total de 19889 grados de libertad desplazables.

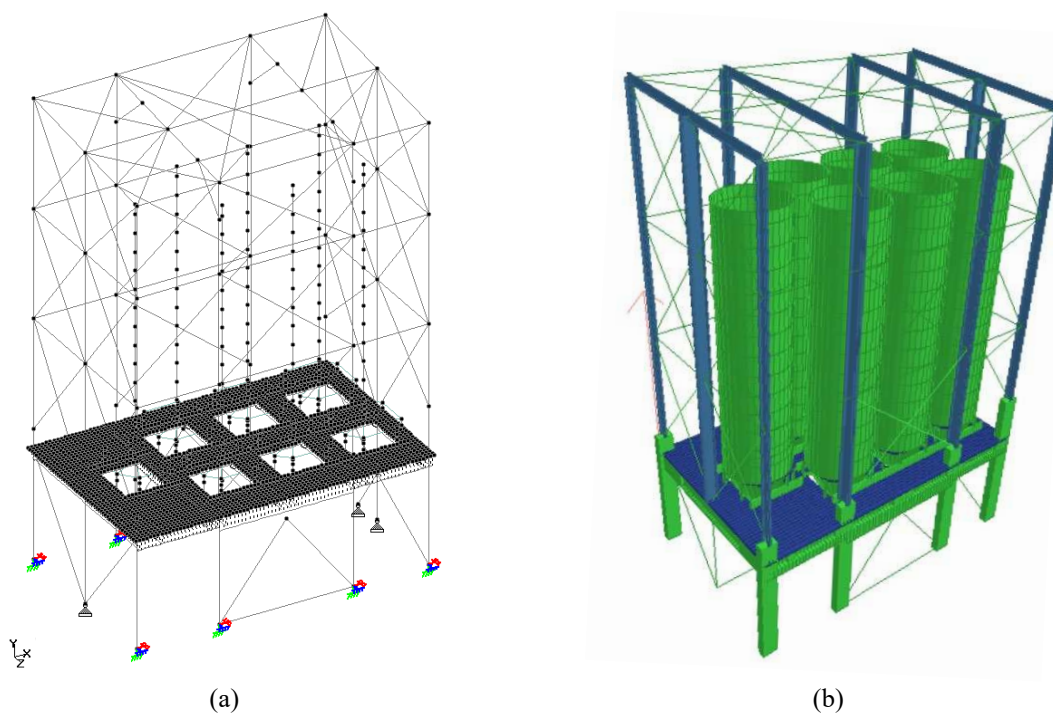


Figura 3: Modelo numérico completo. (a) Axonometría: elementos del modelo (b) Vista tridimensional: render

3.1 Parámetros nominales de materiales estructurales

Se definen cuatro materiales estructurales distintos: un acero y tres hormigones. Los parámetros mecánicos más relevantes para los fines de este trabajo son el módulo de elasticidad y el peso específico, que se extraen de los [Reglamentos CIRSOC 101, 201 y 301](#). El acero en el modelo engloba varios aceros presentes en la estructura (F26, F24, F36). El módulo de elasticidad E_c de los hormigones se estima partir de la resistencia especificada f'_c según la clase de hormigón: $E_c=4700\sqrt{f'_c}$ (con E_c y f'_c en MPa). Se tienen módulos de elasticidad de $2,15 \cdot 10^7$ kPa, $2,57 \cdot 10^7$ kPa y $2,89 \cdot 10^7$ kPa para hormigones H21, H30 y H38, respectivamente.

3.2 Elementos del modelo

Se representan en forma conjunta las placas de las viguetas y la capa de compresión (ambas de hormigón H-21) empleando elementos de placa cuadrangulares de 17 cm de espesor y, en general 20 cm de lado, replicando en buena medida la geometría de la planta. Se modelan los nervios de las viguetas a través de elementos de barra usando los mismos nodos del mallado de elementos de placa y proporcionándoles a estos un adecuado offset vertical. Se liberan los grados de libertad de los nodos extremos de las viguetas, por ser estas premoldeadas y no existir monolitismo con el resto de la estructura. Como primera aproximación se disponen rótulas espaciales perfectas, que luego serán rigidizadas en la etapa de calibración.

Originalmente, todas las vigas principales de la planta consistían en elementos pretensados independientes de sección doble T y hormigón clase H-38. Tras la ampliación, varias de estas vigas quedaron intactas. A otras se las solidarizó, de a pares, mediante un relleno de hormigón armado in situ, resultando vigas compuestas de mayor rigidez y capacidad portante. Además, se adicionó una viga independiente de sección rectangular de hormigón armado clase H-30.

Todas las vigas se cargan al modelo como elementos de barras, compatibilizando la discretización con el mallado de elementos de placa del piso y otorgando un debido offset vertical. La geometría específica de las vigas doble T se logra ingresando la sección como General y definiendo su contorno por coordenadas dentro de STAAD.Pro.

Para las vigas compuestas, se divide la sección en tres partes, reutilizando dos vigas doble T pretensadas ya modeladas. La tercera parte es el relleno de hormigón armado H-30 y poliestireno expandido entre ambas vigas, modelado de forma análoga a estas, con elementos de barra. El comportamiento como viga única se logra mediante relaciones de nodo maestro-esclavo entre los nodos de la viga de relleno y los de las vigas pretensadas, respectivamente.

Las paredes cilíndricas y tolvas tronconómicas de los silos se plasman con elementos de barra en coincidencia con el eje geométrico de cada silo, definiendo secciones tubulares constantes y linealmente variables, respectivamente. La longitud de cada elemento es de no más de un metro. Esta modelización simplificada permite contemplar de forma correcta su aporte a la distribución de masas y rigideces en la estructura, pero omitir en el procesamiento la aparición de modos naturales de vibración asociados a la flexión de las paredes como cáscaras, que resultan irrelevantes en el presente trabajo.

Las patas de cada silo se adicionan como elementos de barra de sección tubular y material acero. Se interponen elementos de placa paralelos al plano horizontal, a la altura de la transición pared-tolva de cada silo. Con relaciones de nodos maestro-esclavos se rigidiza el eje de cada silo y se vincula este a las patas, lográndose una transferencia de las cargas hacia el piso. Algunas patas se apoyan directamente sobre el piso (mallado de elementos de placa), mientras que otras lo hacen sobre vigas de transferencia de cajones de perfiles de acero.

Se modelan columnas y arriostamientos laterales en toda la envolvente del edificio, así como las correas, cabreadas, puntales y arriostamientos que conforman la cubierta, con elementos de barra. La omisión de algunos pisos inferiores de la estructura permite evitar

durante el procesamiento la aparición de algunos modos naturales de vibración que no son relevantes para el problema analizado (ej flexión del edificio como ménsula). Asimismo, se disponen vínculos externos en los nodos inferiores de las columnas de hormigón: originalmente empotramientos perfectos; resortes elásticos de desplazamiento y de giro tras la calibración.

3.3 Acciones sobre el modelo

Para la determinación de modos naturales de vibración se definen dos tipos de acciones sobre el modelo: el peso propio de la estructura y el peso de los productos ensilados.

El peso de los productos ensilados se aplica a los elementos de barra de las paredes de los silos, como cargas uniformes por unidad de longitud de eje (trapezoidales en tolvas). Se usa el [Reglamento CIRSOC 101](#) como referencia para el peso específico de las harinas 000 y 0000 ($\gamma=6,00 \text{ kN/m}^3$). El peso específico del almidón ($\gamma=6,30 \text{ kN/m}^3$) y del gluten ($\gamma=7,40 \text{ kN/m}^3$) se obtienen de antecedentes del proyecto. Las distintas configuraciones de carga de la planta se logran aplicando las cargas correspondientes a cada material en distintas longitudes de eje de silo. Para estudiar la variación de frecuencias y modos naturales con la variación de masas, también se define un producto a granel de peso específico intermedio: $\gamma = 6,86 \text{ kN/m}^3$.

Los pesos propios y cargas de productos son interpretados como masas por STAAD.Pro cuando se ingresan repetidos en todas las direcciones posibles de movimiento durante una excitación dinámica, esto es, en las tres direcciones coordenadas.

3.4 Análisis Estructural

Se efectúa un análisis modal del modelo para distintas configuraciones de carga. El procesamiento permite determinar los modos naturales de vibración del conjunto estructural.

La cantidad de modos de vibración de una estructura está establecida por la cantidad de grados de libertad con que cuenta. En vista de la cantidad de elementos presentes, para el análisis preliminar (esto es, previo a la calibración del modelo con mediciones experimentales) se limita el procesamiento a una cantidad limitada de modos. Se corrobora que el rango de frecuencias propias resultante incluye a las frecuencias de operación de tanto los motores de los vibradores como las de los ventiladores de filtro de manga.

Se encuentra que los modos de menores frecuencias son los que tienen formas más simples (desplazamientos laterales del edificio, torsión de la planta, flexión del piso), como los de la [Figura 4](#), y que las formas modales se complejizan conforme aumentan las frecuencias propias. Se observa que las frecuencias naturales toman valores cercanos entre sí.

4 CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

El modelo numérico confeccionado está originalmente basado en especificaciones de documentación de proyecto. Como todo modelo, presenta simplificaciones e incertidumbres. La estructura real ejecutada tiene características y particularidades propias que, con seguridad, no coinciden con lo idealizado. Para arribar a predicciones lo más certeras posibles del comportamiento dinámico del edificio, se realiza otra sesión de mediciones con acelerómetros.

Se busca excitar de forma intencional modos naturales de vibración asociados a desplazamientos verticales del piso. Las formas modales obtenidas tras el procesamiento del modelo numérico no calibrado permiten intuir zonas de amplitud máxima en modos de flexión de losa, así como zonas nodales.

Al contar con una limitada cantidad de sensores (dos), resultan importantes el diseño y la planificación del experimento de forma de que los registros discretos sean útiles. Se resuelve realizar las nuevas mediciones con toda la maquinaria apagada, bajo la acción del impacto de un tambor lleno con 100 kg de arena cayendo desde 1,60 m de altura ubicado en el centro entre

los puntos 1 y 2 (Punto 3, ver [Figura 1](#)), que produce un efecto de vibraciones libres luego del impacto. Se coordina para realizar los registros sobre el final de un ciclo semanal de producción, cuando la carga de los silos es mínima (menor masa total del sistema).

Se efectúan 3 impactos y se obtienen registros de aceleración en las tres direcciones en los puntos 1 y 2. Los registros se analizan en el dominio de las frecuencias, observando los picos del módulo de la transformada de Fourier de las aceleraciones registradas, para identificar las frecuencias naturales de vibración que contribuyen a la respuesta en cada dirección.

Seguidamente, se ajustan algunos parámetros del modelo, obteniendo de forma iterativa las frecuencias propias hasta acercarlas lo más posible a las frecuencias derivadas de las mediciones. La distribución de masas en el sistema responde a la configuración de productos ensilados durante las mediciones, acorde a los registros de cargas en los silos. Se usan como referencia el modo N°1 de desplazamiento transversal, el modo N°2 de desplazamiento longitudinal y el modo N°10 de flexión de losa ([Figura 4](#)).

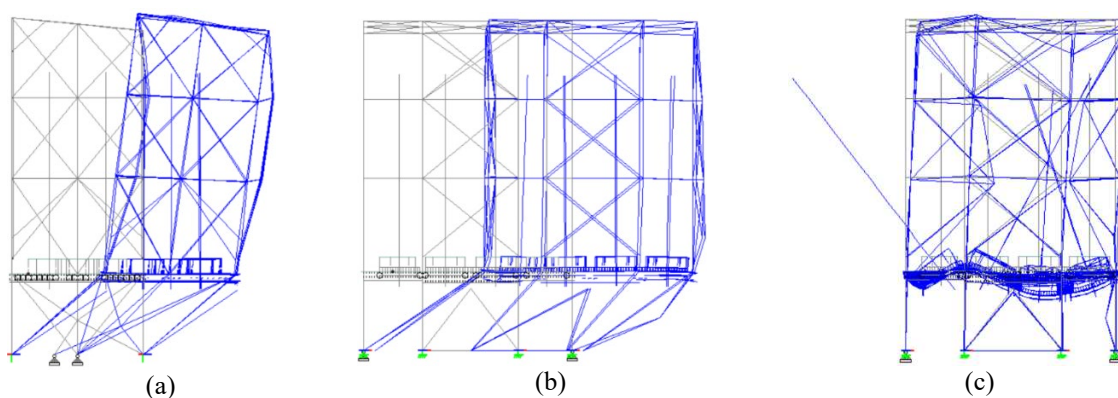


Figura 4: Modos naturales usados para la calibración (a) Modo N°1 (b) Modo N°2 (c) Modo N°3

Los ajustes que logran una calibración aceptable adecuada son:

- Un aumento del 30% de los valores nominales de los módulos de elasticidad de los hormigones
- La restricción a giro según el plano vertical en los nodos extremos de viguetas prefabricadas (del orden de 90% de restricción, donde 0% es rótula perfecta y 100% es empotramiento).
- Una corrección de la rigidez de los vínculos (resortes de desplazamiento y de giro) en los nodos extremos inferiores de columnas.

Se resume la precisión lograda en términos de frecuencias en la [Tabla 1](#). La discrepancia absoluta se expresa con respecto a los valores medidos.

	Frecuencias del modelo [Hz]		Frecuencias medida [Hz]	Discrepancia absoluta [%]
	No calibrado	Calibrado		
Modo N°1 desp. transversal	2,919	2,887	2,90	0,45
Modo N°2 desp. longitudinal	4,849	3,110	3,10	0,32
Modo N°10 flexión de losa	7,973	9,772	9,80	0,29

Tabla 1: Frecuencias naturales utilizadas para la calibración.

5 RESPUESTA DEL MODELO Y POSIBLES AMPLIFICACIONES DINÁMICAS

Con el modelo calibrado, se determinan los modos naturales de vibración del conjunto estructural. Se hace variar la altura de carga (producto de peso específico intermedio) uniformemente en todos los silos y se rastrean cinco modos naturales (dos de desplazamiento

lateral, uno de torsión de planta y dos de flexión de losa) identificando las frecuencias correspondientes. Como se ve en la Figura 5, la configuración con todos los silos totalmente llenos constituye un extremo inferior para los valores de las frecuencias propias debido a que las masas presentan sus valores máximos.

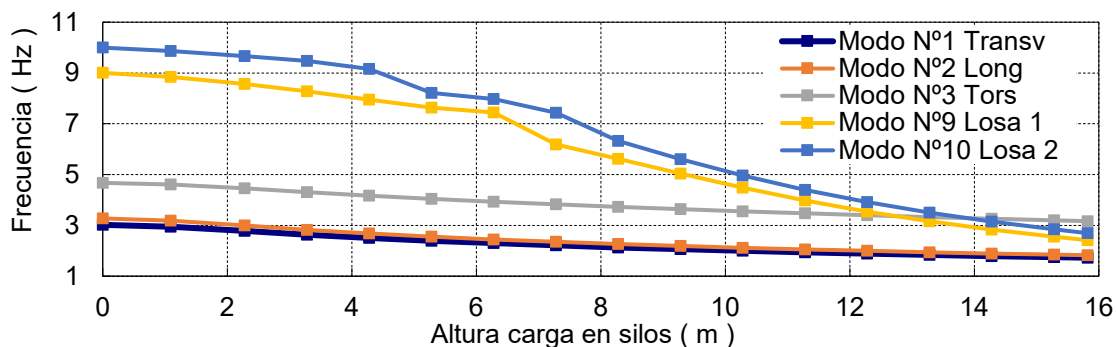


Figura 5: Variación de frecuencias naturales con la altura de carga en silos

5.1 Resonancia

Los modos naturales de vibración del sistema tienen frecuencias muy cercanas entre sí y para la discretización efectuada se contabilizan cerca de 20.000 modos posibles por configuración. Para que ocurra el fenómeno de resonancia, la frecuencia de la excitación tiene que coincidir con (o resultar muy cercana a) una frecuencia natural, pero también debe ser coherente con la forma del modo natural en cuestión y resultar capaz de movilizar la estructura venciendo sus fuerzas de inercia y amortiguamiento (cuestión de escala).

El modelo presenta modos naturales de vibración con frecuencias cercanas a las frecuencias de los equipos de la planta (15 Hz y 48,17 Hz). Esto ocurre para distintas configuraciones de carga en los silos y, en este sentido, podría pensarse que están dadas las condiciones para una potencial resonancia. Sin embargo, los equipos que potencialmente podrían generar efectos de resonancia deberían no solo estar ubicados en lugares específicos de la planta (por ejemplo, en medio de un tramo de losa) sino que, además, sus vibraciones deberían tener una direccionalidad coherente con las formas modales factibles de excitar del propio edificio. Esto no ocurre. Se encuentra que los modos de vibración con frecuencias propias cercanas a los valores en cuestión presentan formas modales complejas en las que no sobresalen ciertos desplazamientos sobre otros, usualmente con combinaciones de configuraciones de torsión, flexión y traslación de la planta, la estructura metálica y los silos.

Para replicar las formas modales presentes se necesitarían más puntos de aplicación de cargas, en general con ubicaciones altamente específicas, que deberían actuar todas en forma sincronizada. Cuando se tiene en cuenta la ubicación de los silos en planta se vuelve evidente que es difícil que esto ocurra.

5.2 Desmoronamiento de bóvedas de harina

El almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos, como lo son las harinas, presenta algunos inconvenientes particulares. Durante el vaciado pueden presentarse interrupciones en el flujo con formación de bóvedas o arcos resistentes, que traen como consecuencia retrasos y paros en los procesos industriales de suministro, pesado y dosificado. Más aún, el posterior desmoronamiento de dichas bóvedas puede generar presiones laterales y verticales muy superiores a las de llenado.

Existe bibliografía académica sobre la contemplación de los efectos del desmoronamiento de bóvedas en el diseño estructural de silos (Hotala, 2003; Ravenet, 1992; Anonowicz, 2014),

pero no sobre la caracterización de las acciones dinámicas propiamente dichas. No se encuentra, por ejemplo, información acerca de la duración de estas cargas.

Se considera una carga dinámica posible de ocurrir, aunque con escasa probabilidad, al derrumbe de una bóveda de producto con las características expuestas en la [Tabla 2](#), dentro del silo N°10, de ubicación prácticamente central en la planta. La función de carga se define a partir de la igualdad entre la cantidad de movimiento adquirida durante la caída por la masa en cuestión y el impulso asociado al impacto durante el tiempo de contacto. La masa se idealiza como cuerpo rígido, se desprecian pérdidas energéticas, se asume una función de carga de tipo semionda senoidal y se proponen un tiempo de contacto de 0,1 s, resultando la función de carga de la [Figura 6](#).

Altura [m]	2,00
Diámetro [m]	3,00
Volumen [m ³]	14,14
Peso esp. [kN/m ³]	6,86
Peso [kN]	96,98
Masa [kg]	9886
Altura de caída [m]	1,00

Tabla 2: Definición de la bóveda

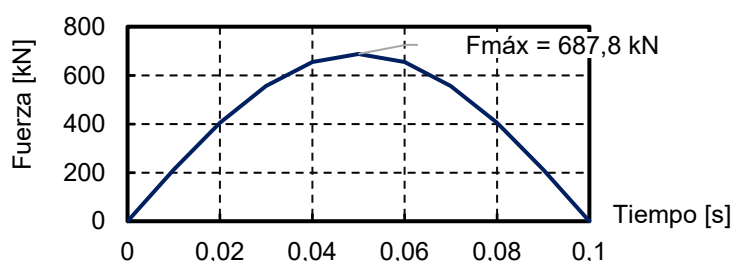


Figura 6: Posible función de carga de acción dinámica de bóveda

El procesamiento se realiza para cuatro combinaciones de carga en los silos: (a) todos los silos llenos, (b) todos los silos hasta la mitad de la altura (c) todos los silos vacíos excepto en el que se produce es desmoronamiento y (d) Con las cargas que tenían los silos cuando se detectaron vibraciones en diciembre de 2017.

Se encuentra que las cargas debidas al material ensilado tienen una influencia significativa en los desplazamientos verticales estáticos, pasando del orden de 2 mm para el caso de todos los vacíos (solo actúa peso propio de la estructura) a 8 mm para el caso con todos los silos totalmente cargados. Para los desplazamientos debido a la acción dinámica solamente, los resultados tienen la tendencia opuesta. Cuando más masa tiene el sistema, mayor son las fuerzas de inercia y menores las fuerzas elásticas (rigidez por desplazamientos) que equilibran a la acción dinámica externa.

En la suma total, la situación más desfavorable resulta la combinación (a) con todos los silos llenos, que produce un desplazamiento máximo de 9,2 mm y que representa un incremento de solo un 9% por sobre los desplazamientos estáticos. Entonces los esfuerzos internos (flexión, corte, etc.) se incrementan en esa proporción con respecto a los estáticos, y luego el grado de seguridad de la estructura no está comprometido debido a los márgenes habituales del cálculo estático con respecto a un estado límite último. No debe perderse de vista que la carga dinámica es de baja probabilidad de ocurrencia y está modelada muy conservadoramente.

Los valores más significativos de aceleración vertical corresponden a la combinación (c). Los resultados son coherentes: a menor masa se requiere más aceleración para originar fuerza de inercia que junto con las fuerzas elásticas equilibren la acción externa. Pero en esa combinación los desplazamientos debido a la acción estática son mínimos, y el resultado final no es determinante. Para una situación operativa de cargas en silos, como la representada por la combinación (d), las máximas aceleraciones son del orden de 0,1 g, valores no significativos al compararlos con las cargas de peso propio.

6 PROPUESTA DE INTERVENCIÓN CON AISLADORES

Aunque las vibraciones medidas con la planta en operación se consideran aceptables para la exposición humana y las potenciales amplificaciones dinámicas no hacen pensar que la

seguridad estructural del edificio pueda verse comprometida, la sensación de discomfort percibida por los operarios del sector podría ser razón suficiente para proponer una intervención en busca de reducir las vibraciones.

La estrategia consiste en interrumpir la rigidez de las patas de los silos con elementos elásticos. En el mercado existe gran variedad de elementos aisladores de vibración, con distintas tecnologías, propiedades, aplicaciones y alcances. El aislador a colocar se elige de catálogos comerciales en función de las cargas máximas a soportar, la factibilidad constructiva y sus frecuencias propias, que deben ser menores a las frecuencias excitadoras para minimizar la transmisibilidad. Resulta determinante la frecuencia de 15 Hz de los equipos vibradores. Se arriba a un aislador de muelles de resortes helicoidales (frecuencia propia 3,0 Hz en vertical y 1,5 Hz en horizontal). Se requiere uno por cada pata de silo (Figura 7).

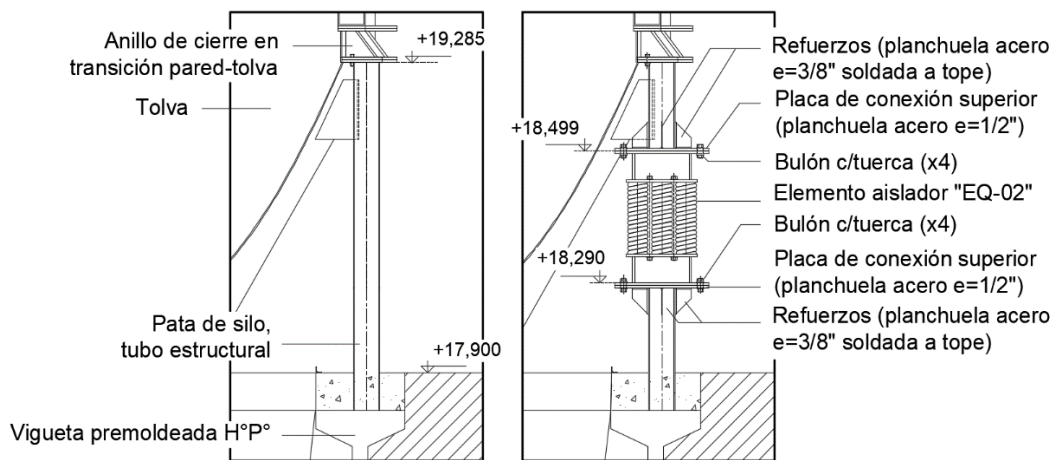


Figura 7: Corte- colocación de aisladores en pata de silo. Izq.: Antes de la intervención. Der.: Con aisladores

Se modela una acción representativa de la acción de vibradores a través de cargas armónicas aplicadas en el nodo extremo inferior de la tolva del silo 10 y se procesa con dos configuraciones de cargas de productos: (i) todos los silos totalmente llenos y (ii) configuración problemática de dic2017, extrayéndose amplitudes de desplazamiento en régimen permanente.

Se representan los aisladores en el modelo para evaluar su influencia frente a la vibración forzada, interponiendo elementos de rigidez representativa en los elementos de barra de las patas de los silos. Se repite el procesamiento para ambos estados de carga.

Para el caso (i) se logra reducir en más de un 95% las amplitudes de desplazamientos en dirección vertical y transversal (Figura 8). La atenuación es moderada en la dirección longitudinal, pero los desplazamientos originales son considerablemente más pequeños que en las otras direcciones. En el caso (ii), altamente asimétrico, se consigue una importante reducción de los desplazamientos en dirección vertical y transversal, pero, opuesto a lo esperado, se amplifican en la dirección longitudinal. Las vibraciones originales son, para empezar, de menor amplitud que las observadas frente al estado de cargas (i) por lo que las vibraciones resultantes, tienen una amplitud similar a las originales en esa dirección, sin aisladores, para el estado de cargas (i). La comparación frente a la respuesta sin aisladores se resume en la Tabla 3.

	E.C. (i)	E.C. (ii)
Desplazamientos longitudinales s/X	-34,3 %	+175,3 %
Desplazamientos verticales s/Y	-97,1 %	-77,9 %
Desplazamientos transversales s/Z	-96,4 %	-81,0 %

Tabla 3: Efecto de los aisladores sobre la amplitud de los desplazamientos del modelo en régimen permanente

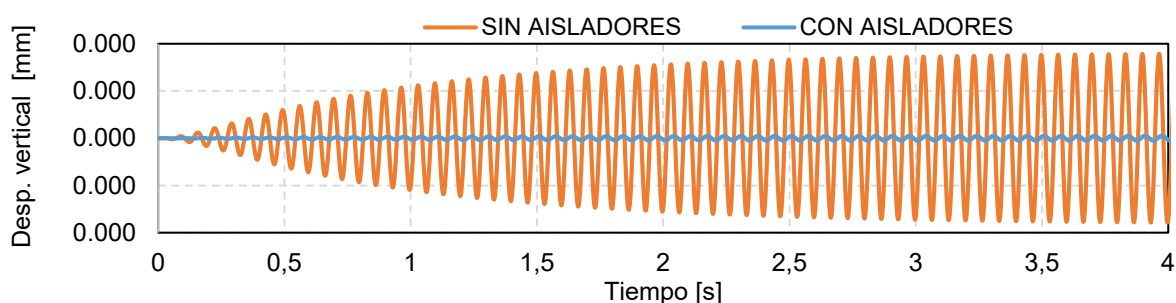


Figura 8: Respuestas del modelo antes y después de la intervención. Estado de cargas (i) todos los silos llenos

7 CONCLUSIONES

Las vibraciones registradas durante una jornada típica están por debajo de los límites establecidos para la afectación a las personas. Se logró un modelo numérico representativo de la estructura, calibrado en buena medida en términos de frecuencias propias representativas. Se obtuvieron leyes de variación de frecuencias propias de algunas formas modales sobresalientes en función de la altura de producto ensilado de forma uniforme en todos los silos. Los resultados resultaron coherentes, viéndose una disminución las frecuencias propias con el aumento de la masa total del sistema.

El análisis dinámico para una acción de baja probabilidad de ocurrencia, representativa de un desmoronamiento de bóveda de harina, mostró que los desplazamientos en la peor combinación presentan un incremento del orden del 9% con respecto a los originados por las cargas estáticas, no resultando importantes en términos de seguridad estructural. Las aceleraciones máximas para una situación operativa de carga en silos, del orden de 0,1 g, no son significativas frente a las cargas de peso propio.

Se planteó una posible intervención para reducir las vibraciones en el edificio, con aisladores de muelles de resortes metálicos helicoidales. La solución podría reducir en gran medida las vibraciones en sentido vertical, que suelen ser las más perceptibles por el cuerpo humano. En direcciones horizontal los resultados varían según el estado de carga, lográndose atenuación en algunos casos y amplificación de vibraciones en otros. De todas formas, para el caso de amplificaciones, se deduce que las vibraciones podrían permanecer cercanas a las vibraciones máximas registradas sin la interposición de aisladores.

REFERENCIAS

- Anonowicz, R., Bywalski, C., y Kaminski, M., Analysis of Loads and Structural Capacity of steel silo with corrugated wall por pelleted material. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(3): 372–379, 2014.
- Hotala, E., Ultimate load bearing capacity of unribbed cylindrical sheels of steel silos. *Wroclaw University of Technology Publishing House*, 2003.
- Ravenet, J., Silos: Deformaciones, fallas, explosiones, prevención de accidentes. Tomo II. Editorial Láser Fotocomposición, imprenta IMGESA. Barcelona, 1992.
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Reglamento Argentino de Cargas Permanentes y Sobrecargas Mínimas de Diseño para Edificios y Otras Estructuras CIRSOC 101, 2005.
- INTI, Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón CIRSOC 201, 2005.
- INTI, Reglamento Argentino de Estructuras de Acero para Edificios CIRSOC 301, 2005.
- Norma IRAM 4078, Parte II, Acústica. Guía para la Evaluación de la vibración humana de cuerpo entero. Estimación de la exposición humana a vibraciones continuas e inducidas por choques en edificios (1Hz a 80Hz), 1990.