

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

EFFECTO DE LOS SUBTERRÁNEOS EN LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN EDIFICIOS DE MUROS DE HORMIGÓN ARMADO

JOAQUÍN ALEJANDRO PINTO GARAY

Informe de Actividad de Graduación para optar al Grado de
Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica

Profesor Supervisor:

MATÍAS HUBE GINESTAR

Santiago de Chile, ~~agosto~~Septiembre, 2016.

A Dios, por todo lo que me ha
dado, Padres, Familia y amigos
que en este caminar han estado
junto a mí.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de graduación no hubiera sido posible sin el apoyo de mi familia en especial de mi esposa Arabella que en los momentos más difíciles estuvo alentándome para lograr finalizar esta etapa de mi vida.

También debo agradecer sinceramente a todo el departamento de Departamento de Ing. Estructural y Geotécnica encabezado por su director Jorge Vázquez y en especial de su coordinadora Elena Cornejo que sin su permanente disposición y colaboración sin duda alguna este trabajo no se hubiera llevado a cabo.

Mención a parte a mi profesor guía don Matías Hube, que sin su gran disposición y entrega se ha podido realizar este trabajo.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
INDICE DE TABLAS	VI
INDICE DE FIGURAS	VII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
I. INTRODUCCIÓN	1
II. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO CARACTERÍSTICO Y LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	3
II.1 Descripción del Edificio	3
II.2 Propiedades Geométricas	11
II.3 Materiales	11
II.4 Cargas Aplicadas	12
II.5 Solicitaciones Sísmicas	14
III. ANÁLISIS SÍSMICO EDIFICIO CARACTERÍSTICO	16
III.1 Modelos Estructural	16
III.2 Características Dinámicas	18
III.2.1 Modos y Periodos	18
III.3 Corte Sísmico	20
III.3.1 Distribución de Esfuerzos en Muros	20
IV. ESTUDIO PARAMÉTRICO	26
IV.1 Modelo Semirígido	26
IV.1.1 Modos, Periodos y Corte Sísmico	26
IV.2 Modelo Flexible	28

IV.2.1 Modos, Periodos y Corte Sísmico.....	28
IV.3 Comparación de Resultados	30
V. CONCLUSIONES	37
BIBLIOGRAFÍA	39

INDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla III-1: Modos, Periodos y masa asociada según dirección de análisis del edificio, Desplazamientos	18
Tabla III-2: Modos, Periodos y masa asociada según dirección de análisis del edificio, Rotaciones	19
Tabla III-3: Cortes sísmicos por dirección de análisis, corte mínimo y máximo según Nch433, factores de reducción de respuesta (R^*), factores de amplificación sísmico (f) y corte de diseño (Q_D).....	20
Tabla IV-1: Modos, Periodos y masa asociada según dirección de análisis, modelo semirígido, Desplazamientos.....	27
Tabla IV-2: Modos, Periodos y masa asociada según dirección de análisis, modelo semirígido, Rotaciones	27
Tabla IV-3: Cortes sísmicos por dirección de análisis, corte mínimo y máximo según Nch433, factores de reducción de respuesta (R^*), factores de amplificación sísmico (f) y corte de diseño (Q_D), modelo semirígido.....	28
Tabla IV-4: Modos, Periodos y masa asociada según dirección de análisis, modelo flexible, Desplazamientos.....	29
Tabla IV-5: Modos, Periodos y masa asociada según dirección de análisis, modelo flexible, Rotaciones.....	29
Tabla IV-6: Cortes sísmicos por dirección de análisis, corte mínimo y máximo según Nch433, factores de reducción de respuesta (R^*), factores de amplificación sísmico (f) y corte de diseño (Q_D), modelo flexible	30

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura II-1: Planta tipo, pisos 1 al 12.....	5
Figura II-2: Planta tipo Subterráneos 1 y 2	6
Figura II-3: Elevación eje 3.....	7
Figura II-4: Elevación eje 6.....	8
Figura II-5: Elevación eje D.....	9
Figura II-6: Elevación eje F.....	10
Figura II-7: Distribución sobrecarga en subterráneos 1 y 2	13
Figura II-8: Espectro de pseudo-aceleración elástico	14
Figura II-9: Espectro de pseudo-aceleración de diseño para sismos X e Y	15
Figura III-1: Vista 3D del edificio de 2 subterráneos y 12 pisos.....	17
Figura III-2: Distribución de Esfuerzos Axial, Corte y Momento sísmico por piso Eje D, muro D-4, sección rectangular, 15x577[cm].....	21
Figura III-3: Distribución de Esfuerzos Axial, Corte y Momento sísmico por piso Eje F, muro F-3, sección doble T, 305x15 + 15x787 + 832.5x15[cm].....	22
Figura III-4: Distribución de Esfuerzos Axial, Corte y Momento sísmico por piso Eje 3, muro 3-2, sección rectangular, 15 X 695.....	23

Figura III-5: Distribución de Esfuerzos Axial, Corte y Momento sísmico por piso Eje 6, muro 6-1, sección T, 15x612.5[cm] + 387x15[cm]	24
Figura IV-1: Evolución del esfuerzo de Corte sísmico por piso, muros D-4 y F-3, sismo X	31
Figura IV-2: Evolución del esfuerzo de Momento sísmico por piso, muros D-4 y F-3, sismo X	32
Figura IV-3: Evolución del esfuerzo Axial sísmico por piso, muros D-4 y F-3, sismo X	33
Figura IV-4: Evolución del esfuerzo de Corte sísmico por piso, muros 3-2 y 6-1, sismo Y	34
Figura IV-5: Evolución del esfuerzo de Momento sísmico por piso, muros 3-2 y 6-1, sismo Y.....	35
Figura IV-6: Evolución del esfuerzo Axial sísmico por piso, muros 3-2 y 6-1, sismo Y	36

RESUMEN

Este estudio tiene por objetivo determinar el grado de influencia que ejercen los muros perimetrales en la distribución de los esfuerzos sísmicos en los muros provenientes de los pisos superiores cuando la planta tipo del edificio se expande en los subterráneos. Para ello se utiliza un edificio residencial de hormigón armado representativo de los edificios chilenos. En este trabajo el edificio se simplificó de modo de minimizar la influencia de factores como el cambio de sección transversal de muros, proximidad entre ejes estructurales y discontinuidad en muros, aspectos que afectan el comportamiento del edificio frente a cargas sísmicas. El edificio simplificado se modeló en el programa ETABS considerando diafragmas rígidos en todos los pisos y la demanda sísmica se obtuvo mediante un análisis modal espectral. Adicionalmente, se generaron dos modelos con distintos modelos de diafragma para cuantificar la importancia del modelamiento de las losas en la estimación de los esfuerzos. En este primer modelo la losa del cielo del primer subterráneo se modeló con su rigidez real y en el segundo modelo todas las losas del edificio se modelaron considerando sus rigideces. Al comparar los tres modelos se obtiene que, independientemente al modelo empleado, el efecto de los muros perimetrales sobre los muros del edificio resulta en la reducción de los esfuerzos internos. Adicionalmente, si el diseñador opta por modelar la estructura considerando la rigidez efectiva de las losas, es más conveniente aplicar esta consideración sólo en aquel nivel en que aparecen los muros perimetrales que generalmente, corresponde a la losa del cielo del primer subterráneo.

ABSTRACT

This study aims to determine the influence of the perimeter walls in the distribution of seismic forces in the core walls of the building due to the existence of larger floor plan area in the basement levels. To achieve this goal, a Chilean typical residential reinforced concrete building was selected. In this work the building was simplified in order to minimize the influence of factors such as changing cross section of the walls, proximity between structural axes and discontinuity in the walls, which affect the seismic behavior of the building. The simplified building was modeled in ETABS program considering rigid diaphragms at every floor while the seismic demand was obtained by response spectrum analysis. Additionally, two models with different models of the diaphragms were generated to quantify the importance of the slab modeling in estimating the seismic demands. In this first model, only the slab of the first basement was modeled with its actual stiffness and in the second model all slabs of the building were modeled with their actual stiffness. Results of this study show that, regardless of the used model, the effect of the perimeter walls of the basements reduced the seismic demand in the core walls. In addition, if the designer chooses to model the structure considering the effective stiffness of the slabs, it is more appropriate to apply this consideration only at the level where the perimeter walls appear. The slab of this level generally corresponds to the slab of the first underground.

I INTRODUCCIÓN

Durante el ejercicio de la profesión siempre se ha tenido presente la importancia de los muros perimetrales de los subterráneos en el comportamiento sísmico de los edificios. Para su modelación se han optado dos criterios básicos. Por un lado, están aquellos ingenieros que incluyen los muros perimetrales en la modelación y por otro lado, aquellos que dilatan los muros del edificio de modo de no incorporarlos en el análisis. Un ejemplo de un edificio con muros dilatados es el edificio habitacional San Nicolás 1331, ubicado en la comuna de San miguel y que consta de dieciocho pisos de altura y un subterráneo. Para los edificios con muros dilatados la idea es mantener estable el comportamiento de los muros a lo alto del edificio hasta las fundaciones. Ambos criterios son válidos para afrontar el mismo objetivo de considerar o aislar la gran influencia de los muros perimetrales en el comportamiento sísmico de un edificio. Los muros perimetrales tienen gran rigidez por lo cual su aparición produce inevitablemente una redistribución de esfuerzos en todos los muros de la estructura.

Este estudio considera edificios diseñados con el primer criterio que implica considerar los muros perimetrales como parte del edificio. El objetivo de este trabajo es analizar cómo afecta la rigidez de los diafragmas de piso en la distribución de los esfuerzos sísmicos en los muros. Para cumplir este objetivo se analizan tres modelos del edificio con distintas rigideces de los diafragmas. En el primer modelo se consideran los diafragmas como infinitamente rígidos en todos sus niveles, llamado modelo rígido. El segundo modelo considera todas las losas modeladas como diafragmas infinitamente rígidos salvo la losa del cielo del primer subterráneo en que su rigidez es calculada según sus propiedades. El tercer modelo, llamado modelo flexible, considera las rigideces de todos los diafragmas de piso. No obstante a lo descrito en relación a la rigidez en el plano de las losas, estos tres modelos consideran la rigidez flexural de las losas fuera del plano. En consecuencia, las

cargas de piso como peso muerto y sobrecargas de uso son distribuidas a los muros resistentes según esta propiedad.

Como resultado de este estudio, se entregan gráficos con la estimación de los esfuerzos de corte, momento flector y carga axial por piso de los muros. Adicionalmente se comparan los valores obtenidos a partir de estos tres modelos. Por simplificación, la entrega de resultados se presenta para dos muros de diferentes ejes por cada dirección de análisis sísmico. Los esfuerzos sísmicos para los distintos casos son obtenidos de acuerdo con lo expresado en la norma Chilena Nch 433 (año de la referencia).

II DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO CARACTERÍSTICO Y LOS PARÁMETROS DE DISEÑO.

Este capítulo contempla la descripción geométrica del edificio, la definición de los materiales empleados y las simplificaciones consideradas para su modelación. También se incluyen las solicitaciones, estáticas (peso muerto y sobrecarga de uso) y la solicitación sísmica definida según Norma Nch433 (2009) y Decreto Supremo N°61 (2011).

II.1 Descripción del Edificio.

El modelo utilizado en este trabajo se basa en un edificio existente de uso habitacional el que fue dañado durante el terremoto del año 2010. Este corresponde a un edificio de hormigón armado, de 12 pisos de 2.5 metros de altura de entrepiso y de 2 subterráneos, cada uno de 3 metros de altura. Para este estudio el edificio se modificó por objeto de obtener una estructura menos compleja. Es así como se eliminan los balcones y los machones ubicados en los bordes laterales de los balcones. Se alinean los ejes interiores con desfases menores a un metro, ubicando sus muros en un solo eje sismoresistente. Adicionalmente, se mantiene la continuidad en vertical y dimensional de todos los muros desde los subterráneos hasta el último piso. Finalmente, no se considera en el análisis las perforaciones en las losas de piso salvo las que corresponden a la caja de ascensores y a la rampa de acceso a los subterráneos.

La vista en planta del piso tipo y del subterráneo tipo con la modificaciones realizadas en este estudio se muestran en las figuras II-1 y II-2 respectivamente. Cada subterráneo tiene una dimensión en planta de 45.22 x 33.33 metros y el piso tipo, que comprende los niveles 1 al 12, tiene una dimensión de 34.85 x 20.91 metros. Las elevaciones de los ejes 3, 6, D y F se muestran en las figuras II-3 a II-6.

En las plantas de las figuras II-1 y II-2 se indican los ejes coordenados X e Y que definen la dirección de cada sismo. El origen del sistema coordenado se define en la intersección de los ejes A y 1a de los subterráneos (ver Figura II-2). A su vez, en las elevaciones de los ejes 3, 6, D y F, se muestra en rojo la nomenclatura utilizada para identificar a los muros analizados en este estudio. El primer número indica el eje al cual pertenecen y el segundo dígito separado por un guión, indica la numeración del elemento dentro de cada eje. Es así como para el eje 3, se considera el muro 3-2 de sección rectangular de dimensiones 15x692.5[cm], para el eje 6, se escoge el elemento 6-1, muro tipo T, de dimensiones alma 15x612.5[cm] y ala 387x15[cm], eje D, elemento D-4 de sección rectangular de dimensiones 15x577[cm] y por último en eje F, se escoge el muro tipo doble T, F-3 de dimensiones ala 305x15, alma 15x787 y ala de 832.5x15[cm].

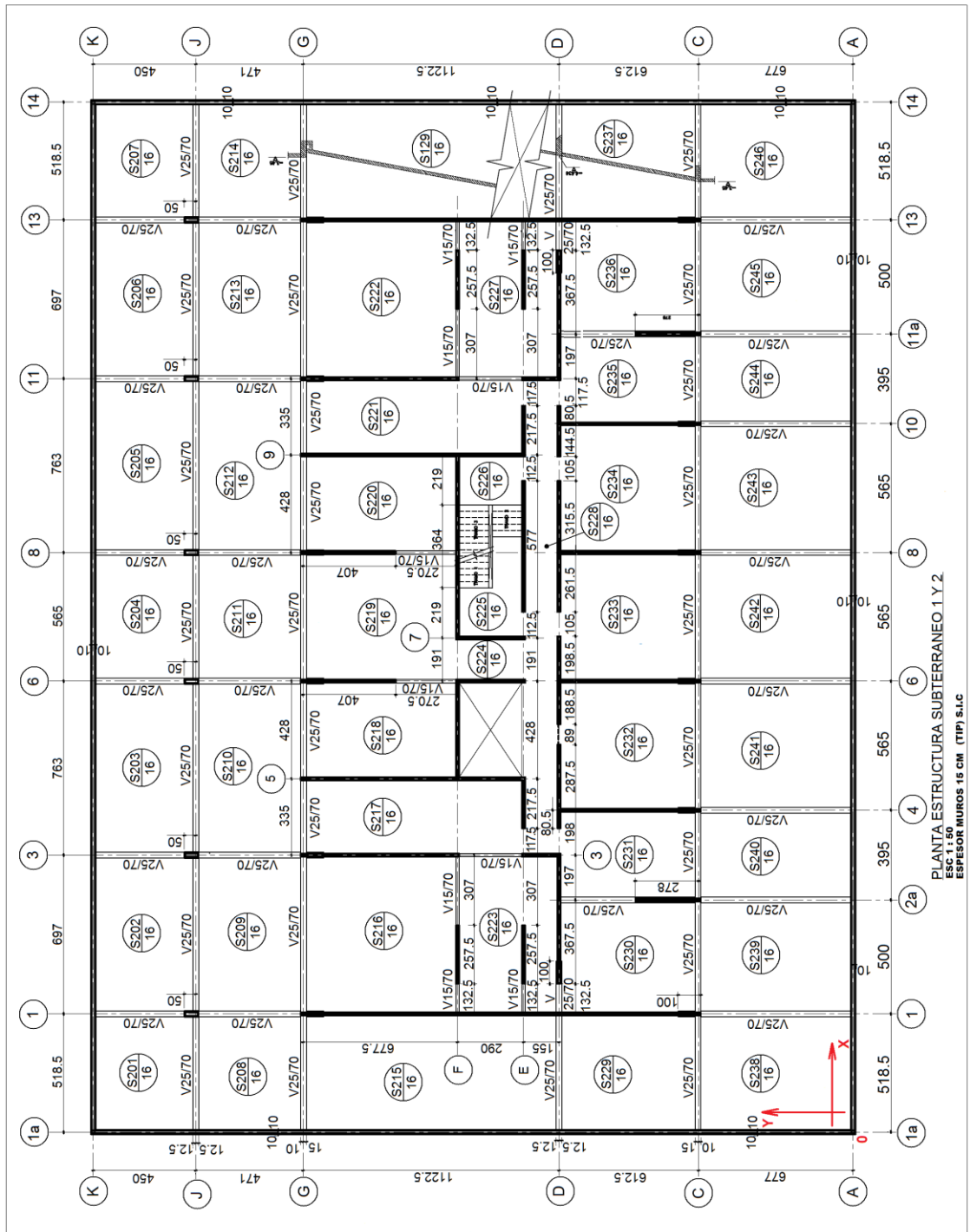


Figura II-2: Planta tipo Subterráneos 1 y 2.

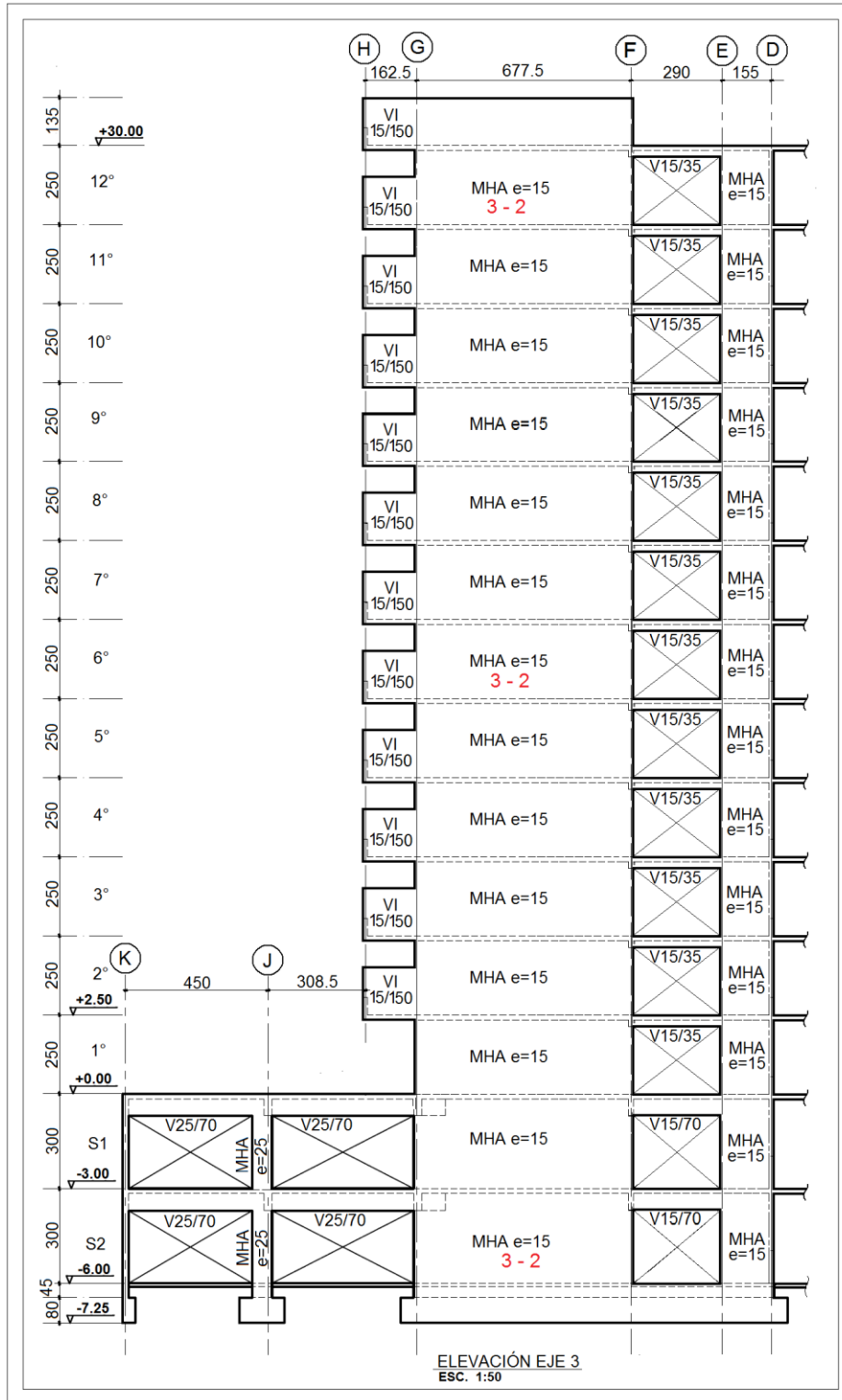


Figura II-3: Elevación eje 3.

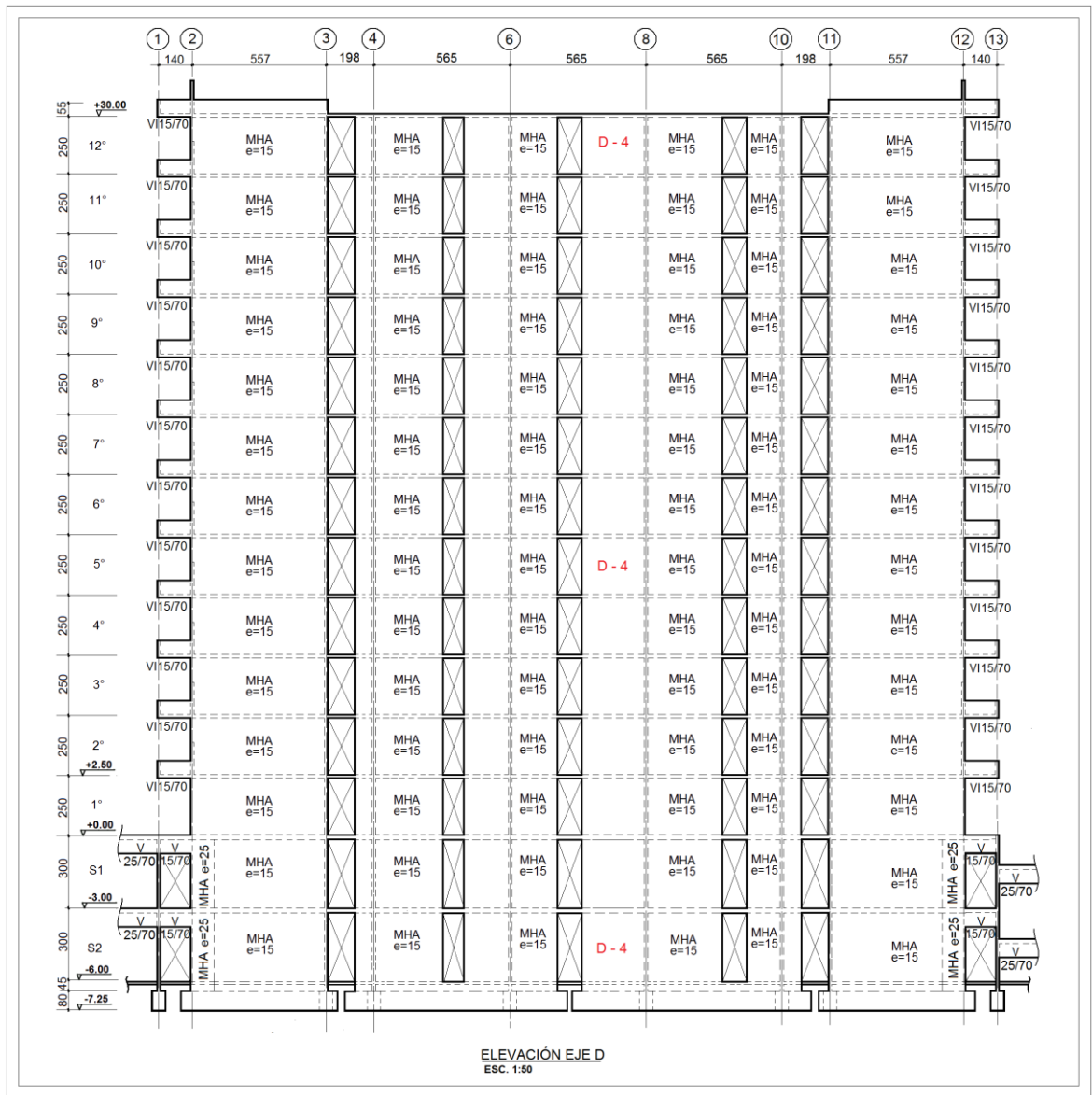


Figura II-5: Elevación eje D.

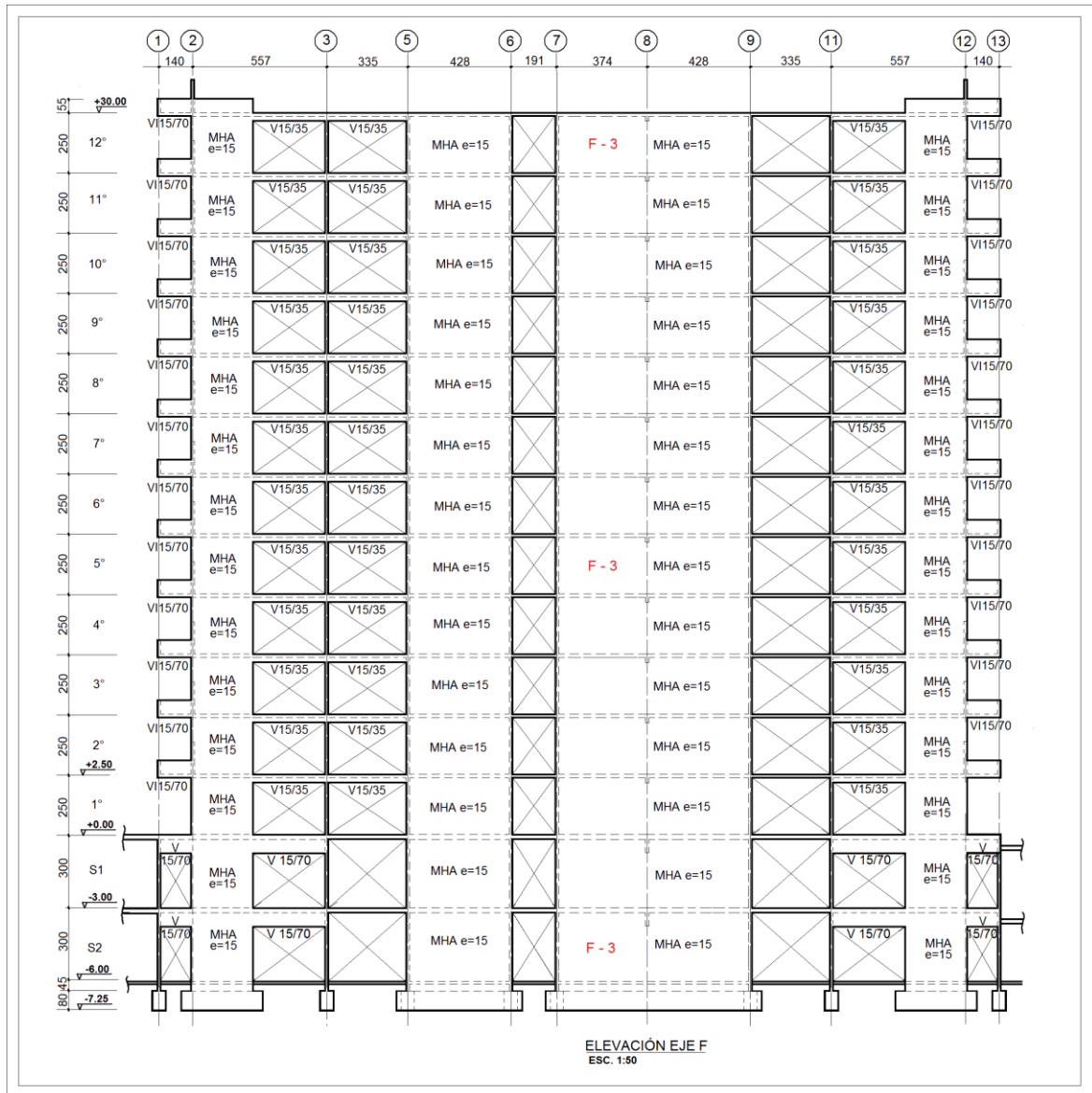


Figura II-6: Elevación eje F.

II.2 Propiedades Geométricas.

El resumen de las propiedades geométricas de los elementos estructurales del edificio son las siguientes:

- a) Subterráneos 1 y 2.
 - Muros interiores de espesor 15 cm.
 - Muros perimetrales de espesor 20 cm.
 - Pilares de espesor 25 cm.
 - Vigas que conectan muros interiores con los muros perimetrales de sección V25/70.
 - Vigas ubicadas en zona de muros provenientes de la estructura superior (pisos 1 al 12) de sección V15/70.
 - Espesor de losa 16 cm.

- b) Pisos superiores (piso 1 al piso 12).
 - Muros de espesor 15 cm.
 - Vigas internas de sección V15/35.
 - Vigas perimetrales de secciones VI 15/70 y VI15/150.
 - Vigas de apoyo a vigas perimetrales invertidas de sección VI15/70.
 - Espesor de losa 15 cm.

II.3 Materiales

Para la modelación estructural se considera el uso de las siguientes propiedades:

- a) Hormigón.
 - Tipo: H25
 - $f_c' = 200$ [Kgf/cm²] Resistencia característica a compresión.
 - $\nu = 0.2$ Coeficiente de Poisson.
 - $E = 15100 * f_c'^{1/2} = 213000$ [Kgf/cm²] Módulo de elasticidad.
 - $G = E / (2 * (1 + \nu)) = 89000$ [Kgf/cm²] Módulo de corte.

Por simplicidad, se adopta para la modelación los siguientes valores:

- $E = 200000 \text{ [Kgf/cm}^2\text{]}$
- $G = 90000 \text{ [Kgf/cm}^2\text{]}$

II.4 Cargas Aplicadas

Por simplicidad, se considera una carga de peso muerto de $1 \text{ [Tonf/m}^2\text{]}$ distribuida sobre cada nivel del edificio, incluyendo los subterráneos. Esta carga equivale al peso propio de la estructura (losas, muros y vigas) así como a las cargas permanentes de terminación como tabiques divisorios y acabado de piso. Adicionalmente, se incluyen las sobrecargas de uso de acuerdo con lo indicado en la norma chilena NCh 1537 of 2009 que para este tipo de edificio corresponden a:

Sobrecarga de uso habitacional (Cielo pisos 1 al 11)	: 200 [Kgf/cm ²]
Sobrecarga Cielo piso 12	: 0.0 [Kgf/cm ²]
Sobrecarga de Estacionamientos y calles de circulación	: 500 [Kgf/cm ²]

No se considera la aplicación de sobrecargas especiales en las áreas de circulación y de balcones, sólo la sobrecarga de uso habitacional definida anteriormente. La distribución de la sobrecarga en los subterráneos se muestra en la figura II-7 en que se aplica la sobrecarga de uso habitacional al sector comprendido entre los ejes D y F y entre ejes 1 al 12 (Sector pasillos, zona coloreada) mientras que, la sobrecarga de estacionamiento, es aplicada al resto de la superficie.

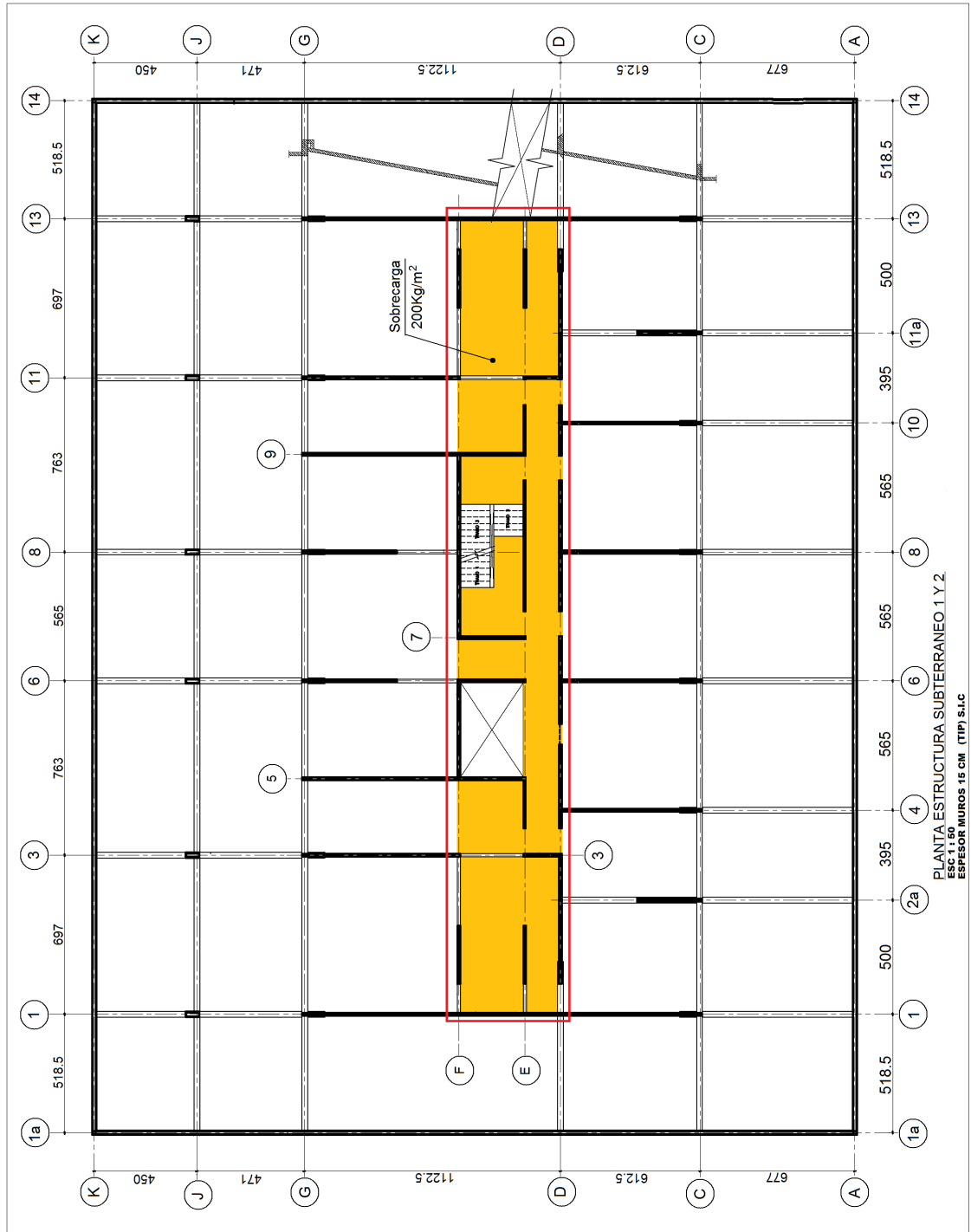


Figura II-7: Distribución sobrecarga en subterráneos 1 y 2.

II.5 Solicitaciones Sísmicas.

Las cargas sísmicas aplicadas sobre el edificio, se evalúan según lo indicado en la norma Chilena NCh433 Of2009 modificada según decreto N°61 del año 2011. Para determinar el espectro de pseudo-aceleración se debe definir la zonificación sísmica de acuerdo a la ubicación geográfica, las características del suelo de fundación y el factor de importancia de la estructura. En este caso, el edificio corresponde al tipo habitacional (categoría del edificio II) ubicado en Santiago ($A_0=0.3g$) sobre un suelo de fundación clasificado como tipo C. Con estos datos, el espectro de pseudo-aceleración elástico se muestra en la figura II-8.

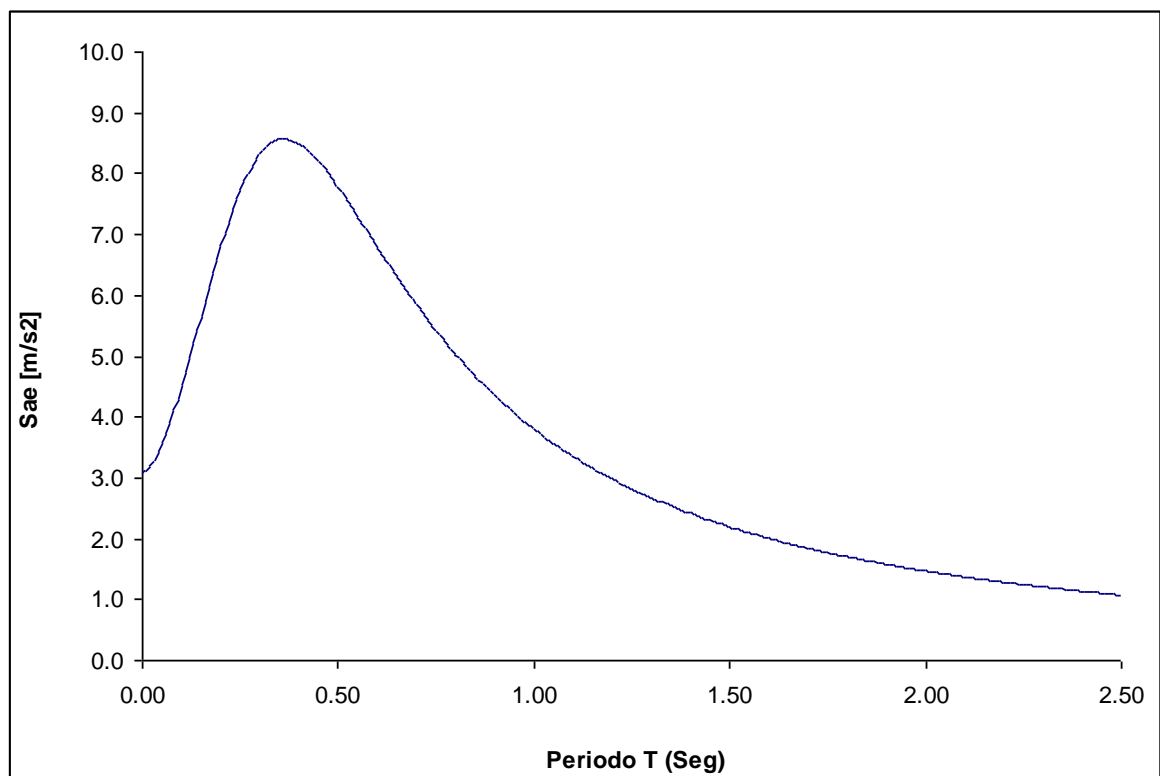


Figura II-8: Espectro de pseudo-aceleración elástico.

Los factores de reducción de respuesta (R^*) para cada dirección principal de análisis dependen de los periodos fundamentales. Para la dirección X el periodo fundamental de

vibración es 0.69 segundos y el factor de reducción de respuesta (R_X^*) es de 7.72. Para la dirección Y el periodo fundamental de vibración corresponde a 0.72 segundos con lo cual el factor de reducción de respuesta (R_Y^*) es de 7.81. Estos factores se obtienen en función del periodo principal de la estructura de cada dirección principal de análisis, del tipo de suelo de fundación representado por el parámetro (T_0) que en este caso su valor corresponde a 0.40 segundos y del factor de modificación de la respuesta estructural (R_0) que depende del tipo de material y del sistema estructural del edificio, que para un edificio de hormigón armado es de $R_0 = 11$.

Aplicando los factores de reducción de respuesta sobre el espectro de Pseudo-aceleración elástico (figura II-8), se obtienen los espectros de pseudo-aceleración reducidos para el análisis del edificio. Estos espectros se muestran en la figura II-9.

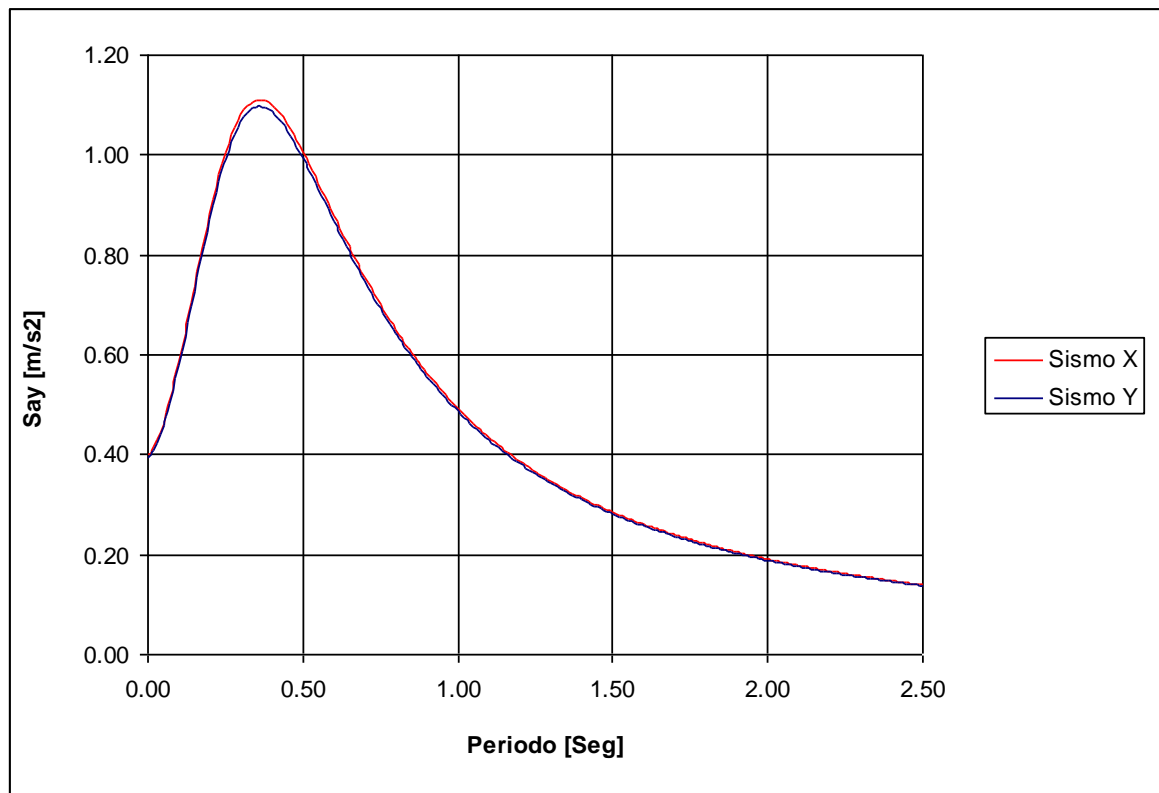


Figura II-9: Espectro de pseudo-aceleración de diseño para sismos X e Y.

III ANÁLISIS SÍSMICO DEL EDIFICIO CARACTERÍSTICO

En este capítulo se describe el modelo estructural construido para analizar el edificio característico. Para obtener resultados que reflejen el efecto de la aparición de los muros perimetrales en la redistribución de los esfuerzos a nivel de los subterráneos, la modelación considera simplificaciones de orden geométrico (enunciadas en el capítulo anterior). Además, se incluyen los esfuerzos axial, corte y de momento sísmico obtenidos del análisis modal espectral de los muros seleccionados de los ejes 3, 6, D y F, entregando los resultados en gráficos que indican la evolución de estos esfuerzos por nivel, desde el piso doce hasta los subterráneos.

III.1 Modelo Estructural

El modelo estructural se construyó usando el programa ETABS y considera el uso de elementos tipo placa de cuatro nodos para la modelación de muros y losas y de elementos tipo “Frame” (barras) para la modelación de vigas. La interacción entre muros, losas y vigas se considera al generar nudos en los encuentros entre estos elementos. A su vez, cada uno de los bloques de losa o muro se subdividió automáticamente utilizando la propiedad “Auto Mesh” en elementos de tamaño máximo de 100x100 centímetros. Cada elemento se modela con las propiedades geométricas y de materiales definidas en el capítulo II. Adicionalmente, el modelo sísmico no considera el efecto de la torsión accidental producida por la distribución de las cargas vivas y muertas sobre la estructura mientras que las losas de cada nivel son modeladas como diafragmas infinitamente rígidos. Con estas simplificaciones se obtienen los modos y periodos principales del edificio. La figura III-1 muestra una vista tridimensional del modelo de elementos finitos construido.

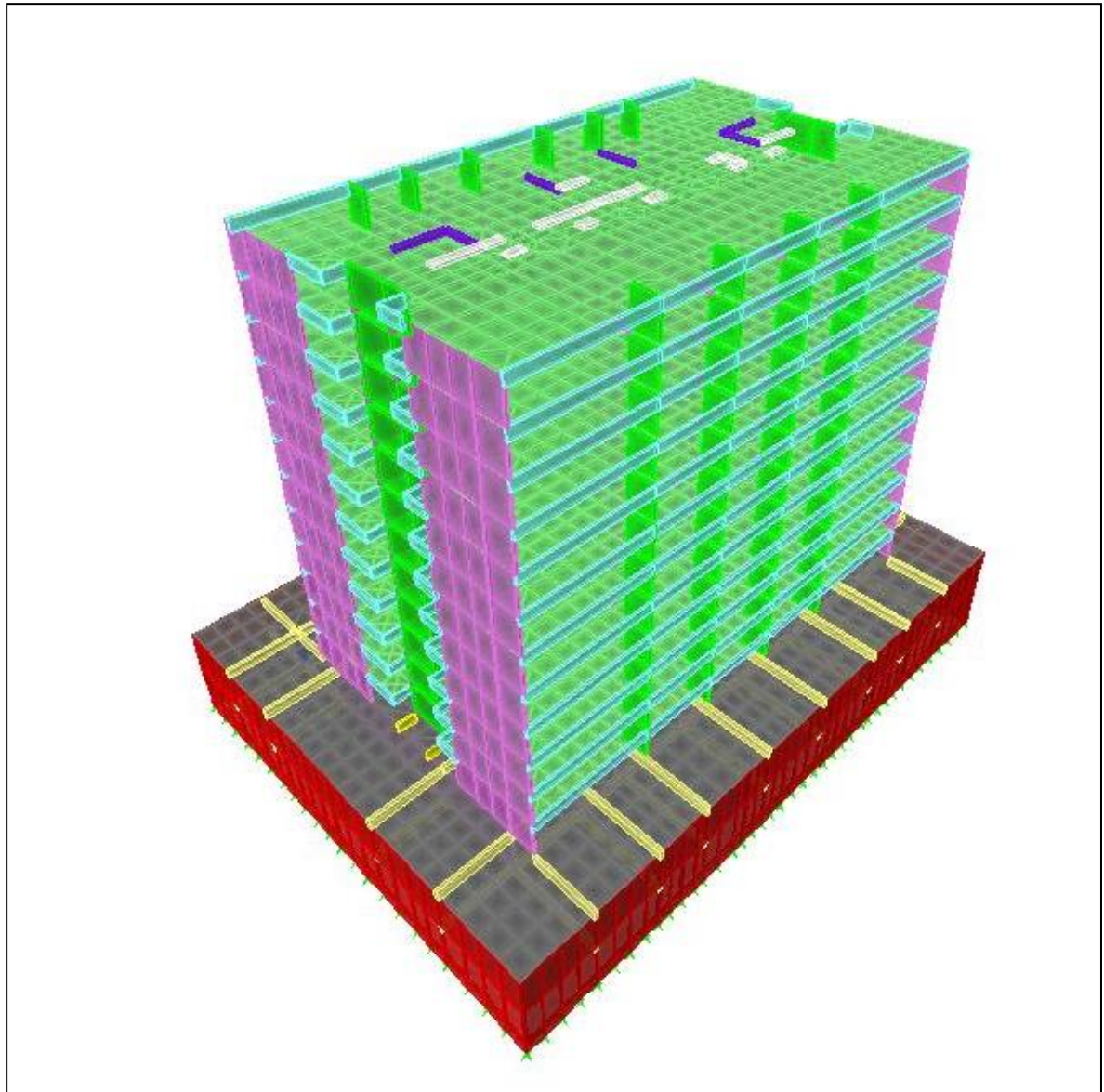


Figura III-1: Vista 3D del edificio de 2 subterráneos y 12 pisos.

Para el cálculo del peso sísmico se emplea las cargas de peso muerto del edificio y el 25% de la sobrecarga de uso. El peso sísmico total de la estructura es:

$$P_{sis} = D + 0.25 * L = 11116.0 \text{ [Tonf]} + 0.25 * 2856.5 \text{ [Tonf]} = 11830 \text{ [Tonf]}$$

Como dato, el peso sísmico aportado por los subterráneos 1 y 2 es de 3177.7 [Ton] que corresponde al 27% del peso sísmico del edificio mientras que los pisos superiores aportan el 73% restante.

III.2 Características Dinámicas.

En esta sección se resumen las características dinámicas del edificio las que definen el comportamiento de éste frente a las cargas sísmicas. Específicamente se muestran los modos de vibrar, los periodos principales y los cortes sísmicos resultantes para cada dirección de análisis. Finalmente se entregan los esfuerzos sobre los muros seleccionados mostrándose gráficamente la evolución de los esfuerzos en ellos en función del nivel desde el piso 12 al segundo subterráneo.

III.2.1 Modos y Periodos

Del modelo computacional se obtuvieron los modos y periodos que acumulan una masa asociada mayor al 90% en cada dirección ortogonal X e Y de análisis. En la tabla III.1 se destacan los periodos con mayor masa, modo 3 para la dirección X y modo 2 para la dirección Y, mientras que, la tabla III.2 hace lo propio con las rotaciones encontrándose que el modo con mayor masa rotacional asociada corresponde al modo 1. El periodo fundamental del edificio es de 0.69 segundos en la dirección de análisis X, 0.72 segundos para la dirección Y mientras que para la rotación el periodo es de 0.19 segundos.

Tabla III-1: Modos, Periodos y masa asociada según dirección de análisis del edificio, Desplazamientos.

Modo	Periodo [Seg]	Porcentaje de Masa Asociada por Dirección de Desplazamiento			Porcentaje de Masa Acumulada por Dirección de desplazamiento		
		UX [%]	UY [%]	UZ [%]	SumUX [%]	SumUY [%]	SumUZ [%]
1	0.8946	2.542	0.000	0.000	2.542	0.000	0.000
2	0.7162	13.905	42.578	0.000	16.447	42.578	0.000
3	0.6902	41.544	14.394	0.000	57.991	56.972	0.000
4	0.1905	10.761	0.046	0.000	68.752	57.018	0.000

Modo	Periodo [Seg]	Porcentaje de Masa Asociada por Dirección de Desplazamiento			Porcentaje de Masa Acumulada por Dirección de desplazamiento		
		UX [%]	UY [%]	UZ [%]	SumUX [%]	SumUY [%]	SumUZ [%]
5	0.1771	3.251	0.129	0.000	72.003	57.147	0.000
6	0.1571	0.111	18.191	0.000	72.114	75.338	0.000
7	0.0920	8.559	0.020	0.000	80.673	75.357	0.000
8	0.0732	0.011	12.614	0.000	80.684	87.971	0.000
9	0.0608	11.691	0.002	0.000	92.374	87.973	0.000
10	0.0489	0.003	8.837	0.000	92.377	96.810	0.000
11	0.0416	7.021	0.011	0.000	99.399	96.821	0.000
12	0.0287	0.004	2.903	0.000	99.403	99.724	0.000

Tabla III-2: Modos, Periodos y masa asociada según dirección de análisis del edificio, Rotaciones.

Modo	Periodo [Seg]	Porcentaje de Masa Asociada por Dirección de Giro			Porcentaje de Masa Acumulada por dirección de Giro		
		RX [%]	RY [%]	RZ [%]	SumRX [%]	SumRY [%]	SumRZ [%]
1	0.8946	0.000	4.374	42.195	0.000	4.374	42.195
2	0.7162	71.999	23.262	0.549	72.000	27.636	42.744
3	0.6902	24.305	69.172	1.001	96.305	96.808	43.744
4	0.1905	0.009	1.069	3.026	96.314	97.877	46.770
5	0.1771	0.018	0.267	8.414	96.332	98.144	55.183
6	0.1571	2.366	0.010	0.016	98.698	98.153	55.199
7	0.0920	0.002	0.953	0.027	98.700	99.106	55.226
8	0.0732	0.943	0.001	0.000	99.643	99.107	55.226
9	0.0608	0.000	0.671	0.302	99.643	99.778	55.527
10	0.0489	0.331	0.000	0.250	99.975	99.778	55.777
11	0.0416	0.000	0.208	0.002	99.975	99.986	55.779
12	0.0287	0.020	0.000	0.140	99.994	99.986	55.919

De la tabla III-1, se observa que con 12 modos se alcanza al 99% de la masa del edificio para cada dirección de análisis. También se observa que los modos principales de traslación están desacoplados entre sí y éstos con el modo principal de rotación, modo 1 (tabla III-2).

III.3 Corte Sísmico.

Utilizando los espectros de diseño obtenidos en el capítulo II, se obtienen los cortes sísmicos para ambas direcciones principales de análisis. Para ello, se utiliza el método CQC (Combinación Cuadrática Completa) para la superposición modal considerando un factor de amortiguamiento uniforme para todos los modos del 5%.

La comparación de los cortes sísmicos (Q_{SIS}) resultantes para ambas direcciones de análisis X e Y resulta ser menores a los cortes máximo y mínimo calculados según la norma chilena Nch 433 (puntos 6.3.7.2 y 6.3.7.1 respectivamente) por lo que ambos cortes son amplificados por el factor f de modo de obtener el corte de diseño (Q_D) valor correspondiente al corte mínimo exigido por la normativa vigente. Para este edificio el corte mínimo equivale al 5% del peso sísmico del edificio (tabla III-3).

Tabla III-3: Cortes sísmicos por dirección de análisis, corte mínimo y máximo según Nch433, factores de reducción de respuesta (R^*), factores de amplificación sísmico (f) y corte de diseño (Q_D).

Dirección Sismo	Peso Edificio P_{EDIF} [Ton]	R^*	Q_{SIS} [Ton]	Q_{SIS}/P_{EDIF} [%]	Q_{MIN} [Ton]	Q_{MAX} [Ton]	f	Q_D [Ton]
X	11830	7.718	528.2	4.465	591.5	1242	1.120	591.5
Y		7.814	530.1	4.481			1.116	591.5

III.3.1 Distribución de Esfuerzos en Muros.

Se presentan los resultados por dirección del sismo escogiendo un muro de cada eje indicado anteriormente. La Figura III-2 muestra los esfuerzos sobre el muro D-4 de sección rectangular, la figura III-3 muestra los esfuerzos del muro F-3 de sección doble T. La figura III-4 muestra los esfuerzos del muro 3-2 de sección rectangular y la figura III-5 los esfuerzos encontrados en el muro 6-1 de sección tipo T.

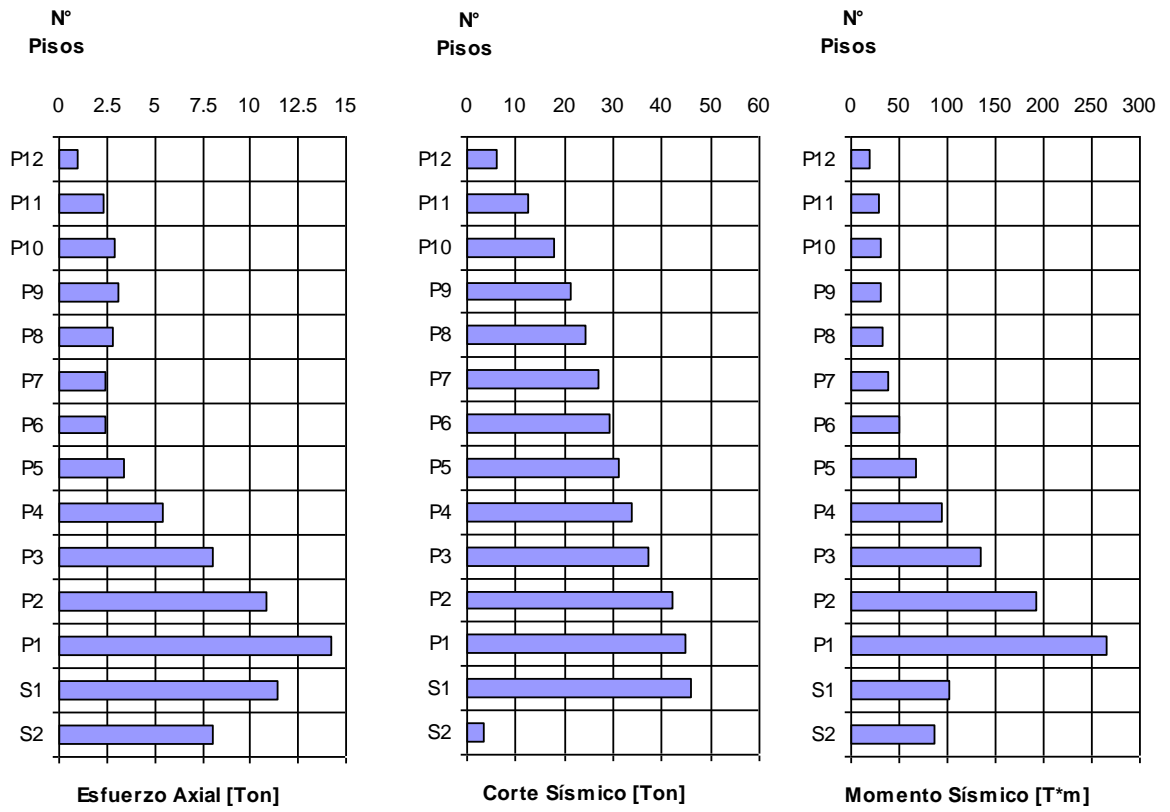


Figura III-2: Distribución de Esfuerzos Axial, Corte y Momento sísmico por piso Eje D, muro D-4, sección rectangular, 15x577[cm].

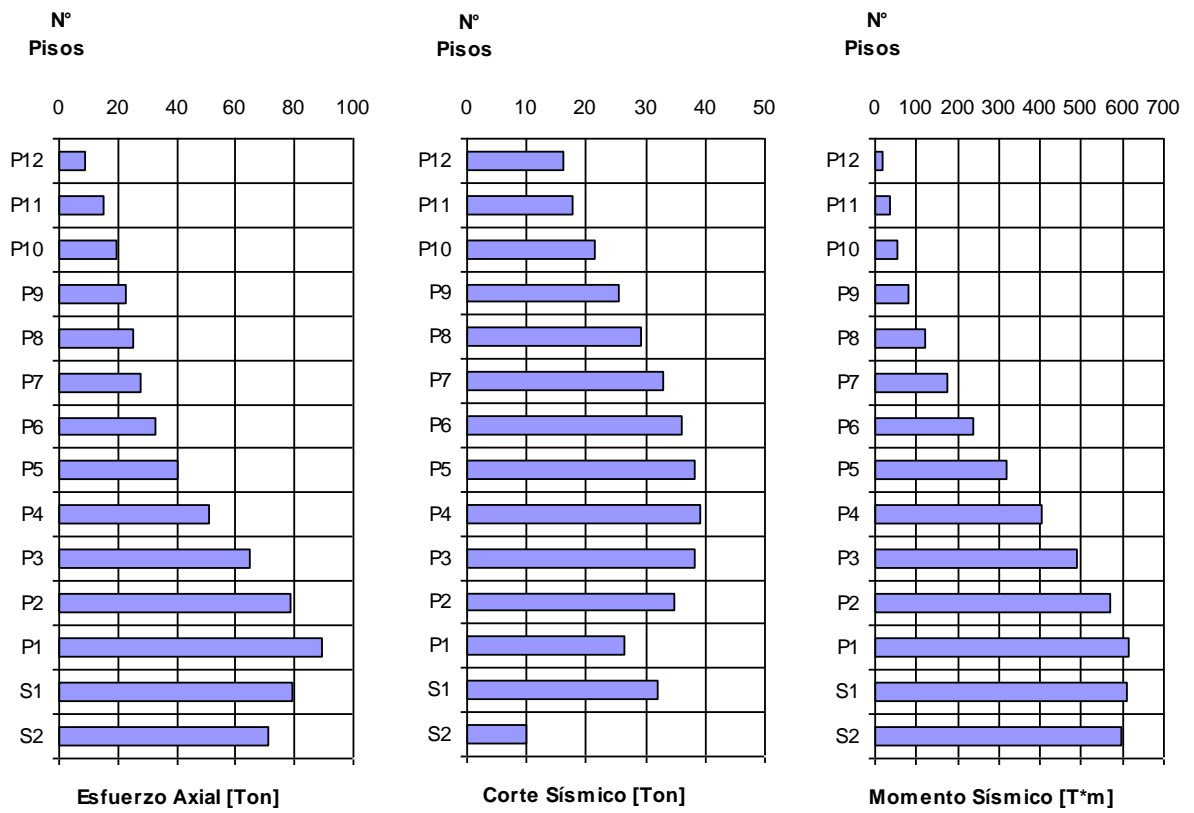


Figura III-3: Distribución de Esfuerzos Axial, Corte y Momento sísmico por piso Eje F, muro F-3, sección doble T, 305x15 + 15x787 + 832.5x15 [cm].

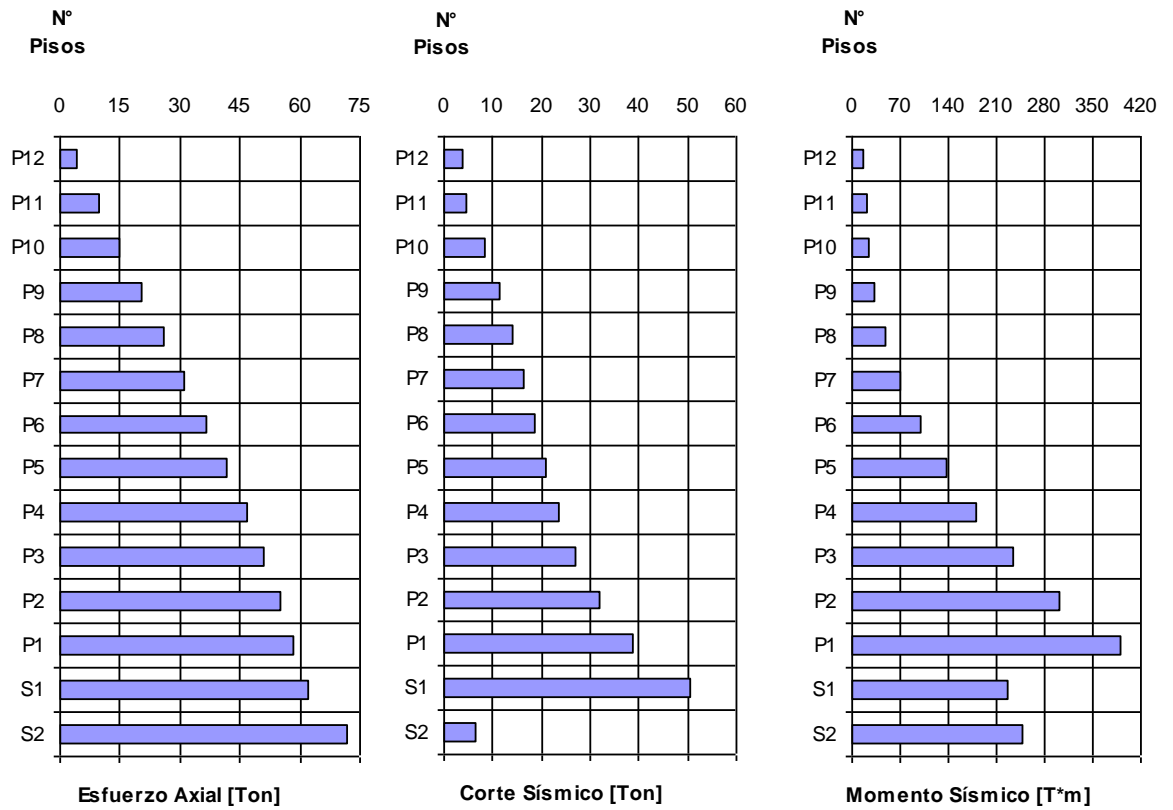


Figura III-4: Distribución de Esfuerzos Axial, Corte y Momento sísmico por piso Eje 3, muro 3-2, sección rectangular 15 X 695[cm].

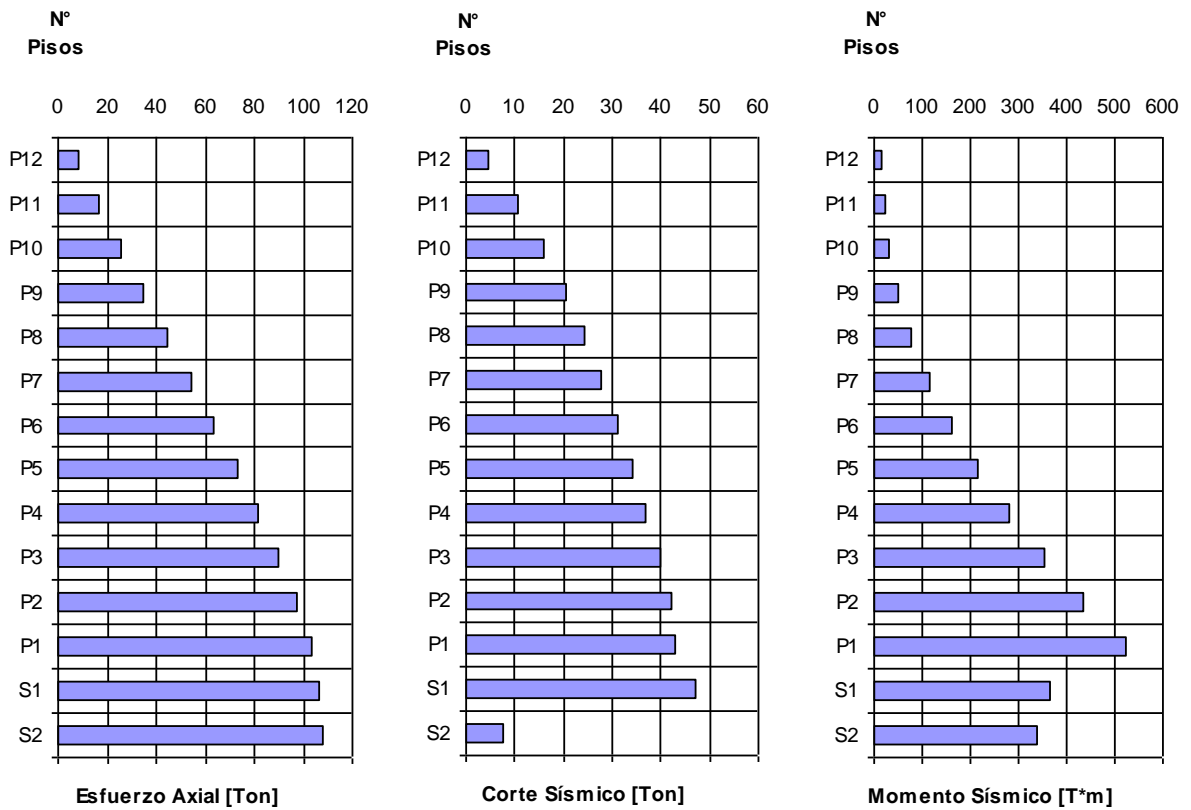


Figura III-5: Distribución de Esfuerzos Axial, Corte y Momento sísmico por piso Eje 6, muro 6-1, sección T, 15x612.5[cm] + 387x15[cm].

En las figuras III-2, III-3, III-4 y III-5, se observa que el momento flector siempre aumenta su valor hasta el piso1 para luego disminuir en los subterráneos permaneciendo con una magnitud similar en ambos subterráneos. Para el esfuerzo de corte en tanto, se observa una disminución drástica de su valor a nivel del segundo subterráneo. Por último para el caso del esfuerzo axial no se aprecia una tendencia similar en todos los casos. Se observa que los muros orientados según eje Y, la carga axial crece en magnitud en todos los niveles mientras que los muros orientados según eje X, este esfuerzo disminuye a nivel de subterráneos.

De los gráficos anteriores se puede concluir que mientras el edificio en los pisos superiores presenta una geometría regular tanto en planta como en la sección de sus elementos sismorresistentes verticales, los esfuerzos sísmicos crecen linealmente en cada uno de estos muros hasta el cielo del primer piso para luego, a partir del cambio de sección de la losa del primer subterráneo y de su conexión con los muros perimetrales, se produce una redistribución de los esfuerzos notándose claramente una disminución del esfuerzo de corte sísmico en los muros provenientes de los pisos superiores.

IV ESTUDIO PARAMÉTRICO

Conocido el comportamiento de los esfuerzos de corte, momento y axial sobre los muros del edificio al modelar las losas como diafragmas rígidos se desea estudiar los efectos que causa en la distribución de esfuerzos, el cambio de rigidez de las losas. Para cumplir este objetivo se crean dos modelos adicionales. El primero, considera únicamente la losa del cielo del primer subterráneo como flexible y el segundo modelo, considera todas las losas del edificio como flexibles. Para generar estas condiciones de análisis, se elimina la condición de diafragma rígido en las losas. En consecuencia, la rigidez en el plano de las losas dependen de sus propiedades geométricas y de materialidad, lo que afecta en la distribución esfuerzos en los muros de cada nivel. Para comparar los resultados con el análisis anterior se obtiene los esfuerzos para los mismos muros.

IV.1 Modelo Semirígido.

Corresponde al modelo en que se elimina la propiedad de diafragma rígido a la losa del cielo del primer subterráneo manteniendo la condición de diafragma rígido en el resto de los niveles de cielo de piso, incluida la losa del segundo subterráneo.

IV.1.1 Modos, Periodos y Corte Sísmico.

Los modos y periodos de vibración asociados al modelo con losa cielo primer subterráneo flexible se muestran en las tablas IV-1 y IV-2. Los primeros 12 modos acumulan una masa asociada mayor al 90%. Comparando los periodos fundamentales de este modelo con los obtenidos para el edificio característico (modelo rígido), se observa que los periodos sufren un incremento del 4.8% para la dirección X y de un 4.6% para la dirección Y es decir, alrededor de un 5% adicional en ambos casos.

Tabla IV-1: Modos, Periodos y Masa asociada según dirección de análisis, modelo Semirígido, Desplazamientos.

Modo	Periodo [Seg]	Porcentaje de Masa Asociada por Dirección de Desplazamiento			Porcentaje de Masa Acumulada por Dirección de Desplazamiento		
		UX [%]	UY [%]	UZ [%]	SumUX [%]	SumUY [%]	SumUZ [%]
1	0.9302	2.805	0.001	0.000	2.805	0.001	0.000
2	0.7493	16.748	41.649	0.000	19.553	41.650	0.000
3	0.7232	40.906	17.142	0.000	60.459	58.792	0.000
4	0.2017	11.808	0.043	0.000	72.267	58.834	0.000
5	0.1853	2.272	0.154	0.000	74.538	58.988	0.000
6	0.1649	0.100	18.255	0.000	74.638	77.242	0.000
7	0.0973	7.653	0.018	0.000	82.290	77.261	0.000
8	0.0765	0.005	11.253	0.000	82.295	88.514	0.000
9	0.0633	10.176	0.000	0.000	92.472	88.514	0.000
10	0.0507	0.012	6.961	0.000	92.484	95.475	0.000
11	0.0386	6.629	0.046	0.000	99.113	95.520	0.000
12	0.0284	0.032	4.203	0.000	99.145	99.723	0.000

Tabla IV-2: Modos, Periodos y masa asociada según dirección de análisis, modelo Semirígido, Rotaciones.

Modo	Periodo [Seg]	Porcentaje de Masa Asociada por Dirección de Giro			Porcentaje de Masa Acumulada por Dirección de Giro		
		RX [%]	RY [%]	RZ [%]	SumRX [%]	SumRY [%]	SumRZ [%]
1	0.9302	0.001	4.680	43.257	0.001	4.680	43.257
2	0.7493	68.796	27.133	0.633	68.797	31.813	43.890
3	0.7232	28.281	65.915	1.058	97.078	97.728	44.948
4	0.2017	0.008	0.758	2.300	97.086	98.485	47.248
5	0.1853	0.015	0.109	9.697	97.101	98.595	56.944
6	0.1649	1.890	0.005	0.026	98.991	98.600	56.971
7	0.0973	0.002	0.682	0.027	98.993	99.282	56.997
8	0.0765	0.698	0.000	0.007	99.690	99.282	57.005
9	0.0633	0.000	0.498	0.542	99.690	99.780	57.547
10	0.0507	0.234	0.001	0.543	99.924	99.780	58.090
11	0.0386	0.001	0.203	0.030	99.925	99.983	58.119
12	0.0284	0.060	0.001	0.110	99.986	99.984	58.230

Los factores de reducción de respuesta (R^*) para las direcciones X e Y, son 7.839 y 7.93 respectivamente. Del proceso de análisis se obtiene un corte sísmico (Q_{SIS}) inferior al mínimo exigido por la norma NCh 433, por lo que éste debe ser amplificado por el factor f cuyo valor para las direcciones X e Y son 1.150 y 1.149 respectivamente. El corte sísmico obtenido y los parámetros más relevantes se resumen en la tabla IV-3.

Tabla IV-3: Cortes sísmicos por dirección de análisis, corte mínimo y máximo según Nch433, factores de reducción de respuesta (R^*), factores de amplificación sísmico (f) y corte de diseño (Q_D), modelo semirígido.

Dirección Sismo	Peso Edificio P_{EDIF} [Ton]	R^*	Q_{SIS} [Ton]	Q_{SIS}/P_{EDIF} [%]	Q_{MIN} [Ton]	Q_{MAX} [Ton]	$f = Q_{MIN}/Q_{SIS}$	Q_D [Ton]
X	11830	7.839	514.3	4.347	591.5	1242	1.150	591.5
Y		7.930	514.8	4.352			1.149	591.5

IV.2 Modelo Flexible.

Corresponde al modelo en que se eliminan las propiedades de diafragma rígido en todas las losas del edificio.

IV.2.1 Modos, Periodos y Corte Sísmico.

Los modos y periodos de vibración asociados al modelo flexible se muestran en las tablas IV-4 y IV-5. Los primeros 12 modos acumulan una masa asociada mayor al 90%. Comparando los periodos fundamentales de este modelo con los periodos fundamentales del edificio característico (modelo rígido), se obtiene que para ambas direcciones de análisis, los periodos se incrementan en un 5.7% es decir, alrededor de un 6% adicional.

Tabla IV-4: Modos, Periodos y masa asociada según dirección de análisis, modelo flexible, Desplazamientos.

Modo	Periodo [Seg]	Porcentaje de Masa Asociada por Dirección de Desplazamiento			Porcentaje de Masa Acumulada por Dirección de Desplazamiento		
		UX [%]	UY [%]	UZ [%]	SumUX [%]	SumUY [%]	SumUZ [%]
1	0.9368	2.805	0.003	0.000	2.805	0.003	0.000
2	0.7568	13.936	45.098	0.000	16.741	45.101	0.000
3	0.7296	44.140	14.305	0.000	60.881	59.406	0.000
4	0.2069	12.274	0.031	0.000	73.154	59.437	0.000
5	0.1900	2.079	0.170	0.000	75.233	59.606	0.000
6	0.1694	0.082	18.947	0.000	75.315	78.554	0.000
7	0.1038	7.447	0.012	0.000	82.761	78.566	0.000
8	0.0806	0.000	11.246	0.000	82.761	89.812	0.000
9	0.0694	9.260	0.000	0.000	92.022	89.812	0.000
10	0.0540	0.020	6.030	0.000	92.042	95.842	0.000
11	0.0472	7.354	0.038	0.000	99.396	95.880	0.000
12	0.0336	0.006	3.759	0.000	99.402	99.639	0.000

Tabla IV-5: Modos, Periodos y masa asociada según dirección de análisis, modelo flexible, Rotaciones.

Modo	Periodo [Seg]	Porcentaje de Masa Asociada por Dirección de Giro			Porcentaje de Masa Acumulada por Dirección de Giro		
		RX [%]	RY [%]	RZ [%]	SumRX [%]	SumRY [%]	SumRZ [%]
1	0.9368	0.004	4.658	43.419	0.004	4.658	43.419
2	0.7568	73.897	22.472	0.522	73.901	27.130	43.941
3	0.7296	23.385	70.722	1.161	97.286	97.852	45.101
4	0.2069	0.007	0.727	2.105	97.293	98.579	47.206
5	0.1900	0.015	0.091	10.110	97.307	98.670	57.316
6	0.1694	1.802	0.004	0.024	99.109	98.673	57.339
7	0.1038	0.001	0.630	0.017	99.111	99.303	57.356
8	0.0806	0.602	0.000	0.051	99.712	99.303	57.407
9	0.0694	0.000	0.399	0.429	99.712	99.703	57.836
10	0.0540	0.152	0.001	0.628	99.864	99.704	58.464
11	0.0472	0.001	0.224	0.020	99.866	99.928	58.483
12	0.0336	0.073	0.000	0.004	99.939	99.928	58.487

Los factores de reducción de respuesta (R^*) para las direcciones X e Y, son 7.862 y 7.956 respectivamente, obteniendo del análisis computacional un corte sísmico (Q_{SIS}) menor al mínimo por lo que, al igual que en el caso anterior, se deberá amplificar por los factores f. Los valores del factor f para las direcciones de análisis X e Y son 1.149 y 1.147 respectivamente. El detalle se resume en la tabla IV-6.

Tabla IV-6: Cortes sísmicos por dirección de análisis, corte mínimo y máximo según Nch433, factores de reducción de respuesta (R^*), factores de amplificación sísmico (f) y corte de diseño (Q_D), modelo flexible.

Dirección Sismo	Peso Edificio P_{EDIF} [Ton]	R^*	Q_{SIS} [Ton]	Q_{SIS}/P_{EDIF} [%]	Q_{MIN} [Ton]	Q_{MAX} [Ton]	$f = Q_{MIN}/Q_{SIS}$	Q_D [Ton]
X	11830	7.862	515.0	4.347	591.5	1242	1.149	591.5
Y		7.956	515.9	4.352			1.147	

IV.3 Comparación de Resultados.

En esta sección se comparan los esfuerzos de los muros obtenidos con el modelo rígido, los modelos semirígido y flexible entregando los resultados por elemento y tipo de esfuerzo.

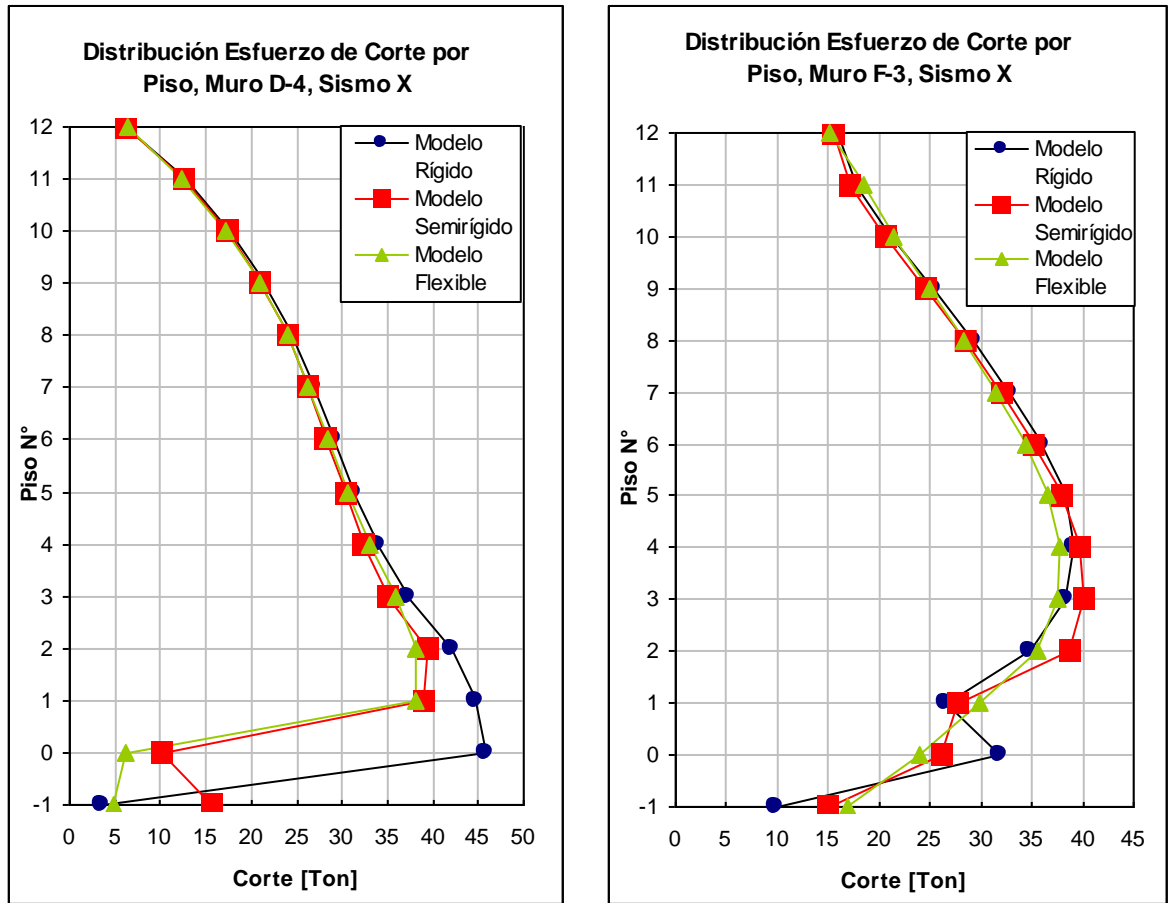


Figura IV-1: Evolución del esfuerzo de Corte sísmico por piso, muros D-4 y F-3, sismo X.

En la figura IV-1 se observa que la predicción del esfuerzo de corte de los tres modelos tiene un comportamiento similar en su desarrollo hasta el piso 1. Se observa que los modelos semirígido y flexible, luego de superar el nivel 0 del gráfico, que corresponde a la losa cielo del primer subterráneo, comienzan a separarse de la trayectoria del modelo rígido reteniendo un mayor corte sísmico basal que el modelo patrón. No obstante, independiente al modelo utilizado, se observa que el corte basal de ambos muros es claramente inferior al valor obtenido en el piso 1 para el muro rectangular D-4 y del piso 3 para el muro doble T, F-3.

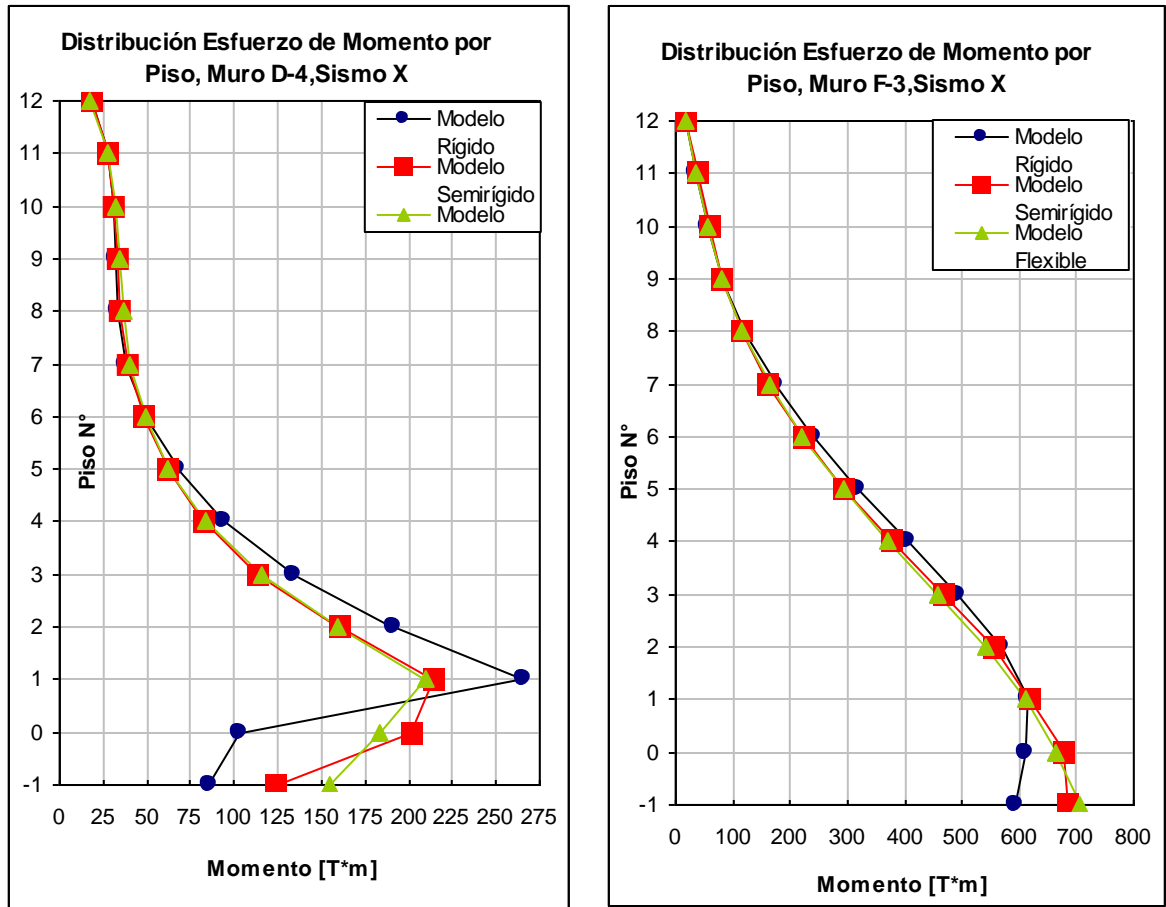


Figura IV-2: Evolución del esfuerzo de Momento sísmico por piso, muros D-4 y F-3, sismo X.

Para el momento flector la figura IV-2 muestra que los modelos de comparación tienen un desarrollo en todos los niveles similares con valores levemente inferiores al modelo con losas rígidas en los pisos superiores. Se observa también que la aparición de los muros perimetrales de los subterráneos provoca la caída de los niveles de momento que actúan en los muros D-4 y F-3. Una vez más se observa que el valor de los momentos residuales en los muros modelados con algún grado de flexibilidad son superiores al momento basal del modelo rígido.

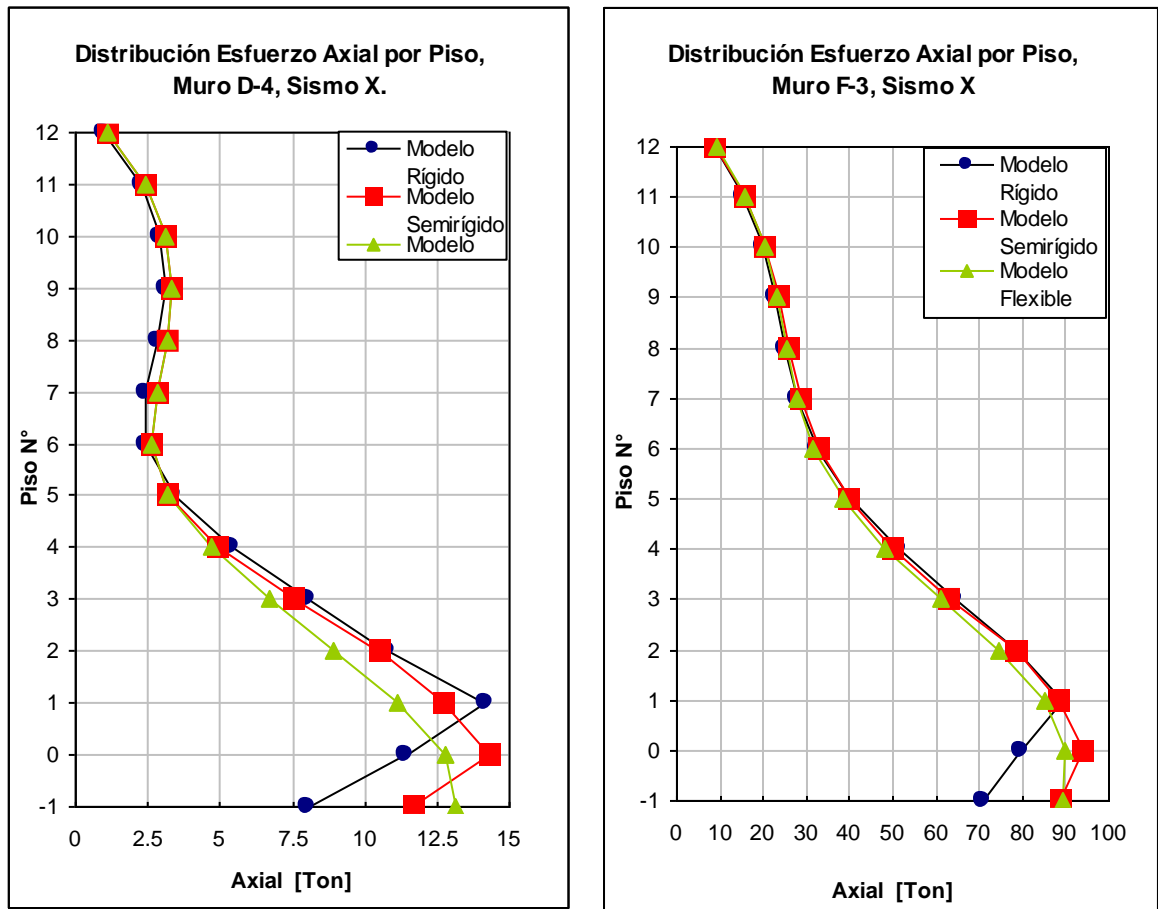


Figura IV-3: Evolución del esfuerzo Axial sísmico por piso, muros D-4 y F-3, sismo X.

Al igual que en el caso del esfuerzo de momento, se aprecia que el esfuerzo axial presenta un desarrollo similar en todos los modelos hasta la aparición de los muros perimetrales donde se aprecia que los modelos semirígido y flexible mantienen una evolución muy similar en ambos muros (D-4 y F-3) en toda su extensión.

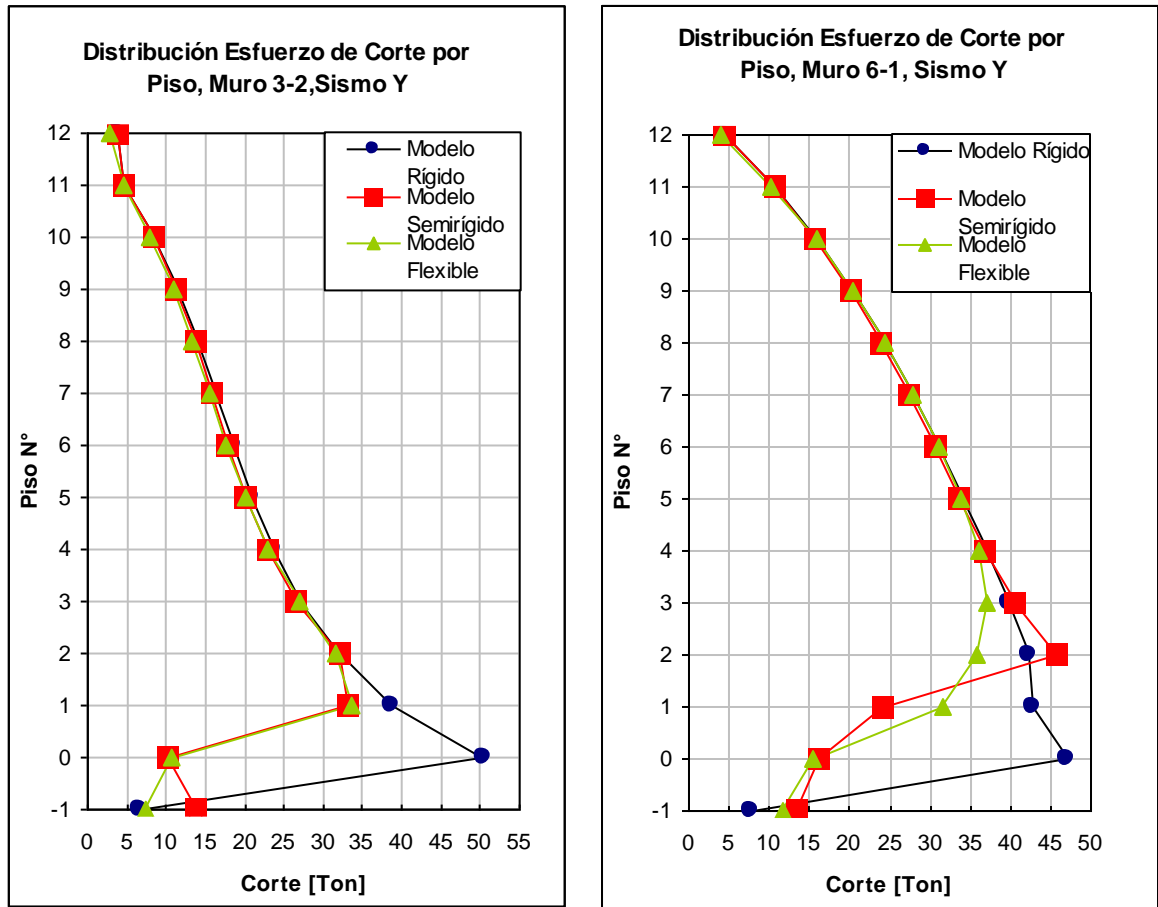


Figura IV-4: Evolución del esfuerzo de Corte sísmico por piso, muros 3-2 y 6-1, sismo Y.

En el caso del sismo Y, se puede observar que las trayectorias de corte de los tres modelos son similares hasta el piso 2 para luego empezar a diferenciarse entre el modelo rígido de los modelos semirígido y flexible, los que mantienen un comportamiento similar hasta el nivel basal. Para este caso se observa que los muros del modelo rígido sólo a nivel del cielo segundo subterráneo (nivel -1) se traspasan el esfuerzo de corte a los muros perimetrales.

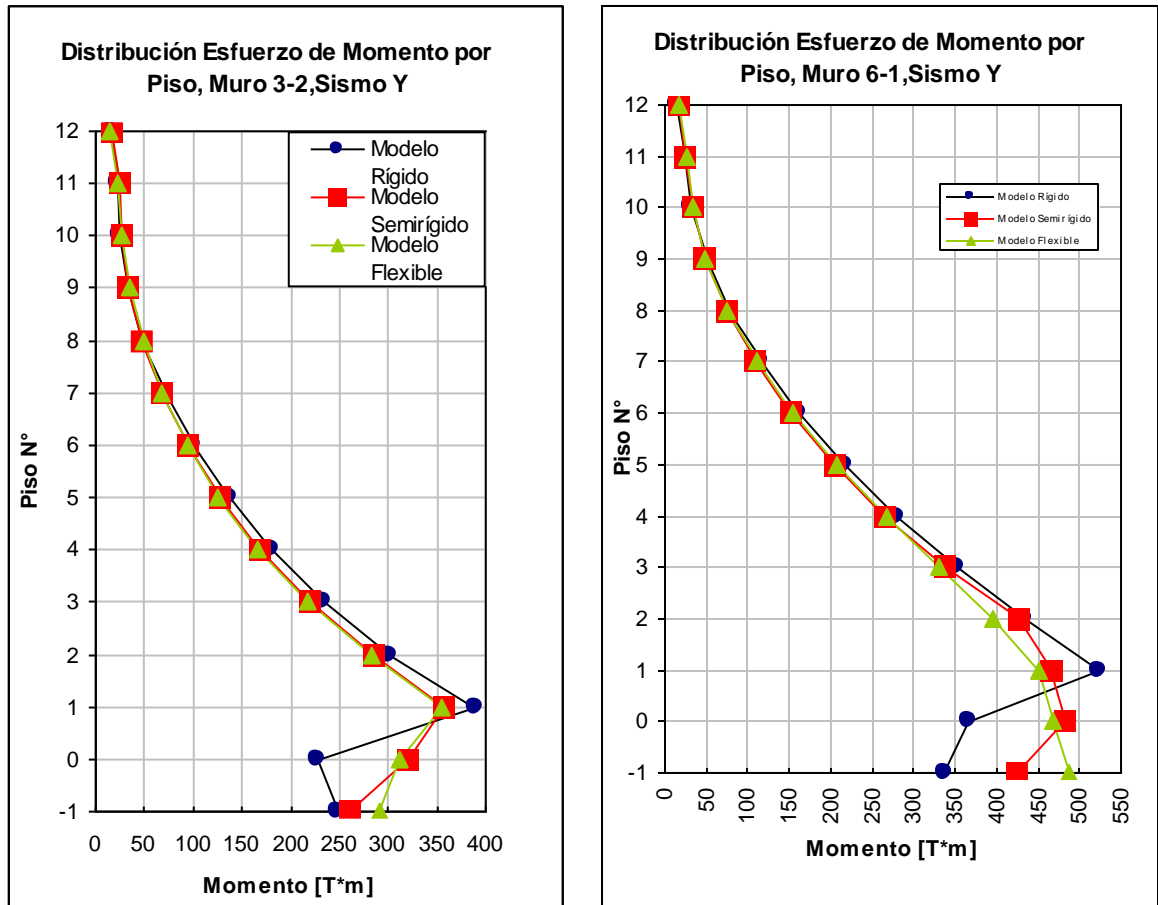


Figura IV-5: Evolución del esfuerzo de Momento sísmico por piso, muros 3-2 y 6-1, Sismo Y.

El comportamiento del esfuerzo de momento en ambos muros es similar siendo el modelo rígido el que registra los mayores valores hasta el piso 1. Este comportamiento cambia a nivel de subterráneos donde el esfuerzo de momento disminuye hasta alcanzar el nivel basal siendo este valor, inferior a los valores registrados por los modelos semirígido y flexible. Es importante observar cómo la aparición de los muros perimetrales altera la evolución de los esfuerzos en los muros del edificio.

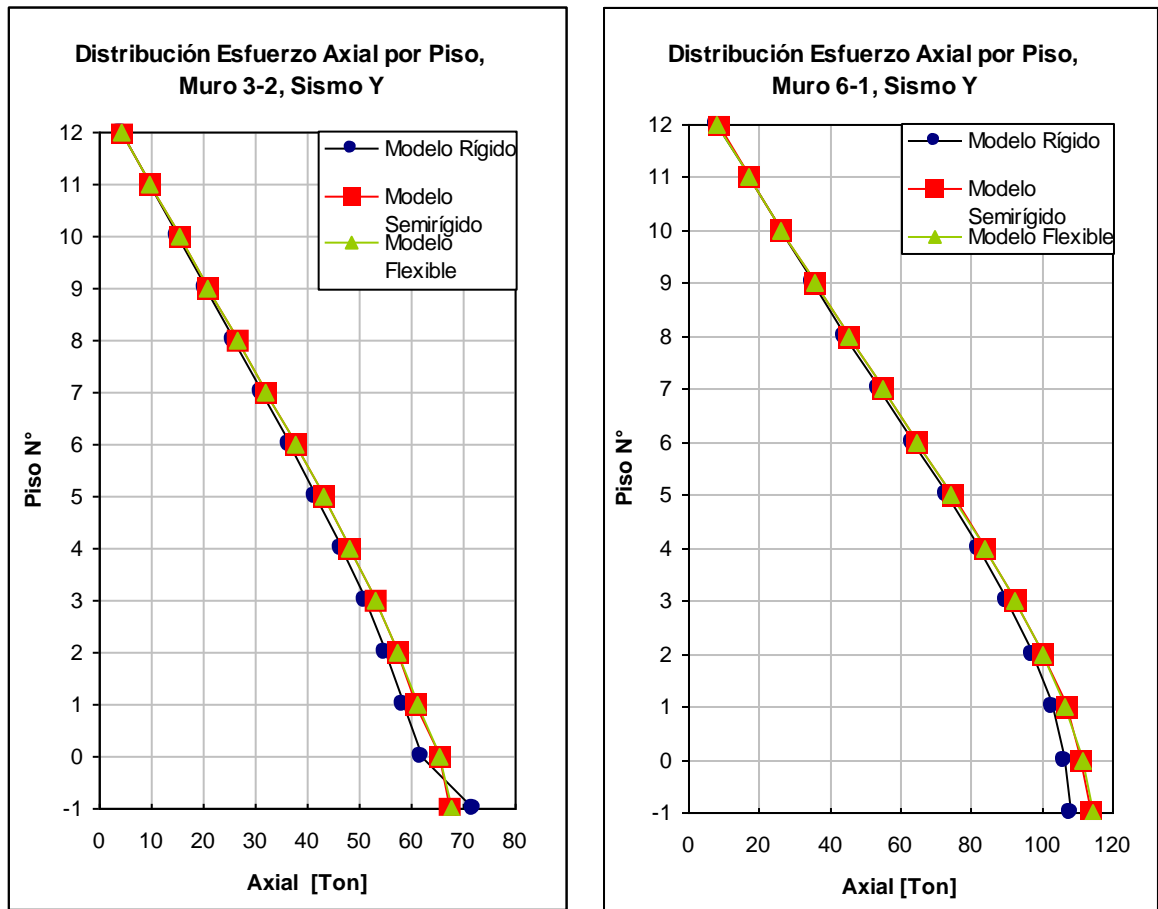


Figura IV-6: Evolución del esfuerzo Axial sísmico por piso, muros 3-2 y 6-1, Sismo Y.

De la figura IV-6 se aprecia que los modelos presentan una trayectoria similar en el desarrollo del esfuerzo axial no observándose un cambio de trayectoria marcado en los subterráneos tal como se observa para el caso de los muros orientados según eje X figura IV-3.

V CONCLUSIONES

Este estudio investiga la importancia de los muros perimetrales de los subterráneos en la redistribución de los esfuerzos y cómo puede ser afectado por la rigidez en planta de las losas de piso. Para ello, las losas se modelan de tres formas distintas. El modelo rígido considera todos los niveles como diafragmas infinitamente rígidos, el modelo semirígido, en que sólo la losa del cielo primer subterráneo es calculada considerando sus propiedades geométricas y tipo de hormigón empleado y por último, el modelo flexible donde todas las losas son modeladas considerando su rigidez real. Una vez obtenidos los resultados, ellos se presentan en gráficos donde se compara la evolución de los esfuerzos por piso para lo cual se escogen dos muros representativos por cada dirección de análisis.

A partir del procedimiento descrito, se puede concluir que:

- Los periodos fundamentales del edificio no se ven afectados mayormente por las propiedades de rigidez en planta de las losas de piso. La diferencia entre los periodos principales obtenidos entre el modelo rígido y el modelo flexible es solo de un 6%.
- La distribución sobre los muros de los esfuerzos sísmicos en los pisos superiores, es independiente al modelo utilizado. Los tres modelos presentan el mismo comportamiento con valores muy similares.
- A nivel de subterráneos los modelos muestran diferencias en la magnitud de los esfuerzos no en el comportamiento general ya que todos los modelos muestran una reducción significativa de los esfuerzos producto de la aparición de los muros perimetrales.
- En general, el modelo rígido entrega los esfuerzos a nivel basal más bajos de los tres modelos empleados. No obstante, los valores máximos registrados en el edificio corresponden al modelo rígido ubicándose éstos en la zona de transición, entre los niveles primero y primer subterráneo.

- El modelo rígido presenta los periodos más bajos por lo que el corte basal es mayor en este modelo por lo que generará los mayores esfuerzos sobre los elementos sismorresistentes del edificio siempre y cuando las losas de los subterráneos garanticen el traspaso de corte a los muros perimetrales.

BIBLIOGRAFIA

NORMA NCh 433-1996, mod. 2009, mod. Decreto Supremo N°61 (2011). Diseño sísmico de edificios. Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.

NORMA NCh 1537 of. 2009 (2009). Diseño Estructural – Cargas permanentes y cargas de uso. Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.

COMPUTERS AND STRUCTURES INC. (2010). CSI Analysis reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge. Berkeley, USA.

W.S. ALCÍVAR (2014). Efecto de los subterráneos en el comportamiento sísmico de edificios de muros de hormigón armado. Informe de actividad de graduación para optar al grado de Magíster en ingeniería estructural y geotécnica. Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería.

ACI 318S-08. BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE AND COMMENTARY. Reported by ACI Committee 318.