

VARIACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS DEL EDIFICIO DE LA CÁMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCIÓN: CASO SÍSMICO

Rodrigo Carreño V.¹, Rubén Boroschek K.²

1 Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Chile.

email: rcarreno@ing.uchile.cl

2 Profesor Asociado. Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile. Chile.

email: rborosch@ing.uchile.cl

RESUMEN

El Edificio de la Cámara Chilena de la Construcción (CChC) cuenta desde 1997 con 12 sensores uniaxiales de aceleración, 4 de ellos ubicados en su base y el resto distribuido en otros tres pisos de la estructura, permitiendo registrar tanto microvibraciones ambientales como movimientos sísmicos. Desde su instalación, el sistema de sensores ha registrado la respuesta dinámica del edificio para 54 temblores de leve y mediana intensidad. El presente trabajo presenta el estudio de la variación de parámetros modales de la estructura ante estos eventos sísmicos.

El proceso de identificación de los parámetros modales del edificio, se realiza mediante un método de identificación basado en múltiples señales de entrada y salida (MIMO: Multiple Input - Multiple Output), el cual requiere tanto de los registros de la excitación externa aplicada sobre la estructura (Input) como los de respuesta dinámica en distintos puntos de ella (Output).

En este trabajo se evalúa la relación de los parámetros modales identificados en la estructura con la amplitud del movimiento. En el caso de las frecuencias modales, se observa que sus valores decaen con la amplitud del movimiento, llegando a rangos de variabilidad entre 4 y 10% para los registros sísmicos estudiados. En tanto, para los amortiguamientos, sus valores se incrementan con la amplitud de la vibración, en órdenes de variación que van desde el 50% (relativo), para el caso de los dos primeros modos traslacionales de la estructura, hasta superar el 300% en modos superiores.

SUMMARY

The Chilean Chamber of Construction Building (CChC) is instrumented since 1997 with 12 uni-axial acceleration sensors, 4 of them located at the base and the rest distributed in three floors of the structure, obtaining ambient and seismic records. The local instrumental network has recorded the dynamic response of the building for 54 low and medium intensity earthquakes. This paper presents a study for the variation of modal parameters of the structure due to these seismic events. Modal parameters are obtained through MIMO (Multiple Input - Multiple Output) identification technique, which requires records of external excitation applied to the structure (Input), and

corresponding dynamic response at different locations in the structure (Output).

Variations of modal parameters identified due to motion amplitude of the structure are studied. For the identified modal frequencies, decreasing values with motion amplitude are observed, in a range between 4% and 10% for the seismic records studied. For modal damping ratios, increasing values with motion amplitude are observed, with variation orders ranging from 50%, for the first translational modes, to over 300% for higher modes.

INTRODUCCIÓN

El edificio de la Cámara Chilena de la Construcción, Figura 1, se encuentra estructurado con un sistema de muros y marcos de hormigón armado, donde los muros concentran la rigidez lateral de la estructura en el eje central del edificio, el que consta de 20 pisos sobre el nivel de terreno y 4 subterráneos, completando una altura 85.5m. Los valores de densidad de muros para la estructura, correspondiente al cuociente entre las áreas de secciones de muro y el área en planta de cada piso, están en el rango de 3 a 6%.

El edificio está fundado sobre una grava densa, correspondiente a suelo tipo II de acuerdo a la norma sísmica NCh433Of96.

Desde el año 1997 el edificio en estudio se encuentra instrumentado con una red de 12 acelerómetros uniaxiales de fuerza balanceada (Figura 2), los cuales captan aceleraciones absolutas en la estructura, traduciéndolas a voltaje analógico. El sistema de adquisición de datos permite registrar desde microvibraciones ambientales a eventos sísmicos de consideración.

El objeto de este estudio es el análisis de las variaciones en las propiedades modales de la estructura durante eventos sísmicos, empleando para ello los registros de aceleraciones obtenidos para 54 de los eventos sísmicos de mayor importancia registrados por la red de monitoreo. Cabe destacar que los sismos analizados no generaron daño en el edificio.

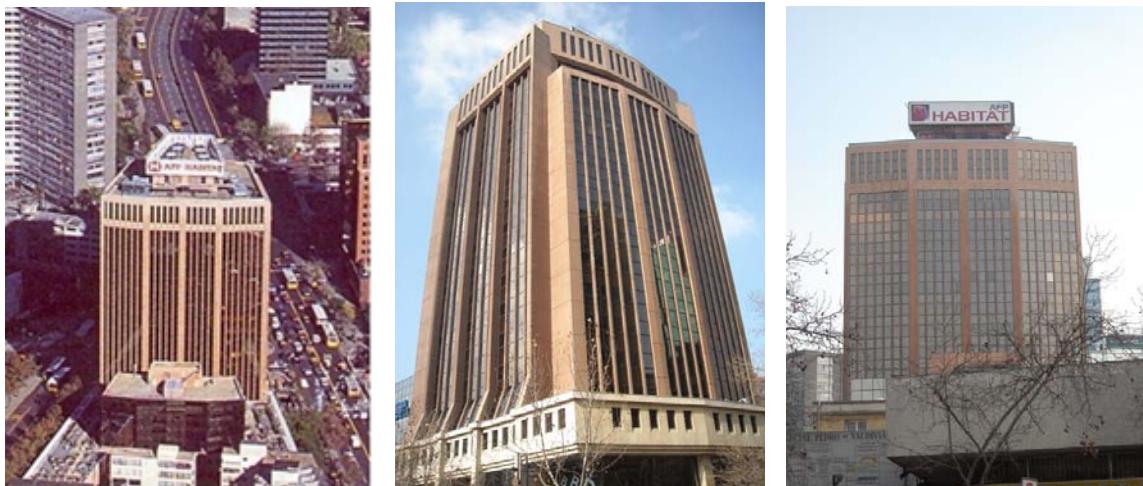


Figura 1 – Edificio de la Cámara Chilena de la Construcción (CChC)

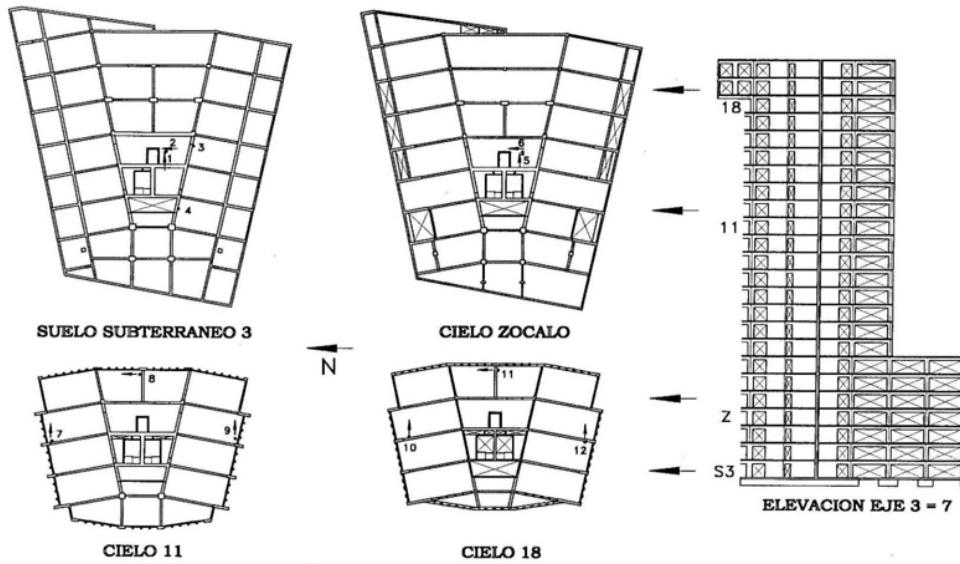


Figura 2 – Ubicación de sensores de aceleración. Edificio Cámara Chilena de la Construcción.

Metodología de Identificación de Parámetros dinámicos.

Para la identificación de los parámetros dinámicos del edificio a partir de registros sísmicos, se implementó un algoritmo de identificación basado en múltiples señales de entrada y salida (MIMO: Multiple Input – Multiple Output).

Para la implementación del método de identificación MIMO se combinaron las metodologías planteadas por dos autores (J.L. Beck: [2], y S.T.Mau: [10],[11],[12],[13]). En ambas se desea encontrar los valores óptimos para los parámetros modales, los que minimizan la diferencia entre la respuesta real medida en la estructura, y la prevista por ellos en base a la excitación externa ($ag_i(t)$, conocida) y las ecuaciones lineales modales de movimiento (Ecuación (1)):

$$\ddot{y}_j(t) + 2 \cdot \omega_j \cdot \beta_j \cdot \dot{y}_j(t) + \omega_j^2 \cdot y_j(t) = \sum_{i=1}^k L_{j,i} \cdot ag_i(t) \quad (1)$$

$$a_p(t) = \sum_{j=1}^N \phi_{j,p} \cdot \ddot{y}_j(t) \quad (2)$$

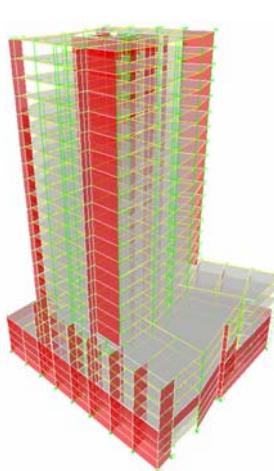
En estas ecuaciones se tienen los valores característicos de cada modo j : ω_j la frecuencia angular modal; β_j la razón de amortiguamiento modal; $L_{j,i}$ el factor de participación modal para la aceleración basal en cada dirección i (ag_i); y $\phi_{j,p}$ la componente del vector modal asociada al punto p . A partir de estos valores se calcula la aceleración relativa en el punto p (a_p), la que se compara con la aceleración relativa medida en el mismo punto ($a_{0,p}$). Finalmente, se define la función objetivo a minimizar en el proceso de identificación MIMO (Ecuación (3)).

$$E = \sqrt{\frac{\sum_p \alpha_p \cdot \sum_t (a_{0,p}(t) - a_p(t))^2}{\sum_p \alpha_p \cdot \sum_t (a_{0,p}(t))^2}} \quad (3)$$

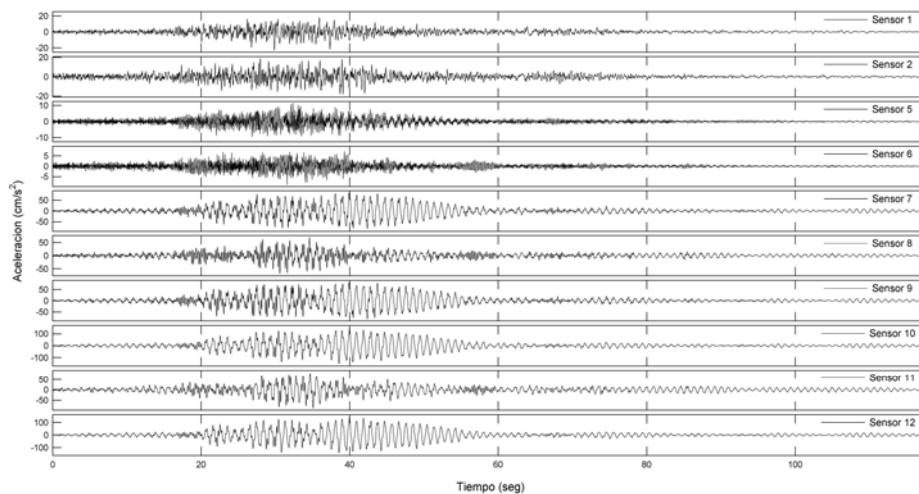
Siendo E una función de error relativo, cuyos resultados se expresan en forma porcentual, entre la respuesta medida en la estructura ($a_{0,p}$) y la resultante con los valores modales identificados (a_p). Los factores α_p permiten por su parte ponderar la importancia de los registros de cada sensor en el proceso de identificación.

Validación del Método de Identificación Modal.

Para validar el proceso de identificación implementado, se empleó un modelo computacional del edificio desarrollado en ETABS (Figura 3). En él se asignaron distintos registros sísmicos en la base de la estructura, obteniendo la respuesta correspondiente mediante un análisis tiempo-historia en posiciones equivalentes a la disposición de sensores en la estructura real (Figura 2).



(a) Vista 3D Modelo ETABS.



(b) Ejemplo de registro tiempo-historia modelo ETABS

Figura 3 – Modelo Teórico de Edificio para validar método de Identificación.

De los distintos registros resultantes del análisis tiempo-historia del modelo del Edificio, se identificaron valores de frecuencias modales con un error inferior al 0.05% relativo para los modos principales. En el caso de los amortiguamientos modales principales, los valores identificados alcanzaron errores que no superaban el 2.5% relativo. En Tabla 1 se presentan los resultados de frecuencias y amortiguamientos modales identificados para uno de estos ejemplos analíticos.

Tabla 1 – Resultados Ejemplo Identificación MIMO, Modelo teórico Edificio.

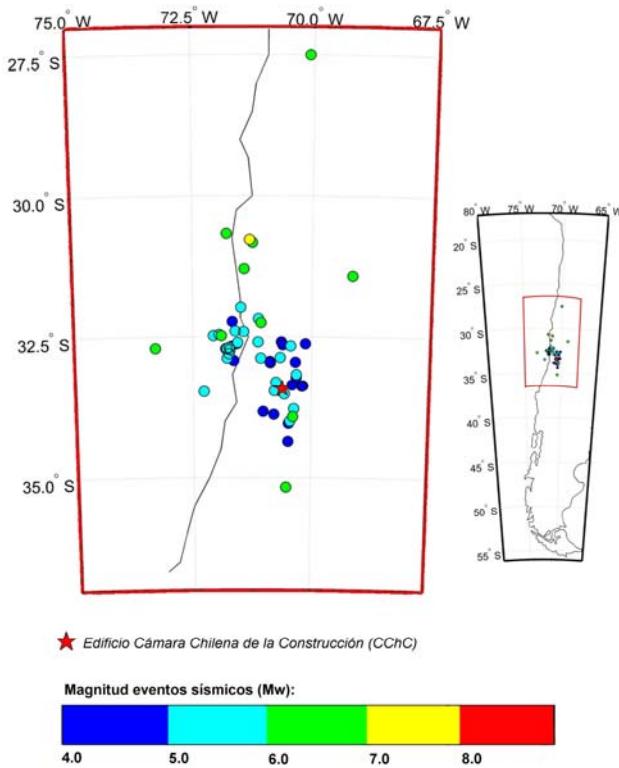
Reales Modelo		Identificación MIMO		Diferencia (%)	
Frec [Hz.]	β [%]	Frec [Hz.]	β [%]	Frec	β
1.05	1.00	1.05	1.00	0%	0.08%
1.09	1.30	1.09	1.30	0%	0.01%
1.46	0.50	1.46	0.50	0%	0.94%
3.94	3.00	3.94	3.00	0%	0.09%
4.05	2.40	4.05	2.40	0%	0.16%
4.18	0.80	4.18	0.80	0%	0.53%
6.85	1.00	6.85	1.00	0%	0.46%
8.10	3.00	8.10	3.01	0%	0.17%
8.39	8.00	8.39	8.17	0.04%	2.14%

En cuanto al error en el ajuste de los registros de respuesta (E , Ecuación (3)), los valores obtenidos fueron del orden de un 2%, valor muy inferior al típicamente resultante en la identificación de registros de movimiento sísmico reales, en rangos del 10% al 30% al utilizar aceleraciones, esto debido a fenómenos como la no-linealidad de la estructura, ruido en los registros de aceleración y el conocimiento limitado de la excitación externa.

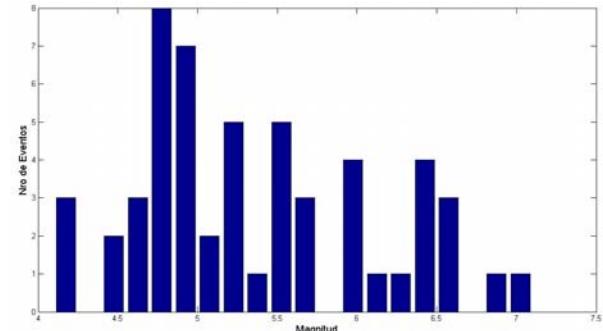
Registros sísmicos utilizados en el estudio.

Los registros sísmicos de aceleración en el edificio, a partir de los cuales se efectúa la identificación modal, se caracterizan por alcanzar rangos de movimiento que no implican daño estructural. Para los registros utilizados, las aceleraciones máximas basales en el edificio alcanzan razones de g (9.8 m/s^2) entre 0.1% y 7%, mientras que las aceleraciones (absolutas) máximas en los pisos superiores resultan en rangos entre 0.2% y 15%.

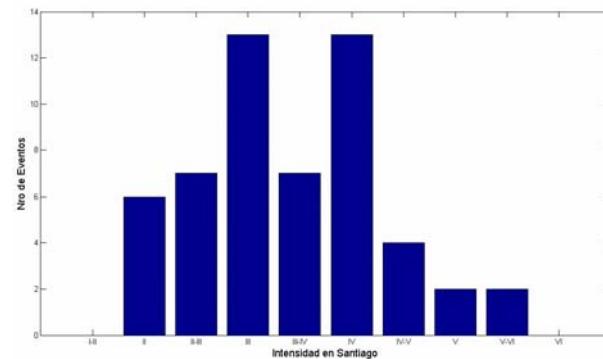
En cuanto a los sismos correspondientes a los registros analizados, sus magnitudes se distribuyen entre 4.2 y 7.1 (Mw), donde los sismos de gran magnitud han tenido su epicentro en regiones alejadas de la zona central (donde está ubicado el edificio, Figura 4.a), con lo cual los eventos sísmicos empleados concentraron sus intensidades para Santiago entre II y V (Figura 4.c).



(a) Epicentros.



(b) Histograma de Magnitud.



(c) Histograma de Intensidad en Santiago.

Figura 4 – Estadística de eventos sísmicos empleados en Identificación Modal.

Propiedades modales del Edificio (Estudios previos).

El edificio de la Cámara Chilena de la Construcción ha sido objeto de múltiples estudios en la identificación de sus parámetros modales ([3],[4],[5],[8],[14]), aunque en su mayoría bajo condiciones ambientales. A partir de estos estudios, se presenta en Tabla 2 un resumen de valores promedio para frecuencias y amortiguamientos modales medidos en la estructura.

Tabla 2 – Frecuencias y Amortiguamientos modales del edificio bajo condiciones ambientales. (Fuente: [4])

Modo	Frec [Hz]	Amort (ξ) [%]	Dirección Modo
1	1.04	1.1	Traslacional. Dirección Este-Oeste.
2	1.07	1.0	Traslacional. Dirección Norte-Sur.
3	1.63	0.6	Torsional.
4	3.60	1.5	Traslacional. Dirección Este-Oeste.
5	3.57	1.5	Traslacional. Dirección Norte-Sur.
6	4.8	1.2	Torsional.

Resultados del Proceso de Identificación Modal.

Del proceso de Identificación Modal sobre los registros sísmicos de la estructura, se obtuvieron valores de error en el ajuste de la respuesta real medida (E , Ecuación (3)) entre 13% y 35%, resultados aceptables considerando el uso de registros de aceleración en el proceso (para velocidades y desplazamientos, los errores aceptables en la identificación son inferiores). Los valores de error (E) resultantes permiten dar validez a los resultados obtenidos para los parámetros modales (frecuencia, amortiguamiento, etc) en los procesos de identificación. En Figura 5 se muestra un ejemplo de ajuste de los registros de aceleración resultante en la identificación modal.

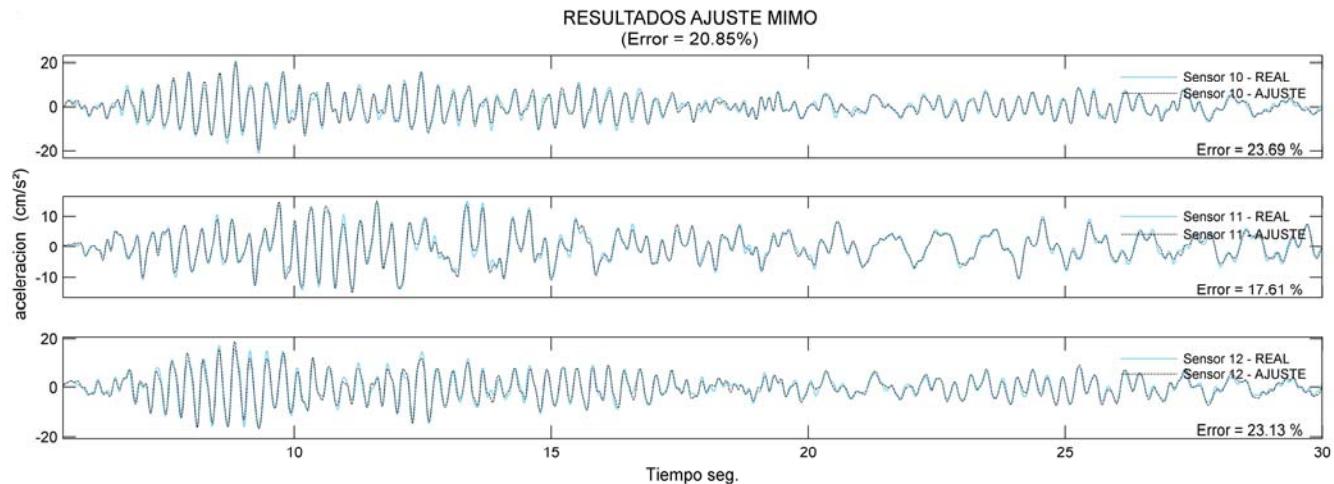


Figura 5 – Ejemplo ajuste de respuesta sísmica resultante de Identificación Modal.
Fecha registro sísmico: 23/05/2002

Parámetros modales identificados, variación con amplitud de movimiento.

Con el fin de analizar el comportamiento no-lineal del edificio durante eventos sísmicos, se estudió fundamentalmente la relación entre los parámetros modales identificados para cada registro sísmico y la amplitud de movimiento asociada en la estructura. De los distintos planteamientos estudiados para definir la amplitud de movimiento, la definición de una “amplitud modal” resulta ser

la de mayor correlación con los parámetros modales identificados. Esta “amplitud modal” es considerada para cada modo como el valor medio cuadrático (RMS) de la aceleración medida en el piso superior instrumentado (Piso 19 en este caso), proyectada en la dirección principal del modo y filtrada en el rango de frecuencias de este (Tabla 2).

$$RMS_{\text{modal},j} = \sqrt{\sum_t \left(\left[\vec{a}_{\text{piso } 19}(t) \cdot \vec{\theta}_j \right]_{[f_j - \Delta f_j, f_j + \Delta f_j]} \right)^2} \quad (4)$$

$RMS_{\text{modal},j}$: Amplitud modal de movimiento, modo j

$\vec{a}_{\text{piso } 19}(t)$: Vector aceleración medida (absoluta) en el C.G del piso 19.

$\vec{\theta}_j$: Vector unitario en dirección principal del modo j.

$[X]_{[f_j - \Delta f_j, f_j + \Delta f_j]}$: Señal X con filtro pasa-banda entre $f_j - \Delta f_j$ y $f_j + \Delta f_j$

f_j : Frecuencia promedio estimada de modo j (Tabla 2)

Δf_j : Rango de confianza para frecuencia f_j

Se presenta en Figura 6 y Figura 7 la relación entre las frecuencias y amortiguamientos modales identificados para los primeros dos modos y la amplitud de movimiento de la estructura.

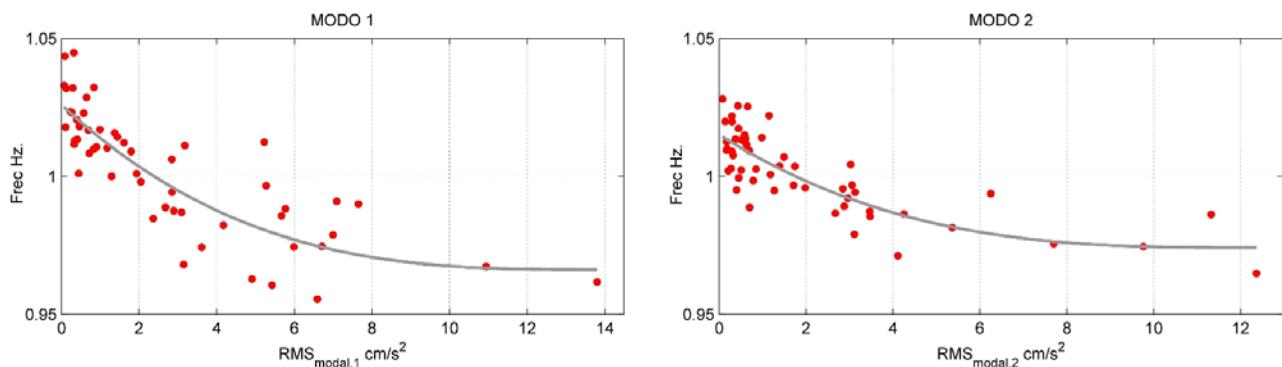


Figura 6 – Frecuencias modales identificadas vs amplitud de movimiento de la estructura.

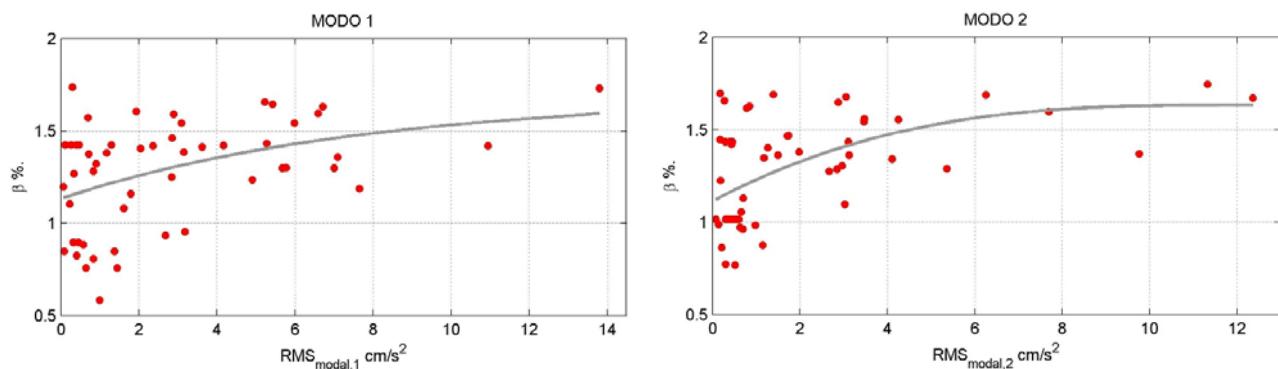


Figura 7 – Razones de amortiguamiento modal identificadas vs amplitud de movimiento de la estructura.

De los gráficos en Figura 6 y Figura 7 se aprecia claramente la correlación entre frecuencias y amortiguamientos modales con la amplitud del movimiento, observándose una tendencia decreciente para las frecuencias y creciente para los amortiguamientos. Las líneas de tendencia

empleadas en los gráficos, obtenidas mediante una regresión robusta ([9]) para descartar puntos fuera de rango, ponen de manifiesto además la estabilización de los parámetros modales a medida que aumenta la amplitud del movimiento, situación esperable mientras se esté en rangos que no impliquen daño estructural.

Del estudio se advierte que, para los modos traslacionales principales (Modos 1, 2, 4 y 5 según Tabla 2), las frecuencias modales oscilan entre 4% y 10% para los valores límite de amplitud de movimiento de los registros estudiados. En el caso de los amortiguamientos, la variación porcentual (relativa) resulta mucho mayor, desde valores alrededor del 50% en los primeros dos modos traslacionales, hasta variaciones que superan el 300% en modos superiores, muchos de los cuales muestran aún en forma clara y estable la tendencia creciente con la amplitud del movimiento de este parámetro.

Parámetros modales identificados, análisis por ventanas.

Como parte de este estudio, se realizó el proceso de identificación modal sobre los registros sísmicos divididos en ventanas de tiempo de 4 segundos. Lo anterior tanto con el objetivo de estudiar el comportamiento no-lineal de la estructura durante un evento sísmico, como replicar el análisis de la relación entre la amplitud del movimiento y los parámetros modales del edificio, realizado previamente utilizando los resultados de la identificación modal sobre cada registro sísmico en su totalidad.

En Figura 8 se observa la evolución de la frecuencia y amortiguamiento modal para el modo 1 durante un evento sísmico, en este caso se advierte la misma correlación entre la amplitud del movimiento y los parámetros modales observada en Figura 6 y Figura 7.

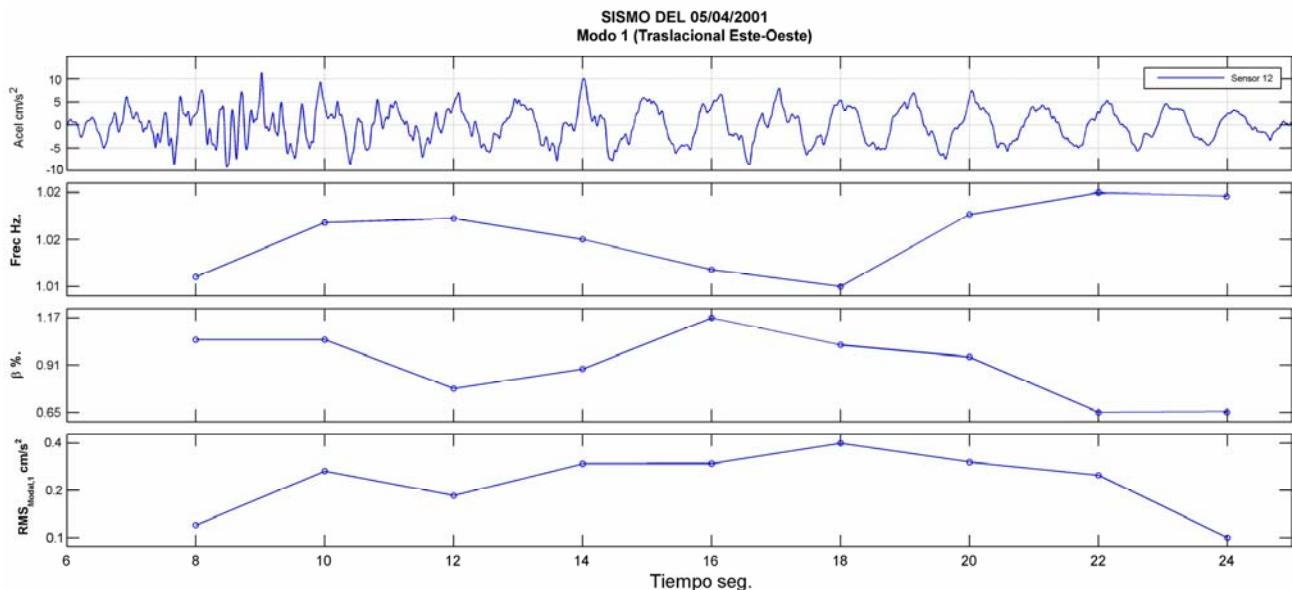


Figura 8 – Evolución de parámetros modales, Modo 1. Fecha Sismo: 05/04/2001.

Al replicar los gráficos del tipo presentado en Figura 6 y Figura 7 considerando los parámetros modales obtenidos en cada ventana de registro sísmico, se incrementa la cantidad de puntos y por tanto la robustez estadística de los resultados, esto a cambio de un menor grado de confianza en los resultados del proceso de identificación en cada ventana individual, dada la menor longitud de registro con la que trabaja cada proceso. Con todo lo anterior, se observa en los gráficos correspondientes una mayor claridad en la tendencia de los datos, a cambio de una mayor dispersión

de estos. Se muestra en Figura 9 los resultados de las frecuencias para los dos primeros modos traslacionales de la estructura.

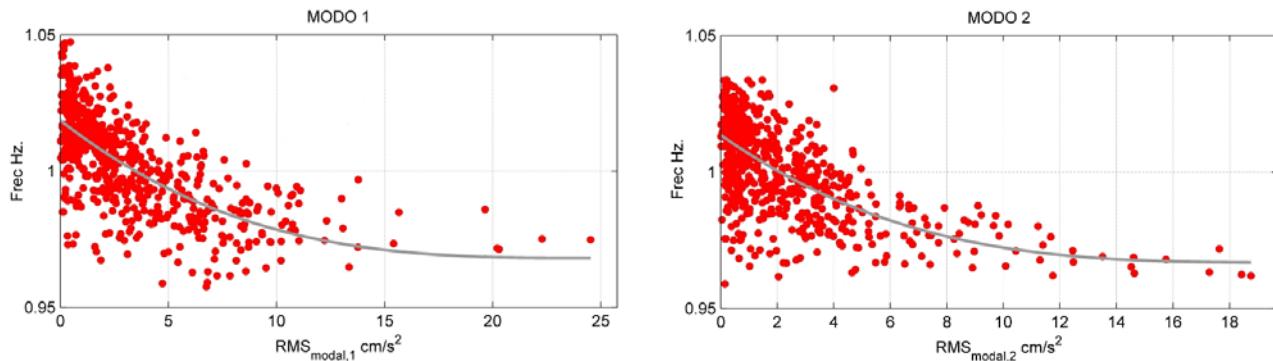


Figura 9 – Frecuencias modales identificadas vs amplitud de movimiento de la estructura.
Resultado análisis por ventanas.

Conclusiones.

La aplicación del algoritmo de identificación MIMO implementado para este estudio, validado mediante modelos analíticos, sobre registros de movimiento del Edificio de la Cámara Chilena de la Construcción asociados a eventos sísmicos que no implicaron daño estructural, permite apreciar la correlación entre las frecuencias y razones de amortiguamiento modales con la amplitud del movimiento de la estructura. Las frecuencias modales decrecen con la amplitud del movimiento, en el caso de los modos traslacionales principales en un rango entre 4% y 10% para los límites de amplitud con los que se desarrolló este trabajo. Por su parte, los amortiguamientos modales aumentan con la amplitud de respuesta, en rangos que van desde un 50% relativo en los modos principales, hasta valores mayores al 300% en modos superiores.

El algoritmo de identificación implementado permite además analizar los registros de movimiento por ventanas, de manera de estudiar el comportamiento no lineal de la estructura durante cada evento sísmico, mediante la evolución de los parámetros modales. De lo anterior se observa que en muchos casos los parámetros modales se correlacionan en forma instantánea con la amplitud de movimiento durante un evento sísmico.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos por su colaboración al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, al Ingeniero Pedro Soto, a la Cámara Chilena de la Construcción, y al Proyecto Fondecyt N° 1070319, que apoyó esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] P.Y. Bard, M. Celebi, F. Dunand, P. Gueguen y J. Rodgers. "Comparison of the dynamic parameters extracted from weak, moderate and strong motion recorded in buildings". *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006, Paper Number: 1021. 2006.
- [2] J.L Beck. "Determining models of structures from Earthquake records". *Rep. EERL 78-01*, Caltech, Pasadena, California. 1978.
- [3] R. Boroschek, P. Soto. "Variación de las propiedades dinámicas de un edificio instrumentado en sismos leves y moderados". *VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Valparaíso, 2002.
- [4] R. Boroschek, F. Yañez. "Experimental verification of basic analytical assumptions used in the analysis of structural wall buildings". *Engineering Structures*, (22) pp. 657-669. 2000.
- [5] A. Castillo. "Identificación de las propiedades modales de edificios altos utilizando el método de subespacio estocástico". *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile*. Santiago, Chile. 2005.
- [6] L. De La Fuente. "Verificación experimental de modelos analíticos en el edificio de la Cámara Chilena de la Construcción". *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile*. Santiago, Chile. 1999.
- [7] A.L. Hong, R. Betti, Ch. Lin. "Identification of dynamic models of a building structure using multiple earthquake records". *Struct. Control Health Monit.*, 2009.
- [8] P. Lazcano. "Variación de los Parámetros modales del Edificio de la Cámara Chilena de la Construcción a partir de registros ambientales y sísmicos". *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile*. Santiago, Chile. 2008.
- [9] R.J. Rosseeuw, A.M. Leroy. "Robust Regression and Outlier Detection". New York, Wiley. 1987.
- [10] S.T. Mau, S. Wang . "Arch dam system identification using vibration test data". *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol 18, 491-505. 1989.
- [11] S.T. Mau, Y. Li. "A case study of MIMO system identification applied to building seismic records". *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol 20, 1045-1064. 1991.
- [12] S.T. Mau, Y. Li. "Learning from Recorded Earthquake motion of Buildings". *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123. Jan 1997. 1997.
- [13] S.T. Mau y V. Aruna. "Story-Drift, Shear, and OTM Estimation from Building Seismic Records". *Journal of Structural Engineering*, Vol 20, No. 11, November, 1994.
- [14] P. Valdés. "Identificación paramétrica en sistemas estructurales utilizando el método de del Subespacio estocástico". *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile*. Santiago, Chile. 2004.