

## Caracterización dinámica de un edificio residencial de hormigón armado.

*P. Cáceres Tiznado<sup>1</sup>, C. Oyarzo Vera<sup>2</sup> y J.J. Olivera López<sup>3</sup>*

### RESUMEN:

La calibración de modelos numéricos se ha convertido en una tarea indispensable para reducir el error en la predicción del desempeño estructural de sistemas complejos. En las dos últimas décadas se han desarrollado varios métodos de calibración para un modelo numérico, pero es poco frecuente que en la práctica se implementen este tipo de procedimientos. Por lo tanto, el ciclo de análisis-verificación-calibración-diseño suele ser incompleto.

Uno de los métodos experimentales utilizados para determinar las características estructurales de un edificio corresponde a aquellos basados en pruebas de vibración. Este tipo de ensayos permite caracterizar dinámicamente las estructuras, combinando pruebas modales y técnicas de identificación de sistemas. El análisis modal operacional (OMA) es una de estas técnicas que tiene como objetivo identificar las propiedades modales de una estructura basada en su respuesta vibratoria medida cuando la estructura está bajo sus condiciones normales de operación.

Este estudio tiene como objetivo validar y reafirmar las propiedades modales obtenidas en un estudio anterior, para así evaluar el estado de salud estructural de un edificio residencial de hormigón armado. La evaluación estructural se realizará a través de la implementación de dos redes de acelerómetros distintas, las que fueron utilizadas para determinar las frecuencias naturales del edificio. La primera campaña de medición se realizó con acelerómetros Triaxiales de sensibilidad media (Memsic CXL04GP3) y la segunda campaña de medición con acelerómetros unidireccionales de alta sensibilidad (PCB 3252C03) ubicados en uno de los cuatro módulos del edificio (Block A).

Las frecuencias modales del “Block A” fueron identificadas satisfactoriamente mediante dos métodos, uno en el dominio del tiempo y el otro en el dominio de la frecuencia, SSI y FDD respectivamente. La red de acelerómetros implementada en distintos pisos confirmó que se pueden obtener resultados concluyentes y muy similares a un estudio anterior [1] con una menor cantidad de mediciones.

---

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE.

<sup>2</sup> Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE.

<sup>3</sup> Profesor Informante, Ingeniero Civil, Estudiante Programa de Magister, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE.

**ABSTRACT:**

The calibration of numerical models has become an indispensable task to reduce the error in the prediction of the structural performance of complex systems. In the last two decades several methods of calibration have been developed for a numerical model, but it is rare that in practice these types of procedures are implemented. Therefore, the analysis-verification-calibration-design cycle is usually incomplete.

One of the experimental methods used to determine the structural characteristics of a building corresponds to those based on vibration tests. This type of tests allows the dynamic characterization of structures, combining modal tests and systems identification techniques. The operational modal analysis (OMA) is one of these techniques that aims to identify the modal properties of a structure based on its measured vibrational response when the structure is under its normal operating conditions.

This study aims to validate and reaffirm the modal properties obtained in an earlier study, in order to evaluate the structural health status of a residential building made of reinforced concrete. The structural evaluation will be carried out through the implementation of two networks of different accelerometers, which were used to determine the natural frequencies of the building. The first measurement campaign was performed with medium sensitivity Triaxial accelerometers (Memsic CXL04GP3) and the second measurement campaign with high sensitivity unidirectional accelerometers (PCB 3252C03) located in one of the four building blocks (Block A).

The modal frequencies of "Block A" were satisfactorily identified by two methods, one in the time domain and the other in the frequency domain, SSI and FDD respectively. The accelerometer network implemented on different floors confirmed that it is possible to obtain conclusive and very similar results to a previous study [1] with a smaller number of measurements.

## 1. INTRODUCCIÓN

Debido a que Chile está ubicado en el cinturón de fuego del Pacífico, es considerado el segundo país sísmicamente más activo del mundo y el cuarto más expuesto a sufrir daños mayores por catástrofes naturales [2]. Gran parte de Chile se encuentra en la zona de subducción entre las placas del Pacífico y América del Sur. En este contexto, el área de Concepción ha sufrido dos mega terremotos en los últimos 60 años, el terremoto de magnitud 9.5 de Valdivia en 1960 y el terremoto de magnitud 8.8 de Maule en 2010.

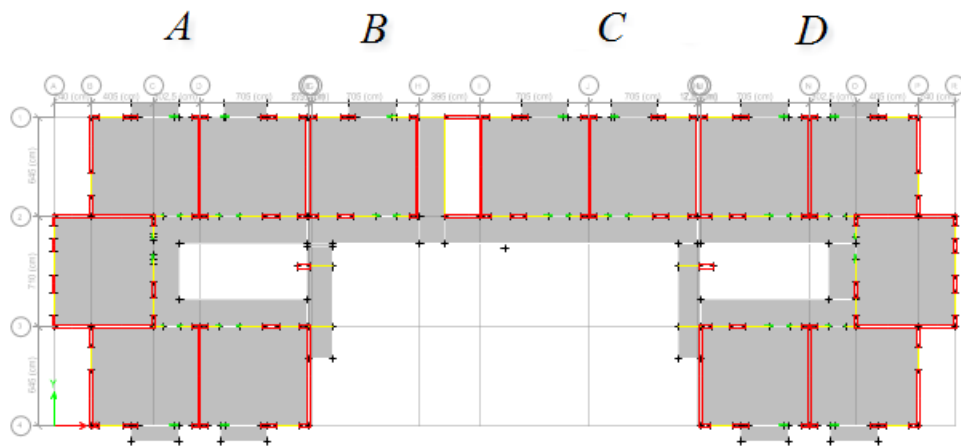
En los últimos años, la modelación numérica de sistemas estructurales y el uso de software se han convertido en un trabajo rutinario en las empresas de ingeniería. Para desarrollar un modelo numérico adecuado de la estructura es necesario reducir el número de errores a un nivel aceptable. Sin embargo, incluso con los más cuidadosos y detallados modelos numéricos se producen diferencias entre los resultados estimados de forma numérica y los obtenidos experimentalmente. Por lo general, los errores entre estos resultados son significativos y se deben a numerosas causas, algunas de ellas resultantes de supuestos de idealización o simplificaciones y otras relacionadas con errores de discretización intrínseca introducidos por los métodos numéricos empleados que no pueden ser corregidos [3]. Uno de los métodos más atractivos para obtener datos experimentales consiste en medir la respuesta dinámica de una estructura cuando es excitada por acciones de baja intensidad. Estas acciones inducen una respuesta de vibración elástica de la estructura a partir de la cual se pueden estimar las propiedades modales. Este tipo de análisis se conoce en la comunidad de dinámica estructural como Análisis Modal. Dentro de este grupo de análisis, el modal operacional (OMA) es una técnica experimental que tiene como objetivo identificar las propiedades modales de una estructura basada en datos de vibración recogidos cuando la estructura está bajo sus condiciones normales de operación. Las propiedades modales determinadas son las frecuencias naturales, razones de amortiguación y formas modales.

Una vez que los parámetros modales de la estructura han sido identificados experimentalmente, los errores existentes en el modelo inicial pueden ser corregidos reduciendo las discrepancias del modelo mediante la aplicación del método de optimización, redes neuronales, matrices de sensibilidad y otros, denominándose dicho proceso de mejora, actualización de modelos. El objetivo final de la actualización es producir modelos corregidos y verificados que puedan ser utilizados para una mejor predicción de la respuesta estructural bajo acciones extremas. También contribuirá a un diagnóstico más preciso de la salud estructural y mejorará el diseño de las intervenciones de adaptación necesarias.

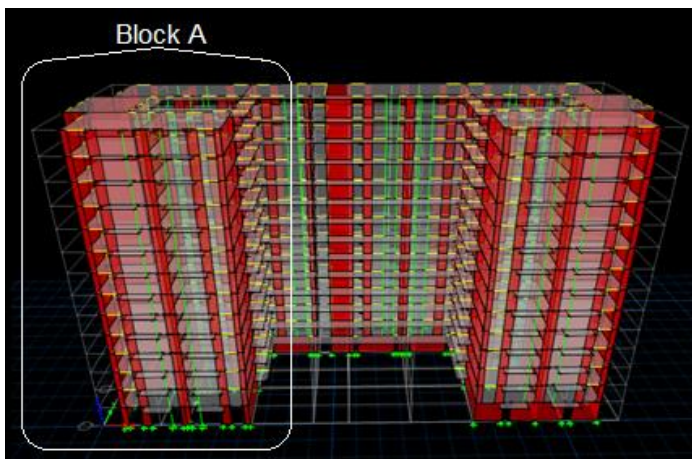
Este estudio tiene como objetivo validar y reafirmar las propiedades modales obtenidas de un estudio anterior [1], para evaluar el estado de salud estructural de un edificio residencial de hormigón armado. La evaluación estructural se realizará a través de 2 tipos distintos de sensores de vibración (acelerómetros) ubicados en el "Block A" del edificio, para identificar las frecuencias naturales de éste. Estos datos experimentales se utilizarán para obtener un modelo numérico mejorado, el cual se empleará posteriormente para predecir el comportamiento de la estructura bajo acciones sísmicas e hidrodinámicas extremas, con el fin de evaluar su viabilidad para designar este edificio como una estructura de evacuación vertical durante una amenaza de tsunami.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

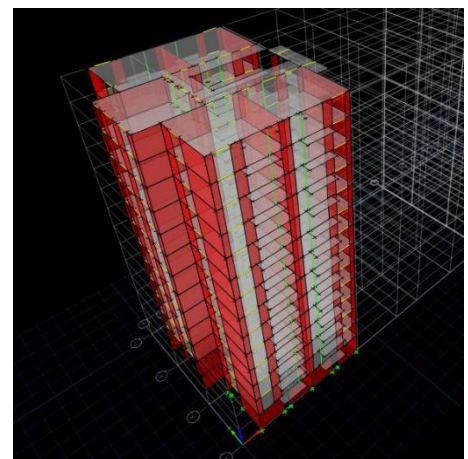
La estructura corresponde a un edificio residencial de hormigón armado ubicado en la provincia de Concepción, Chile. El edificio consta de 14 niveles (aproximadamente 33 m de altura). Está constituido por muros (15, 20 y 25 cm de espesor) y marcos de hormigón armado. Los pisos corresponden a losa de hormigón de 15 cm de espesor. El edificio está dividido en cuatro bloques separados por espacios de expansión sísmica de 2,5 cm. El hormigón utilizado corresponde a un hormigón H-30 [4]. Sin embargo, estudios en terreno [5] han demostrado que la calidad del hormigón varía significativamente en los distintos niveles de la estructura.



**Fig 1.** Vista en planta del modelo del edificio.



**Fig 2.** Modelo de edificio en 3D.



**Fig 3.** Modelo Block A en 3D.

### 3. ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL

#### 3.1 Instrumentación

Teniendo en cuenta que el edificio está ubicado en frente de una carretera principal y que está expuesto a la acción de viento, se realizó un Análisis Modal Operacional (OMA) para identificar las frecuencias naturales del edificio y sus correspondientes amortiguamientos con dos tipos distintos de acelerómetros.

La primera campaña experimental se realizó utilizando **acelerómetros triaxiales de sensibilidad media (Memsic CXL04GP3)** [6]. Estos transductores son capaces de medir en las tres direcciones principales, con una sensibilidad de 500 mV/g, en un rango de +/- 4g hasta 100 Hz. El sistema de adquisición de datos está constituido por un módulo de voltaje NI9205 montado en un chasis cDAQ-9174, fabricado por National Instruments. Los acelerómetros se conectaron al sistema de adquisición mediante cables multipolar cuya longitud varía entre 10 y 50 m. Estos cables estaban blindados con papel de aluminio, con el fin de evitar una contaminación de la señal procedente de alguna fuente de voltaje ubicada en las cercanías del edificio. La adquisición de datos fue controlada por una rutina programada en una plataforma LabView.



**Fig 4.** cDAQ-9174.



**Fig 5.** Acelerómetros Memsic CXL04GP3.

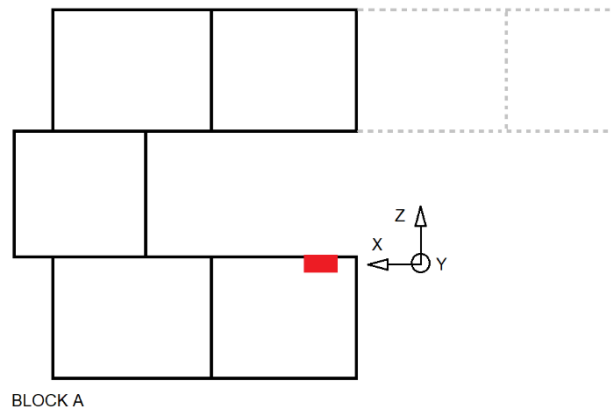


**Fig 6.** Módulo de voltaje NI9205.



**Fig 7.** Caja conectora.

En esta campaña se utilizaron siete acelerómetros ubicados en los pisos 14°, 12°, 10°, 8°, 6°, 4° y 2°. Se realizaron cinco mediciones de 60 minutos, a una frecuencia de muestreo de 200 Hz. Luego la señal fue filtrada mediante un filtro Butterworth de pasa-baja de orden 6, considerando una frecuencia de corte de 50 Hz.



**Fig 8.** Esquema de ubicación de acelerómetros Memsic en Block A.

La segunda campaña experimental se realizó utilizando **tres acelerómetros unidireccionales de alta sensibilidad (PCB 352C03)** [3] conectados por cables a un sistema de adquisición de datos de National Instrument (módulo NIcDAQ-9174 y NI9234) controlado por un código LabView desarrollado por los autores para registrar la respuesta del edificio. Estos acelerómetros son capaces de medir con una sensibilidad de 10 mV/g en un rango entre 0,5 a 10.000 Hz. Estos sensores se conectan directamente al módulo y no requieren de una caja conectora.

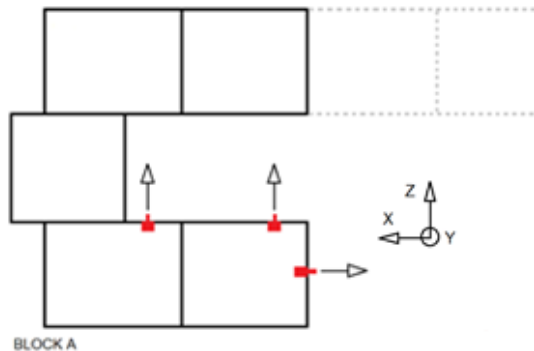


**Fig 9.** Acelerómetros modelo 352C03.



**Fig 10.** Módulo NI9234.

En esta campaña se realizaron cuatro mediciones de 60 minutos en los pisos 13°, 9°, 5° y 1°, con una frecuencia de muestreo de 2048 Hz. Dos de los acelerómetros fueron ubicados en la dirección “Z” (Oeste - Este) y el tercero en dirección “X” (Norte - Sur). Luego la señal fue filtrada mediante un filtro Butterworth de pasa-baja de orden 6, considerando una frecuencia de corte de 50 Hz.



**Fig. 11.** Distribución de acelerómetros unidireccionales en Block A.

### 3.2 Identificación de parámetros modales

Se emplearon dos métodos de identificación de sistemas para determinar las propiedades modales de la estructura: Stochastic Subspace Identification y Frequency Domain Decomposition.

Stochastic Subspace Identification (SSI) [7]:

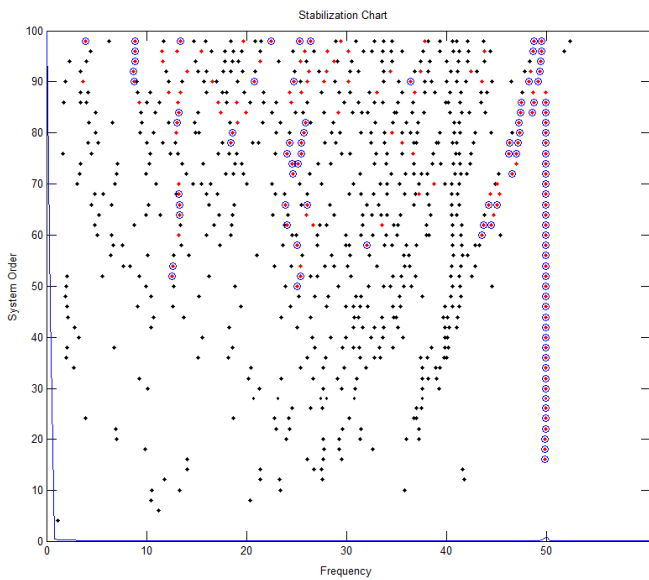
SSI es un método que trabaja directamente con el registro en el dominio del tiempo, resuelve la ecuación dinámica en el espacio de estados y encuentra las frecuencias modales de los gráficos de estabilización. En general, no es posible determinar el orden de sistema de antemano. Por lo tanto, es necesario repetir el análisis con diferentes órdenes y verificar la repetitividad de los resultados. En este gráfico, los puntos representan las frecuencias fundamentales de los polos (modos) con orden de sistema diferente. Los puntos rojos rodeados de anillos azules representan frecuencias modales identificadas en modos estados-espacio con orden de sistema diferente, cuyas formas de modo también son similares. Es muy probable que los polos que revelan estabilidad en términos de frecuencias y formas de modos similares (normalmente alineados en una columna vertical en el gráfico) representen modos de vibración.

Frequency Domain Decomposition (FDD) [8]:

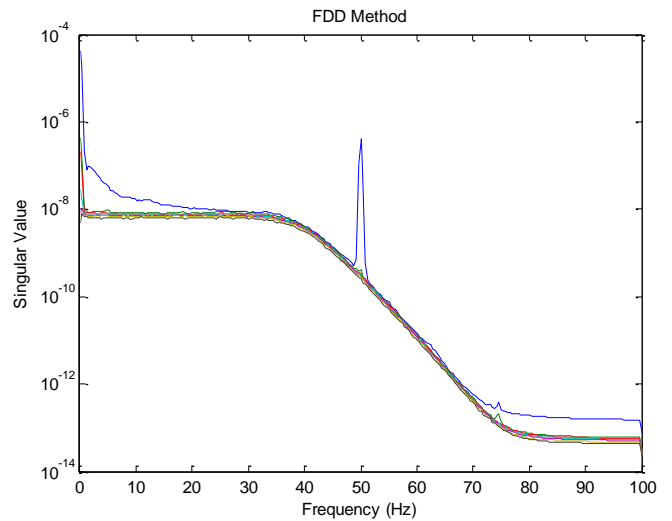
El método FDD es una extensión del clásico método peak-picking. El algoritmo FDD asume que la excitación aplicada sobre la estructura tiene una naturaleza aleatoria y puede ser descrita como un ruido blanco. Por lo tanto su densidad espectral de potencia (PSD) es una constante, es decir, una gráfica plana. Estos picos en la función PSD se asumen como frecuencias de resonancia y las formas de modo se pueden determinar aplicando procedimientos de Descomposición de Valor Singular (SVD).

### 3.2.1 Resultados con Acelerómetros Memsic (CXL04GP3)

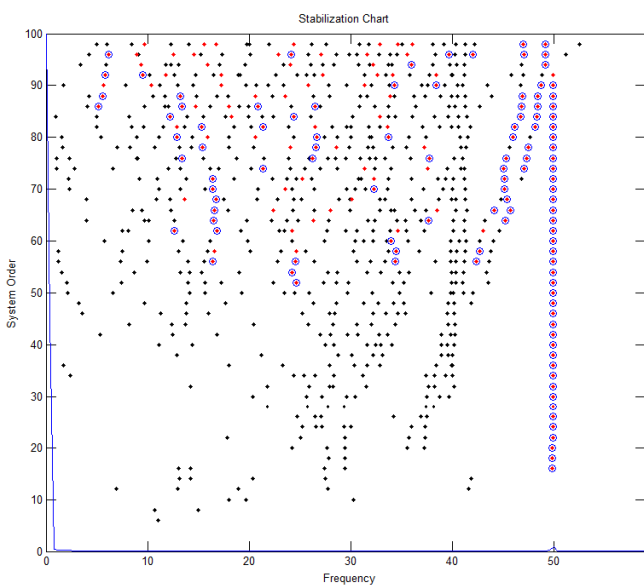
Los resultados de esta campaña experimental no fueron claros, debido a la alta contaminación eléctrica del lugar, baja sensibilidad de los acelerómetros y posibles problemas en parte del equipo de adquisición de datos (caja conectora). De tal manera que resultó imposible distinguir entre las frecuencias obtenidas de la estructura y las del ruido eléctrico. Lo dicho anteriormente se puede observar de mejor manera en las Figuras 12 a la 14.



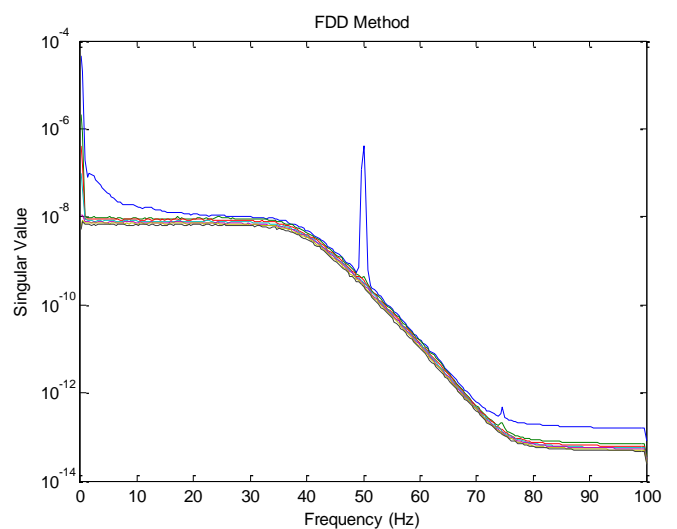
**Fig. 12. a.** Gráfico de estabilización obtenido por SSI dirección X. (Oeste – Este).



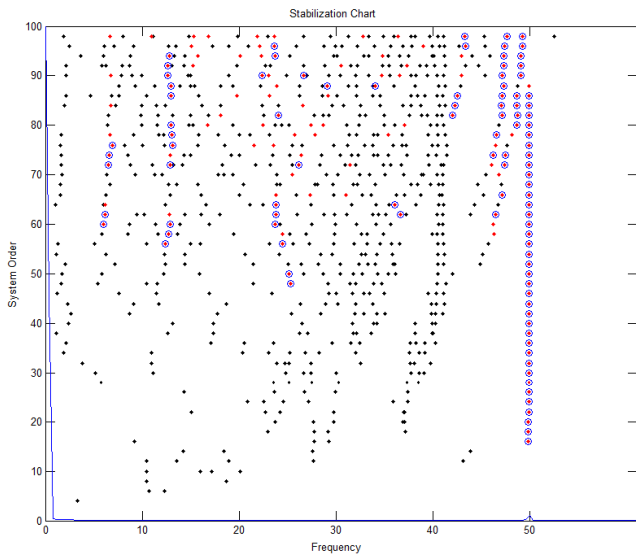
**Fig. 12. b.** Función de densidad espectral obtenida por FDD dirección X. (Oeste – Este).



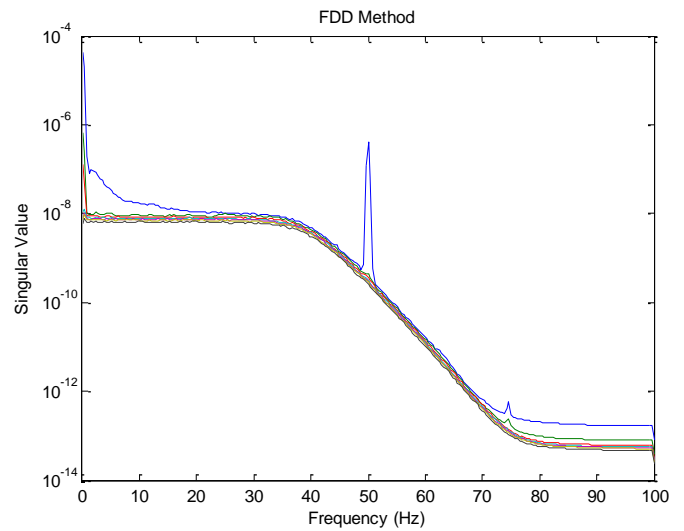
**Fig. 13. a.** Gráfico de estabilización obtenido por SSI dirección Y. (Vertical).



**Fig. 13. b.** Función de densidad espectral obtenida por FDD dirección Y. (Vertical).



**Fig. 14. a.** Gráfico de estabilización obtenido por SSI dirección Z. (Norte – Sur).



**Fig. 14. b.** Función de densidad espectral obtenida por FDD dirección Z. (Norte – Sur).

### 3.2.2 Acelerómetros Unidireccionales (PCB 3252C03)

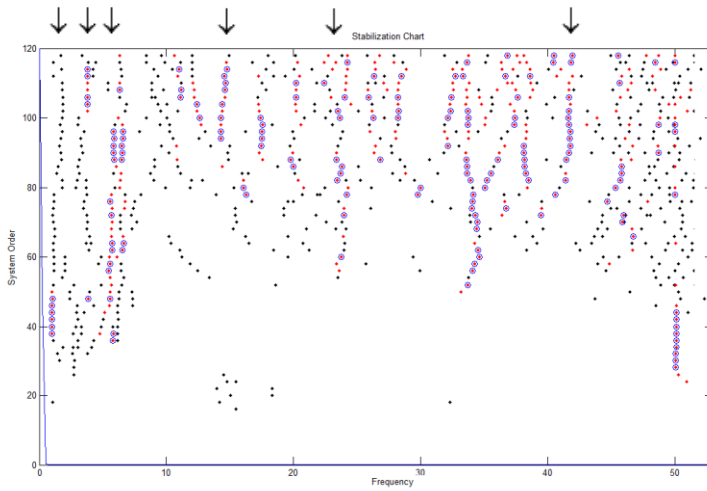
En esta campaña, se pudieron identificar las frecuencias por el método SSI. El método FDD entregó peaks que, a pesar de ser pequeños, pueden ser asociados a las frecuencias naturales de mayor intensidad del Block A.

Los datos recopilados fueron procesados y analizados de tres maneras distintas:

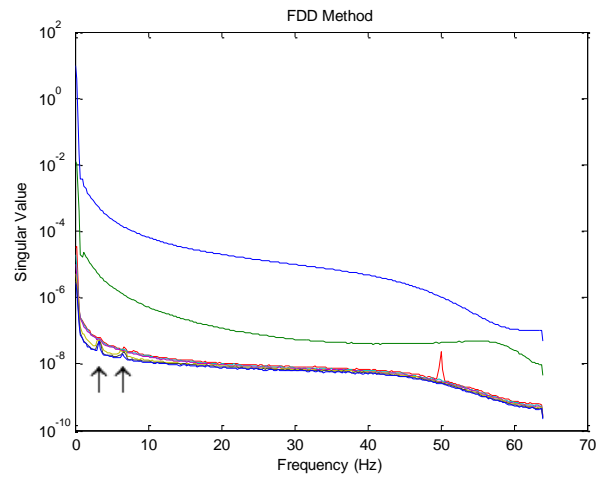
- 1) Uso de datos de solo dos acelerómetros en dirección Oeste – Este (Z). (**Fig. 15.a**) y (**Fig. 15.b**).
- 2) Uso de datos de solo un acelerómetro en dirección Norte – Sur (X). (**Fig. 16.a**) y (**Fig. 16.b**).
- 3) Uso de datos obtenidos por los acelerómetros en ambas direcciones. (**Fig. 17.a**) y (**Fig. 17.b**).

Lo anterior, se realizó para apreciar de forma más clara los resultados obtenidos en cada dirección y poder diferenciar en que influye que estas se procesen juntas. En los tres casos se usó un orden de sistema de 120.

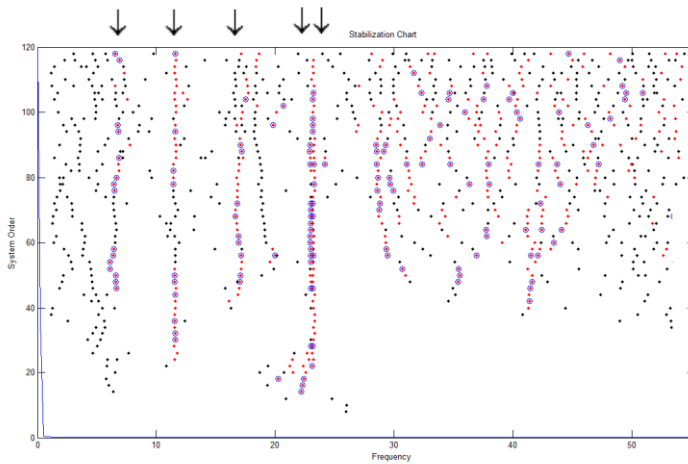
En los gráficos se indican con una flecha las frecuencias identificadas como modos del sistema.



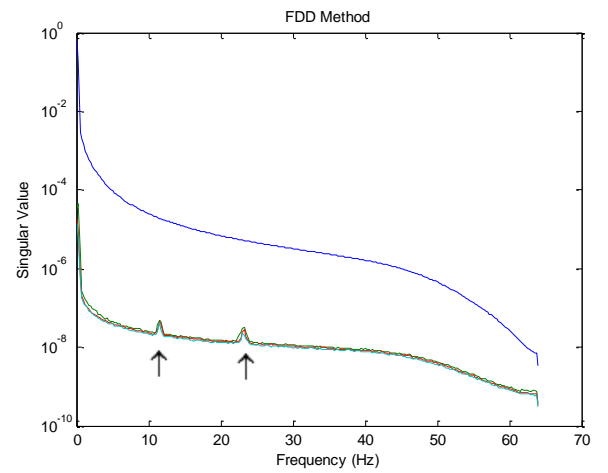
**Fig. 15. a.** Gráfico de estabilización obtenido por SSI dirección Z (Oeste – Este).



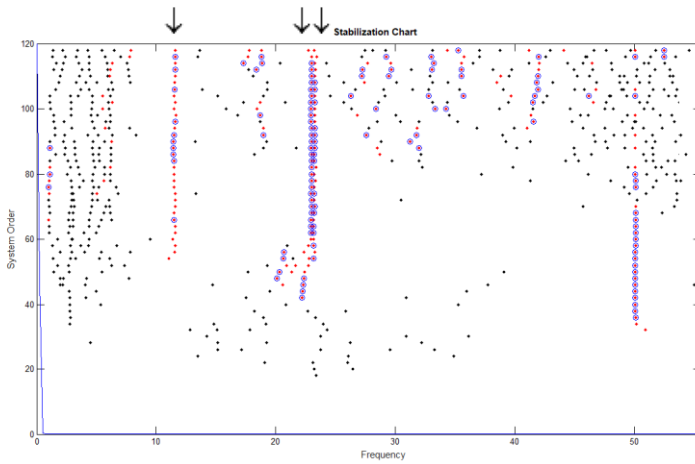
**Fig. 15. b.** Función de densidad espectral obtenida por FDD dirección Z (Oeste – Este).



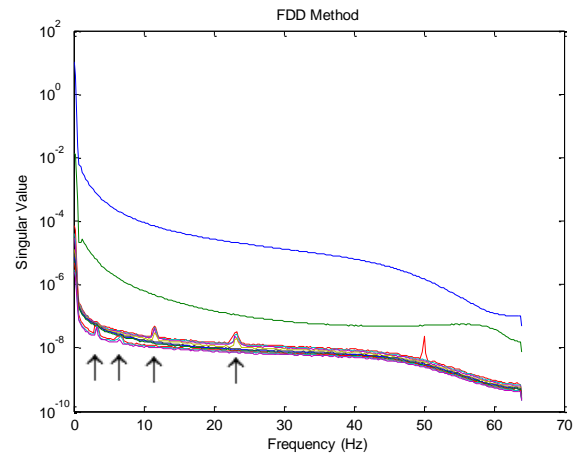
**Fig. 16. a.** Gráfico de estabilización obtenido por SSI dirección X (Norte - Sur).



**Fig. 16. b.** Función de densidad espectral obtenida por FDD dirección X (Norte - Sur).



**Fig. 17. a.** Gráfico de estabilización obtenido por SSI en ambas direcciones.



**Fig. 17. b.** Función de densidad espectral obtenida por FDD en ambas direcciones.

En las Tablas 1 y 2 se muestran los modos con sus respectivas frecuencias naturales y amortiguamientos. La Tabla 1 muestra los resultados utilizando los acelerómetros en dirección Oeste – Este (Z) y la Tabla 2 los resultados utilizando los acelerómetros en dirección Norte – Sur (X).

**Tabla 1.** Frecuencias obtenidas de método SSI dirección Oeste – Este (Z).

Frecuencia (Hz) Experimental	Amortiguamiento experimental
1.062	3.7 %
3.779	13.9 %
5.837	5.4 %
6.21	0.9 %
17.444	16.2 %
28.22	1.8 %
41.637	2.8 %

**Tabla 2.** Frecuencias obtenidas de método SSI dirección Norte – Sur (X).

Frecuencia (Hz) Experimental	Amortiguamiento experimental
6.57	1.5 %
11.414	0.5 %
16.883	0.2 %
22.983	0.8 %
23.166	0.6 %

Se puede apreciar que al procesar los datos de manera separada se encuentran frecuencias que no se pueden distinguir de manera clara en la Figura 17. a. Por otra parte, las frecuencias cercanas a 11,4 Hz, 22,9 Hz y 23,1 Hz son las que se aprecian con mayor facilidad, dándonos un indicio de que estas podrían ser las frecuencias globales del Block A.

Luego de obtener las frecuencias naturales, se realizó una comparación entre la predicción numérica, estudio realizado por Olivera et al [1] y la campaña actual. Esta se puede apreciar en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Frecuencias identificadas en predicción numérica, estudio anterior y campaña actual.

Block	Predicción numérica	Identificación experimental estudio anterior	Identificación experimental campaña actual
	Frecuencia (Hz)	Frecuencia (Hz)	Frecuencia (Hz)
A	9.177	11.752	11.414
	20.521	23.524	22.983 - 23.166

Las frecuencias mostradas en esta tabla son las con mayor relevancia entregadas por el método SSI, estas también se pueden observar en los peaks obtenidos por el método FDD de las Figuras 15.b y 16.b.

En la Tabla 4 se muestra la diferencia porcentual entre las frecuencias experimentales obtenidas en el estudio anterior con las de la campaña actual. Se puede apreciar que la diferencia entre estas frecuencias es mínima.

**Tabla 4.** Comparación de frecuencias y diferencias relativas.

Block	Identificación experimental estudio anterior	Identificación experimental campaña actual	Diferencia entre estudio anterior y campaña actual
	Frecuencia (Hz)	Frecuencia (Hz)	Porcentaje (%)
A	11.752	11.414	2.9
	23.524	22.983 - 23.166	2.3 - 1.52

#### 4. CONCLUSIONES

Las frecuencias modales del “Block A” fueron identificadas satisfactoriamente por los métodos SSI y FDD realizados con los registros obtenidos de los acelerómetros unidireccionales (PCB 3252C03). El método SSI entregó varias frecuencias naturales de la estructura, donde las de mayor importancia se ven respaldadas por los peaks observados en los gráficos de función de densidad espectral obtenida por FDD. Esto a pesar de que los peaks no muestren una gran energía (debido a la poca excitación de la estructura).

La red de acelerómetros implementada en distintos pisos confirmó que se pueden obtener resultados concluyentes con una menor cantidad de mediciones. Esto se ve reflejado en la diferencia (entre un 1.5% y 2.9%) que se obtuvo al comparar los datos de éste estudio con los del estudio anterior. Se reafirma que los resultados obtenidos son ciertamente frecuencias naturales del edificio.

Se demuestra que es una buena opción realizar un proceso de datos para cada dirección (X, Y y Z) y luego un procesamiento de datos en conjunto. Al analizar los gráficos de estabilización obtenidos por el método SSI de forma unidireccional, se pudieron obtener frecuencias de menor intensidad que no se ven reflejadas en el gráfico en conjunto (Figuras 15. a, 16. a y 17. a.). Estas frecuencias, si bien son de menor intensidad, no dejan de ser relevantes para la caracterización dinámica del edificio y un futuro ajuste modal.

Se recomienda realizar un chequeo de los acelerómetros Memsic (CXL04GP3), cables multipolares, caja conectora y al módulo de voltaje NI9205 antes de usarlos en un próximo estudio. Se realizaron pruebas de los acelerómetros en laboratorio, demostrando que éstos sí percibían aceleraciones, pero debían ser de una gran intensidad para que fueran concluyentes. Dentro de las causas más probables están:

- Fallas en acelerómetros que provoquen una disminución en su sensibilidad.
- Mal funcionamientos de cables multipolares. Estos cables, que a pesar de que hayan estado blindados con papel aluminio para disminuir la contaminación eléctrica, hacían que el testeó de frecuencias difiriera bastante con respecto al no uso de éstos.
- Fallas en la caja conectora. A pesar de que se implementaron diferentes técnicas de disminución de contaminación eléctrica (y una considerable reducción de ésta), seguía entregando respuestas inconcluyentes donde no se podía distinguir entre datos obtenidos y ruido eléctrico.

Las formas modales no fueron identificadas en este estudio porque la red de sensores no era lo suficientemente amplia como para representar adecuadamente las deformaciones modales.

## 5. Referencias

- [1] **Olivera, J.** (2016) "Caracterización dinámica de un edificio de hormigón armado basado en un análisis modal operacional". Proyecto de Título, Ingeniero Civil, UCSC, Chile.
- [2] **Jimeno, P.** (17 de mayo de 2015). "El mapa de riesgo sísmico que redefinirá las tarifas de las aseguradoras" (SHTML). La Tercera. Consultado el 20 de mayo de 2015.
- [3] **Friswell, M. & Motterhead, J.** (1995). "Finite element model updating in structural dynamics (1st ed.)". Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- [4] **Olivera, J., Vergara, L. & Oyarzo, C.** (2017). "Structural health assessment of a R/C building in the coastal area of Concepción, Chile". *Procedia Engineering* 199, 2214 – 2219, DOI 10.1016/j.proeng.2017.09.185
- [5] **Vergara, L. & Oyarzo, C.** (2017). "Caracterización de las propiedades mecánicas del hormigón de un edificio habitacional". Simposio de Habilitación Profesional, Departamento de Ingeniería Civil. UCSC, Chile.
- [6] **Zamora, L., Padilla, J., Olivera, J. & Oyarzo, C.** (2017). "Numerical model updating of the UCSC-cross (Chile) using experimentally extracted data and by applying regional sensitivity methods". 16<sup>th</sup> World conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017. Enero 2017, Stgo Chile.
- [7] **Van Overschee, P. & de Moor, B.** (1996). "Subspace identification for linear system: theory, implementation, application". Boston: Kluwer Academic Publishers.
- [8] **Brincker, R., Andersen, P. & Zhang, I.** (2000). "Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition". Paper presented at the 18th International Modal Analysis Conference (XVIII IMAC), 7-10 February 2000, San Antonio, Texas.