

## MODIFICACIÓN ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS PARA EVITAR PROBLEMAS VIBRATORIOS QUE AFECTAN EL FUNCIONAMIENTO DE EQUIPOS DE MEDICIÓN DE ALTA TECNOLOGÍA

José E. Stuardi<sup>a</sup>, Julio C. Massa<sup>a,b</sup> y Juan F. Giró<sup>a,c</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Estructuras, Facultad de C. E. F. y N., Universidad Nacional de Córdoba, Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina, [jstuardi@gmail.com](mailto:jstuardi@gmail.com), <http://www.efn.uncor.edu>

<sup>b</sup>Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto, Argentina, [jmassa@efn.uncor.edu](mailto:jmassa@efn.uncor.edu), <http://www.ing.unrc.edu.ar>

<sup>c</sup>Departamento de Ingeniería de Sistemas de Información, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba, Argentina, [juanfgiro@gmail.com](mailto:juanfgiro@gmail.com), <http://www.frc.utn.ar>

**Palabras Clave:** modificación estructural, vibraciones, amortiguadores, respuesta dinámica.

**Resumen.** En el presente trabajo se estudia el acondicionamiento dinámico de losas de edificios de grandes luces sujetos a vibraciones causadas por el tráfico y por la presencia de equipos electromecánicos, con el objeto de cumplir especificaciones de fabricantes de equipos de medición y diagnóstico. Específicamente se estudia como disminuir la respuesta estructural de losas de grandes dimensiones, muy susceptibles a los fenómenos de resonancia a causa del bajo coeficiente de amortiguamiento, colocando dispositivos disipadores. Debido al bajo nivel de fuerzas generado en los amortiguadores la inserción de los disipadores se realiza mediante columnas metálicas de sección transversal relativamente pequeña, donde los requerimientos básicos están referidos a la rigidez de las columnas y las fundaciones, para un adecuado funcionamiento del modelo dinámico de Maxwell que se genera. Los disipadores son del tipo viscoso, y la cantidad y ubicación son optimizadas para mejorar la respuesta estructural. La problemática estudiada tiene su origen en diseños arquitectónicos elaborados desde el punto de vista de la funcionalidad o la estética, con apoyos muy espaciados y de secciones delgadas, teniendo en cuenta sólo aspectos de la estática. En tales casos, las vibraciones pueden generar efectos no deseados y dañinos en seres humanos, edificios y equipos técnicos de medición y control. Este trabajo muestra que la inserción de dispositivos disipadores en las losas es una alternativa económica y eficiente para cumplir requerimientos dinámicos.

## 1 INTRODUCCIÓN

Las vibraciones son útiles y pueden ser aprovechadas beneficiosamente en procesos tecnológicos e industriales, sin embargo generan también efectos no deseados y dañinos en seres humanos, edificios y equipos técnicos de medición y control. Los problemas estructurales dinámicos, especialmente los problemas de vibraciones, tienen un rol cada vez más preponderante en construcciones civiles, equipos, máquinas y medios de transporte terrestre, marítimo y aéreo.

Las prácticas de diseño actuales que incluyen potencias elevadas, incremento en las velocidades, materiales y secciones más livianas para mejorar el rendimiento, exigencias mayores en los materiales y materiales especiales, traen aparejada la necesidad de un análisis cada vez más detallado de los fenómenos vibratorios. En el área de construcciones civiles, este tipo de problemas está apareciendo con frecuencia en áreas centrales donde la densidad poblacional aumenta, por la presencia de equipos automatizados y otros tales como bombas, acondicionadores de aire, ascensores y montacargas.

En las grandes ciudades crece la tendencia a la recuperación y puesta en valor de zonas de antiguo uso industrial, puertos, estaciones de carga o playas de maniobra de ferrocarril, lugares en general con alta contaminación de ruidos y vibraciones donde el aislamiento toma un valor preponderante.

El destino arquitectónico cambiante en la vida útil de un edificio, los costos y la practicidad definen una tendencia a construcciones livianas de grandes luces y con tabiques de construcción seca. Razones estéticas definen estructuras delgadas tipo filigrana y con escasos apoyos que puedan interferir con la habitabilidad o la belleza. Desde el punto de vista estructural, esto conduce naturalmente a altas flexibilidades, períodos naturales elevados y consecuentemente a grandes desplazamientos por cargas dinámicas tales como viento, excitación por tráfico automotor, férreo y peatonal. La inclusión de dispositivos mecánicos en las estructuras puede corregir adecuadamente sus propiedades, de manera que la respuesta dinámica sea compatible con las necesidades estructurales o de los equipos instalados. La modificación de la rigidez, la masa o el amortiguamiento es un camino para solucionar esos problemas. En el primer y segundo caso, se logra un corrimiento de las frecuencias propias que desintonizan la estructura del rango de frecuencias donde la energía espectral es preponderante. El incremento de amortiguamiento es en ingeniería sísmica un hecho asociado al propósito de aumentar artificialmente la ductilidad, con la finalidad de disipar energía en forma controlada y estable, reduciendo la respuesta estructural dinámica (Bozzo y Barbat, 2000).

Los absorbedores sintonizados o Tuned Mass Dampers (TMD) constituyen una alternativa válida para el control de las vibraciones especialmente en los casos donde por diversas razones no se dispone de un acceso directo a los apoyos estructurales. Estos dispositivos consisten básicamente en osciladores auxiliares que se agregan al sistema principal, con el objeto de generar un amortiguamiento aparente y reducir la respuesta en un modo de la estructura mediante la compensación de fuerzas inerciales, a diferencia de los amortiguadores que están basados en el fenómeno de disipación de energía. Si bien poseen una base conceptual sencilla, la incorporación práctica a estructuras de los absorbedores sintonizados es a menudo compleja, estando su aplicabilidad y rendimiento muy limitados por problemas tecnológicos y por las variables de diseño particulares de cada caso. Los TMD han sido también propuestos como dispositivos sismorresistentes, demostrando ser también efectivos en algunos casos como limitantes de la respuesta sísmica (Nawrotzki, 2000). Estos dispositivos encuentran típicamente utilidad en puentes, viaductos, torres, chimeneas, etc. (Fiebig et al., 2004).

La utilización directa de disipadores de energía es una tendencia moderna de diseño sísmico, basado en sistemas estructurales con demandas de ductilidad localizadas en puntos

predeterminados, en los que se pueda disipar energía en forma estable. Los disipadores viscoelásticos pueden reducir significativamente la respuesta, sin embargo se requiere una cantidad importante de ellos y las dimensiones de los dispositivos pueden ser muy grandes, por lo que son más ventajosos para el control de vibraciones. Los sistemas basados en plastificación de metales son ventajosos para el control sísmico. Otros sistemas son los amortiguadores tipo 1D basados en extrusión de metales o de fluidos, o sistemas amortiguadores basados en la fricción, todos ellos en general usados para mejorar la respuesta global de estructuras (Soong y Spencer, 2002; Aiken, 1996).

Una problemática reciente que se encuentra cada vez con mayor frecuencia, es la perturbación del funcionamiento de equipos de alta tecnología debido a niveles altos de vibraciones. Este escenario se encuentra no sólo en industrias metal mecánicas, donde máquinas pesadas generadoras de golpes y vibraciones se instalan próximas a otras extremadamente sensibles, sino también en numerosos edificios con otros destinos, tales como centros de diagnóstico médico, sanatorios y hospitales. Estos edificios poseen actualmente verdaderas instalaciones industriales de líquidos y gases, elevados consumos energéticos, etc. junto con equipos electrónicos de última tecnología con requerimientos especiales de vibraciones en el entorno, como microscopios, balanzas, equipos de resonancia magnética, etc.

## 2 PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

La incorporación de dispositivos mecánicos para el control de vibraciones debiera en principio ser planeada en el momento de diseño. Por diversas causas, entre las que se pueden citar la relativa facilidad de instalación, por tratarse de componentes integrantes de un proceso de rehabilitación, adaptación estructural, o por cambio de destino arquitectónico o simplemente por falta de previsión o desconocimiento de los problemas vibratorios que se generan, son en muchos otros casos colocados a posteriori de la construcción.

En ocasiones resulta difícil predecir los problemas vibratorios con antelación a la construcción, y en otras las correcciones deben ser efectivamente hechas en base a una estructura construida, cuyas propiedades puedan verificarse por medio de mediciones. Para estructuras terminadas es necesario evaluar in situ la situación. Normalmente la evaluación se realiza en etapas: una primera medición del nivel de vibraciones, luego mediciones para determinar las propiedades dinámicas de la estructura y finalmente las tendientes a verificar la posibilidad y eficiencia de las distintas estrategias de solución posibles.

Las principales causas de vibraciones excesivas están relacionadas con dos factores principales: a) vibraciones externas, incluyendo tráfico automotor y férreo, b) vibraciones internas generadas en el mismo cuerpo del edificio por la presencia de motores, ventiladores y bombas de los equipos instalados. En ambos casos las vibraciones son normalmente amplificadas localmente por la estructura de soporte. Una protección (aislamiento) de la fuente generadora es naturalmente más factible y económica en el segundo caso.

En un sistema de vías de tráfico férreo es posible el aislamiento mediante la inclusión de elasticidades de diversas formas, pero esto debe ser previsto a nivel de proyecto (Wettschureck, 2000). Si la vía está construida, prácticamente sólo queda como posibilidad un aislamiento del receptor. Esto se logra mediante la construcción de un sistema de baja frecuencia natural para disminuir la transmisibilidad desde sus apoyos. La aplicabilidad de estos sistemas está limitada por el hecho de que el sistema oscilatorio que provee el aislamiento presenta una elevada respuesta dinámica a excitaciones generadas en el mismo equipo. Ya que el aislamiento es en esencia una compensación de fuerzas inerciales, es factible aumentar la masa suspendida del sistema a valores suficientemente elevados, y encuadrar así las vibraciones a los valores especificados, generando soluciones a veces costosas y complicadas. Por esta razón no es recomendable el aislamiento directo (sin bloque inercial) de equipos sensibles de alta tecnología. Además, hay que tener cuenta que debido a la



### 3 CASO ESTUDIADO

El caso estudiado es el edificio de un Centro de Diagnóstico Médico ubicado en San Isidro, Provincia de Buenos Aires, con una superficie de 9 por 18 m (Figura 2), que consta de planta baja y dos pisos.

El tránsito automotor en la zona es denso, y la superficie de las calles circundantes es empedrada. En el segundo piso del edificio (Punto 1) está previsto instalar un equipo de resonancia magnética (MRI) General Electric modelo Signa MRI 1,5 T para lo cual se habían hecho previsiones (refuerzos estructurales) sólo de carácter estático.

Los límites admisibles para el equipo MRI según especificaciones (General Electric, 2002) son:

- en el dominio del tiempo (vibraciones transitorias): aceleraciones menores a  $5 \text{ mm/s}^2$  cero a pico.
- en el dominio de las frecuencias (vibraciones permanentes): rampa lineal de aceleraciones RMS desde (0 Hz,  $0,5 \text{ mm/s}^2$ ) a (20 Hz,  $1 \text{ mm/s}^2$ ); de 20 Hz a 38 Hz un valor eficaz de  $1 \text{ mm/s}^2$  y  $4,5 \text{ mm/s}^2$  RMS desde 38 Hz hasta 45 Hz.

En la Figura 2.a y Figura 2.b se indican los tres lugares donde se efectuaron mediciones de vibraciones: el Punto 1 del 2.º piso donde se instalará el equipo MRI, el Punto 2 sobre la vertical que corresponde al Punto 1 pero en la planta baja y el Punto 3 en el segundo piso.

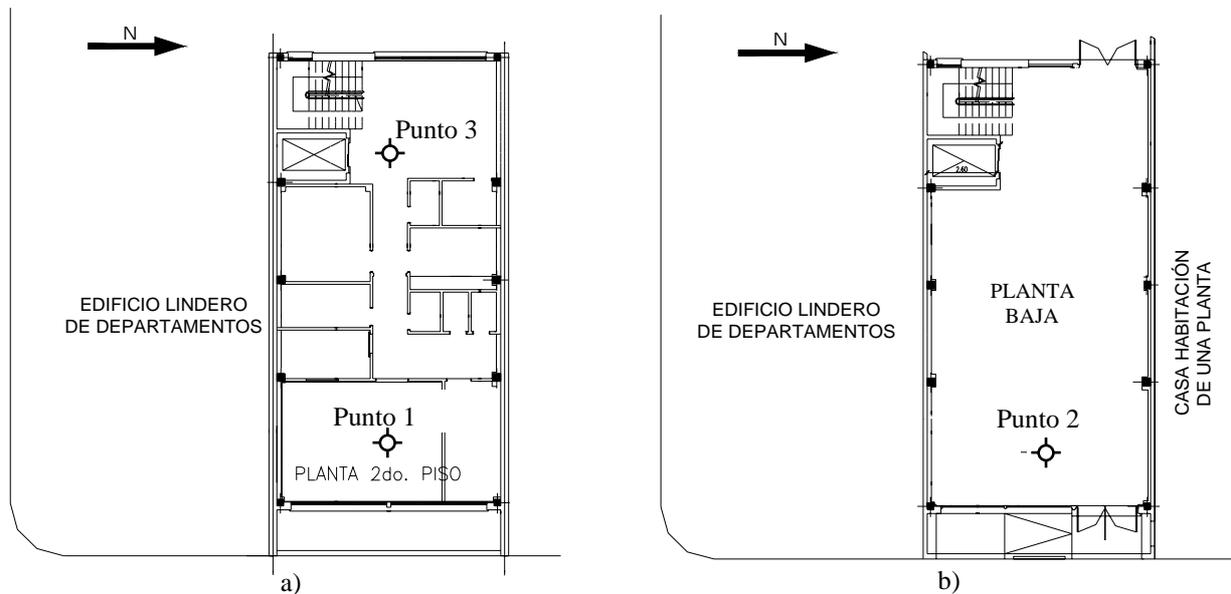


Figura 2: 2.º piso del edificio estudiado (a) y planta baja (b)

### 4 ESTUDIOS PRELIMINARES

Como parte de los chequeos de preinstalación se realizó una medición del nivel de vibraciones (Dalde, 2006). Se determinó así la influencia del tráfico automotor por las calles circundantes y del funcionamiento del ascensor del edificio, pero no pudo determinarse la influencia de otros equipos, como por ejemplo aire acondicionado, compresores, chillers, etc., por no estar todavía instalados al momento de efectuar las mediciones.

La Figura 3 muestra algunos registros relevantes obtenidos durante la medición, procesados convenientemente para facilitar la comparación con los valores máximos exigidos. Se muestran registros en el dominio del tiempo con una duración de 1 segundo y espectros en el rango de frecuencias 0-50 Hz, conteniendo la señal medida en comparación con los límites admisibles, estos últimos dibujados en línea de trazos de rayas color azul.

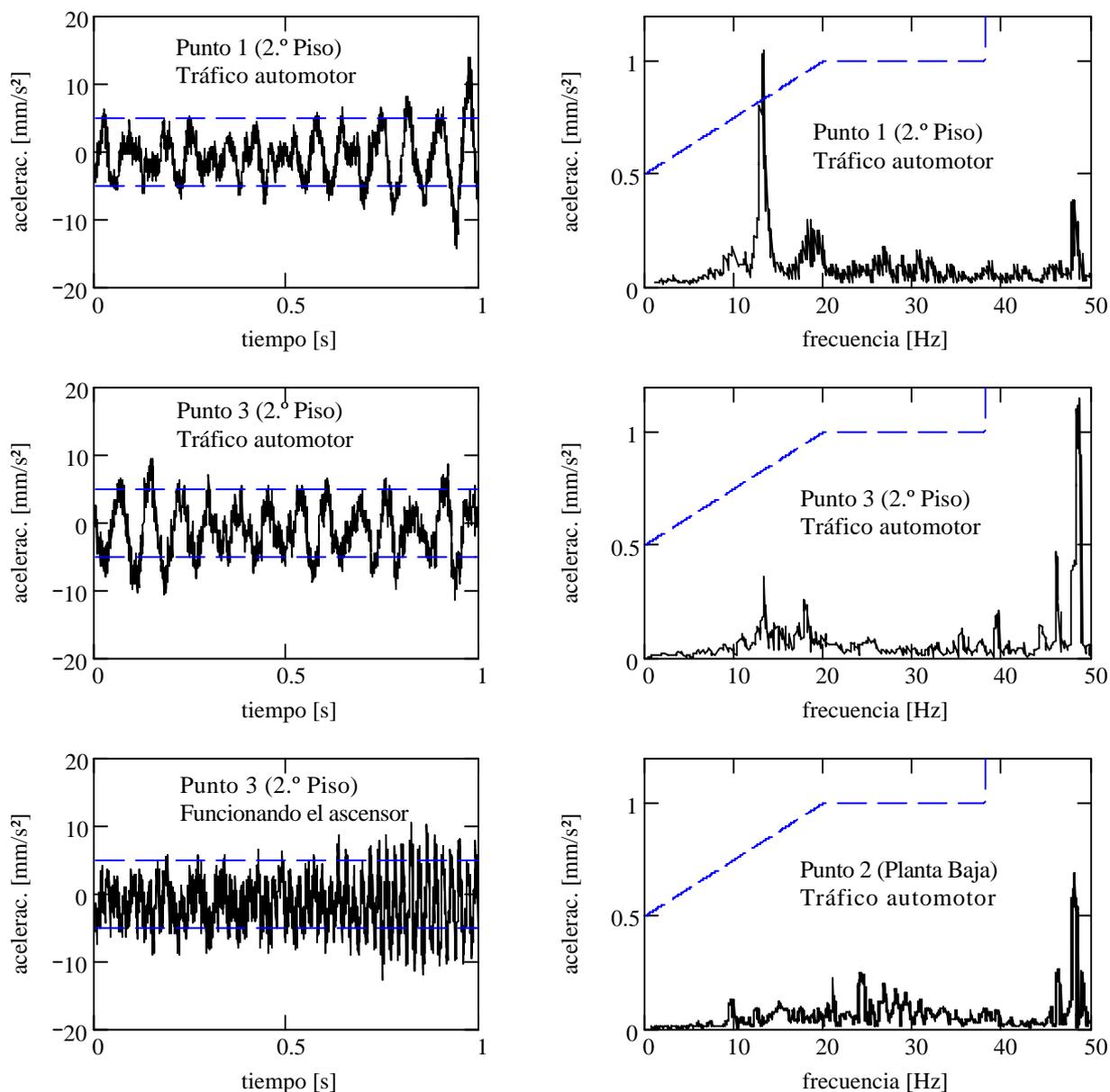


Figura 3: Mediciones de vibraciones preliminares

#### 4.1 Análisis de mediciones preliminares

Los niveles de vibraciones medidos son elevados, superando los límites establecidos por el fabricante del equipo. De un análisis cruzado de las curvas de respuesta temporal y espectros es evidente que los valores máximos de vibraciones se presentan en 13 y 19 Hz y que estas frecuencias no se perciben en las mediciones sobre planta baja. Por esta razón se considera posible que estos picos estén asociados a amplificaciones por resonancias de la losa. Los picos de los espectros en otras frecuencias están presentes en todos los puntos de medición indicando que pueden ser oscilaciones forzadas debidas a cargas provenientes desde el exterior o equipos (p.e. ascensor) del mismo edificio. Del análisis de las curvas resulta que una reducción adecuada de las amplitudes en las dos frecuencias citadas conduciría a un mejoramiento del estado vibratorio tal que sea posible encuadrar al sitio dentro de los límites establecidos. Esto puede ser logrado amortiguando las amplitudes debidas a resonancias y aislando las excitatrices que fuerzan una respuesta en la losa del 2.º piso.

## 4.2 Metodología propuesta

Como parte de la metodología propuesta en el presente trabajo, a esta altura del desarrollo es conveniente realizar un análisis modal de la losa, para determinar sus propiedades dinámicas, frecuencias propias y amortiguamientos críticos y efectuar otras mediciones para chequear las amplitudes. El nuevo relevamiento del nivel de vibraciones se realiza con el objeto de generar información suficiente para la toma de decisión respecto de eventuales medidas estructurales tendientes a posibilitar la instalación y funcionamiento correcto del resonador en un ambiente vibratorio, que excede las especificaciones correspondientes.

Las excitatrices que deben considerarse en las mediciones son el tráfico automotor, los equipos colindantes a la sala del futuro resonador y las personas circulando en las proximidades del punto de instalación de la máquina. Los puntos de medición previstos están en el 2.º piso y en la planta baja.

## 5 MEDICIONES COMPLEMENTARIAS, ANÁLISIS MODAL

Las mediciones de la segunda etapa se realizaron usando transductores ubicados en el lugar donde se instalará el equipo en el Punto 1 en el 2.º piso y en el punto 2 en la planta baja indicados en la [Figura 2](#). Otros puntos sobre la losa se utilizan para el análisis modal y son detallados más adelante. Para definir las distintas mediciones se hizo un relevamiento de las excitatrices principales. Ningún equipo auxiliar pudo ser considerado porque el edificio estaba todavía en construcción al momento de las mediciones. La [Figura 4](#) resume los registros obtenidos en el tiempo y los espectros correspondientes.

### 5.1 Análisis de las mediciones complementarias

El tráfico automotor no era intenso en el momento de las mediciones y la velocidad de los vehículos estaba limitada por haber autos estacionados en ambos lados de la calle. Los registros en el punto donde se ubicará el resonador entran dentro de las especificaciones. En el espectro se distinguen los picos en las frecuencias 13, 19 y 30 Hz. Los valores máximos de aceleraciones en el punto de ubicación del MRI debido a la caminata fuerte de cuatro personas sobre la losa del 2.º piso arrojaron valores que exceden las especificaciones en el dominio del tiempo. Se destaca la contribución especialmente grande de la frecuencia 13 Hz. En la planta baja y para tráfico automotor los valores máximos están apenas excedidos sólo para los registros temporales y no en los espectros de frecuencias.

### 5.2 Análisis modal de la losa del 2.º piso

La [Figura 5](#) resume los resultados del análisis modal de la losa del 2.º piso. El modo 1 (13 Hz) resulta un modo típico de placa apoyada, con una semionda en el sentido longitudinal y una en el sentido transversal. El modo 2 (19 Hz) y el modo 3 (29 Hz) están asociados a un número mayor de semiondas en el sentido longitudinal, manteniendo siempre una semionda en el sentido transversal. Los modos antisimétricos (no mostrados) presentan frecuencias mayores a 50 Hz, por lo que carecen de relevancia justificando así la adopción de un modelo que representa una mitad simétrica longitudinal. Los modos considerados resultan casi simétricos respecto de un eje longitudinal de la losa (eje E-O), con excepción de las asimetrías generadas en el lado SO por la presencia del ascensor y la escalera. Esta asimetría de geometría es responsable de la aparición de variaciones locales de los modos 1, 2 y 3 en 14, 18 y 27 Hz respectivamente.

El análisis modal confirma las presunciones resultantes del análisis de mediciones preliminares. En la [Figura 6](#) se muestran señales típicas obtenidas durante el proceso de análisis modal. El amortiguamiento medido por el método del decremento logarítmico es del 6 %.

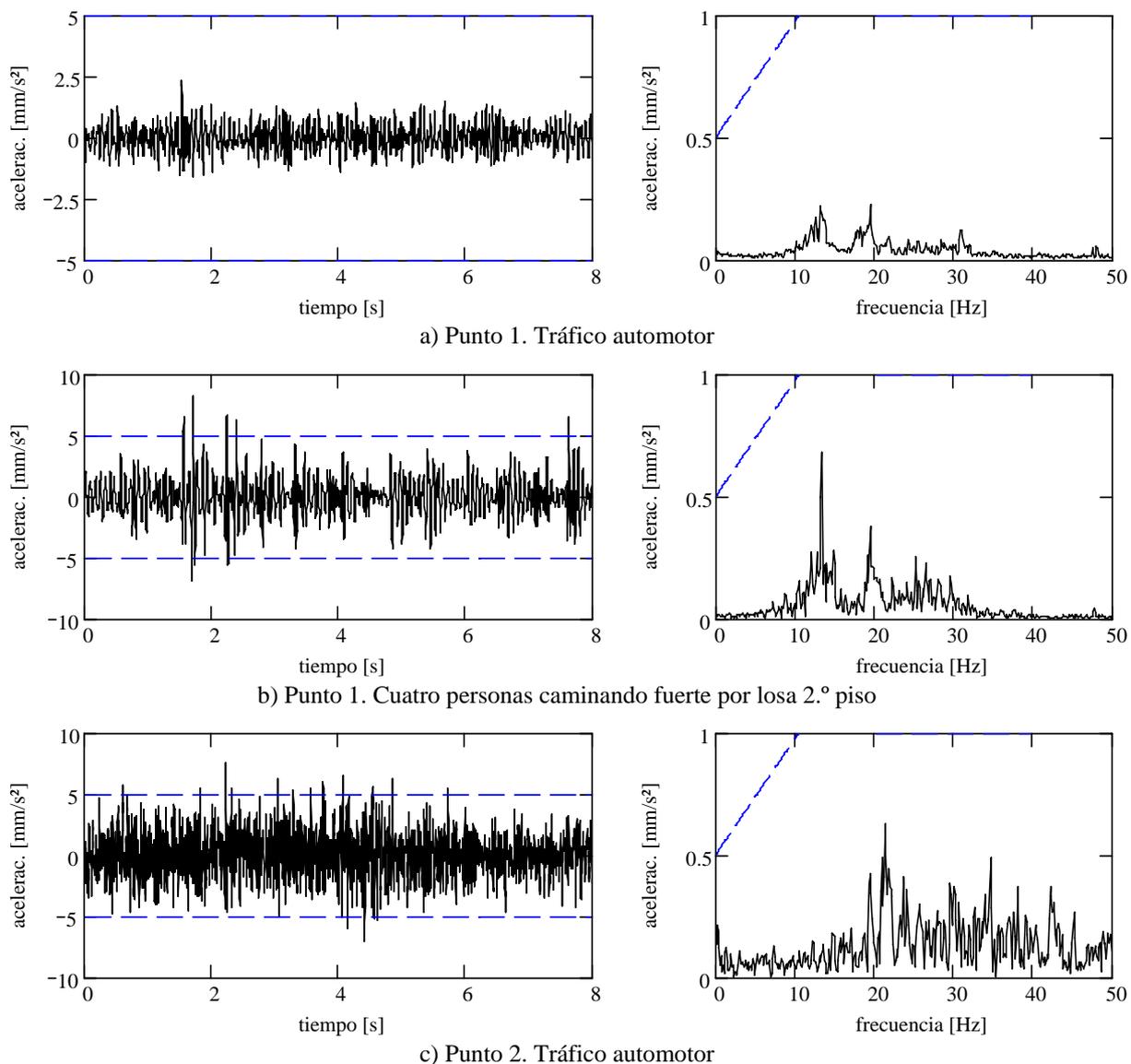


Figura 4: Registros complementarios y espectros correspondientes

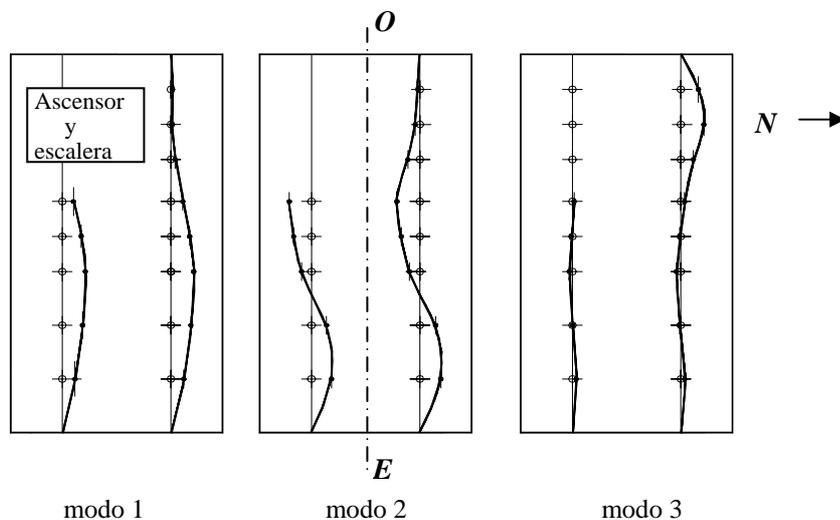


Figura 5: Formas modales del análisis modal experimental

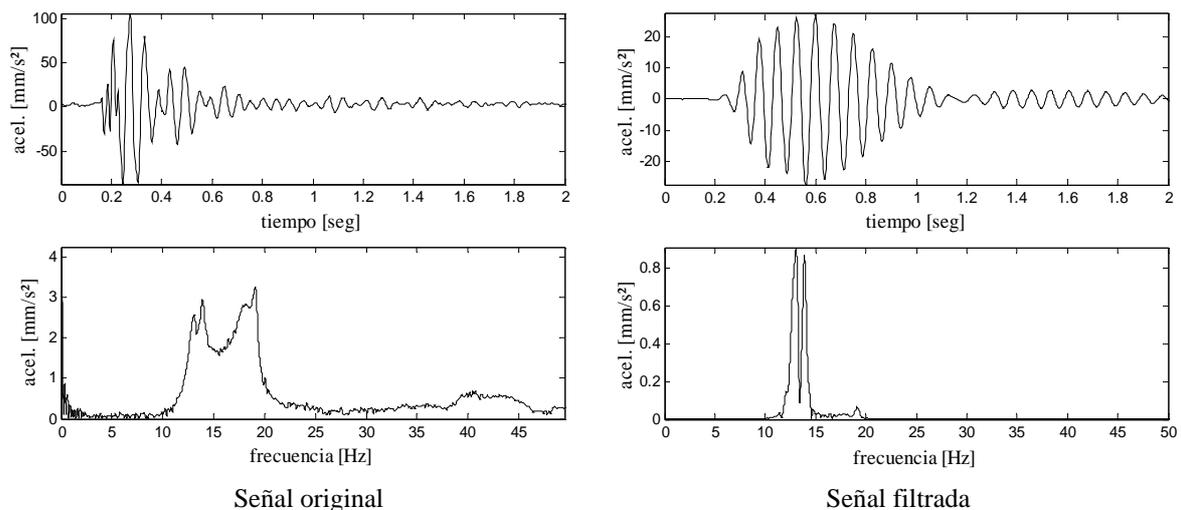


Figura 6: Señal por golpe en losa del 2.º piso para determinar amortiguamiento, Punto 1, modo 1

### 5.3 Solución propuesta

De acuerdo con las mediciones, se puede anticipar que para una actividad normal del edificio, se producirán grandes amplificaciones que llevarán a la losa a una condición vibratoria inadecuada para el funcionamiento del equipo de resonancia magnética, debido a su sensibilidad a las vibraciones inducidas en la misma estructura. Por ello deberán tomarse medidas para lograr el aislamiento de los futuros emisores de vibraciones a instalar en el edificio. Ante la imposibilidad de prever a futuro el nivel final de vibraciones del edificio en pleno funcionamiento se opta en este trabajo por una solución del tipo Modificación Estructural ME2 agregando amortiguamiento estructural por medio de la conexión puntual de la losa con amortiguadores fundados en la planta baja. La colocación de absorbedores dinámicos TMD, que no hubiesen necesitado columnas de amarre, no fue considerada porque al presente no hay en la literatura evidencia de que sean efectivos cuando los desplazamientos son de unos pocos micrómetros, y además porque requieren una puesta a punto en obra y son extremadamente sensibles a variaciones de las frecuencias propias de la losa.

## 6 MODELOS NUMÉRICOS UTILIZADOS

A pesar de su de forma sencilla, la losa de hormigón estudiada está compuesta por plantas de distintas secciones y está provista de nervios de variadas dimensiones (Figura 7.a). Debido a requerimientos técnicos del equipo de MRI, las vigas por debajo de la losa son especialmente delgadas y de mayor altura, de manera de alejar la masa de acero magnético del nivel de superficie. El modelo de elementos finitos utilizado (Figura 7.b) representa la mitad longitudinal de la losa, que fue considerada simétrica, y pretende detectar las propiedades dinámicas del conjunto complejo de distintas secciones que conforman su planta total.

Otro modelo simplificado del conjunto losa-sistema amortiguador (Figura 8), considera a la losa en un espacio reducido de variables modales y es utilizado para analizar y optimizar las características de los módulos amortiguadores, compuestos por dispositivos disipadores, columnas de soporte, bloques de fundación y el suelo de fundación. Debe prestarse especial cuidado al diseño de estos sistemas, para asegurar que el conjunto funcione adecuadamente. El segundo modelo es analizado en el dominio de la frecuencia porque el amortiguamiento de los disipadores resulta no proporcional y dependiente de esta variable. Los amortiguadores previstos son del tipo viscoso, con una constante de amortiguamiento vertical que varía según la frecuencia como se muestra en la Figura 9.

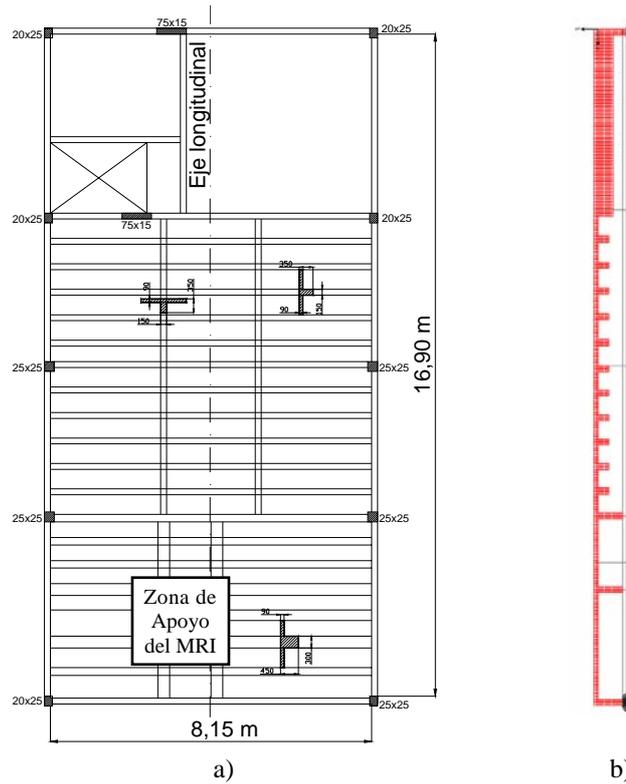


Figura 7: Vista en planta de la losa donde apoya el equipo de MRI (a) y sección longitudinal del modelo de Elementos Finitos de la losa (b)

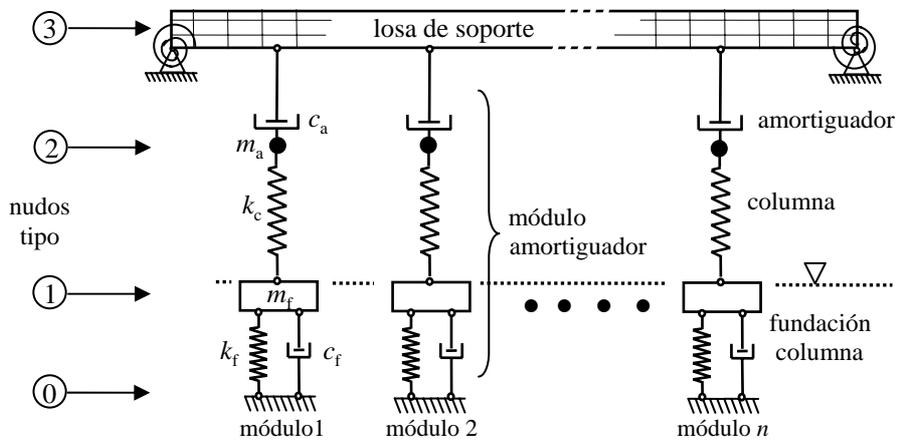


Figura 8: Modelo reducido del sistema losa-amortiguadores

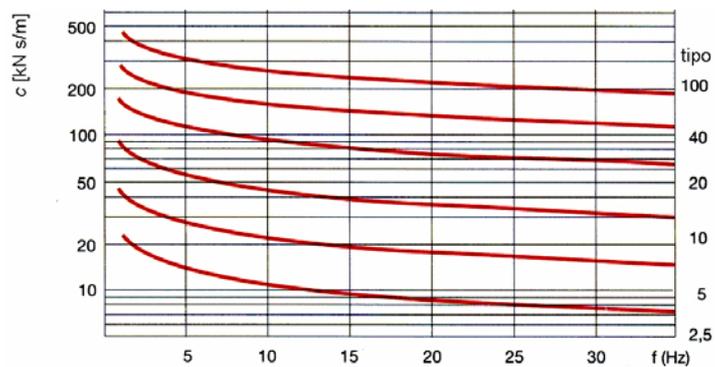


Figura 9: Variación del amortiguamiento para amortiguadores viscosos comerciales

El sistema de ecuaciones que determina la respuesta del conjunto losa-sistema de amortiguamiento puede ser escrita en el dominio de la frecuencia como:

$$[K(1+i2\beta)+i\omega C(\omega)-\omega^2 M] u(\omega) = F(\omega) \tag{1}$$

donde  $K$  y  $M$  son las matrices de rigidez y masa,  $C$  es la matriz de amortiguamiento proveniente de los disipadores agregados,  $\beta$  es el coeficiente de amortiguamiento histerético de la estructura,  $u(\omega)$  los desplazamientos y  $F(\omega)$  las fuerzas aplicadas a los nudos. El término entre corchetes representa la rigidez dinámica  $K_d(\omega)$ . El sistema de ecuaciones puede partitionarse en los grados de libertad  $A$  (Amortiguador) correspondientes a los nudos tipo 0, 1 y 2 de los módulos amortiguadores y en los grados de libertad  $E$  (Estructura) correspondientes a los nudos tipo 3 del modelo de elementos finitos de la losa mostrado en la **Figura 8**:

$$\begin{bmatrix} K_{dAA} & K_{dAE} \\ K_{dEA} & K_{dEE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A \\ u_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_A \\ F_E \end{bmatrix} \tag{2}$$

La contribución de cada módulo amortiguador a la rigidez dinámica global puede ser expresada mediante las matrices de rigidez  $K_a$ , amortiguamiento  $C_a$  y masa  $M_a$  de un módulo genérico como sigue:

$$K_a = \begin{bmatrix} \overbrace{k_f}^0 & \overbrace{-k_f}^1 & \overbrace{0}^2 & \overbrace{0}^3 \\ -k_f & k_f+k_c & -k_c & 0 \\ 0 & -k_c & k_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad C_a(\omega) = \begin{bmatrix} c_f & -c_f & 0 & 0 \\ -c_f & c_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_a & -c_a \\ 0 & 0 & -c_a & c_a \end{bmatrix}; \quad M_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

donde  $k$ ,  $c$ , y  $m$  indican rigidez, amortiguamiento y masa y los subíndices  $f$ ,  $c$ , y  $a$  indican fundación, columna y amortiguador respectivamente. A continuación se muestra la contribución de los módulos amortiguadores a la matriz de rigidez y de amortiguamiento global del sistema, luego de imponer condiciones de borde:

$$K = \left[ \begin{array}{ccc|cc|cc|cc} k_f+k_c & -k_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & k_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & k_f+k_c & -k_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & k_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & \ddots & & & & & \\ & & & & & \ddots & & & & \\ \hline & & & & & & & & 0 & \\ & & & & & & & & 0 & \\ & & & & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & & & \ddots \end{array} \right] \tag{4}$$

módulo 1
módulo 2
módulo 3 a n
nudos tipo 3

$\left. \begin{array}{l} n \text{ módulos} \\ \text{amortiguadores} \end{array} \right\}$ 
  
 $\left. \begin{array}{l} \text{partición E} \\ \text{nudos tipo 3} \\ \text{losa del 2.º} \\ \text{piso} \end{array} \right\}$



## 6.1 Cálculo de los parámetros que definen la cadena de amortiguadores

Una primera aproximación del amortiguamiento que se agregará puede ser obtenida ignorando los términos fuera de la diagonal de la matriz de amortiguamiento, esto es asumiendo amortiguamiento proporcional:

$$\xi_i = \frac{\bar{m}_{i,i}^{-1}}{2\omega_i} \phi_i^T C_{EE} \phi_i \quad i = 1, \dots, m \quad (10)$$

donde  $\omega_i$  es la frecuencia natural circular del modo  $i$ , y  $m$  es el número de modos considerados. La efectividad del amortiguador se ve modificada por las propiedades dinámicas de su apoyo “fijo”, compuesto por la columna y la fundación. Las dimensiones físicas de ambas deben ser limitadas por razones de arquitectura de obra.

El criterio básico de diseño de la fundación de la columna es que su frecuencia natural vertical no esté dentro del rango de frecuencias de interés de la losa, esto es, su rigidez dinámica se mantenga aproximadamente constante en el rango de frecuencias considerado. Por lo tanto, si la fundación es del tipo tradicional rígida, su masa debe ser mantenida relativamente baja para que la frecuencia natural no decaiga. En este caso, el amortiguamiento de los modos más altos se ve perjudicado por la flexibilidad de la fundación. Dependiendo del caso particular, una fundación elástica es también posible, basada en frecuencias naturales bajas. Una fundación del tipo inercial para los amortiguadores conduce a un mejoramiento de la rigidez dinámica a altas frecuencias y una consecuente pérdida relativa de efectividad para los modos bajos. De acuerdo al tipo de suelo y las posibilidades concretas es necesario verificar distintas posibilidades del sistema de apoyo que satisfagan requerimientos de diseño estructural, arquitectónico y económico. La frecuencia axial natural de las columnas debe exceder la frecuencia máxima de trabajo de los disipadores para evitar interacciones dinámicas.

## 6.2 Análisis de la solución propuesta

La losa del 2.º piso del edificio es una losa de dimensiones relativamente grandes sin apoyos intermedios. Posee amortiguamiento estructural propio y el derivado de los tabiques internos de construcción seca, y ya que esta contribución es relativamente pequeña, la losa resulta especialmente sensible a las excitaciones que actúan directamente sobre ella, tales como la circulación de personas, camillas y el funcionamiento de equipos. Una mejora sustancial del comportamiento dinámico puede ser lograda aumentando el amortiguamiento estructural y reduciendo la amplificación dinámica en las frecuencias propias. Se pretende llevar la relación de amortiguamiento desde el valor medido de aprox. 6 % a valores comprendidos entre 30-40%. Este rango de amortiguamiento provee una buena reducción en la curva de transmisibilidad en la zona dominada por el amortiguamiento sin aumentar excesivamente su valor en la zona de frecuencias mayores a la frecuencia propia considerada. Una solución posible es la instalación de disipadores que ubicados convenientemente proporcionen a los primeros modos suficiente amortiguamiento. La posición de los dispositivos debe aproximarse lo más posible a los vientres de las formas modales correspondientes a los modos a amortiguar, sin embargo está sujeta a fuertes condicionamientos desde el punto de vista arquitectónico y de la habitabilidad. Los disipadores pueden disponerse como un par simétrico para el modo 1, dos pares simétricos para el modo 2 y un disipador adicional en la zona asimétrica de la losa para el modo 3, (Figura 10.a). Teniendo en consideración que los disipadores deben amortiguar microdesplazamientos, la cadena de componentes del sistema debe ser fijada rígidamente. El dispositivo va montado por sobre el extremo superior de la columna y por debajo de la losa del 2.º piso según se muestra en el esquema básico de la Figura 10.b. Las posiciones finales mostradas de las columnas responden no sólo a consideraciones estructurales, sino también a

las posibilidades desde el punto de vista de la funcionalidad del edificio.

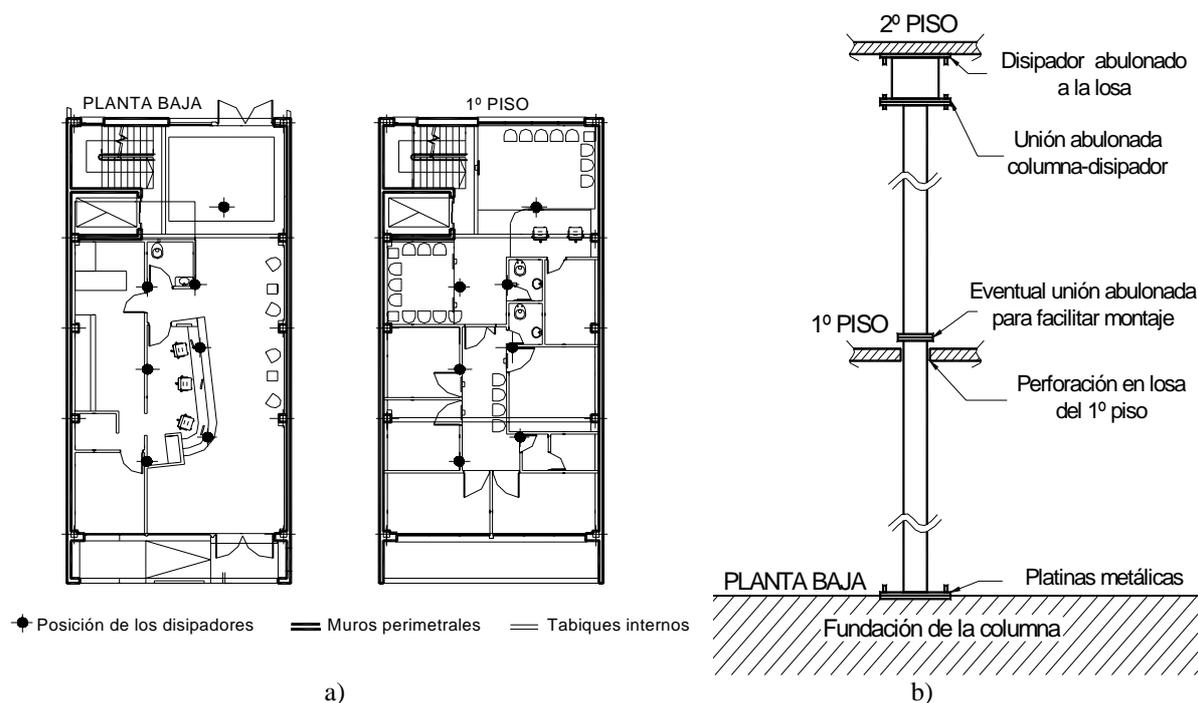


Figura 10: Ubicación de las columnas de los disipadores en planta baja y 1er. piso (a)  
Esquema de montaje de la columna con el dispositivo disipador (b)

## 7 RESULTADOS OBTENIDOS

El modelo de elementos finitos fue calibrado para ajustarlo a las frecuencias medidas experimentalmente. Los modos obtenidos por programa de cálculo son mostrados en [Figura 11](#).

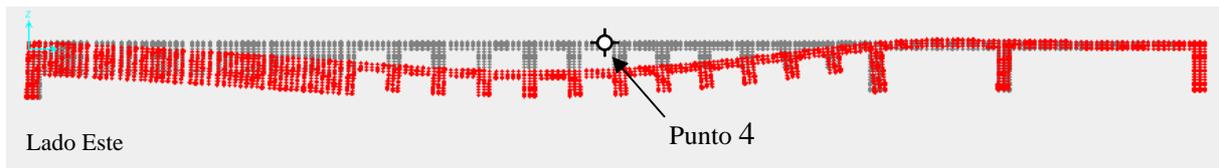
Los parámetros del sistema de disipación fueron optimizados mediante el uso de un programa de cálculo desarrollado para tratar el modelo simplificado ([Figura 8](#)), de manera de obtener una eficiencia máxima con mínimos costos de columna y de fundación, considerando las pobres características del suelo de fundación. Se trata de una arcilla plástica con SPT=5 hasta los 3 m de profundidad, a este nivel el número de golpes del ensayo asciende a 15-20 y el coeficiente de balasto es de 3,7 kg/cm<sup>3</sup>. Los parámetros finales optimizados resultan:  $c_a=200$  kN s/m (valor de referencia para 13 Hz),  $k_c=262$  kN/mm, mientras que la fundación posee una  $k_f=100$  kN/mm, una  $m_f=4000$  kgf y un amortiguamiento de suelo de 30%.

La columna posee sólo requerimientos de rigidez (téngase en cuenta que las cargas axiales dinámicas son sólo de algunos daN) y puede construirse mediante 2 perfiles metálicos UPN 22 enfrentados, logrando así una sección de tamaño relativamente pequeño.

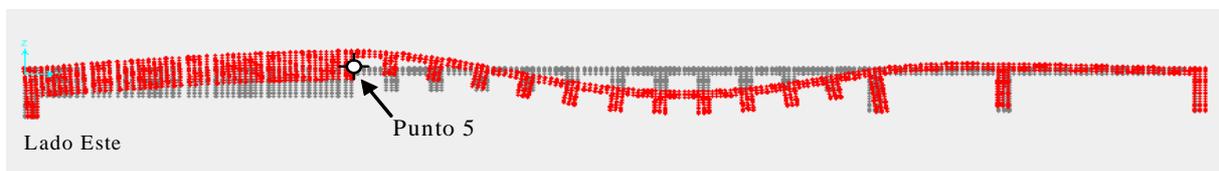
En la [Figura 12](#) se muestra la función de amplificación dinámica proveniente de la diagonal de la matriz de respuesta en frecuencia del modelo para las coordenadas generalizadas de los modos 1, 2 y 3. Los amortiguamientos pueden ser calculados desde las curvas de amplificación dinámica mediante el "half band power method" o a partir del máximo de las funciones. Las relaciones de amortiguamiento resultantes son 33 % para el modo 1, 19 % para el modo 2, y 18 % para el modo 3, por lo que la respuesta en desplazamientos prevista para señales armónicas permanentes en las frecuencias de los modos 1, 2 y 3 se reducen al 18 %, 32 % y 34 % de los desplazamientos respectivos previstos para el amortiguamiento 6%.

El programa de cálculo de los disipadores fue validado a partir del modelo de elementos

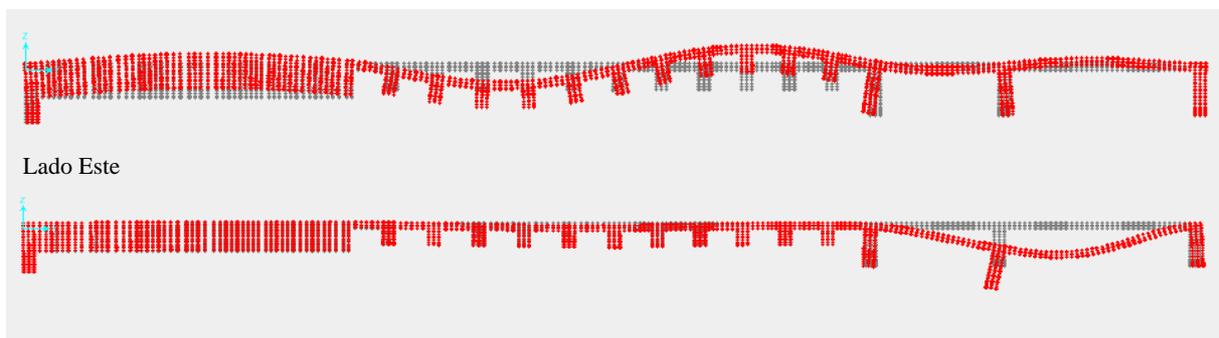
finitos, mediante una integración no lineal en el dominio del tiempo. Debido a que esta formulación no es capaz de modelar la dependencia del amortiguador con la frecuencia, para este caso de cálculo el dispositivo, a efectos comparativos, fue modelado como constante en la frecuencia. Se utilizó un impulso rectangular de duración 0,01 s y amplitud 1 kgf como señal de carga aplicada directamente sobre los Puntos 4 y 5 (ver Figura 11), lo que permite evaluar una aproximación de la función respuesta a impulso de la losa amortiguada en esos mismos puntos. Para un pulso de estas características el 72% de la energía está dentro del ancho de banda, esto es debajo de 44 Hz. En la Figura 13 se observa que hay excelente concordancia entre los resultados del modelo de elementos finitos y el modelo simplificado.



Modelo de elementos finitos; modo 1, 13 Hz



Modelo de elementos finitos: modo 2, 19 Hz



Modelo de elementos finitos: variantes del modo 3, 27 y 29 Hz

Figura 11: Formas modales obtenidas por elementos finitos  
Sección longitudinal central en el plano de simetría del modelo

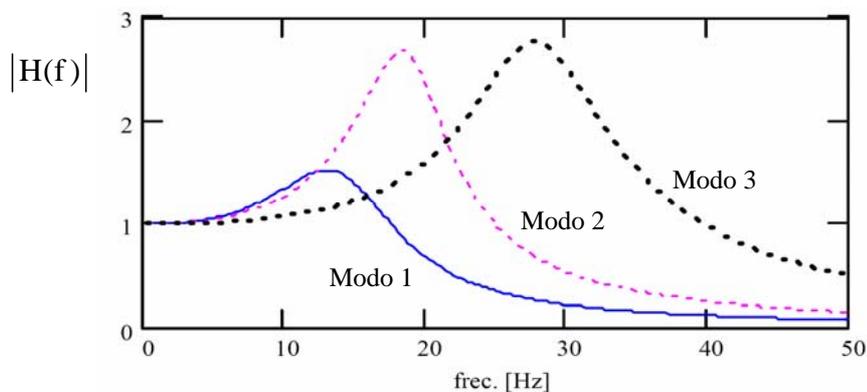


Figura 12: Curvas de amplificación dinámica para los modos 1, 2 y 3

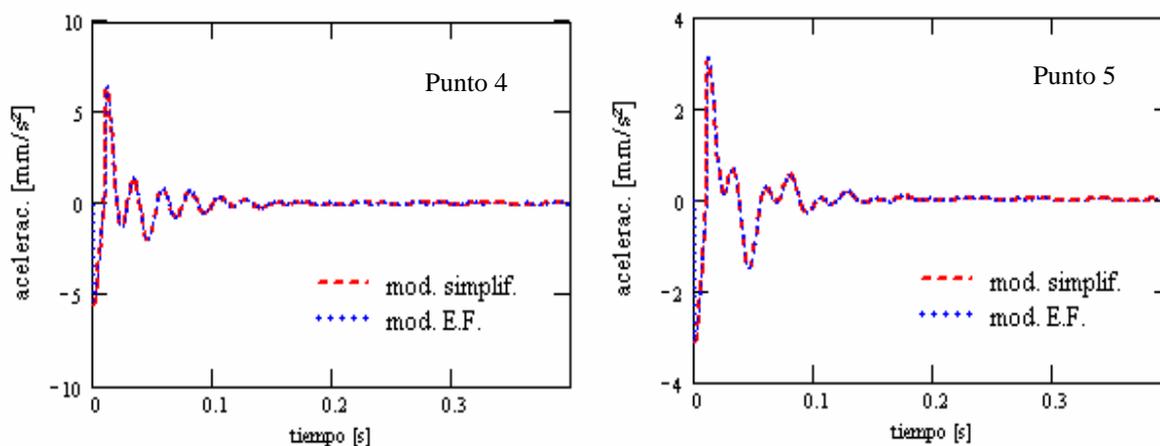
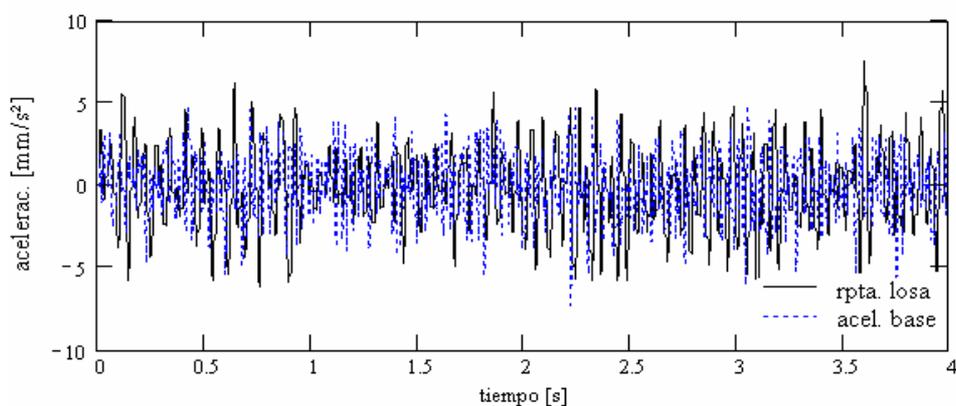


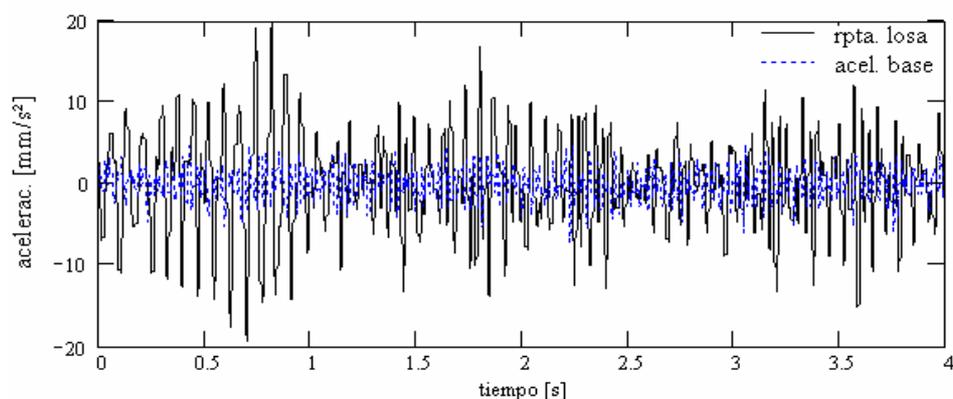
Figura 13: Respuesta de aceleraciones de la losa en los Puntos 4 y 5 para pulso rectangular

Con el objeto de cuantificar la reducción de aceleraciones obtenibles por la presencia de los dispositivos amortiguadores, se aplicó el registro de aceleraciones medido sobre planta baja de la Figura 4.c, como movimiento de base de la losa.

En la Figura 14 se comparan aceleraciones absolutas calculadas en el Punto 4 para el modelo con y sin amortiguadores. De las curvas es evidente que se pueden esperar reducciones de las aceleraciones reales en un factor 2 a 3 de las existentes sin dispositivos amortiguadores en el caso de excitaciones provenientes desde la base.



a) con dispositivos amortiguadores



b) sin dispositivos amortiguadores

Figura 14: Respuesta comparativa en aceleraciones debido a excitación de base

## 8 CONCLUSIONES

Se presenta un análisis general de la problemática de vibraciones en edificios causadas por agentes externos (máquinas, tráfico automotor, férreo, etc.) e internos (sistemas auxiliares y equipamiento técnico en general) y la metodología para reducir sus efectos. Para dar solución al problema de vibraciones aquí presentado, deben considerarse diversas propuestas técnicas que deben ser evaluadas en cuanto a factibilidad y eficacia. En estos casos la experiencia en el uso de dispositivos es importante para obtener una buena relación costo beneficio.

Las mediciones de vibraciones de sistemas estructurales y la obtención de propiedades dinámicas a partir de éstas son una herramienta de utilidad para la calibración del modelo de cálculo. Como solución al problema de vibraciones de una losa de grandes dimensiones en altura se propone la instalación de siete disipadores del tipo viscoso a fin de evitar las amplificaciones dinámicas en resonancia. La solución demuestra ser efectiva para encuadrar el nivel de vibraciones dentro de los límites especificados para un equipo de resonancia magnética de alta sensibilidad.

Se propone un esquema de cálculo mixto basado en dos modelos: a) un modelo detallado de elementos finitos para la estructura, que es calibrado mediante mediciones y b) otro modelo reducido para el cálculo del sistema de disipación, construido a partir de las propiedades dinámicas del primero. Este último modelo de cálculo simplificado del sistema estructura-disipadores está basado en coordenadas geométricas para los amortiguadores y generalizadas para la estructura. La solución de las ecuaciones dinámicas con amortiguamiento no proporcional en el dominio de la frecuencia, permite diseñar el conjunto amortiguador-columna-fundación en forma precisa y sencilla. El sistema es resuelto en el dominio de la frecuencia, atendiendo a la necesidad de considerar la dependencia de la constante de amortiguamiento con esta variable. El modelo propuesto es validado para casos de amortiguamiento independiente de la frecuencia, en algunos casos simplificados mediante un programa de elementos finitos comercial e integración no lineal en el tiempo.

## REFERENCIAS

- I. Aiken. Passive energy dissipation—Hardware and applications. *Proceedings Los Angeles County and Seaosc Symposium on Passive Energy Dissipation Systems for New and Existing Buildings*, Los Angeles, USA, 1996.
- L. Bozzo and A. Barbat. *Diseño sismorresistente de edificios*. Editorial Reverté, 2000.
- D. Dalde. Estudio de campo magnético ambiental y vibraciones, Centro de Diagnóstico Médico Argus. San Isidro, Argentina, 2006.
- W Fiebig, J. Rabiega and F. Dalmer. Reduction of vibration levels on pedestrian bridges by tuned mass dampers. *5th National Conference for Research & Development*, Poland, 2004.
- P. Nawrotzki. Some strategies for the reduction of seismic structural responses. *The first International Conference on Structural Stability and Dynamics*, Taipei, Taiwan, 2000.
- General Electric. Accoustics and vibration guidelines: Signa LCC Magnet (CXK4), M66-15G, 2002.
- T. Soong and B. Spencer Jr. Supplemental energy dissipation: state of the art and state of the practice. *Engineering Structures*, 24(3):243-259, 2002.
- R. Wettschureck and D. Rolf. The dynamic stiffness as an indicator of the effectiveness of a resilient rail fastening system applied as a noise mitigation measure: laboratory tests and field application. *Engineering International*, 4:7-10, 2000.