

Efecto de la componente sísmica vertical en el diseño de edificios de gran altura en Chile

D. Cares (1), R. Boroschek (2), R. Lagos (3), A. Larraín (4)

(1) Ingeniero Civil, Universidad de Chile, david.cares@ug.uchile.cl

(2) Ingeniero Civil, PhD. Universidad de Chile, rborosch@ing.uchile.cl

(3) Ingeniero Civil, C.E.O. René Lagos Engineers, rlagos@renelagos.com

(4) Ingeniero Civil, C.E.O. Alfonso Larraín y Asociados, alfonso.larrain@alving.cl

Resumen

El diseño sismorresistente de edificios en Chile y el mundo se basa esencialmente en la consideración de dos componentes horizontales del sismo. La normativa chilena vigente exige este tipo de análisis e indica los casos particulares en que la componente vertical debe ser considerada. En estos casos, el espectro de diseño vertical se obtiene de un espectro horizontal reducido. Esta consideración asume que las edificaciones en la vertical son suficientemente rígidas como para que exista una transferencia de las cargas en esta dirección sin amplificación alguna. Sin embargo, el aumento en altura de los edificios invita a revisar esta situación. En este artículo se estudian 12 edificios chilenos de más de 30 pisos, modelados computacionalmente, en los cuales se analiza el efecto de amplificación vertical del sismo. Para esto se realizó un análisis tiempo-historia, considerando zona y tipo de suelo, con registros de los sismos de mayor magnitud ocurridos en Chile. A partir de la inclusión de la componente vertical, se calculó el nivel de amplificación existente entre la base del edificio y el piso superior, encontrándose amplificaciones de desplazamiento del orden de 2 y de aceleración del mismo orden.

Palabras-Clave: *aceleración vertical; amplificación sísmica; espectro vertical; edificios altos*

Abstract

The earthquake-resistant design in Chile and in the world is based essentially on the consideration of two horizontal components of the earthquake. The actual Chilean code stipulates as mandatory this kind of analysis and indicates in which cases the vertical component should be included. In these cases, the vertical design spectrum is calculated as a reduction of the horizontal spectrum. This calculation assumes that buildings are rigid enough, so loads are transferred vertically with no amplification. However, the increase in height of buildings suggests that this situation should be reviewed. In this article, 12 Chilean over-30-story buildings are computationally analyzed, in which the effect of vertical amplification is studied. For this purpose, a time-history analysis was performed with records from the largest earthquakes occurred in Chile, considering seismic zone and soil type. Through the inclusion of the vertical component, the amplification level between base and upper level of each building was calculated.

Keywords: *vertical acceleration; seismic amplification; vertical spectrum; tall buildings*

1 Introducción

Parte fundamental del diseño de edificios en Chile es la estructuración sismorresistente de estos, debido a la recurrencia de eventos sísmicos en el territorio nacional. La norma NCh433 [1], que regula el diseño sísmico de edificios, establece como obligatorio el análisis modal espectral de las estructuras. Este análisis consiste en la aplicación de un espectro de diseño, particular a cada zona sísmica y tipo de suelo, en dos direcciones horizontales perpendiculares. Además, se sugiere el análisis vertical solo en elementos que son susceptibles a la acción de esta componente del sismo.

En la práctica, el espectro de diseño vertical para estos elementos se obtiene con la reducción del espectro horizontal en $2/3$, lo cual está recomendado por ejemplo en la norma de diseño sísmico industrial [2]. Esta práctica está basada en asumir que las edificaciones son rígidas en la vertical, con lo cual la aceleración en esta componente se transfiere de la base al piso superior sin amplificación [3].

Hoy en día, el aumento en la altura de las edificaciones ha provocado que las estructuras se flexibilicen en la dirección vertical, con lo cual puede existir amplificación de las aceleraciones en esta componente.

A continuación, se estudia el efecto de amplificación vertical para la respuesta de desplazamiento de 12 edificios altos en Chile. A partir de los modelos computacionales de estos edificios, se realiza un análisis tiempo-historia con registros sísmicos reales que incluyen la componente vertical de aceleraciones. Se obtiene la respuesta de desplazamiento en el tiempo de los muros de ascensores, tanto en la base como en el piso superior de cada edificio, y se calcula la amplificación de respuesta entre estos puntos.

2 Metodología

Se escogen 12 edificios en Chile, con modelo computacional disponible y sobre 30 pisos. La Fig. 1 resume las edificaciones que se analizan en el presente artículo, caracterizándolas por la cantidad de pisos de cada una. Mediante una ejecución preliminar de estos modelos, se obtienen los periodos predominantes por dirección de los edificios, los cuales se presentan en la misma Figura.

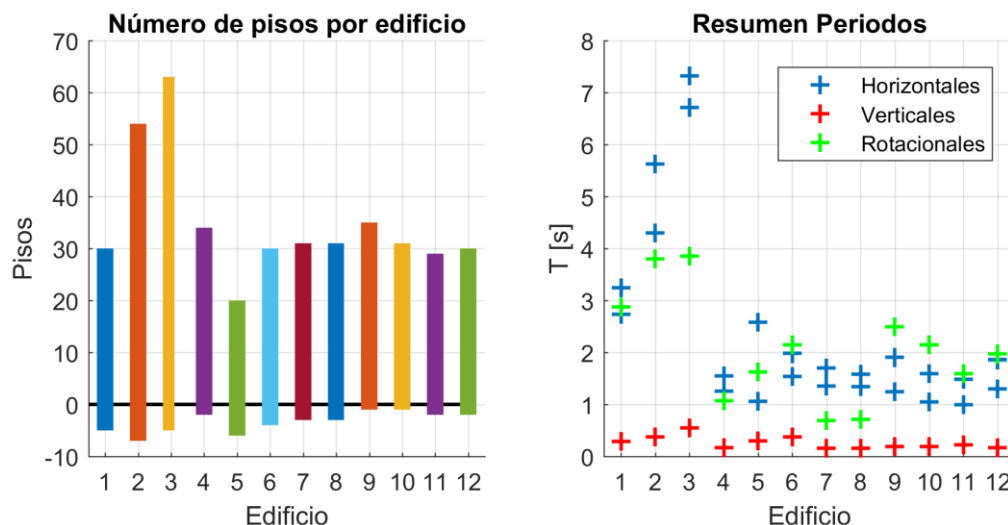


Fig. 1 – Resumen de edificios a estudiar, según número de pisos y periodos predominantes

Los primeros seis edificios seleccionados para este estudio (numerados del 1 al 6) se encuentran emplazados en zona sísmica 2, mientras que los seis restantes (7 a 12) se localizan en zona sísmica 3. En cuanto a clasificación de suelos, todos los edificios se ubican sobre suelo tipo B. En la Fig. 2 se observa la vista 3D de algunos de los modelos de edificios en Zona 2, y la Fig. 3 en Zona 3.

Dada su ubicación y tipo de suelo se escogen los eventos sísmicos registrados en Chile cuya máxima aceleración en alguna de las direcciones fuera al menos un 20% de la aceleración de la gravedad. La Tabla 1 exhibe los registros utilizados para los edificios de Zona 2, y la Tabla 2 presenta los correspondientes a Zona 3.

Estos registros se incorporan como función tiempo-historia a los modelos de elementos finitos. Se ejecutan los análisis considerando un gran número de modos de vibrar, con lo cual se asegura la consideración del 90% de la masa en todas las direcciones de análisis, incluyendo la vertical.

Luego del análisis, se rescata la respuesta de desplazamiento vertical en cada punto de los muros de ascensores, en la base y en el piso superior del edificio. Posteriormente se obtiene el nivel de amplificación de la respuesta en el tiempo. Para esto se calcula el desplazamiento máximo absoluto en ambos niveles, además del promedio de los máximos en el piso superior. Luego se calculan las razones de desplazamiento, tomando como referencia la base, mediante las siguientes fórmulas:

$$Max P_{sup} = \frac{\max |u_z^{sup}|}{\max |u_z^{base}|} \quad (1)$$

$$Max Media P_{sup} = \frac{\sum_i \max |u_z^{sup}| / N}{\max |u_z^{base}|} \quad (2)$$

$$Max Dif = \frac{\max(u_z^{sup} - u_z^{base})}{\max |u_z^{base}|} \quad (3)$$

$$Min Dif = \frac{\min(u_z^{sup} - u_z^{base})}{\max |u_z^{sup}|} \quad (4)$$

Adicionalmente, se calcula el nivel de amplificación de la respuesta en el espacio de la frecuencia. Para esto, se determina la transformada de Fourier de las respuestas y se obtiene su razón teniendo cuidado en limitar el efecto de frecuencias de baja excitación basal.

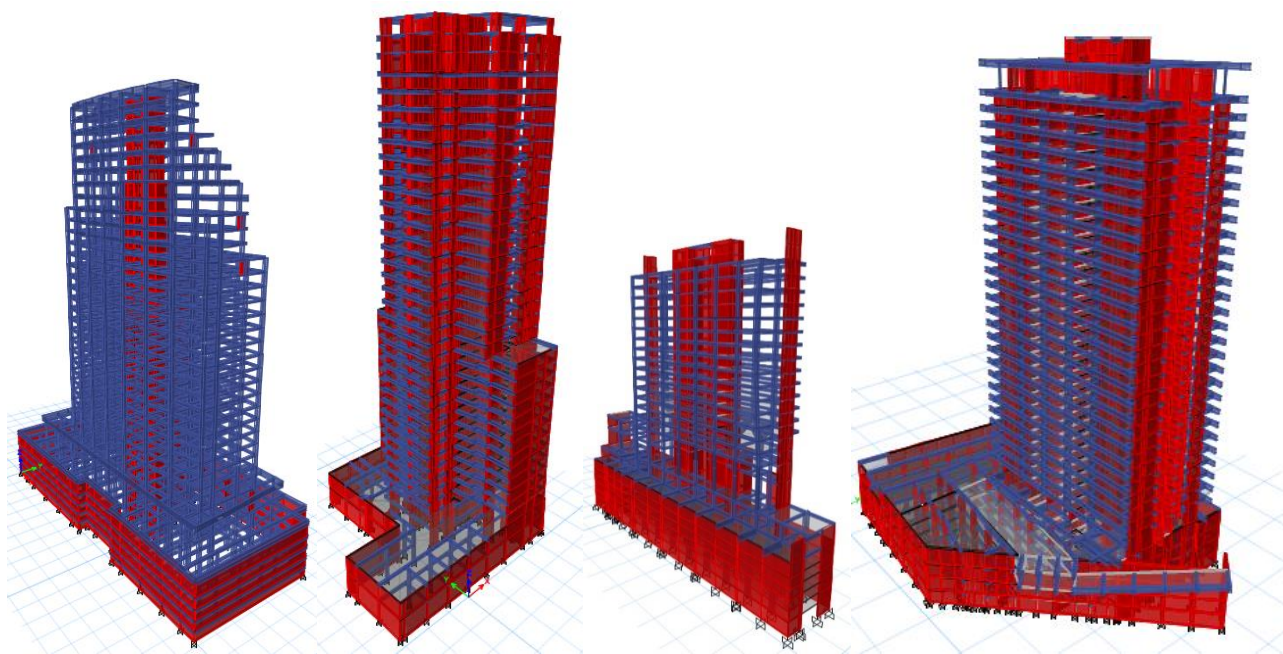


Fig. 2 – Vista 3D de modelos de edificios en zona 2

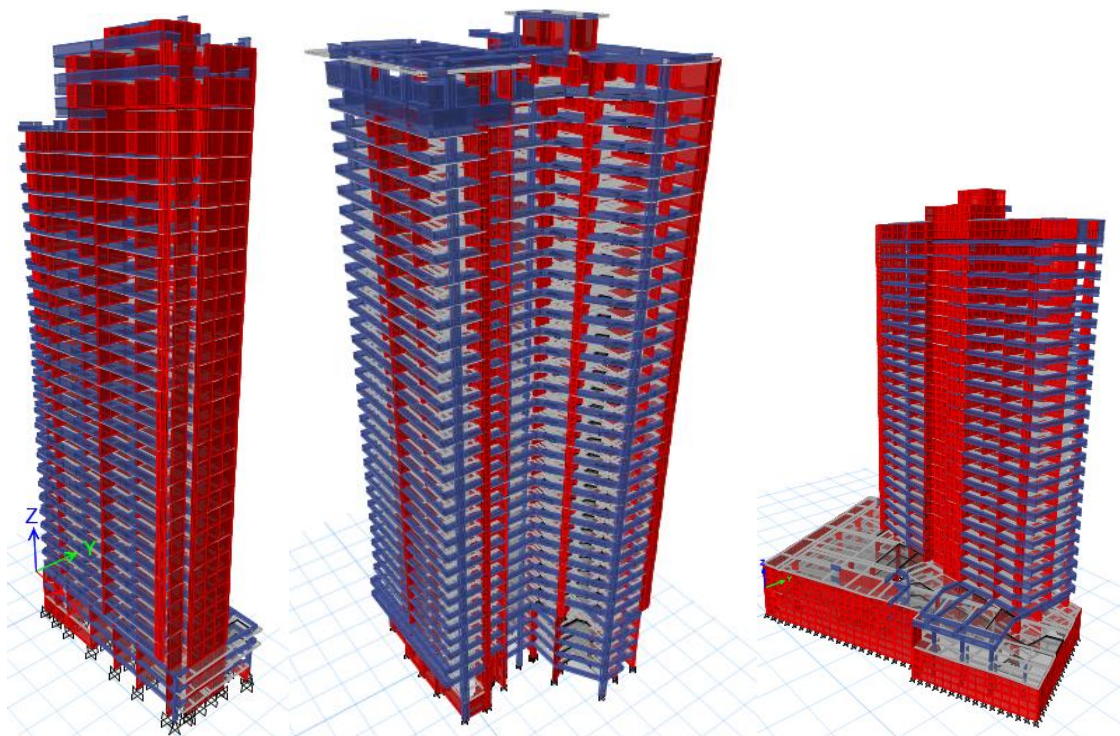


Fig. 3 - Vista 3D de modelos de edificios en zona 3

Tabla 1 – Registros sísmicos disponibles en zona 2

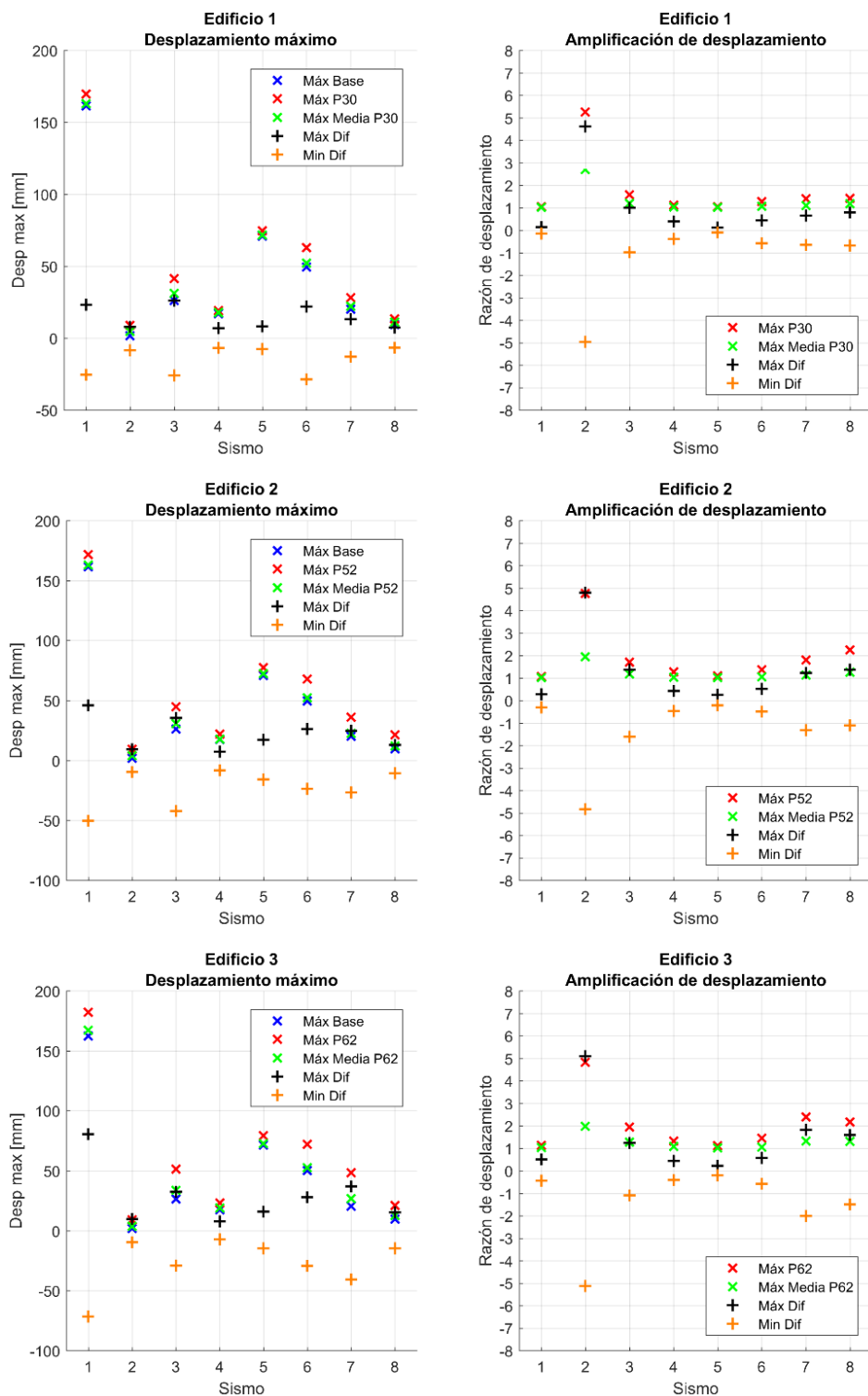
| N° sismo | Fecha Evento | Mw | Estación | Zona | Suelo | Máx. acel. EW [g] | Máx. acel. NS [g] | Máx. acel. UD [g] |
|----------|--------------|-----|--------------|------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 27/2/2010 | 8.8 | Curicó | 2 | B | 0.20 | 0.47 | 0.41 |
| 2 | 10/9/2008 | 5.7 | Pica | 2 | B | 0.63 | 0.56 | 0.45 |
| 3 | 13/6/2005 | 7.8 | Pica | 2 | B | 0.57 | 0.72 | 0.80 |
| 4 | 14/11/2007 | 7.7 | Pica | 2 | B | 0.18 | 0.20 | 0.10 |
| 5 | 1/4/2014 | 8.1 | Pica | 2 | B | 0.28 | 0.34 | 0.23 |
| 6 | 27/2/2010 | 8.8 | Talca | 2 | B | 0.48 | 0.42 | 0.24 |
| 7 | 3/3/1985 | 7.9 | San Fernando | 2 | B | 0.34 | 0.29 | 0.12 |
| 8 | 3/3/1985 | 7.9 | Talca | 2 | B | 0.17 | 0.17 | 0.07 |

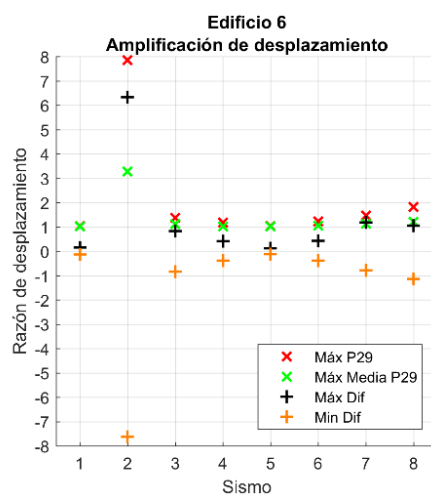
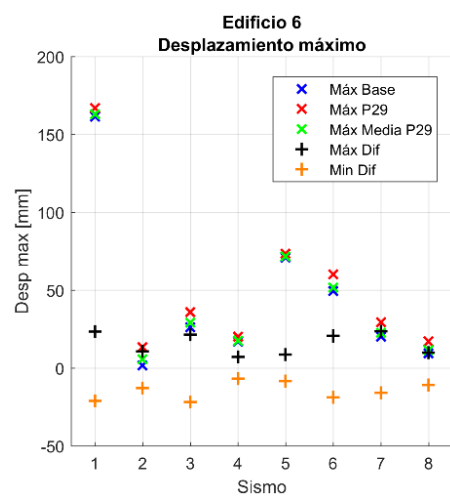
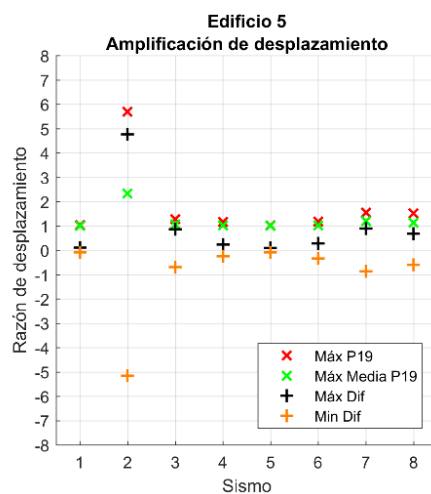
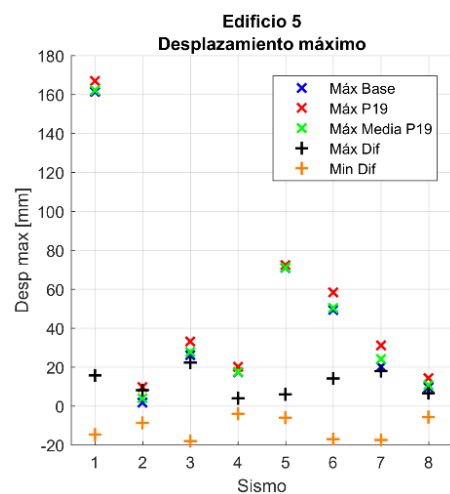
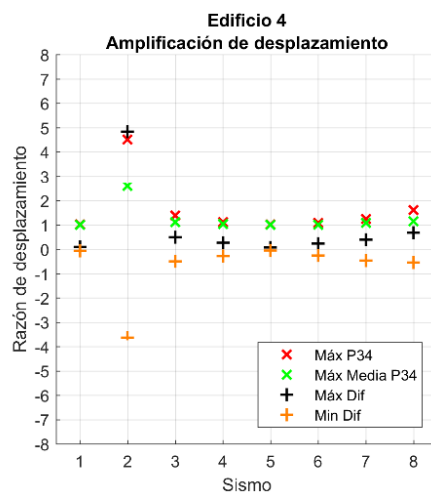
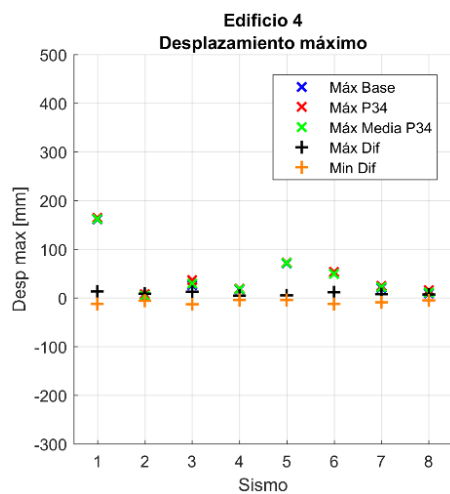
Tabla 2 – Registros sísmicos disponibles en zona 3

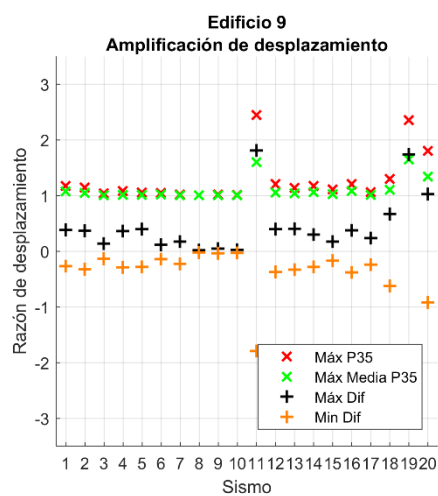
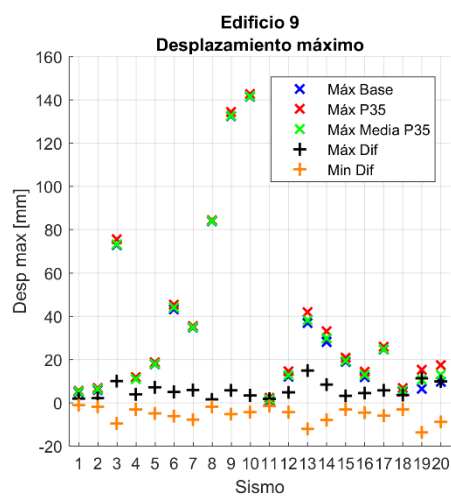
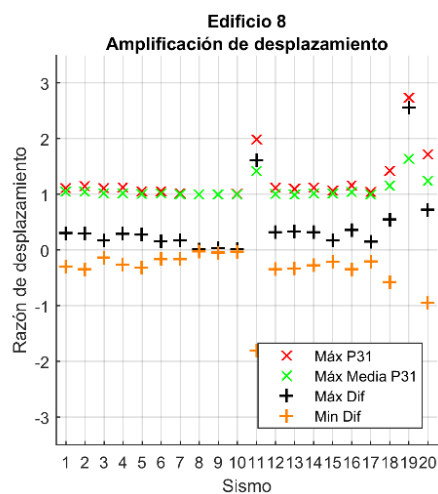
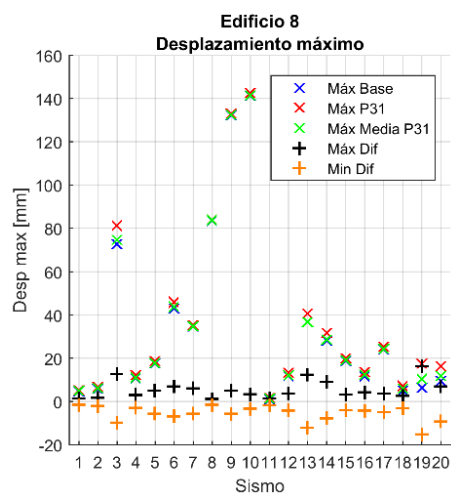
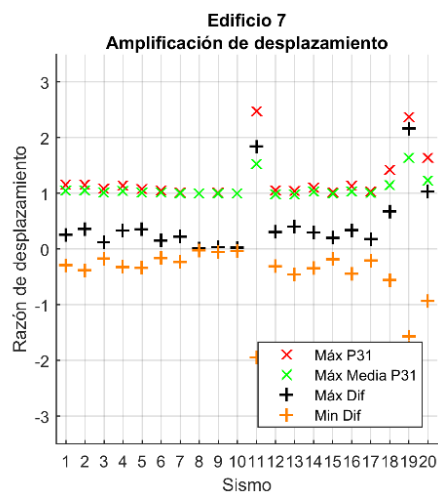
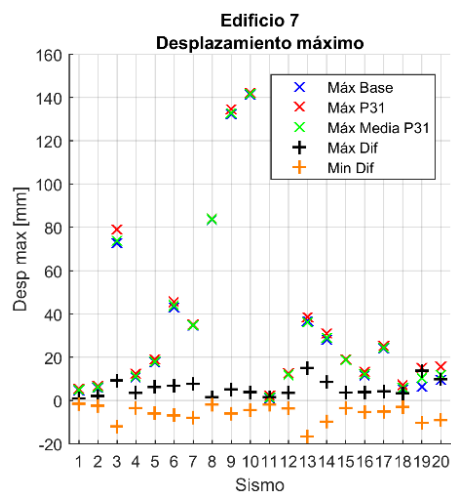
| N° sismo | Fecha Evento | Mw | Estación | Zona | Suelo | Máx. acel. EW [g] | Máx. acel. NS [g] | Máx. acel. UD [g] |
|----------|--------------|-----|----------------------|------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 10/9/2008 | 5.7 | Alto Hospicio | 3 | B | 0.30 | 0.18 | 0.14 |
| 2 | 13/7/2014 | 5.6 | Alto Hospicio | 3 | B | 0.11 | 0.24 | 0.11 |
| 3 | 27/2/2010 | 8.8 | Hualañe | 3 | B | 0.39 | 0.45 | 0.39 |
| 4 | 15/10/1997 | 7.1 | Illapel | 3 | B | 0.29 | 0.37 | 0.19 |
| 5 | 27/2/2010 | 8.8 | Papudo | 3 | B | 0.29 | 0.42 | 0.16 |
| 6 | 1/4/2014 | 8.1 | Poconchile | 3 | B | 0.21 | 0.29 | 0.14 |
| 7 | 13/6/2005 | 7.8 | Poconchile | 3 | B | 0.39 | 0.33 | 0.22 |
| 8 | 16/9/2015 | 8.3 | La Higuera-Comisaria | 3 | B | 0.19 | 0.19 | 0.09 |
| 9 | 16/9/2015 | 8.3 | Coquimbo-Hospital | 3 | B | 0.25 | 0.26 | 0.18 |
| 10 | 16/9/2015 | 8.3 | El Pedregal | 3 | B | 0.29 | 0.35 | 0.19 |
| 11 | 26/9/2015 | 6.3 | El Pedregal | 3 | B | 0.15 | 0.22 | 0.15 |
| 12 | 3/3/1985 | 7.9 | Iloca | 3 | B | 0.28 | 0.23 | 0.09 |
| 13 | 3/3/1985 | 7.9 | Llay Llay | 3 | B | 0.47 | 0.35 | 0.23 |
| 14 | 3/3/1985 | 7.9 | Melipilla | 3 | B | 0.53 | 0.69 | 0.26 |
| 15 | 3/3/1985 | 7.9 | Pichilemu | 3 | B | 0.18 | 0.26 | 0.12 |
| 16 | 3/3/1985 | 7.9 | Quintay | 3 | B | 0.26 | 0.24 | 0.18 |
| 17 | 3/3/1985 | 7.9 | San Felipe | 3 | B | 0.43 | 0.31 | 0.20 |
| 18 | 3/3/1985 | 7.9 | Zapallar | 3 | B | 0.31 | 0.27 | 0.19 |
| 19 | 1/4/2014 | 8.1 | Alto Hospicio | 3 | B | 0.84 | 1.12 | 1.03 |
| 20 | 1/4/2014 | 8.1 | Iquique Chipana | 3 | B | 0.41 | 0.60 | 0.43 |

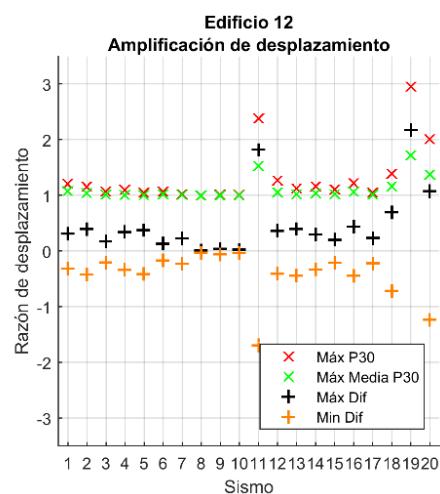
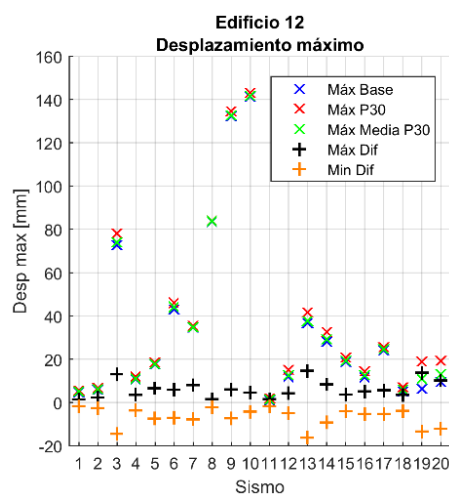
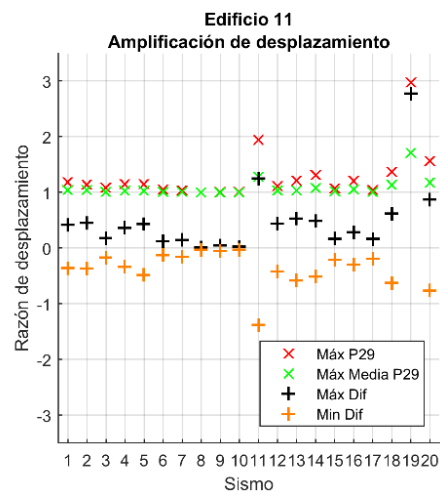
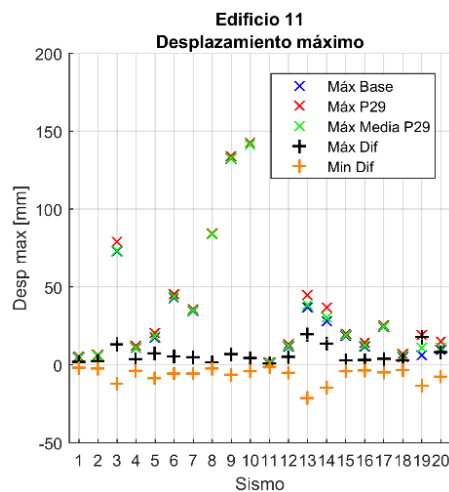
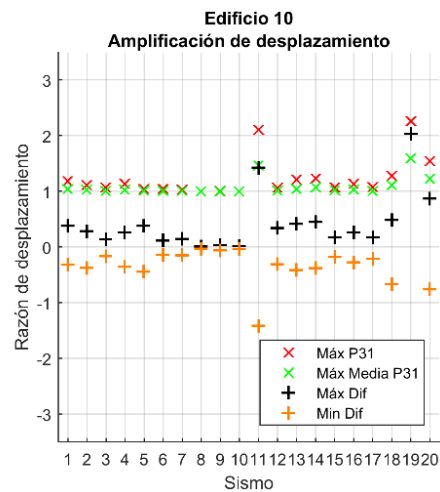
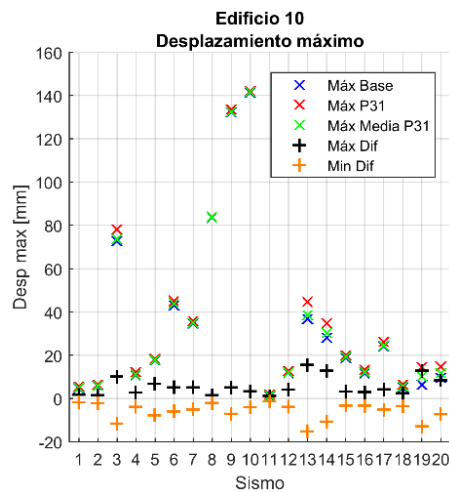
3 Resultados

Las gráficas a continuación presentan los resultados obtenidos para el desplazamiento máximo y la razón de desplazamientos respectivos en el espacio del tiempo, utilizando para estos últimos las fórmulas (1) a (4).





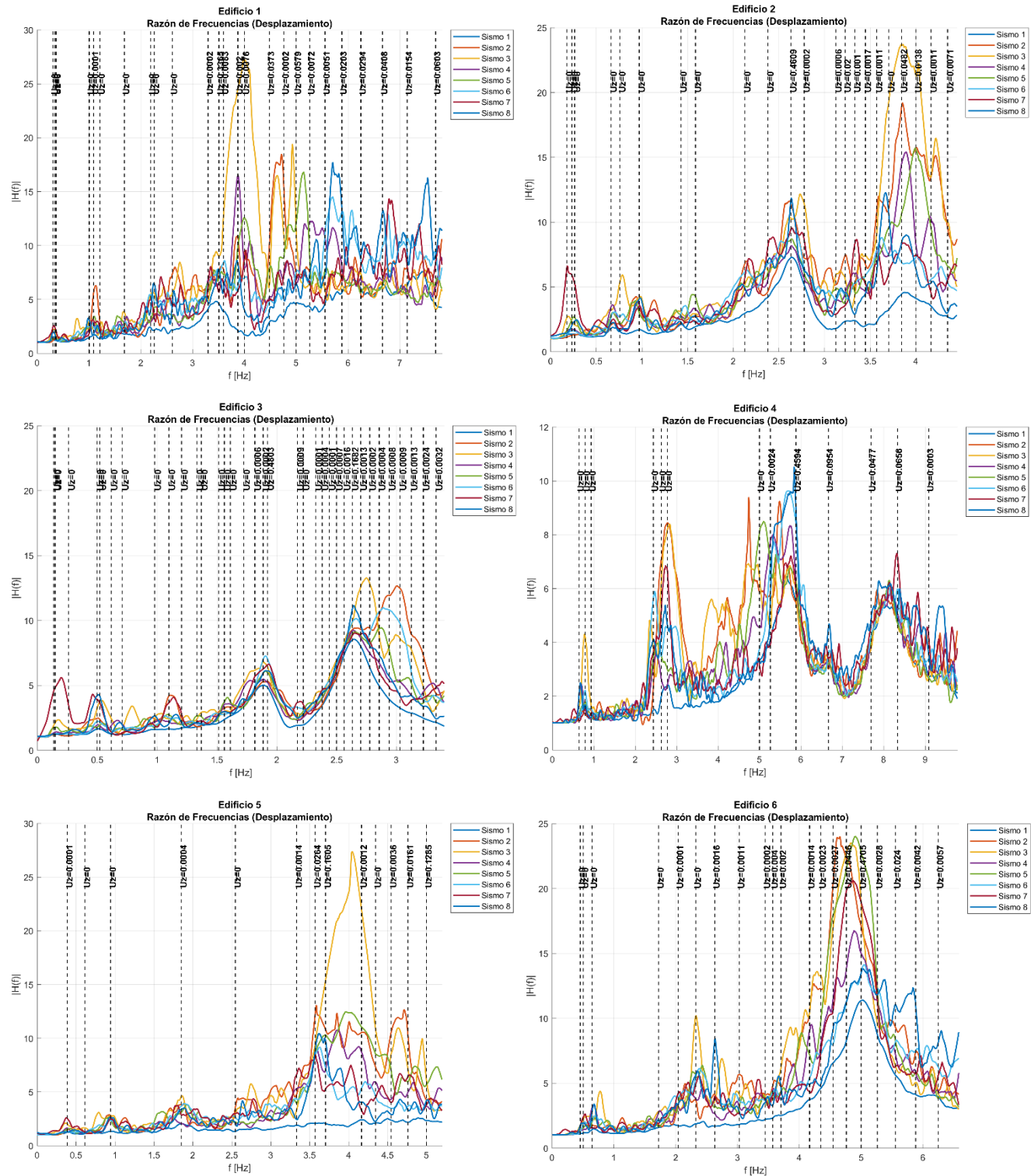


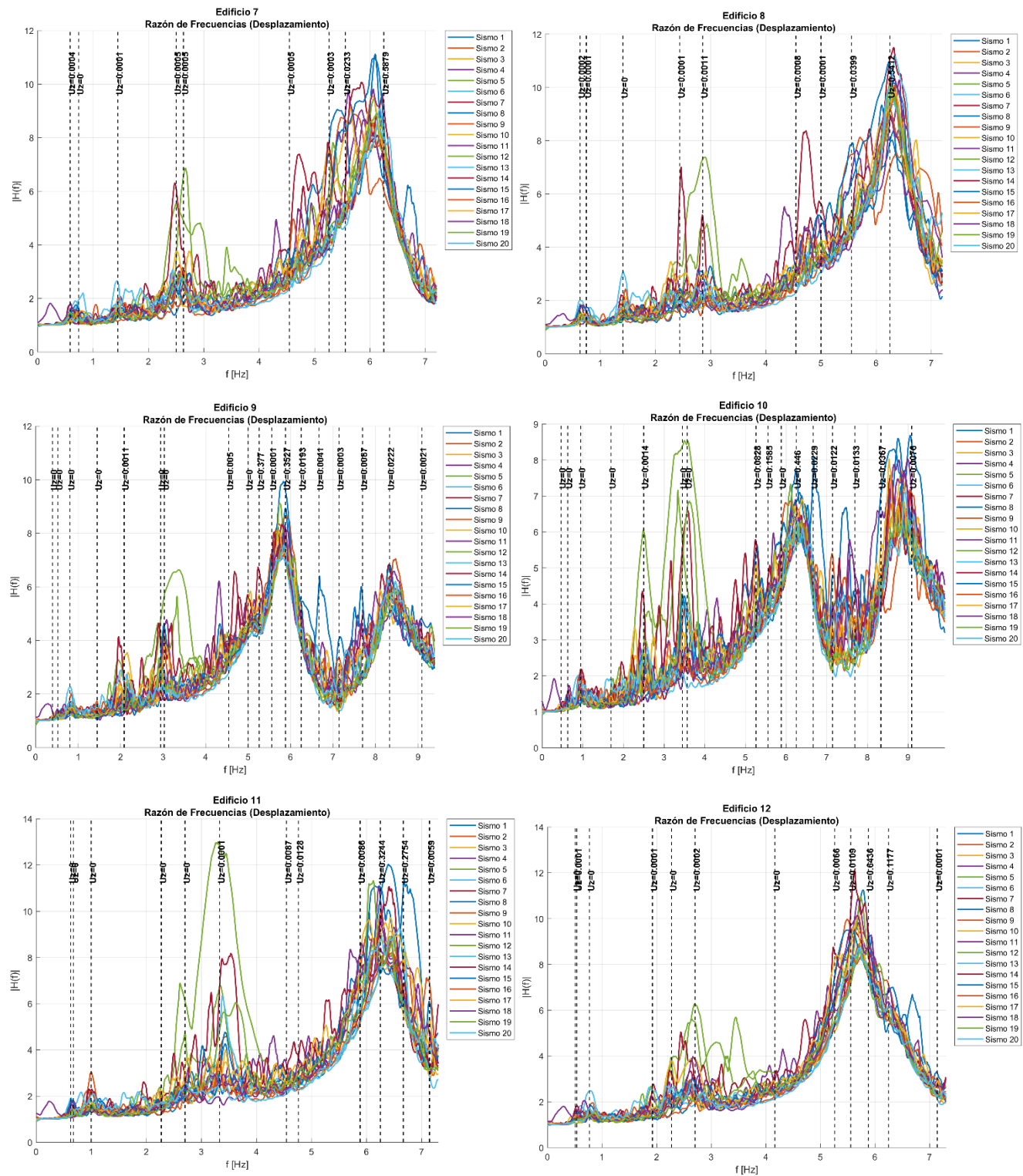


Del cálculo de la razón de desplazamientos en el espacio del tiempo se obtiene que la respuesta de la base se amplifica al doble en el piso superior, salvo para el evento sísmico de Pica 2008, en el cual se observa un nivel de amplificación en el piso más alto de 8 veces la respuesta de la base. Esto último se debe a que el sismo fue de tipo impulsivo, el cual liberó el 95% de la energía en 2 segundos. Sin embargo, se nota que la magnitud de la respuesta en este caso fue notoriamente menor que la de los otros sismos

registrados en Zona 2. Este comportamiento también se observa en el sismo El Pedregal 2015 (sismo 11, Zona 3).

En las siguientes figuras se presentan también los resultados de amplificación de desplazamientos en el espacio de la frecuencia.





La razón de frecuencias muestra que la respuesta se amplifica principalmente en los modos de vibrar verticales, además de aquellos modos horizontales en los que se mueve masa vertical. El nivel de amplificación alrededor de las frecuencias verticales en promedio es de 10. En las otras frecuencias

modales este nivel es variable, pero en todo caso es menor que la amplificación en los modos de vibrar verticales.

4 Conclusiones

La realización de este estudio permite concluir que efectivamente los edificios altos poseen flexibilidad en la dirección vertical, con lo cual existe amplificación de la respuesta. Debido a que los desplazamientos en los muros se relacionan directamente con los esfuerzos en estos, el resultado presentado en este artículo identifica la necesidad de revisar el efecto de la amplificación en el diseño de la armadura de los elementos resistentes. Este análisis se está ejecutando.

5 Referencias

- [1] INN (2009). *Diseño sísmico de edificios* (NCh433.Of1996 (Mod. 2009)). Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.
- [2] INN (2003). *Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales* (NCh2369.Of2003). Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.
- [3] ASCE (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (ASCE/SEI 7-16). American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA.