

VARIACION DE LAS PROPIEDADES DINAMICAS DE UN EDIFICIO INSTRUMENTADO EN SISMOS LEVES Y MODERADOS

Ruben Boroschek⁽¹⁾, Pedro Soto⁽¹⁾

(1) Depto. Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile. rborosch@cec.uchile.cl

RESUMEN

El edificio corporativo de la Cámara Chilena de la Construcción se encuentra instrumentado con sensores de aceleración desde el año 1995. A la fecha no han ocurrido sismos mayores, sin embargo se han registrado movimientos ambientales y sismos de leves a moderados lo que ha permitido la identificación de las propiedades dinámicas y sus variaciones bajo distintos niveles de vibración. A pesar de que no se ha detectado daño en los sismos y vibraciones ambientales, las frecuencias de vibrar varían hasta en un 4 % cuando las aceleraciones máxima de la estructura presentan cambios entre 0.005 y 0.12 g. De igual manera el amortiguamiento presenta entre un 50 y un 300% de variación. De la comparación de estos resultados con los de un modelo matemático de la estructura, se observa una diferencia menor al 5 % en los periodos fundamentales de la estructura, lo que permite validar los supuestos de análisis en el rango elástico de respuesta.

SUMMARY

The Chilean Construction Chamber Building has been instrumented with accelerometers since 1995. A series of low level and moderate seismic events and ambient vibration records have been recorded in the structure. From these records the dynamic properties are identified using parametric and no parametric system identification techniques. Although no damage has occurred the predominant modal frequencies have change nearly 4 %, in average, for maximum accelerations variations between 0.005 a 0.12 g. Damping also changed between 50% to 300% for the same change in maximum acceleration. An analytical model has been developed using standard design assumptions and compared with the experimental properties. The difference between the model and experimental frequencies is less than 5%.

INTRODUCCION

El edificio corporativo de la Cámara Chilena de la Construcción es un edificio de 22 pisos y 3 subterráneos ubicado en Santiago, Chile y construido a finales de los años 80, Ref. 2. El sistema estructural consiste en un núcleo de hormigón y columnas y muros menores en la misma función, Figura 1. La densidad de muros varía desde un 6.3 % en el piso 1 hasta un 4 % en el piso 22. Estos valores permiten clasificar a esta estructura dentro de la categoría de edificio de estructuración típica chilena.

REGISTROS DE MOVIMIENTO FUERTE

El edificio corporativo de la Cámara Chilena de la Construcción y el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile tiene un sistema de registro de movimiento fuerte desde el año 1995, Ref. 1, Figura 1. Este sistema está formado por una central de registro y doce acelerómetros distribuidos tanto en planta como en altura. La central de registro tiene la capacidad de almacenar la información generada por todos los acelerómetros con un tiempo común, lo que es fundamental para estudiar propiedades dinámicas de la estructura. El sistema está constantemente monitoreando la información recolectada por los acelerómetros y solo almacena un registro cuando se cumplen las condiciones programadas de activación.

Desde su puesta en funcionamiento, se han registrado gran cantidad de eventos leves y moderados y vibraciones ambientales, lo que ha permitido obtener información sobre el comportamiento y propiedades dinámicas del edificio. Para estudiar las variaciones de las propiedades dinámicas del edificio se seleccionaron los eventos registrados más importantes, tabla 1, cabe agregar que ninguno de ellos ha generado daño al edificio.

Tabla 1. Eventos Más importantes (Ref. 3)

Evento	Mag. Richter	Latitud	Longitud	Aceleración Max. Registrada en Suelo G	Aceleración Max. Registrada en el Edificio G
24 de Enero de 1997	5.3	33°28.1'S	70°47.1'W	0.064	0.140
20 de Abril de 1997	5.3	33°59.7'S	70°28.0'W	0.022	0.050
19 de Junio de 1997	5.1	33°09.4'S	70°18.1'W	0.013	0.040
14 de Octubre de 1997 (Terremoto de Punitaqui)	6.8	30°44.5'S	71°19.7'W	0.024	0.080
12 de Enero de 1998	5.9	31°18.8'S	71°25.1'W	0.009	0.046

SISTEMA DE IDENTIFICACION

Para este trabajo se utilizaron técnicas paramétricas y no paramétricas para la identificación de las propiedades dinámicas fundamentales. Las primeras se caracterizan por requerir un modelo o función con parámetros a ajustar de acuerdo a un cierto criterio de minimización. Las segundas no utilizan un modelo a priori y se deben interpretar los parámetros dinámicos directamente de los datos.

La técnica paramétrica utilizada considera el ajuste de parámetros dinámicos estructurales utilizando varias señales de entrada y salida (MIMO). El algoritmo utilizado es el de minimización modal, desarrollado por Mau (Ref. 4). Este algoritmo numérico tiene la capacidad de identificar gran cantidad de parámetros y de trabajar simultáneamente con varios registros, optimizando globalmente la solución del problema a través de la función de ajuste, Ecuación 1 y 2.

$$J = \sum_i \sum_s [a_{oi}(s\Delta T) - a_i(s\Delta T, z)]^2 \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$\text{con } a_i = \sum_j \mathbf{f}_{ij} u_j(s\Delta T, z) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde $a_{oi}(s\Delta T)$ es la respuesta observada de la estructura.

$a_i(s\Delta T, z)$ es la respuesta calculada al resolver la integral de Duhamel para $u_j(s\Delta T, z)$.

\mathbf{f}_{ij} : Componente de la forma modal j en el nodo i .

$s\Delta T$: Intervalo de tiempo.

z : Vector con parámetros modales a identificar.

Las técnicas no paramétricas utilizadas son el espectro de potencia y la función de transferencia. En Boroschek y Yañez (Ref. 1) se puede encontrar una descripción de procedimiento utilizado.

El estudio de propiedades dinámicas promedio se realiza utilizando el registro completo. Para estudiar su evolución de acuerdo a la amplitud de la excitación se divide el registro en ventanas de tiempo de duración menor a la longitud del registro.

VARIACION DE LOS PARAMETROS MODALES MEDIOS PARA CADA REGISTRO

Con el fin de estudiar como varían los parámetros modales medios se realizó un ajuste de tipo MIMO con una ventana de longitud igual al registro. El modelo matemático empleado para el proceso de identificación paramétrica fue un modelo bidimensional, sin torsión, con cuatro respuestas (2 pares ortogonales) y 2 excitaciones ortogonales.

Los resultados del proceso de identificación paramétrica de cada evento, Tabla 2, indica una variación en los modos y en la cantidad de modos que participan.

Tabla 2. Propiedades identificadas

Evento	24/1/1997		20/4/1997		19/6/1997		14/10/1997		12/1/1998	
Magnitud Rich.	5.3		5.3		5.1		6.8		5.9	
Modos Identificados	Frec.	B	Frec.	B	Frec.	B	Frec.	B	Frec.	B
	Hz	%	Hz	%	Hz	%	Hz	%	Hz	%
	0.986	2.7	0.996	1.5	1.000	1.7	0.967	1.4	0.972	1.4
	1.002	1.7	0.996	1.5	1.020	1.4	0.977	1.5	1.005	1.6
	1.486	2.6	1.470	N/c	-	-	-	-	-	-
	2.262	N/c	-	-	-	-	-	-	2.176	3.6
	3.324	3.6	3.377	2.9	3.416	3.0	3.353	3.6	3.382	2.5
	3.421	3.6	3.381	3.0	3.470	2.3	3.355	3.6	3.471	2.7
	4.543	N/c	-	-	-	-	-	-	4.951	1.0
	-	-	-	-	5.892	3.4	-	-	-	-
	-	-	-	-	8.815	9.6	-	-	-	-
Error Relativo de Ajuste (%)	38.0		24.0		26.3		27.1		20.4	
Error Absoluto de Ajuste	1.75E5		2.83E4		1.59E4		2.82E5		2.20E4	

N/c – Valor no representativo

Los parámetros medios identificados para el sismo del 14 de Octubre de 1997 se han introducidos a un modelo matemático de varios grados de libertad y comparado con la respuesta medida, Figura 2. El ajuste para los registros de aceleraciones es para todas las componentes muy bueno.

Adicionalmente después de cada evento sísmico se realizó un registro de vibraciones ambientales. Las propiedades dinámicas de la estructura en esta condición se identificaron utilizando técnicas no paramétricas asociadas al espectro de potencia, Figura 3, Ref.1. De este análisis se observó que el período y amortiguamiento se "recupera" a valores iniciales que son a veces menores que los observados en los eventos sísmicos y que aún en microvibraciones se observan variaciones en los períodos, aunque menores.

VARIACION DE LOS PARAMETROS MODALES A LO LARGO DEL REGISTRO

Con el propósito de analizar la variación de los parámetros modales en función de la zona del registro, se efectuó un análisis paramétrico por ventana móvil a lo largo de todos los registros. Los registros fueron analizados secuencialmente utilizando el ajuste MIMO con una ventana de 10 segundos, no traslapada. En algunos casos para evitar perturbaciones al término del registro se utilizó una ventana menor. El modelo matemático empleado, para el proceso de identificación paramétrica, corresponde a un modelo bidimensional sin torsión, con 2 respuestas ortogonales y 2 excitaciones ortogonales; en esta etapa se han considerando solo las cuatro formas modales fundamentales para efectos de comparación, Figura 4.

Los resultados obtenidos muestran que para los eventos utilizados existen variaciones en los valores de la frecuencia modal que depende de la intensidad del sismo. Como es de esperar el período de la estructura (inverso de la frecuencia), aumenta con la intensidad del movimiento. A pesar de que no hay daño, se aprecian variaciones del orden del 4 % en todas las formas modales.

Las variaciones que se obtiene para los coeficientes de amortiguamiento, Figura 5, son del orden del 300%. Aparentemente se encuentran influenciadas por la característica del movimiento en la

ventana de tiempo considerada. Si bien la magnitud de la variación es importante en porcentaje, esto es un efecto local y en general se encuentra en un rango de amplitud relativamente bajo y por lo tanto la variación no es significativa. Es importante notar que estas variaciones deben relacionarse con el nivel de participación que tiene el modo en la respuesta en la ventana de análisis.

COMPARACION DE DATOS CON MODELO DE LA ESTRUCTURA

Para establecer la bondad de los modelos estructurales de diseño se elaboro un modelo analítico utilizando suposiciones tradicionales: inercia asociada a secciones brutas, inercia de vigas sin considerar losa colaborante, valor del modulo del hormigón en estado no agrietado, segmentos rígidos de dimensión en un 25% menor a la dimensión del elemento entre otras, (Ref. 1). Se compararon las propiedades dinámicas de este modelo con los resultados obtenidos de los estudios de las señales de sismos, Tabla 3 (Ref. 1). Se observa que el modelo de diseño se ajusta bastante a los parámetros observados y por lo tanto se le puede considerar como un buen predictor de la respuesta dinámica bajo movimientos leves y moderados.

Tabla 3. Comparación Registro Sismos, Microvibraciones y Modelo Analítico

	Modelo de Análisis	Microvibraciones	Sismos
Forma modales	0.96	1.04 [1.1%]*	0.967-1.000 [1.4-3.7%]
	1.02	1.07 [1.0 %]	0.977-1.020 [1.4-1.7%]
	1.42	1.63[0.6 %]	1.470-1.486 [2.6 %]
	3.67	3.56-3.63 [1.5%]	3.324-3.382 [2.5-3.6%]
	3.82	3.53-3.60 [1.5%]	3.355-3.471 [2.7-3.6%]
	4.12	4.80 [1.2%]	4.543-4.951 [1.0 %]

* Razón de amortiguamiento crítico.

CONCLUSIONES

A pesar de que no se ha detectado daño entre los sismos y vibraciones ambientales, las frecuencias de vibrar de un edificio de 22 pisos y 3 subterráneos varían en alrededor de un 4 % cuando las aceleraciones máximas de la estructura pasan de 0.005 a 0.12 g. De igual manera el amortiguamiento presenta entre un 50 a un 300 % de variación para esta misma amplitudes.

Un modelo matemático de la estructura, desarrollado utilizando supuestos típicos de diseño, determina valores de las propiedades dinámicas con un error menor al 5 % en las frecuencias fundamentales reales de la estructura en ausencia de daño.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado con la cooperación de la Camarada Chilena de la Construcción, de la Red Nacional de Acelerógrafos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, el Conicyt a través del proyecto Fondecyt 1950629 y la oficina Lagos Contreras Asociados.

REFERENCIAS

- 1- Boroschek y Yañez, “ Experimental Verification of Basic Analytical Assumptions Used in The Analysis of Structural Wall Buildings”, Engineering Structures 22 (2000).
- 2- Lagos, Contreras y Asociados, “Planos Estructurales”.
- 3- Red Nacional de Acelerógrafos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- 4- Mau and Li (1991), “A case Study of MIMO System Identification Applied to Building Seismic Records”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics Vol 20, 1045 1064 (1991).

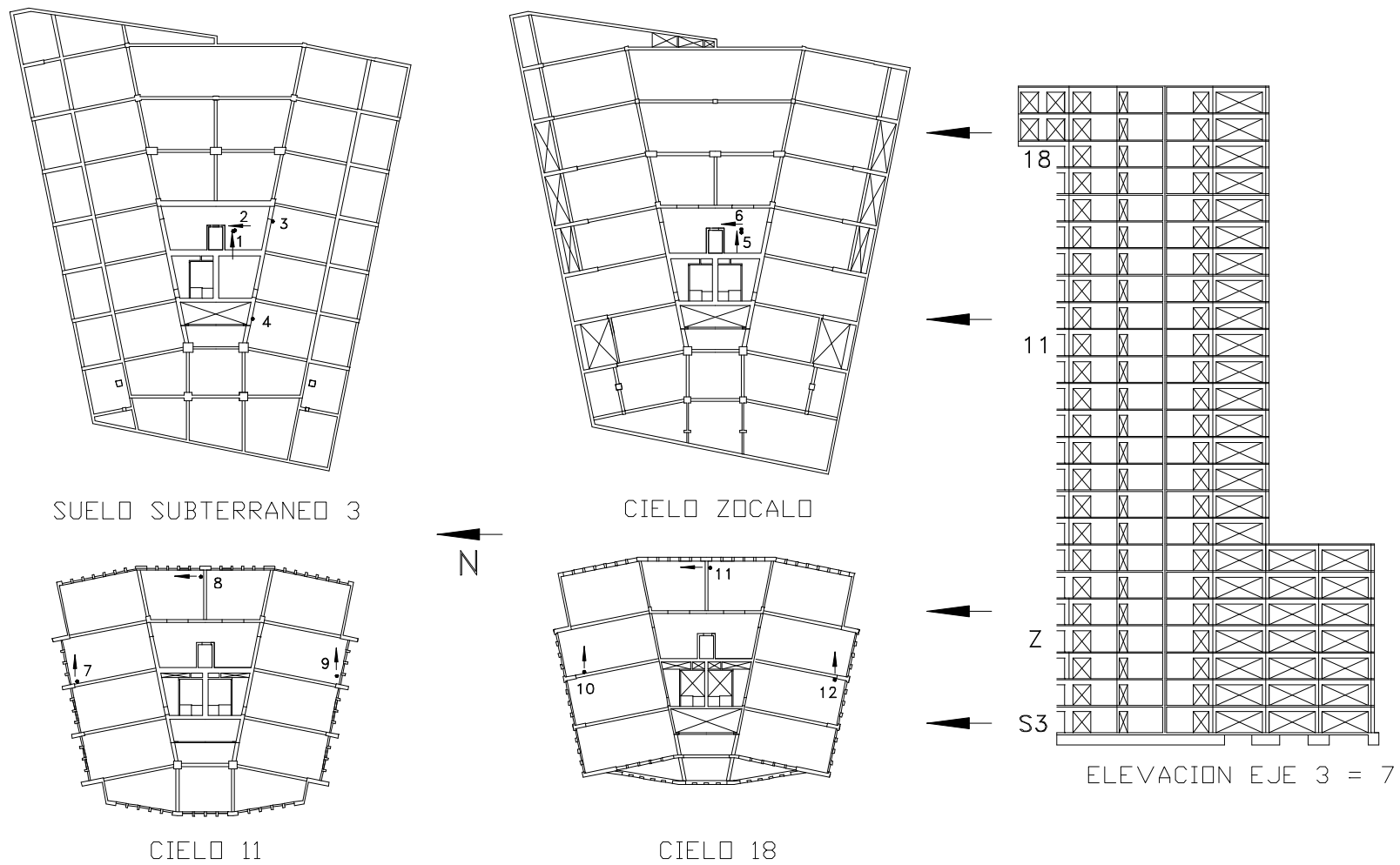


Figura 1. Ubicación de Sensores y Estructura

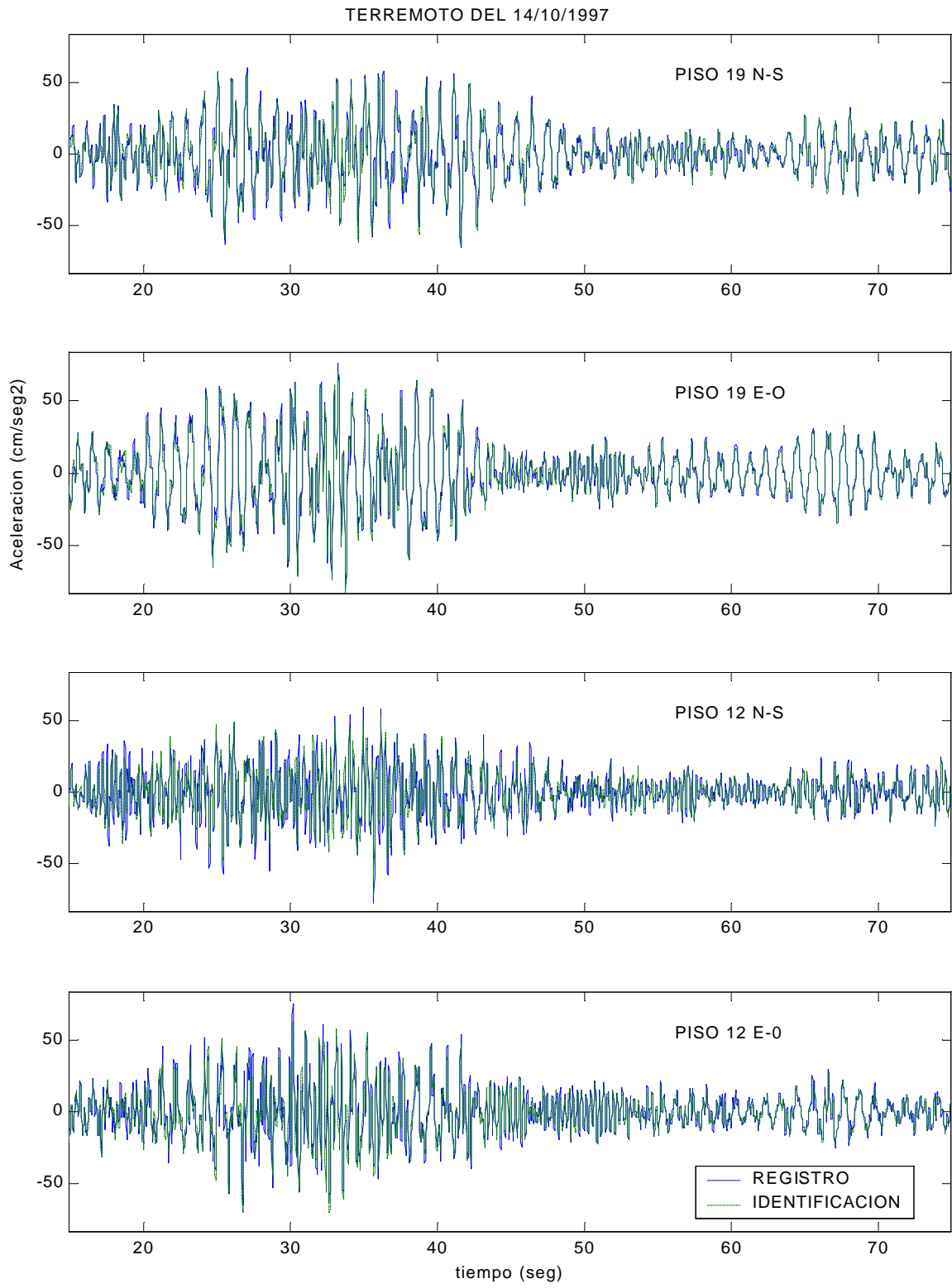


Figura 2. Ajuste la Repuestas para el evento del 14/1/1997

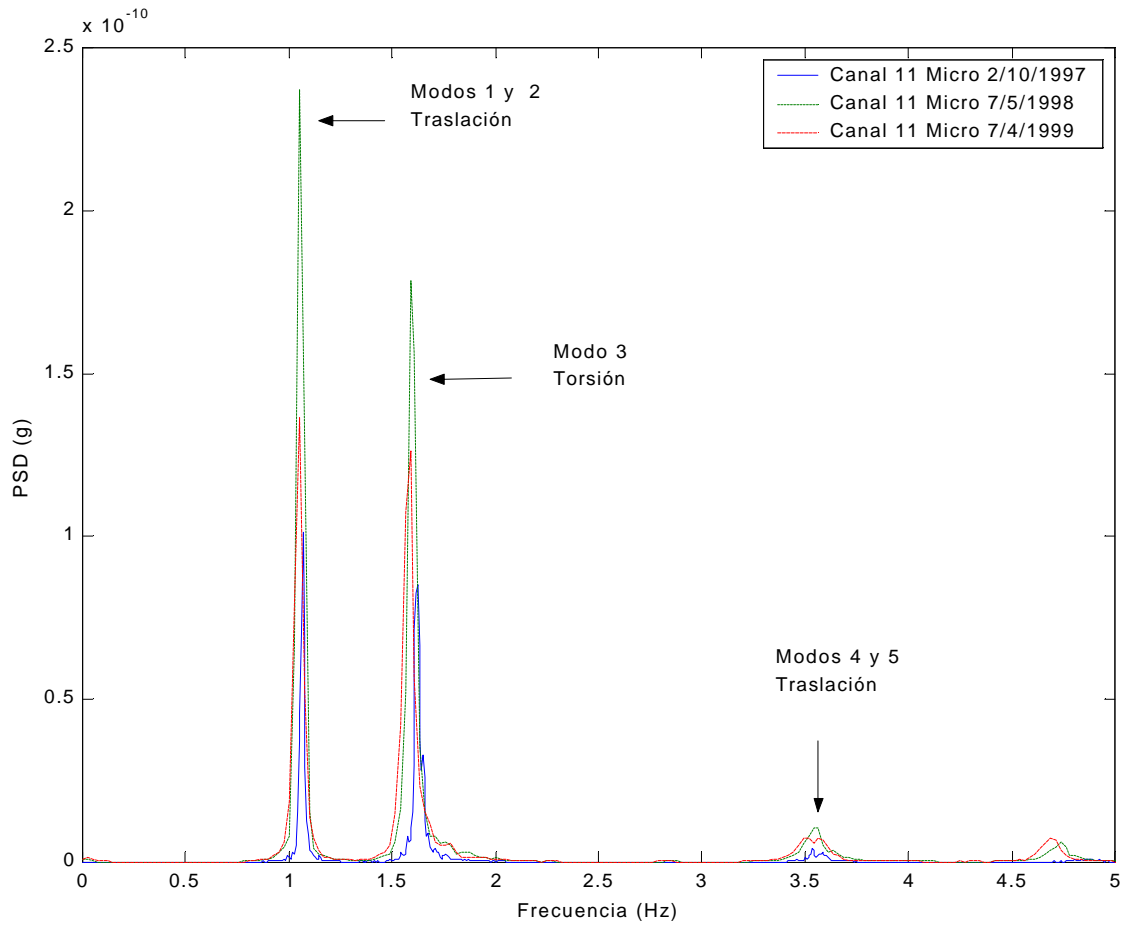


Figura 3. Frecuencia Modales de Microvibraciones

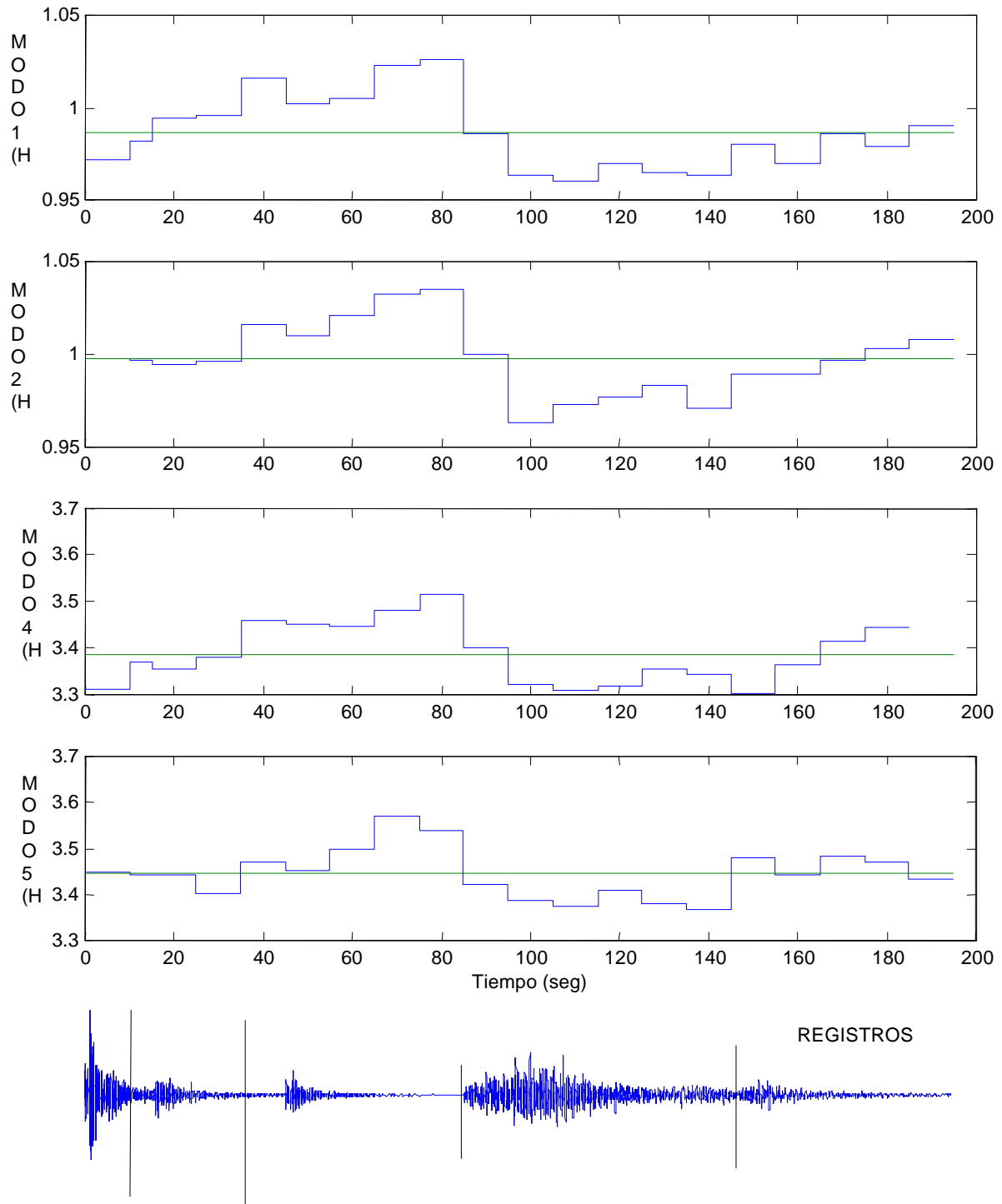


Figura 4. Variación de la frecuencia modal, utilizando ventanas.

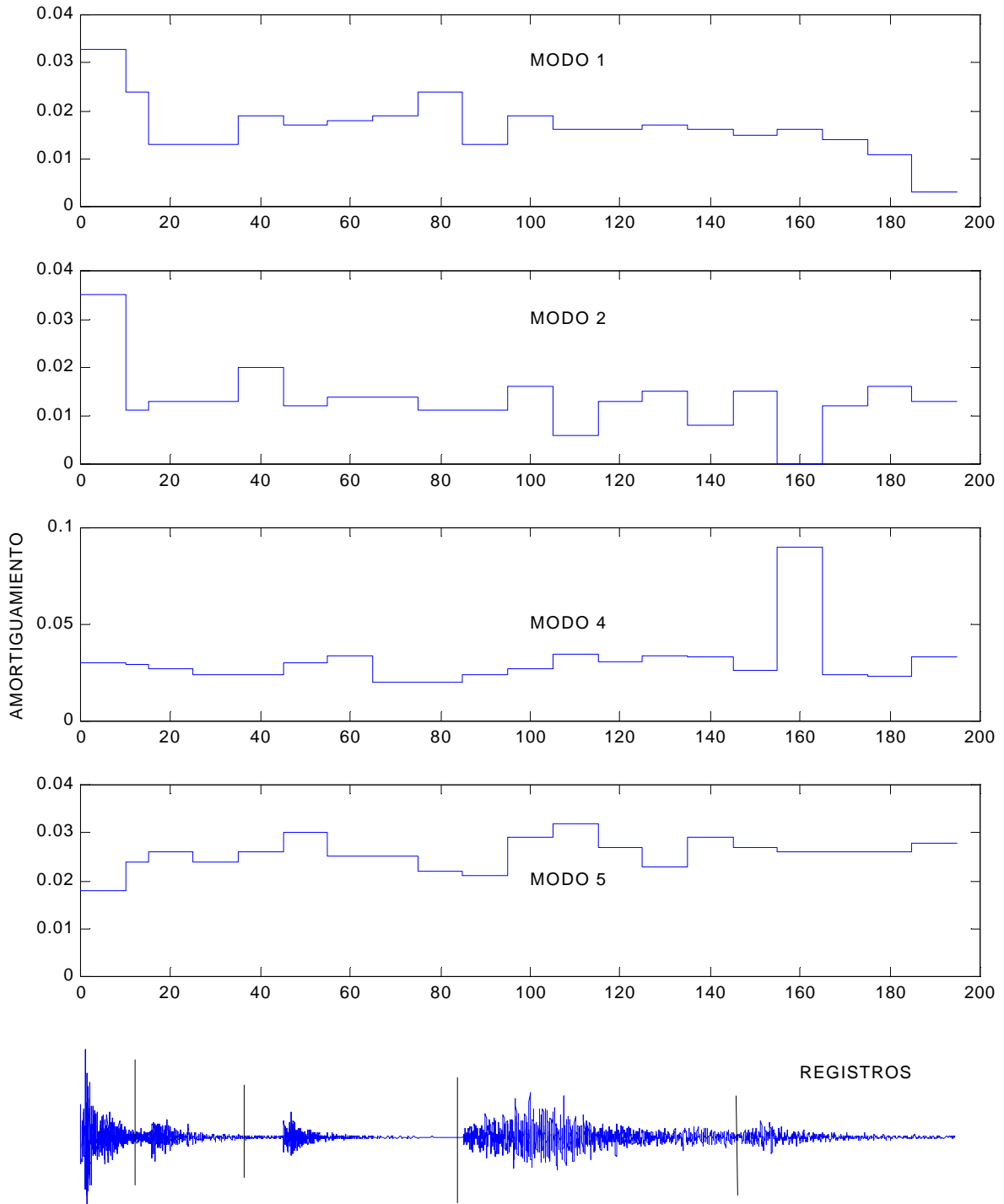


Figura 5. Variación del amortiguamiento, utilizando ventanas.