

ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL DE UN MURO DE HORMIGÓN ARMADO DE UN EDIFICIO HABITACIONAL

M. Vega Tapia¹, C. Oyarzo Vera² y N. Maureira Carsalade³

RESUMEN:

Los modelos numéricos son una herramienta muy utilizada para la realización de diferentes proyectos en ingeniería, por lo que se torna de suma importancia verificar que las predicciones del comportamiento de una estructura que con ellos se hacen sean confiables. Por ello es imprescindible poder hacer algún análisis posterior para saber si el comportamiento calculado por el modelo numérico se asemeja al comportamiento real observado en la estructura.

Este documento muestra un análisis modal experimental realizado a un muro de hormigón armado de un edificio habitacional en la provincia de Concepción. Sus dimensiones son 31.7 m de altura, ancho de 90 cm y espesor de 25 cm. El análisis modal se realizó por medio de una excitación externa aplicando impactos por medio de un martillo de goma. La señal fue registrada por medio de tres acelerómetros de alta precisión adosados al muro. Para determinar los parámetros modales de la estructura (frecuencias, modos de vibrar y amortiguamiento) se emplearon los métodos Identificación de Sub-espacio Estocástico (SSI) y Descomposición en el Dominio de la Frecuencia (FDD).

Se construyó un modelo numérico por medio del Software SAP2000 simulando los materiales y las condiciones de apoyo lo más real posible, para obtener los parámetros modales teóricos.

Finalmente, los resultados experimentales se compararon con los resultados teóricos y se ajustó el modelo numérico buscando minimizar una función de error entre la frecuencia calculada y la medida.

PALABRAS CLAVES: Análisis Modal; FDD; SSI.

ABSTRACT:

Numerical models are a widely used tool for the realization of different projects in engineering. Therefore, it is of paramount importance to verify the reliability of the predictions made with them for the behavior of a structure. Hence, it is essential to be able to do some later analysis to know whether the behavior calculated by the numerical model resembles the actual behavior observed in the structure.

This paper shows an experimental modal analysis of a reinforced concrete wall of a residential building in the Concepción province. Its dimensions are 31.7 m in height, width of 90 cm and thickness of 25 cm. The modal analysis was performed by means of an external excitation applied by impacts with a rubber hammer. The signal was recorded by three high-precision accelerometers attached to the wall. In order to determine the modal parameters of the structure (frequencies, damping and mode shapes), the Stochastic Sub-space Identification (SSI) and Frequency Domain Decomposition (FDD) methods were used.

A numerical model was constructed using the SAP2000 software simulating the materials and the support conditions as real as possible to obtain the theoretical modal parameters.

Finally, the experimental results were compared with the theoretical results and the numerical model was adjusted to minimize an error function between the calculated frequency and the measurement.

KEYWORDS: Modal Analysis; FDD; SSI.

¹ Estudiante, Carrera Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, mvega@ing.ucsc.cl

² Profesor asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, coyarzo@ucsc.cl

³ Profesor asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, nmaureira@ucsc.cl
(Profesor informante)

1. INTRODUCCIÓN

En la ingeniería civil estructural, una de las herramientas más utilizadas para el desarrollo de nuevos diseños y diagnóstico de estructuras existentes son los modelos numéricos, los cuales permiten obtener solución aproximada para problemas complejos e imposibles de resolver de forma analítica. Hoy en día el gran poder computacional permite a los ingenieros llevar a cabo su tarea de forma más rápida y también abordar retos cada vez más complejos (Díaz, 2015).

Se torna fundamental, entonces, saber si el modelo numérico realizado es capaz de representar de forma confiable a la estructura real. Es aquí donde se necesita de algún método que permita verificar y corregir el modelo numérico reduciendo el error en la predicción. Uno de los métodos aplicados para conocer el comportamiento real de la estructura, consiste en medir la respuesta dinámica de la estructura debida a una excitación, y a partir de ella, encontrar la respuesta modal del sistema. En este método interactúan dos técnicas: el ensayo modal y la identificación de sistemas. (Oyarzo, 2012)

El análisis modal es un proceso mediante el cual se describe una estructura en términos de sus propiedades dinámicas o parámetros modales que son básicamente frecuencias, amortiguamiento y modos de vibrar. Estos parámetros dependen principalmente de la masa y la rigidez de la estructura. La utilización de este análisis es de suma relevancia para un modelo estructural, ya que proporciona una descripción definitiva del comportamiento de una estructura que puede ser evaluada para ciertas especificaciones del diseño. También se puede controlar la integridad de la estructura y su comportamiento, con el fin de detectar problemas y evitarlos (Rodríguez, 2005)

La información que se obtiene del análisis modal realizado a la estructura se compara con la respuesta modal obtenida mediante el método numérico. En esta etapa se busca obtener el menor error posible entre las respuestas del modelo y las experimentales. Este proceso se logra modificando las propiedades físicas del modelo y condiciones de apoyo hasta encontrar la mejor relación. (Ramos et al, 2012)

El estudio que se presenta en este documento tiene como principal objetivo el encontrar las propiedades modales (frecuencias, amortiguamiento y formas modales) de un muro de hormigón armado, mediante un análisis modal experimental aplicando una excitación externa de impacto. Los datos experimentales se procesarán mediante dos métodos. Uno ha sido desarrollado en el dominio del tiempo y el otro en el dominio de la frecuencia. Estos métodos son Identificación de Sub-espacio Estocástico (SSI) (Van Overschee & De Moor, 1996) y Descomposición en el Dominio de la Frecuencia (FDD) (Brincker et al, 2000), respectivamente. Los datos experimentales obtenidos del análisis modal se usarán para compararlos con los del modelo numérico del muro de hormigón armado realizado en el software comercial SAP2000. De esta forma, se busca obtener un modelo con un comportamiento lo más real posible, que permita predecir su comportamiento actual y futuro de la estructura frente a distintos tipos de demandas.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

El muro de hormigón armado es parte de un edificio habitacional de la provincia de Concepción, Región del Biobío, y su construcción se realizó hace aproximadamente 3 años. Las dimensiones del muro son de 90 cm de ancho, 25 cm de espesor y una altura de 31,7 m. Es un muro continuo que pasa por todos los pisos del edificio. Por uno de sus costados pasa uno de los shaft de instalación eléctrica, y además está conectado a las losas de los pasillos del edificio mediante una viga en voladizo (Figura 1).

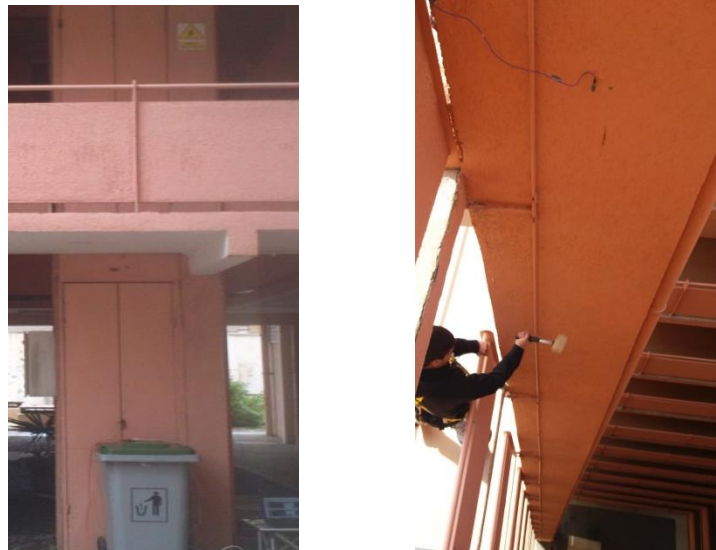


Figura 1: Muro de hormigón

3. TRABAJO EN TERRENO

3.1 Instrumentación

Se instrumentaron en forma secuencial 5 pisos del muro (piso 1, 4, 7, 10, 13) mediante acelerómetros adosados a la superficie del muro utilizando una placa de fijación (Figura 2). En cada nivel se instalaron 3 acelerómetros unidireccionales (Figura 3) los cuales se fueron moviendo piso a piso a medida que se avanzó con el ensayo.

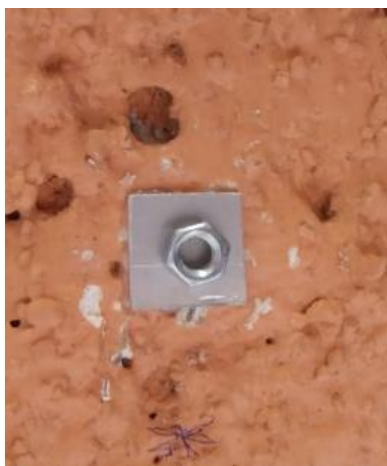


Figura 2: Placa de fijación

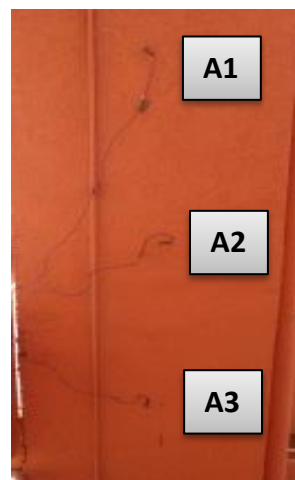


Figura 3: Acelerómetros instalados

El sistema de adquisición de datos está formado por un módulo de adquisición de datos NI 9234 acoplado a un chasis cDAQ-9174. Los sensores se conectaron al sistema de adquisición por medio de cables blindados los cuales evitan toda contaminación debido a señales electromagnéticas provenientes por ejemplo de la red eléctrica. Los datos se almacenaron en un notebook por medio de una rutina programada en la plataforma LadView.

3.2 Procedimiento y Adquisición de datos

La excitación al muro se realizó por medio de impactos mediante un martillo de goma (Figura 4) y la respuesta se midió por aproximadamente 20 segundos con una tasa de muestreo de 2048 lecturas por segundo. Cada nivel instrumentado se golpeó entre 6 y 8 veces, tal como se indica en la Tabla 1 en tres puntos diferentes indicados como G1, G2, G3 (Figura 5).

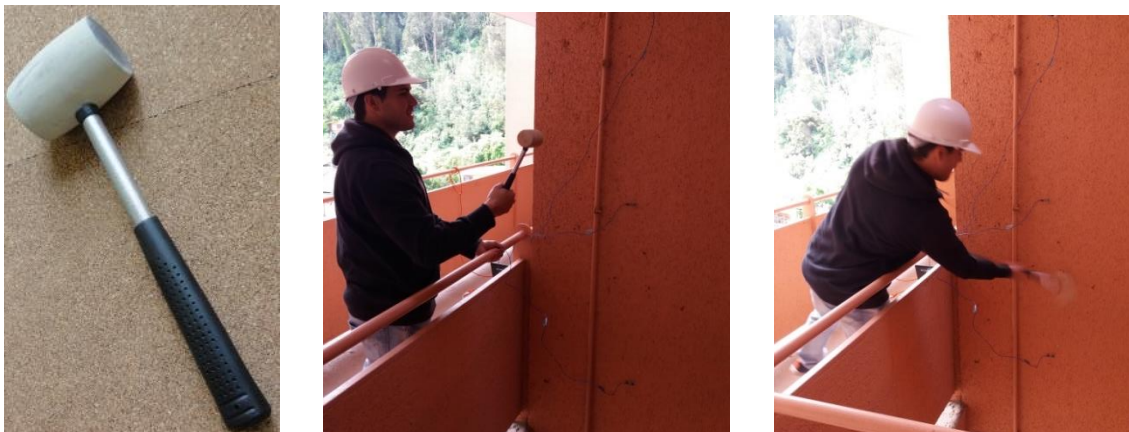


Figura 4: Martillo de goma y excitación del muro mediante impacto

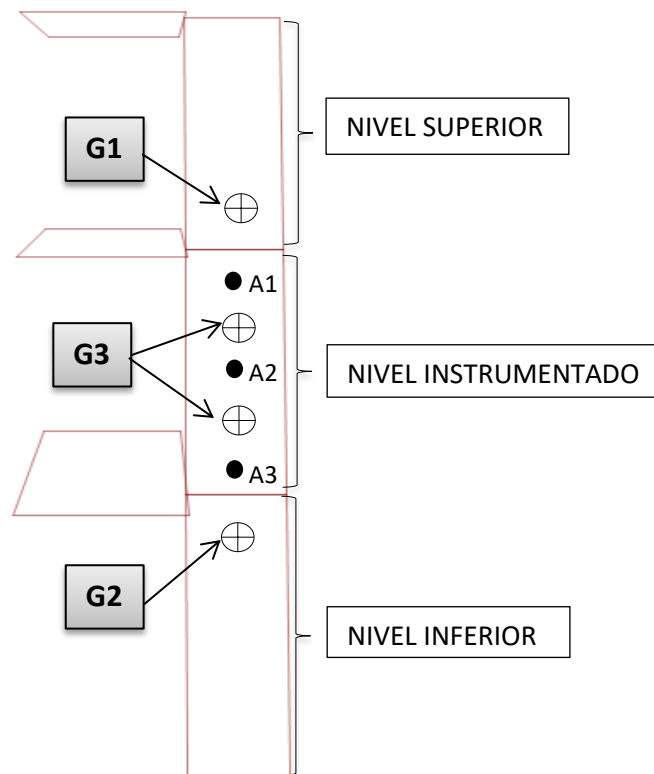


Figura 5: Serie de golpes

La Tabla 1 muestra el procedimiento y cantidad de golpes a registrar.

Tabla 1: Información de serie de golpes

Piso	Golpes			Total
	G1	G2	G3	
1	2	-	4	6
4	2	2	4	8
7	2	2	4	8
10	2	2	4	8
13	2	2	4	8

Dónde:

- G1: Golpes cada 20 segundos en el piso superior.
- G2: Golpes cada 20 segundos en el piso inferior.
- G3: Golpes cada 20 segundos entre los sensores.

4. IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS MODALES

Una vez capturada la señal esta fue limpiada mediante la aplicación de un filtro de pasa baja con una frecuencia de corte de 200 Hz, a fin de eliminar el ruido de alta frecuencia asociada a las vibraciones ambientales de baja intensidad. Este proceso se realiza en el dominio del tiempo por funciones cuya expresión en el dominio de frecuencia es una señal normalizada que elimina (multiplica por cero) todas las frecuencias fuera del intervalo de interés. Estas funciones se llaman filtros. (Oyarzo, 2012).

Con la señal ya limpia, se procedió a separar en cada registro (Figura 6) los golpes en forma individual (G1, G2, G3) para cada acelerómetro. Obteniéndose así registros individuales para cada impacto (Figura 7)

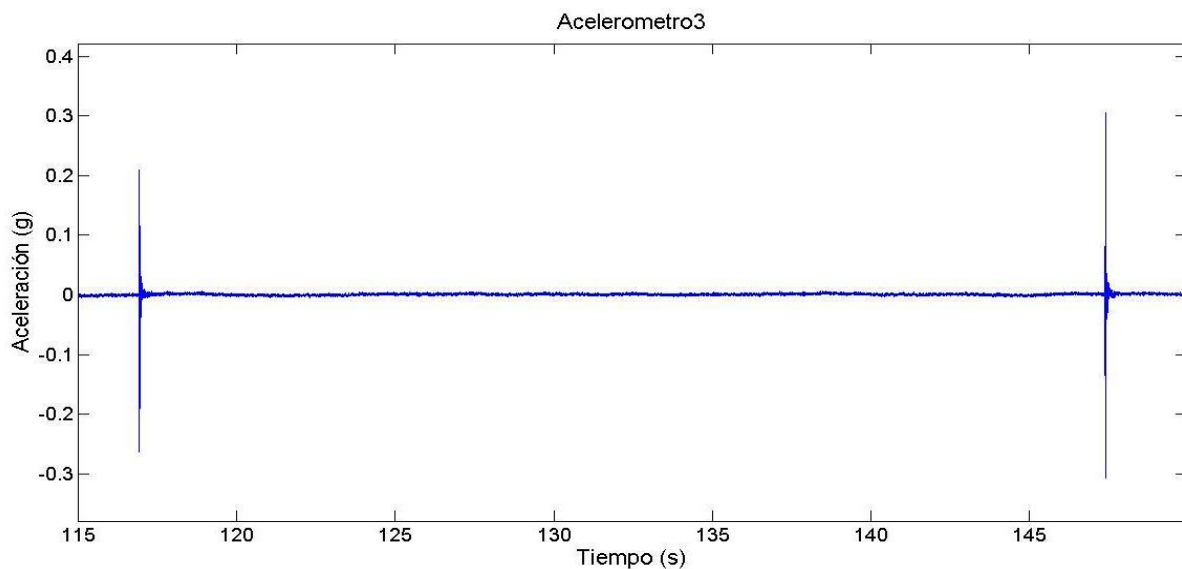


Figura 6: Registro completo

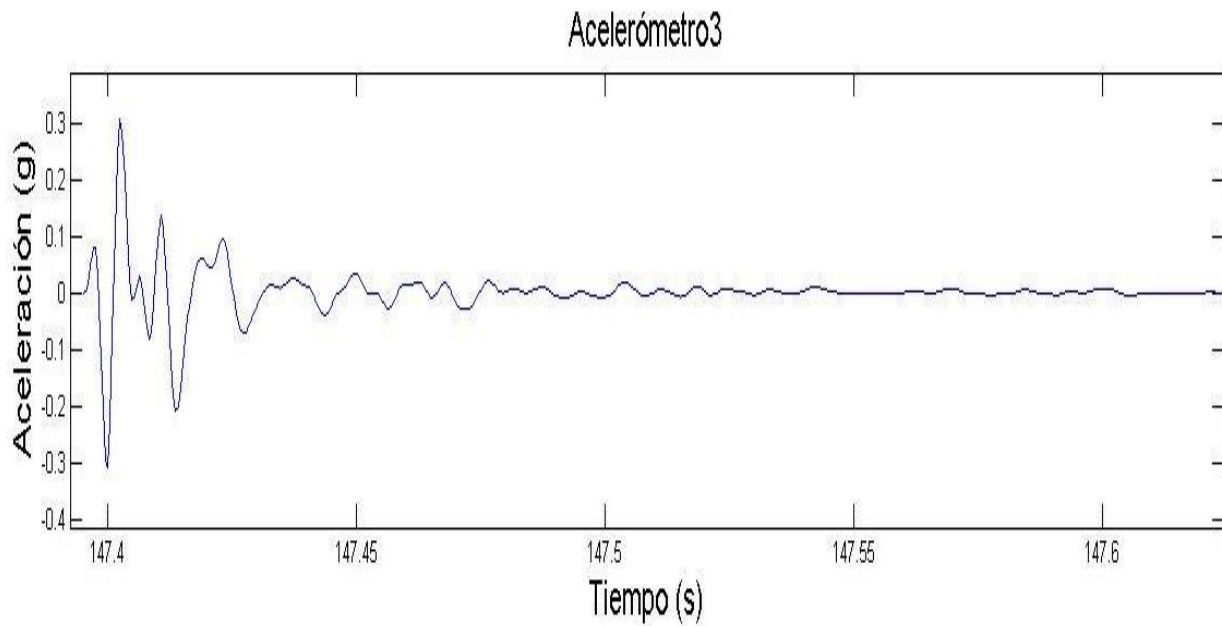


Figura 7: Golpe individual

Cada golpe fue analizado por medio de los métodos de: Descomposición en el Dominio de la Frecuencia (FDD) y el método de Identificación de Sub-espacio Estocástico (SSI), para obtener los parámetros modales del muro para cada uno de los ensayos.

El método FDD (Brincker et al, 2000) es una extensión del clásico método conocido como “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, la función de densidad espectral de potencia de la excitación (PSD) se convierte en una constante y, en consecuencia, los picos de la función de respuesta en frecuencia (FRF) pueden identificarse directamente a partir de los picos de la función PSD de respuesta. 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 Único. Los gráficos de las curvas PSD que se muestra en la Figura 8, fueron producidos por un código implementado en MATLAB (Beskhyroun, 2011).

El método SSI (Van Overschee & De Moor, 1996) es una técnica de dominio de tiempo basada en datos que emplea una factorización QR y la Descomposición de Valores Singulares para identificar las matrices del modelo de espacio de estado dinámico. Una vez que se encuentra el modelo de espacio de estado de la estructura, los parámetros modales (frecuencias naturales, razones de amortiguación y formas modales) se pueden determinar por descomposición de valores propios. En general, no es posible determinar el orden del sistema de antemano. Por lo tanto, es necesario repetir el análisis con diferentes órdenes del sistema y verificar la repetibilidad de los resultados. Este procedimiento se realizó construyendo diagramas de estabilización (Figura 9) que también fueron producidos por un código implementado en MATLAB (Beskhyroun, 2011). En este gráfico, los puntos representan las frecuencias fundamentales de los polos (modos) identificados considerando modelos con diferentes órdenes del sistema (SO). Los puntos rojos están asociados con aquellas frecuencias que son similares a otra frecuencia detectada en el modelo precedente, mientras que los círculos azules alrededor de los puntos representan aquellos polos que tienen una forma de modo similar a un polo detectado en el modelo precedente. Es muy probable que los polos que revelan estabilidad en términos de frecuencias y formas modales similares (normalmente alineados en una columna vertical en el gráfico) representen modos de vibrar.

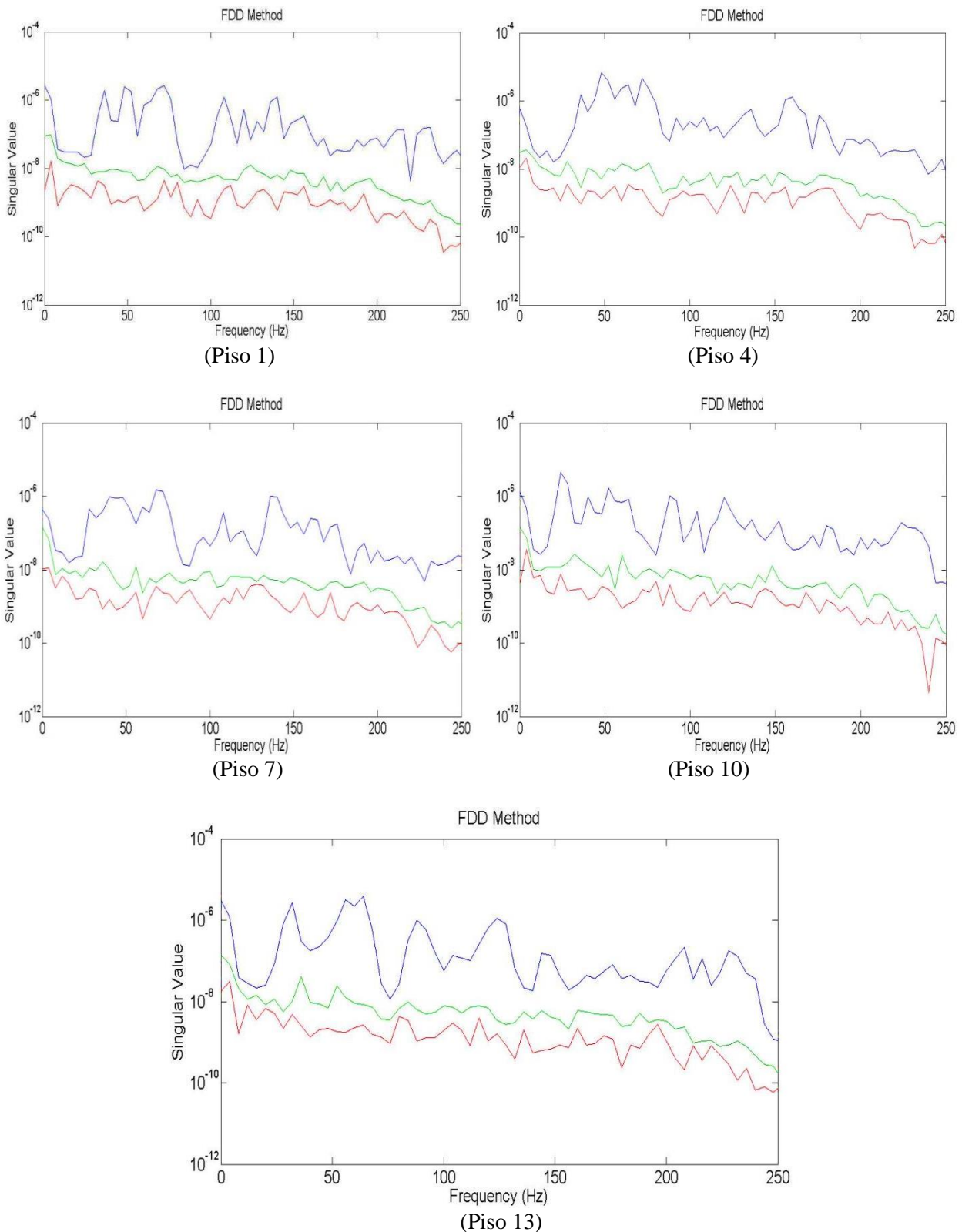


Figura 8: Diagramas PSD para cada piso método FDD

Dado los resultados entregados por medio de los diagramas PSD mediante el método FDD, no fue posible encontrar frecuencias debido a la poca energía registrada, donde no se puede apreciar de forma clara ningún peak asociado a una frecuencia. Finalmente, se optó por no usar este método.

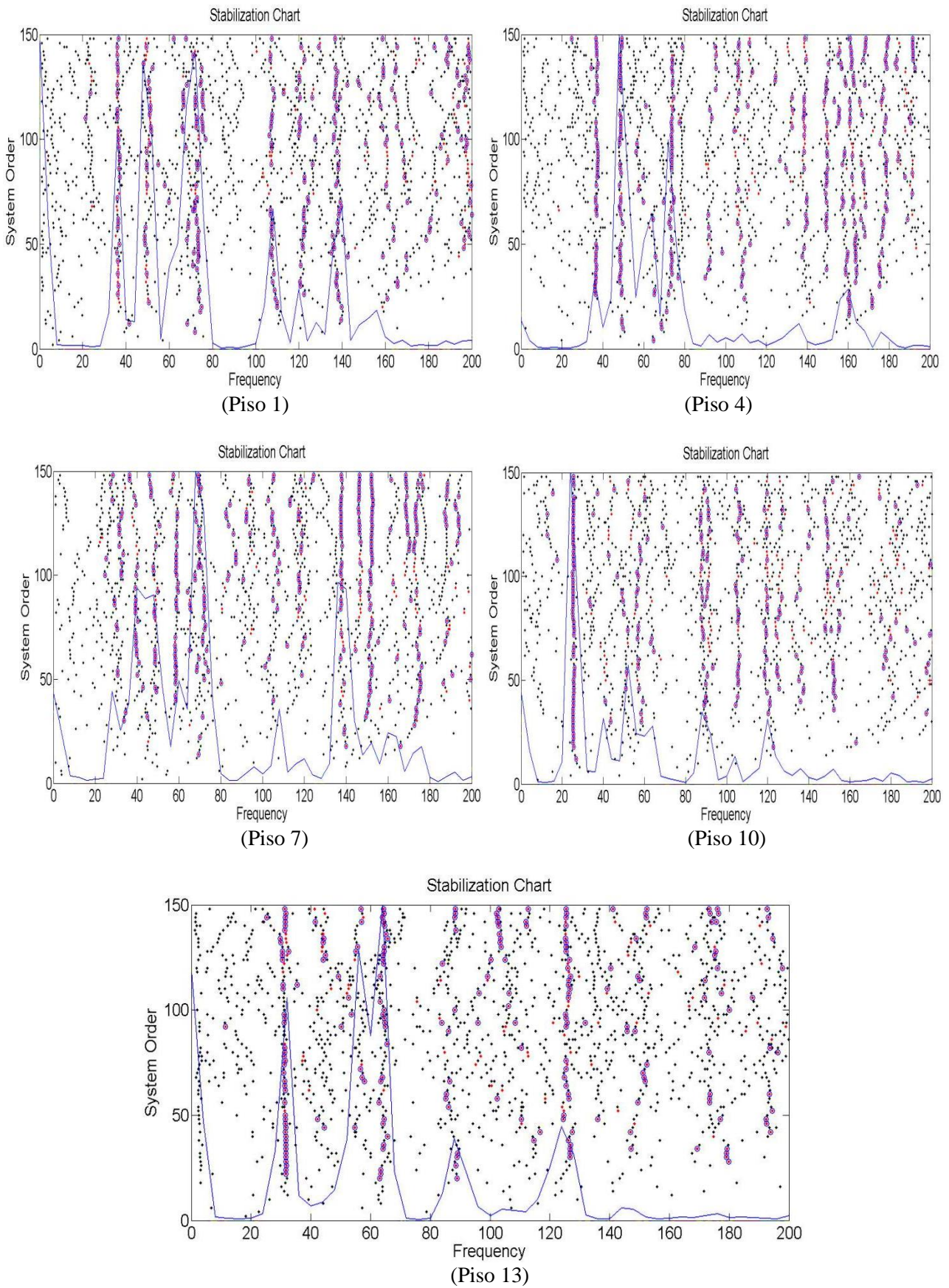


Figura 9: Diagramas de estabilización método SSI

Los parámetros modales se obtuvieron mediante el método SSI, los que se observan a continuación y en la Tabla 2.

Tabla 2: Frecuencias experimentales (Hz) de cada golpe método SSI

Piso 1	Frecuencias (Hz)
piso1_g1_g1	36 49 74
piso1_g1_g2	60 74 107
piso1_g3_g1	60 74 107
piso1_g3_g2	74 107
piso1_g3_g3	36 49 60 74
piso1_g3_g4	60 74
Total Frecuencias	17
Piso 4	Frecuencias (Hz)
piso4_g1_g1	36 60 72 108
piso4_g1_g2	36 48 60 72 108
piso4_g2_g1	36 48 72 108
piso4_g2_g2	36 48 72 108
piso4_g3_g1	36 48 72 108
piso4_g3_g2	36 48 72
piso4_g3_g3	36 48 72
piso4_g3_g4	36 48 60
Total Frecuencias	30
Piso 7	Frecuencias (Hz)
piso7_g1_g1	30 64
piso7_g1_g2	30 64
piso7_g2_g1	47 60
piso7_g2_g2	39 47 60 70
piso7_g3_g1	31 55
piso7_g3_g2	31 55
piso7_g3_g3	31 55
piso7_g3_g4	31 55
Total Frecuencias	18

Piso 10	Frecuencias (Hz)
piso10_g1_g1	25
piso10_g1_g2	25 62
piso10_g2_g1	25 88
piso10_g2_g2	25
piso10_g3_g1	25
piso10_g3_g2	25
piso10_g3_g3	25 62
piso10_g3_g4	25
Total Frecuencias	11
Piso 13	Frecuencias (Hz)
piso13_g1_g1	34 64
piso13_g1_g2	34 64 97
piso13_g2_g1	32 64
piso13_g2_g2	32 64
piso13_g3_g1	32 64
piso13_g3_g2	32 64
piso13_g3_g3	32 64
piso13_g3_g4	32 64
Total Frecuencias	17

En la Tabla anterior se utilizó una nomenclatura como lo indica la Figura 10:

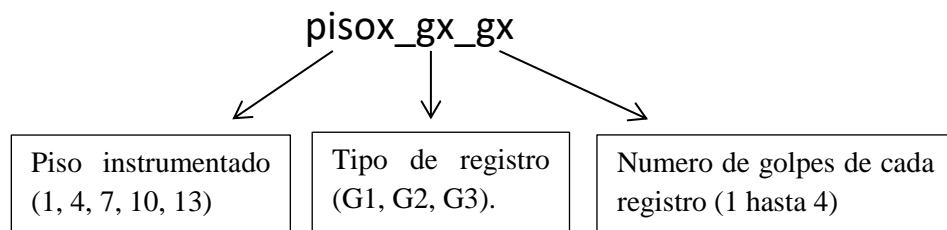


Figura 10: Nomenclatura utilizada para identificar los ensayos

La Tabla 2 muestra todas las frecuencias encontradas de cada piso para todas las series de golpes (G1, G2, G3) mediante el método SSI y el total de frecuencias por piso.

Las tablas 3 a la 7 muestran en cada columna las frecuencias de mayor repetibilidad y similitud encontradas por el método SSI en cada uno de los ensayos de los pisos estudiados, donde se encontraron desde 1 frecuencia hasta 4 indicadas como F1, F2, F3 y F4 dependiendo de cada piso.

Tabla 3: Frecuencias experimentales piso 1

	F1 (Hz)	F2 (Hz)	F3 (Hz)
Frecuencias	60.08	73.97	106.97
	60.08	73.93	106.97
	60.07	73.93	107.03
	59.98	74.04	107.00
		74.07	
	74.03		
Promedio (Hz)	60.05	73.99	107.00
CoV (%)	0.08	0.08	0.03
Repetición	4	6	4
% de Repetición	24	35	24

Tabla 4: Frecuencias experimentales piso 4

	F1 (Hz)	F2 (Hz)	F3 (Hz)	F4 (Hz)
Frecuencias	36.87	49.18	72.19	108.39
	36.65	48.47	72.61	107.92
	36.81	48.74	72.36	107.57
	36.38	48.51	72.48	108.39
	36.48	48.51	72.75	107.73
	36.80	49.08	73.49	
	36.30	49.48		
	36.50			
Promedio (Hz)	36.60	48.85	72.65	108.00
CoV (%)	0.6	0.8	0.6	0.3
Repetición	8	7	6	5
% de Repetición	27	23	20	17

Tabla 5: Frecuencias experimentales piso 7

	F1 (Hz)	F2 (Hz)
Frecuencias	30.00	55.02
	31.03	55.01
	30.99	55.03
	30.99	55.04
	30.95	
	29.98	
Promedio (Hz)	30.66	55.02
CoV (%)	1.69	0.02
Repetición	6	4
% de Repetición	33	22

Tabla 6: Frecuencias experimentales piso 10

	F1 (Hz)
Frecuencias	25.04
	25.02
	25.05
	25.00
	24.98
	25.01
	24.98
	25.01
Promedio (Hz)	25.01
CoV (%)	0.10
Repetición	8
% de Repetición	73

Tabla 7: Frecuencias experimentales piso 13

	F1 (Hz)	F2 (Hz)
Frecuencias	31.96	64.02
	32.03	63.93
	31.96	63.98
	31.99	63.99
	32.03	63.96
	32.03	63.97
		64.03
		64.02
Promedio (Hz)	32.00	63.99
CoV (%)	0.11	0.05
Repetición	6	8
% de Repetición	35	47

Se aprecia que en ningún piso los datos superan a la media ($CoV < 2\%$), lo que representa una buena similitud entre los datos.

También se muestra el porcentaje de repetición, que es la cantidad de veces que se repite una frecuencia del total de datos encontrados en cada uno de los ensayos, desde un mínimo de 20 % hasta un máximo de 73 % de repetibilidad.

El criterio de aseguramiento modal (MAC) es utilizado para comparar la similitud que hay entre las formas modales obtenidas experimentalmente en las diferentes pruebas, pero también para compararlas con aquellas determinadas por el modelo numérico. MAC es un indicador que representa el grado de similitud entre dos formas modales determinando su desviación cuadrática mínima y utilizando el principio de ortogonalidad de las formas modales (Ecuación 1). Es decir, si los valores MAC son igual o mayor que un 0.85, se consideraron como evidencia de coincidencia de las formas modales. (Oyarzo, 2012)

$$MAC(\phi_i, \phi_j) = \frac{|\phi_i^T \phi_j|^2}{(\phi_i^T \phi_i)(\phi_j^T \phi_j)} \quad (1)$$

Dónde:

ϕ_i = Vector de forma modal identificado para la prueba i.

ϕ_j = Vector de forma modal identificado para la prueba j.

A continuación se presentan la comparación de los modos obtenidos por varios ensayos o test (T1 al T8) para una misma frecuencia en cada uno de los pisos, encontrados por el método SSI.

Tabla 8: Criterio de aseguramiento modal piso 1

Frec: 60.05 Hz	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1	1	0.031	0.094	0.049	-	-	-	-
T2	0.031	1	0.967	0.981	-	-	-	-
T3	0.094	0.967	1	0.992	-	-	-	-
T4	0.049	0.981	0.992	1	-	-	-	-
T5	-	-	-	-	-	-	-	-
T6	-	-	-	-	-	-	-	-
T7	-	-	-	-	-	-	-	-
T8	-	-	-	-	-	-	-	-
Frec: 73.99 Hz	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1	1	0.001	0.120	0.120	0.071	0.9747	-	-
T2	0.001	1	0.298	0.346	0.805	0.016	-	-
T3	0.120	0.298	1	0.996	0.717	0.037	-	-
T4	0.120	0.346	0.996	1	0.753	0.021	-	-
T5	0.071	0.805	0.717	0.753	1	0.017	-	-
T6	0.9747	0.016	0.037	0.021	0.017	1	-	-
T7	-	-	-	-	-	-	-	-
T8	-	-	-	-	-	-	-	-
Frec: 107.00 Hz	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1	1	0.980	0.136	0.086	-	-	-	-
T2	0.980	1	0.056	0.0353	-	-	-	-
T3	0.136	0.056	1	0.816	-	-	-	-
T4	0.086	0.0353	0.816	1	-	-	-	-
T5	-	-	-	-	-	-	-	-
T6	-	-	-	-	-	-	-	-
T7	-	-	-	-	-	-	-	-
T8	-	-	-	-	-	-	-	-



Tabla 9: Criterio de aseguramiento modal piso 4

Frec: 36.6 Hz	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1	1	0.995	0.923	0.169	0.004	0.0803	0.139	0.189
T2	0.995	1	0.956	0.224	0.007	0.1232	0.190	0.243
T3	0.923	0.956	1	0.368	0.005	0.2521	0.322	0.372
T4	0.169	0.224	0.368	1	0.315	0.980	0.997	0.989
T5	0.004	0.007	0.005	0.315	1	0.297	0.363	0.405
T6	0.080	0.123	0.252	0.980	0.297	1	0.984	0.952
T7	0.139	0.199	0.322	0.997	0.363	0.984	1	0.991
T8	0.189	0.243	0.372	0.989	0.405	0.952	0.991	1
Frec: 48.85Hz	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1	1	0.505	0.835	0.847	0.267	0.901	0.833	-
T2	0.505	1	0.133	0.144	0.938	0.213	0.131	-
T3	0.835	0.133	1	0.999	0.016	0.978	0.997	-
T4	0.847	0.144	0.999	1	0.020	0.986	0.986	-
T5	0.267	0.938	0.016	0.020	1	0.052	0.015	-
T6	0.901	0.213	0.978	0.986	0.052	1	0.985	-
T7	0.833	0.131	0.997	0.986	0.015	0.985	1	-
T8	-	-	-	-	-	-	-	-
Frec: 72.65 Hz	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1	1	0.987	0.995	1.000	0.994	0.913	-	-
T2	0.987	1	0.996	0.983	0.978	0.839	-	-
T3	0.995	0.996	1	0.994	0.983	0.875	-	-
T4	1.000	0.983	0.994	1	0.994	0.922	-	-
T5	0.994	0.978	0.983	0.994	1	0.916	-	-
T6	0.913	0.839	0.875	0.922	0.916	1	-	-
T7	-	-	-	-	-	-	-	-
T8	-	-	-	-	-	-	-	-
Frec: 108.00 Hz	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1	1	0.723	0.913	0.176	0.688	0.913	-	-
T2	0.723	1	0.474	0.124	0.482	0.839	-	-
T3	0.913	0.474	1	0.320	0.485	0.875	-	-
T4	0.176	0.124	0.320	1	0.025	0.922	-	-
T5	0.688	0.482	0.485	0.025	1	0.916	-	-
T6	0.913	0.839	0.875	0.922	0.916	1	-	-
T7	-	-	-	-	-	-	-	-
T8	-	-	-	-	-	-	-	-



Tabla 10: Criterio de aseguramiento modal piso 7

Frec: 30.65 Hz	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1	1	0.988	0.998	0.992	0.987	0.986	-	-
T2	0.988	1	0.994	0.965	0.994	1.000	-	-
T3	0.998	0.994	1	0.987	0.995	0.992	-	-
T4	0.992	0.965	0.987	1	0.975	0.960	-	-
T5	0.987	0.994	0.995	0.975	1	0.991	-	-
T6	0.986	1.000	0.992	0.960	0.991	1	-	-
T7	-	-	-	-	-	-	-	-
T8	-	-	-	-	-	-	-	-

Frec: 55.02Hz	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1	1	0.993	0.059	0.996	-	-	-	-
T2	0.993	1	0.092	0.983	-	-	-	-
T3	0.059	0.092	1	0.063	-	-	-	-
T4	0.996	0.983	0.063	1	-	-	-	-
T5	-	-	-	-	-	-	-	-
T6	-	-	-	-	-	-	-	-
T7	-	-	-	-	-	-	-	-
T8	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 11: Criterio de aseguramiento modal piso 10

Frec: 25.00 Hz	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1	1	0.999	0.994	0.999	0.996	1.000	0.996	0.999
T2	0.999	1	0.999	1.000	0.999	0.999	0.996	0.999
T3	0.994	0.999	1	0.993	0.992	0.992	0.999	0.997
T4	0.999	1.000	0.993	1	0.998	0.999	0.996	0.999
T5	0.996	0.999	0.992	0.998	1	0.996	0.996	0.999
T6	1.000	0.999	0.992	0.999	0.996	1	0.995	0.998
T7	0.996	0.996	0.999	0.996	0.996	0.995	1	0.999
T8	0.999	0.999	0.997	0.999	0.999	0.998	0.999	1

Tabla 12: Criterio de aseguramiento modal piso 13

Frec: 32.00 Hz	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1	1	0.992	0.980	0.992	0.870	0.972	-	-
T2	0.992	1	0.985	0.978	0.883	0.994	-	-
T3	0.980	0.985	1	0.988	0.948	0.976	-	-
T4	0.992	0.978	0.988	1	0.908	0.953	-	-
T5	0.870	0.883	0.948	0.908	1	0.884	-	-
T6	0.972	0.994	0.976	0.953	0.884	1	-	-
T7	-	-	-	-	-	-	-	-
T8	-	-	-	-	-	-	-	-
Frec: 63.98Hz	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1	1	0.044	0.598	0.189	0.481	0.068	0.497	0.673
T2	0.044	1	0.121	0.783	0.019	0.957	0.029	0.222
T3	0.598	0.121	1	0.065	0.773	0.252	0.747	0.970
T4	0.189	0.783	0.065	1	0.037	0.643	0.041	0.173
T5	0.481	0.019	0.773	0.037	1	0.001	0.998	0.637
T6	0.068	0.957	0.252	0.643	0.001	1	0.000	0.359
T7	0.497	0.029	0.747	0.041	0.998	0.000	1	0.614
T8	0.673	0.222	0.970	0.173	0.637	0.359	0.614	1

Las tablas 8 a la 12 muestran el criterio de aseguramiento modal para cada frecuencia encontrada en los diferentes ensayos realizado en cada uno de los pisos seleccionados. Se observan valores muy cercanos a uno que corresponden a una muy buena comparación modal, eso quiere decir, que para frecuencias similares encontradas en dos test diferentes (Ej: T1 y T2) estas tienen un comportamiento modal muy parecido por eso su valor tan cercano a uno.

En el piso 10 se encontró una sola frecuencia de 25 Hz que se repetía en todos los ensayos y al aplicar el MAC todas las comparaciones dieron un resultado cercano a uno.

El piso 4 fue en donde más frecuencias se encontraron por el método SSI. Cada una de estas frecuencias tuvieron una muy buena repetibilidad en cada uno de los ensayos. La comparación de los modos entre los test para cada frecuencia mostraron resultados satisfactorios. Por tanto, se consideró el piso 4 como aquel con una identificación más precisa y confiable de su comportamiento dinámico de todos los niveles ensayados en el edificio.

5. MODELO NUMÉRICO

5.1 Descripción del modelo

Se construyeron varios modelos mediante la utilización del software de elementos finitos SAP2000. El primero (Figura 11) consideró el muro completo adosado a las losas y vigas dándole condiciones de apoyo lo más real posible. El segundo modelo consideró solo el muro desde el piso 1 hasta el piso 14 aplicando condiciones de apoyo simple en los encuentros con la viga en voladizo que la conecta a la losa (Figura 12). Finalmente, se realizó un tercer modelo del muro, considerando la altura de tres pisos que representarían los pisos 3, 4 y 5 (Figura 13) con condiciones de empotramiento en sus extremos superior e inferior y apoyo simple en el encuentro con la viga que conecta a la losa. Las propiedades del material utilizado son los mostrados en la Tabla 13 que corresponden a las de un hormigón H-25.



Figura 11: Modelo numérico muro completo adosado a las losas

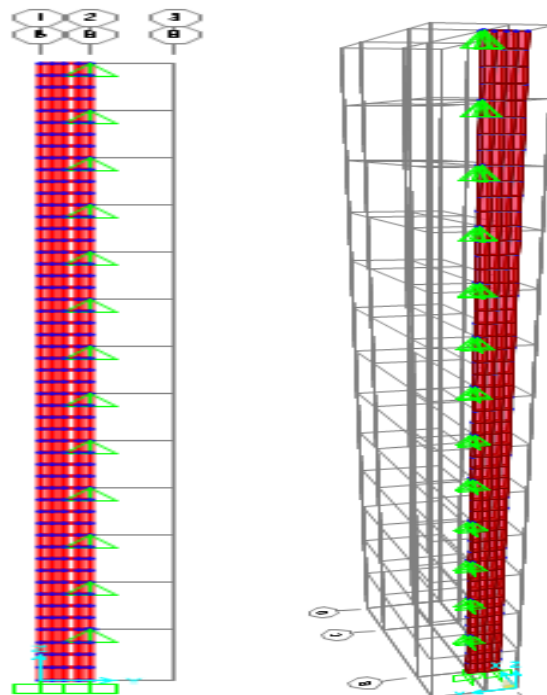


Figura 12: Modelo numérico muro completo

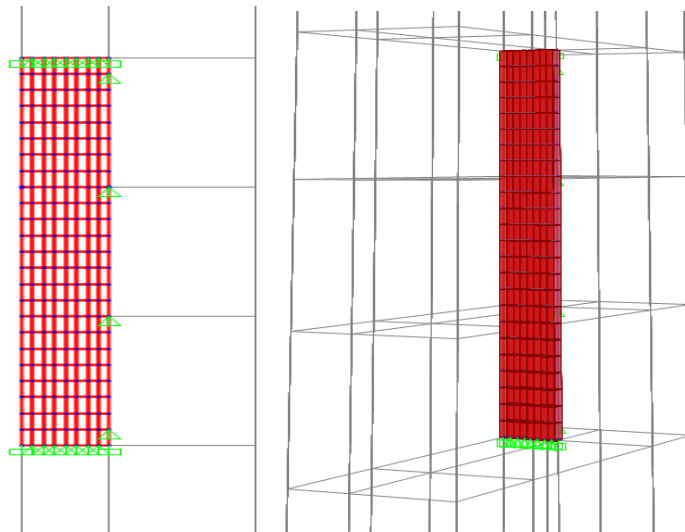


Figura 13: Modelo numérico tres pisos continuos

El primer modelo del muro completo que incluye vigas y losas entregó resultados asociados a la respuesta modal de las losas y no fue posible separar dicho comportamiento de aquel que se midió en los muros. El segundo modelo entregó resultados asociados al comportamiento del muro pero describían su respuesta modal en toda su altura, algo que difícilmente se podría lograr activar con el nivel de energía aplicado por la excitación de impacto.

A partir de los resultados obtenidos se optó por trabajar con el modelo del muro de tres pisos continuos (Figura 13), pues su respuesta numérica resultó asemejarse más a la respuesta local mediada experimentalmente.

Tabla 13: Propiedades del material

Hormigón	H-25
Densidad	2400 Kg/m ³
Módulo de Elasticidad (E)	2,1 • 10 ⁹ Kg/cm ²
Numero de Poisson (v)	0,2
Resistencia específica a la compresión del concreto (f'c)	200 Kg/cm ²

5.2 Resultados del modelo

El comportamiento modal calculado mediante el modelo 3 se presenta en la Tabla 14. En ella se presentan las frecuencias modales y porcentaje de participación de cada modo. El objetivo de estos datos es compararlos con los resultados experimentales obtenidos en el piso 4 (Tabla 4), es decir, las frecuencias encontradas por el método SSI y los resultados numéricos entregados por el modelo.

Tabla 14: Frecuencias y participación masa modal SAP2000

Modo	Frecuencia	UX
N°	Hz	(%)
1	36.7	61
2	69.7	< 1
3	72.1	11
4	130.6	< 1
5	153.4	17

Con los resultados se evaluaron 2 hipótesis de pareo de modos, a fin de encontrar la mejor relación entre los resultados experimentales y numéricos (Tabla 15 y 16) y así obtener el menor error posible en las predicciones posteriores.

Hipótesis 1: Las frecuencias experimentales del piso 4 corresponden a las frecuencias numéricas de los modos 1, 2, 3, 5 obtenidas del modelo de elementos finitos.

Hipótesis 2: Las frecuencias experimentales del piso 4 corresponden a las frecuencias numéricas de los modos 1, 2, 3, 4 obtenidas del modelo de elementos finitos.

Tabla 15: Hipótesis 1

$f_{exp.}$	Modo	$f_{num.}$	Masa (%)	$Error_i$	$Error_{acum.}$	$Error_{pond.}$
36.6	1	36.7	61	0.5%	0.5%	0.3%
48.8	2	69.7	< 1	43%	43.5%	0.4%
72.6	3	72.1	11	1%	44.5%	0.1%
108.0	5	153.4	17	42%	86.5%	7.1%
Error_total_pond.						7.9%

Tabla 16: Hipótesis 2

$f_{exp.}$	Modo	$f_{num.}$	Masa (%)	$Error_i$	$Error_{acum.}$	$Error_{pond.}$
36.6	1	36.7	61	0.5%	0.5%	0.3%
48.8	2	69.7	< 1	43%	43.5%	0.4%
72.6	3	72.1	11	1%	44.5%	0.1%
108.0	4	130.6	< 1	21%	65.5%	0.2%
Error_total_pond.						1.0%

Dónde:

$$Error_i = \frac{f_{exp.} - f_{num.}}{f_{exp.}} \quad (2)$$

$$Error_{acum.} = \sum_i \frac{f_{exp.} - f_{num.}}{f_{exp.}} \cdot i \quad (3)$$

$$Error_{pond.} = Error_i \cdot \% \text{ masa} \quad (4)$$

$f_{exp.}$: Frecuencia experimental

$f_{num.}$: Frecuencia numérica

Las tablas anteriores muestran dos hipótesis de pareo de modos, donde se muestran diferentes errores en relación a las frecuencias experimentales y numéricas que dependen principalmente del orden y el porcentaje de participación de los modos.

Se confirma el planteamiento de la hipótesis número dos pues resultó ser la que menor error total ponderado obtuvo siendo tan solo un 1 %, por lo que se demuestra que los primeros 4 modos entregados por el modelo numérico son los que mejor se ajustan a las frecuencias experimentales además tienen una participación de masa modal de un 72%.



La Tabla 17 muestra la sensibilidad del modelo numérico al evaluar la hipótesis 2, cuando se cambia el módulo de elasticidad del hormigón. Los hormigones considerados son H-20, H-25 y H-30.

Tabla 17: Errores para cada tipo de hormigón

H-20						
$f_{exp.}$	Modo	$f_{num.}$	Masa (%)	$Error_i$	$Error_{acum}$	$Error_{pond}$
36.60	1	35.83	61	2.1%	2.1%	1.3%
48.85	2	67.93	< 1	39%	41%	0.4%
72.65	3	70.35	11	3%	44%	0.3%
108.00	4	127.33	< 1	18%	62%	0.2%
Error_total_pond.						2.2%

H-25						
$f_{exp.}$	Modo	$f_{num.}$	Masa (%)	$Error_i$	$Error_{acum}$	$Error_{pond}$
36.60	1	36.78	61	0.5%	0.5%	0.3%
48.85	2	69.70	< 1	43%	43%	0.4%
72.65	3	72.19	11	1%	44%	0.1%
108.00	4	130.60	< 1	21%	65%	0.2%
Error_total_pond.						1.0%

H-30						
$f_{exp.}$	Modo	$f_{num.}$	Masa (%)	$Error_i$	$Error_{acum}$	$Error_{pond}$
36.60	1	38.91	61	6.3%	6.3%	3.8%
48.85	2	73.74	< 1	51%	57%	0.5%
72.65	3	76.37	11	5%	62%	0.5%
108.00	4	138.23	< 1	28%	90%	0.3%
Error_total_pond.						5.2%

Se puede observar que las frecuencias numéricas cambian muy poco, es decir son insensibles al cambio de hormigón y también mencionar que la participación de masa modal en todos los modelos sigue siendo la misma.

La diferencia del error total ponderado entre el modelo con hormigón H-20 y el modelo con H-30 es de tan solo un 3%.

Las frecuencias entregadas por el modelo con hormigón H-25 son las que mejor se ajustan a las frecuencias experimentales con un error total ponderado de 1.0%.

6. CONCLUSIONES

El análisis modal experimental se realizó a un muro de hormigón armado de un edificio habitacional de la provincia de Concepción. Se exitó la estructura por medio de impactos aplicados por un martillo de goma. La respuesta se registró mediante 3 acelerómetros adosados a la estructura. La respuesta modal fue determinada mediante la técnica FDD y SSI. Solo el método SSI fue capaz de identificar frecuencias en cada uno de los pisos, desde una frecuencia en el piso 10 hasta 4 frecuencias en el piso 4 con resultados de muy notable coincidencias y buena repetibilidad. El método SSI resulta ser una técnica muy potente para la identificación de parámetros modales para estructuras rígidas como flexibles.

A través del método FDD no fue posible encontrar frecuencias debido que los golpes no transmitieron la suficiente energía dado por la rigidez del muro. No se logró apreciar ningún peak en los diagramas de PSD, por lo tanto no se obtuvieron parámetros modales por medio de este método y se descartó. El método FDD es una buena técnica de identificación de parámetros modales cuando la estructura no es rígida o la energía de excitación es alta.

Por medio del método SSI se tuvieron resultados exitosos logrando encontrar varias frecuencias por cada piso con buenos índices de repetibilidad. Por medio del criterio de aseguramiento modal (MAC) se obtuvieron resultados con una muy buena comparación modal entre las frecuencias con valores muy cercanos a 1, lo que evidencia que las frecuencias encontradas por este método podrían ser efectivamente frecuencias reales del muro.

De los tres modelos numéricos que se analizaron para encontrar el que mejor se asemejara a las frecuencias experimentales, resultó ser el tercer modelo que mostraba 3 pisos continuos de muro de hormigón armado el más semejante en su respuesta dinámica, las primeras frecuencias numéricas eran muy similares a las frecuencias experimentales, motivo por el que fue elegido como el modelo que mejor representación real tiene del muro de hormigón armado estudiado y serviría para hacer proyecciones de este.

El análisis para la calibración del modelo utilizó los resultados del piso 4, pues demostraron tener los mejores índices de repetibilidad. La comparación de las frecuencias experimentales y numéricas se llevó a cabo mediante dos hipótesis, teniendo mejor correlación la hipótesis número 2 que pareaba la respuesta modal experimental con los modos 1, 2, 3 y 4 del modelo numérico, registrándose un error total ponderado de un 1.0%. Esto significa que las frecuencias asociadas a los primeros cuatro modos (con una participación de masa modal de un 72%) tienen una muy buena relación con las cuatro frecuencias encontradas, experimentalmente. Por lo tanto el modelo asociado a los tres pisos continuos es el que representa de manera satisfactoria al muro en su comportamiento dinámico.

La prueba de sensibilidad realizada al modelo numérico, donde se cambió las propiedades del hormigón de un H-20, H-25 y H-30 resultó insignificante respecto a las frecuencias numéricas entregadas por el modelo, ya que difieren en promedio del error total ponderado de un 2.8% entre los tres tipos de hormigones. Por lo tanto el cambio de módulo de elasticidad de cada tipo de hormigón, no afecta significativamente las frecuencias entregadas por modelo numérico del muro de hormigón armado. Sin embargo, el que mejor ajuste logra y se asemeja más al comportamiento real de la estructura es con el hormigón H-25.

Finalmente se puede concluir que se encontraron los parámetros modales del muro de hormigón armado satisfactoriamente por medio del método SSI y se logró calibrar un modelo numérico con los datos experimentales que representa al muro de forma deseable y confiable. Por lo tanto este modelo serviría para estudiar el muro de hormigón armado en diferentes escenarios y poder ver su comportamiento y respuesta ante las nuevas condiciones a las que se está sometiendo.

7. REFERENCIAS

Beskyroun, S. (2011). Graphical Interface Toolbox for Modal Analysis. *9th Pacific Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, 14-16 Abril, 2011.

Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2000). Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition. *18th International Modal Analysis Conference*. San Antonio, Texas, 7-10 Feb, 2000.

Díaz, S. (2015). *Métodos numéricos aplicados a la ingeniería civil estructuras*. Jaén.

Oyarzo, C. (2012). Damage identification of unreinforced masonry structures based on vibration response. *PhD Tesis, University of Auckland*. Auckland, New Zealand.

Ramos, L., Aguilar, R., Lourenço, P., & Moreira, S. (25 de September de 2012). Dynamic structural health monitoring of Saint Torcato Church. Switzerland.

Rodríguez, M. (2005). *Análisis modal operacional: Teoría y práctica. Capítulo V*. Sevilla.

Van Overschee, P., & De Moor, B. (1996). *Subspace Identification for Linear Systems*. Boston: Kluwer Academic Publisher.