



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS NO LINEAL DE EDIFICIO DAÑADO DURANTE EL  
TERREMOTO DE 2010**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**RENZO MATÍAS ABURTO FERNÁNDEZ**

PROFESOR GUÍA:  
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
FABIÁN ROJAS BARRALES  
BETZABETH SUQUILLO RONQUILLO

SANTIAGO DE CHILE

2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: RENZO ABURTO FERNÁNDEZ  
FECHA: 2024  
PROF. GUÍA: LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

## ANÁLISIS NO LINEAL DE EDIFICIO DAÑADO DURANTE EL TERREMOTO DE 2010

La presente memoria puede dividirse en dos grandes partes. En primer lugar se muestra una metodología que apunta a modelar el edificio Antígona usando elementos no lineales partiendo desde la base de un modelo de elementos finitos existente, para posteriormente reconocer que es posible generalizar la metodología a otras estructuras y otros elementos de modelamiento.

En esa línea se encontró que la metodología funciona correctamente ya que el modelo creado es funcional y reproduce las características básicas del edificio como peso sísmico y períodos fundamentales de manera satisfactoria. Además, la metodología da pie a que se pueda analizar la misma estructura usando otro modelo macroscópico, o incluso replicarla para otra estructura.

La segunda parte somete al modelo a un análisis no lineal estático (*pushover*) que simula las demandas de desplazamiento que sufrió la estructura durante el terremoto del 2010 con el objetivo de corroborar que éste reproduce los daños exhibidos por la estructura en el sismo.

De los resultados asociados al análisis no lineal, se encontró que el modelo reproduce de manera parcial la ubicación de los daños, mostrando consistencia parcial en el sentido de que los resultados indican que las zonas dañadas no son las únicas que deberían existir, lo que se atribuye a ciertas consideraciones simplificadas en la metodología que podrían modificarse para sacrificar sencillez por precisión.

*Para Sofía*

# Agradecimientos

Quisiera agradecer primero a mi familia, que incondicionalmente supo apoyarme desde pequeño en cada una de mis decisiones y alentarme hasta el final. A pesar de que la vida nos separó hace un tiempo, los llevo presente siempre, aunque quizá me cueste expresarlo.

Gracias especialmente a mi madre Antonieta, que se preocupó en cada instante de mi carrera y veló cada segundo por mi bienestar. Estar a cargo de una familia no es simple, y menos en nuestras circunstancias, por lo que fue una gran fuente de inspiración así como un ejemplo de persona. Infinitas gracias, te amo mucho.

También agradecer a mis amigos de plan común, en especial al Toro, Moraga, Aldo y Concha. Gracias por darme un espacio donde sentirme cómodo dentro de la facultad, por los muchos momentos juntos, por estar durante tantos años y por escucharme y apoyarme. Gracias además a Constanza y Andrés, que nunca pensé que unas personas que conocí en un simple laboratorio podrían volverse tan importante. Agradezco en particular a Constanza, que en los últimos años se volvió una parte fundamental de mi vida y le tengo mucho cariño.

No podría olvidar a mis amigos de civil, en particular al grupo civilcitos que me adoptaron y me trataron como si siempre hubiera pertenecido desde el primer día. Gracias especiales a Sebastián que me acompañó desde el primer año, se preocupó por mi y me siguió a todas. Es una gran persona y uno de mis modelos a seguir.

Gracias además quienes son de mis más viejas amigas, Kenia y Javiera. El tiempo ha pasado y el nivel de cercanía a ido cambiando, pero las llevo siempre en mi corazón.

Este trabajo está dedicado a Sofía. A pesar de todo no puedo no reconocer que fue una pieza fundamental en todo esto, y que quizá no hubiera llegado hasta aquí sin su incesable apoyo. Probablemente no leas esto, pero muchas gracias y te amo mucho.

Haciendo memoria, es muy poco espacio para tanta gente que me evoca recuerdos gratos, pero gracias a todas y cada una de las personas con las que me topé durante mi estadía en la universidad, el liceo, scout o lo que sea y que me causó alguna alegría en mayor o menor grado. Les quiero mucho y aunque no haya podido nombrarlos a todos, sepan que viven en mi corazón.

Finalmente, quisiera agradecer al profesor Leonardo, por confiar en mi y en el proceso aún cuando las cosas no iban por el mejor de los caminos, y por aportar con su experiencia y conocimiento a la confección de esta memoria.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción general . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo general . . . . .	2
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.3. Organización . . . . .	3
<b>2. Marco teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Modelos macroscópicos . . . . .	4
2.2. Análisis no lineales . . . . .	9
<b>3. Antecedentes de la estructura en estudio</b>	<b>13</b>
3.1. Descripción general . . . . .	13
3.2. Daños debido al terremoto de 2010 . . . . .	15
3.2.1. Daños por flexo-compresión . . . . .	15
3.2.2. Daños por corte . . . . .	18
3.2.3. Otros daños . . . . .	20
3.3. Estudio previo . . . . .	22
<b>4. Modelamiento de la estructura</b>	<b>23</b>
4.1. Modificaciones previas . . . . .	23
4.2. Muros y vigas de acople . . . . .	25
4.3. Vigas . . . . .	31
4.4. Masa . . . . .	31
4.5. Losas . . . . .	33
4.6. Restricciones . . . . .	37
<b>5. Metodología generalizada de modelamiento</b>	<b>38</b>
<b>6. Resultados y discusión</b>	<b>47</b>
6.1. Análisis modal espectral . . . . .	47
6.2. Carga lateral versus desplazamiento de techo . . . . .	49
6.3. Deformaciones unitarias axiales en planta . . . . .	50
6.4. Distorsión por corte en altura . . . . .	55
<b>7. Conclusiones</b>	<b>61</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>63</b>

<b>Anexos</b>	<b>65</b>
<b>Anexo A. Plantas edificio Antígona</b>	<b>65</b>
<b>Anexo B. Ubicación vigas para simular acople de losas</b>	<b>68</b>
<b>Anexo C. Código en OpenSees del modelo</b>	<b>73</b>

# Índice de Tablas

4.1.	Diferencia en los períodos fundamentales luego de aplicar las modificaciones. . .	25
4.2.	Resumen sobrecargas de uso. . . . .	32
6.1.	Comparación de los 4 primeros períodos entre OpenSees y ETABS. . . . .	47
6.2.	Comparación de los 4 primeros períodos entre OpenSees (modificado) y ETABS (modificado). . . . .	48

# Índice de Ilustraciones

1.1.	Diagrama del modelo E-SFI-3D (Kolozvari, López & Massone, 2023). . . . .	2
2.1.	Diagrama del modelo MVLEM (Kolozvari et al., 2015). . . . .	5
2.2.	Diagrama del modelo con acoplamiento (Massone et al., 2009). . . . .	5
2.3.	Diagrama del modelo SFI-MVLEM (Massone, López & Kolozvari, 2021). . . . .	6
2.4.	Diagrama del modelo E-SFI (Massone, López & Kolozvari, 2021). . . . .	7
2.5.	Diagrama del modelo E-SFI-3D (Kolozvari, López & Massone, 2023). . . . .	8
2.6.	Diagrama del modelo MEFI (López, Rojas & Massone, 2022). . . . .	9
2.7.	Diagrama del modelo de la estructura analizada en el E-Defense con sus componentes (Kolozvari et al., 2023). . . . .	10
2.8.	Vista general del modelo del edificio confeccionado en Perform 3D (Massone et al., 2021). . . . .	11
2.9.	Distribución de las vigas de acople en una planta típica del edificio (Massone et al., 2021). . . . .	12
3.1.	Ubicación geográfica del edificio Antígona . . . . .	13
3.2.	Planta del subterráneo 1 (nivel 2). Figura creada a partir de planos originales. . . . .	14
3.3.	Planta tipo de los niveles 9 al 17. Figura creada a partir de planos originales. . . . .	15
3.4.	Ubicación de los muros dañados en el primer subterráneo. Figura creada a partir de planos originales. . . . .	16
3.5.	Imagen del daño sufrido por el muro marcado en rojo en el primer subterráneo (Leiva et al., 2010). . . . .	16
3.6.	Imagen del daño sufrido por el muro marcado en azul en el primer subterráneo (Leiva et al., 2010). . . . .	17
3.7.	Ubicación los muros dañados en el primer piso. Figura creada a partir de planos originales. . . . .	17
3.8.	Imagen del daño sufrido por el muro marcado en rojo en el primer piso (Leiva et al., 2010). . . . .	18
3.9.	Ubicación los muros dañados por corte. Figura creada a partir de planos originales. . . . .	18
3.10.	Daño por corte en la fachada norte (Leiva et al., 2010). . . . .	19
3.11.	Daño por corte en la fachada oriente (Leiva et al., 2010). . . . .	19
3.12.	Ubicación de la zona dañada en las losas. Figura creada a partir de planos originales. . . . .	20
3.13.	Daño en una de las losas (Leiva et al., 2010). . . . .	20
3.14.	Ubicación del muro con la conexión dañada. Figura creada a partir de planos originales. . . . .	21
3.15.	Daño en la conexión muro-viga (Leiva et al., 2010). . . . .	21
3.16.	Imagen del modelo en ETABS realizado por Suquillo. Imagen extraída de uno de los archivos originales. . . . .	22

4.1.	Ubicación del muro a modificar en el modelo de Suquillo. Figura creada a partir de planos originales. . . . .	23
4.2.	Largo del muro en el modelo de Suquillo. Imagen extraída de uno de los archivos originales. . . . .	24
4.3.	Ubicación del muro a modificar en el modelo de Suquillo. Figura creada a partir de planos originales. . . . .	24
4.4.	Ley constitutiva del acero que se usará en el modelo. La curva es simétrica para la otra dirección de carga. . . . .	27
4.5.	Ley constitutiva del hormigón no confinado que se usará en el modelo. Valores positivos son compresión. . . . .	27
4.6.	Ley constitutiva del hormigón confinado que se usará en el modelo. Valores positivos son compresión. . . . .	28
4.7.	Muros del estacionamiento que no pudieron ser modelados mediante ESFI-3D. Figura creada a partir de planos originales. . . . .	29
4.8.	Conjunto de <i>shells</i> trapezoidales junto con las aberturas en desnivel que los generaron. . . . .	30
4.9.	División de planta en sectores para cálculo de áreas y masa. . . . .	32
4.10.	Vigas de acople implementadas en una planta tipo. . . . .	33
4.11.	Curva momento-curvatura para las vigas de acople de alto 15 centímetros. . .	36
4.12.	Curva momento-curvatura para las vigas de acople de alto 18 centímetros. . .	36
4.13.	Renderizado del modelo completado en OpenSees. . . . .	37
5.1.	Resumen del algoritmo usado para definir el orden de los nodos. . . . .	42
6.1.	Espectro de desplazamiento y obtención del desplazamiento objetivo (Suquillo, 2017). . . . .	48
6.2.	Curva de capacidad obtenida del modelo. . . . .	49
6.3.	Curva de capacidad obtenida del modelo de Suquillo, considerando hormigón confinado en todos los elementos de borde (Suquillo, 2017). . . . .	49
6.4.	Deformaciones unitarias axiales en planta para el subterráneo 2 en dirección $X-$ (izquierda) y $X+$ (derecha). . . . .	50
6.5.	Deformaciones unitarias axiales en planta para el subterráneo 2 en dirección $Y-$ (izquierda) y $Y+$ (derecha). . . . .	50
6.6.	Deformaciones unitarias axiales en planta para el subterráneo 1 en dirección $X-$ (izquierda) y $X+$ (derecha). . . . .	51
6.7.	Deformaciones unitarias axiales en planta para el subterráneo 1 en dirección $Y-$ (izquierda) y $Y+$ (derecha). . . . .	51
6.8.	Deformaciones unitarias axiales en planta para el piso 1 en dirección $X-$ (izquierda) y $X+$ (derecha). . . . .	52
6.9.	Deformaciones unitarias axiales en planta para el piso 1 en dirección $Y-$ (izquierda) y $Y+$ (derecha). . . . .	52
6.10.	Indicador de confinamiento de los elementos analizados en el subterráneo 1 (izquierda) y piso 1 (derecha) . . . . .	53
6.11.	Imagen de la fachada norte (izquierda) y oriente (derecha) junto con el nombre y ubicación de las zonas a analizar. . . . .	55
6.12.	Ilustración de cómo se calcula la distorsión promedio a graficar por piso. . . .	56
6.13.	Distorsión angular por piso del muro M4 para la dirección $X-$ (azul) y $X+$ (celeste). . . . .	56

6.14.	Distorsión angular por piso del muro M5 y M8 para la dirección $X-$ (rojo) y $X+$ (morado). . . . .	57
6.15.	Distorsión angular por piso del muro M7 para la dirección $X-$ (verde claro) y $X+$ (verde oscuro). . . . .	57
6.16.	Distorsión angular por piso del muro MQ para la dirección $Y-$ (azul) e $Y+$ (celeste). . . . .	59
6.17.	Distorsión angular por piso del muro MR para la dirección $Y-$ (rojo) e $Y+$ (morado). . . . .	59
6.18.	Distorsión angular por piso del muro MS para la dirección $Y-$ (verde claro) e $Y+$ (verde oscuro). . . . .	60
A.1.	Planta tipo del subterráneo 2 (nivel 1). Figura creada a partir de planos originales.	65
A.2.	Planta tipo del nivel 3. Figura creada a partir de planos originales. . . . .	66
A.3.	Planta tipo del nivel 4. Figura creada a partir de planos originales. . . . .	66
A.4.	Planta tipo del nivel 5 al 7. Figura creada a partir de planos originales. . . . .	67
A.5.	Planta tipo del nivel 8. Figura creada a partir de planos originales. . . . .	67
A.6.	Planta tipo del nivel 18. Figura creada a partir de planos originales. . . . .	68
A.7.	Planta tipo del nivel 19. Figura creada a partir de planos originales. . . . .	68
B.1.	Vigas de acople implementadas en el subterráneo 2 (nivel 1). . . . .	69
B.2.	Vigas de acople implementadas en el subterráneo 1 (nivel 2). . . . .	70
B.3.	Vigas de acople implementadas en el nivel 3. . . . .	70
B.4.	Vigas de acople implementadas en el nivel 4. . . . .	71
B.5.	Vigas de acople implementadas en los niveles 5 al 7. . . . .	71
B.6.	Vigas de acople implementadas en el nivel 8. . . . .	72
B.7.	Vigas de acople implementadas en el nivel 18. . . . .	72

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Introducción general

Modelar un fenómeno físico es algo que la humanidad ha hecho desde que obtuvo las herramientas para hacerlo, y conforme éstas han ido evolucionando en complejidad a lo largo de la historia, también ha aumentado la dificultad y diversidad de los problemas que se pueden estudiar; y, en ese aspecto, el área estructural no ha quedado afuera.

Uno de los grandes hitos es la aparición de la computación durante el siglo 20, el cual trajo consigo la posibilidad de hacer mejores modelos y más minuciosos, de la mano de la teoría de elementos finitos. Así, nacieron numerosos programas comerciales de análisis estructural con amplio uso dentro de la ingeniería a nivel mundial.

Simultáneamente, se tienen dos grandes ramas dentro del análisis estructural: análisis lineales y no lineales. Los primeros son ampliamente usados por su simplicidad y su relativa fidelidad al comportamiento real de una estructura. Por otro lado, los análisis no lineales son metodologías que en años recientes han visto incrementada su presencia y popularidad por su mejor y más completa descripción del comportamiento estructural. Las metodologías se han incorporado en códigos constructivos de otros países y es de esperar que su aplicación se normalice en los próximos años.

El uso de programas comerciales de análisis estructural ha simplificado enormemente la tarea de modelamiento, sin embargo, muchos se limitan a análisis lineales o, si admiten análisis no lineales, aún así recaen fuertemente en el uso de elementos finitos, lo que en cuanto a tiempos de ejecución resulta sumamente ineficiente. En paralelo, en el campo de los análisis lineales se está consciente de ese problema y en años recientes se han desarrollado teorías que se despegan de modelos microscópicos (elementos finitos) y apuntan a metodologías macroscópicas que puedan simplificar el problema y aumentar la eficiencia del modelo.

Así, un escenario ideal sería confeccionar un modelo en una plataforma comercial, donde los pasos de dibujo, creación de elementos, etc, son sencillos y donde además no sería necesario recaer en una discretización demasiado fina; y, la información del modelo confeccionada traspasarla a otra plataforma donde se puedan aplicar las metodologías no lineales macroscópicas más eficientes. Naturalmente, este cambio de plataforma debe ser sencillo dentro de lo posible y alejarse de aspectos específicos de la estructura, cosa de que sea replicable para

otras o que el elemento macroscópico en uso sea fácilmente reemplazable para, por ejemplo, realizar comparaciones.

En esa línea, se aplicará un cambio de plataforma (y posterior análisis no lineal estático) desde un modelo existente en ETABS a OpenSees del edificio Antígona, ubicado en Viña del Mar, que sufrió daños debido a flexo-compresión en la base y por corte en pisos superiores durante el terremoto del año 2010. El modelamiento de la estructura se realizará usando un modelo de interacción macroscópico de los muros de hormigón armado llamado E-SFI-MVLEM-3D (*Efficient Shear Flexure Interaction Multiple Vertical Line Element Model*) que se muestra en la figura 1.1.

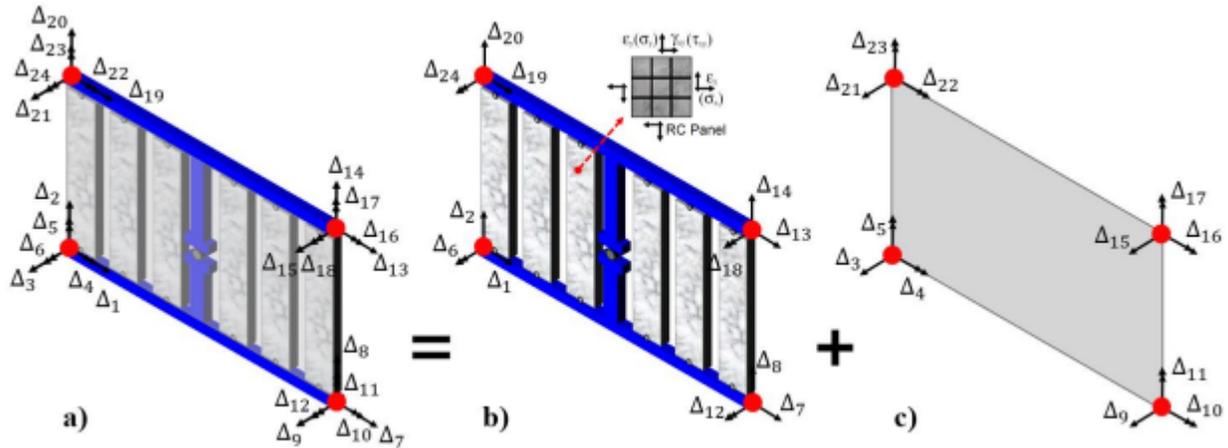


Figura 1.1: Diagrama del modelo E-SFI-3D (Kolozvari, López & Massone, 2023).

Así, el objetivo del presente trabajo es verificar si el modelo no lineal constituido es capaz de predecir los modos de falla observados durante el terremoto, lo que de lograrse permitiría dar una validación adicional al modelo de interacción de elementos y expandir su uso, lo que constituiría un importante avance en el estudio del desempeño de estructuras. Por otro lado, se busca generalizar la metodología a usar en el cambio de plataforma, con el objetivo de poder a futuro replicar el procedimiento o realizar comparaciones entre otros y potencialmente mejores elementos que se desarrollen.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

El objetivo general es verificar si el modelo no lineal realizado de la estructura es capaz de predecir los daños sufridos por ésta durante el terremoto del año 2010 y proponer una metodología que permita replicar el tipo de modelo realizado.

### 1.2.2. Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general, a lo largo del trabajo se realizará:

- Estudiar el modelo macroscópico E-SFI-MVLEM-3D y comprender bien su trasfondo para su correcta implementación.
- Recopilar datos del edificio con el propósito de tener la información suficiente para realizar el modelo.
- Investigación y estudio de cómo traspasar la mayor cantidad de información disponible a la plataforma *OpenSees* para no tener que construir un modelo desde cero.
- Realizar una formulación no lineal de la estructura e implementarla en la plataforma *OpenSees*
- Corroborar el modelo no lineal a modo de comprobar que éste funciona correctamente para seguir con las siguientes etapas.
- Realizar análisis estáticos que simulen la demanda causada por el terremoto de 2010.
- Generalizar la metodología usada en la modelación para poder aplicar la formulación ESFI-3D a otras estructuras.

### 1.3. Organización

El presente trabajo consta de siete capítulos (incluyendo el actual). El segundo capítulo aborda un resumen de la bibliografía investigada, con énfasis en los modelos macroscópicos de muros de hormigón armado y en la confección de modelos no lineales de estructuras existentes. En el tercer capítulo se describe la estructura en análisis junto con sus antecedentes del sismo de 2010. En el cuarto y quinto capítulo se expone el proceso de modelamiento de la estructura en la plataforma OpenSees y posterior generalización de éste para futura replicación respectivamente. En el capítulo 6 se presentan los resultados de los análisis no lineales estáticos realizados para luego concluir sobre éstos y el proceso de modelamiento en el capítulo 7.

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1. Modelos macroscópicos

A la hora de realizar un modelo de una estructura con el propósito de analizarla, justamente por tratarse de modelar la realidad, existen diversas maneras de abordar el problema. En el caso particular de estructuras de muros de hormigón armado, su comportamiento no es del todo claro debido a varios aspectos, como su inherente complejidad a nivel material, interacción entre esfuerzos internos o disposiciones arquitectónicas (López, Rojas & Massone, 2022 [1]). Así, se vuelve crucial realizar una formulación adecuada para describir el sistema.

Las dos grandes familias de modelos corresponden a los microscópicos (elementos finitos) y macroscópicos (de comportamiento). Los primeros son los que más presencia tienen en los análisis por su completitud, sin embargo, pueden complejizarse rápidamente para estructuras grandes y/o intrincadas y volverse altamente demandantes computacionalmente. Por otro lado, si bien los modelos macroscópicos no sufren tanto de ese problema, para tener esa ventaja deben sacrificar exactitud mediante asunciones y simplificaciones.

#### MVLEM

Dentro de los modelos macroscópicos, uno de los más ampliamente conocidos es el *Multiple Vertical Line Element Model (MVLEM)* desarrollado por Vulcano et al. en 1988 [2]. Como se puede ver en la figura 2.1, en esta formulación bidimensional un elemento consiste de seis grados de libertad globales (tres superiores y tres inferiores). Estos grados de libertad se encuentran al medio de dos vigas rígidas que a su vez se conectan mediante múltiples elementos verticales uniaxiales. La respuesta para el esfuerzo de corte se captura mediante un resorte al interior del elemento.

En este modelo, la respuesta flexural y la respuesta de corte están desacopladas, por lo que es ideal para el análisis de muros dominados por flexión. De todas maneras, ese no es siempre el caso en la práctica, y si se desea tener un modelo más general se debe incorporar de alguna manera la interacción entre flexión y corte.



se calcula  $\epsilon_y$  y  $\gamma_{xy}$  para cada una de las fibras verticales que componen el elemento. En cuanto a la deformación normal horizontal  $\epsilon_x$  que permanece desconocida, se puede calcular de dos maneras bajo la asunción de que ésta es nula ( $\epsilon_x = 0$ ) o que la resultante de esfuerzo normal horizontal es cero ( $\sigma_x = 0$ ), sin embargo, Massone et al. (2006) [4] encontraron que ninguno de esos dos supuestos es capaz de capturar con precisión la respuesta de un tipo específico de muro chato (*shear span-depth ratio* menor a 0.5).

## SFI-MVLEM

Más adelante, Kolozvari et al. desarrollan en 2015 el *Shear-Flexure Interaction Multiple-Vertical-Line-Element Model (SFI-MVLEM)*. En el SFI-MVLEM, se observa según la figura 2.3 que cada elemento uniaxial vertical del modelo MVLEM se reemplaza por paneles bidimensionales de hormigón armado que se describen mediante el *Fixed-Strut Angle Model (FSAM)*. El FSAM (Orakcal et al., 2019 [5]) es un modelo constitutivo de hormigón armado en el que los esfuerzos normales en el hormigón fisurado se calculan a lo largo de direcciones fijas que corresponden a la paralela y perpendicular con respecto a la primera grieta formada. El uso de este modelo permite capturar el acoplamiento entre flexión y corte en cada panel a nivel de elemento (Kolozvari et al., 2019 [6])

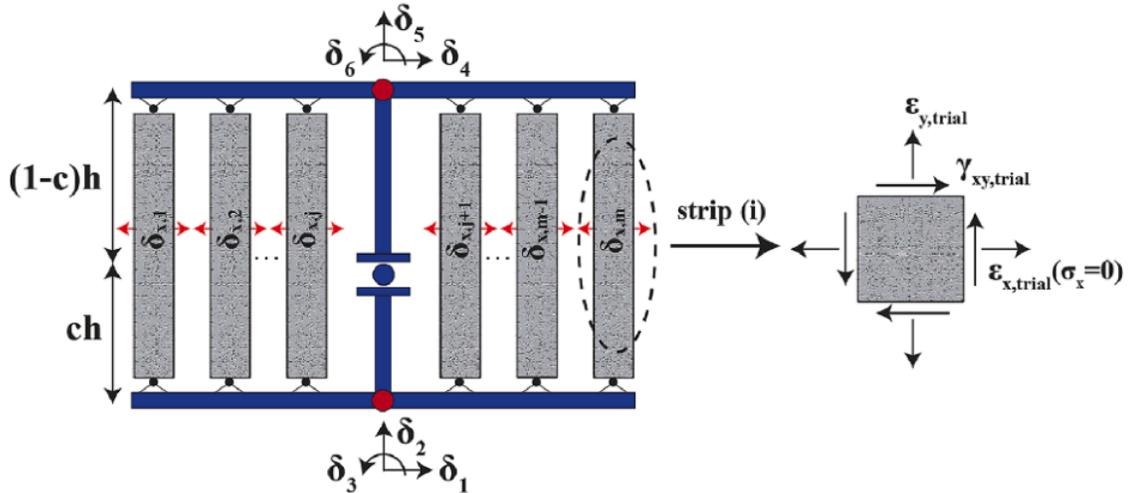


Figura 2.3: Diagrama del modelo SFI-MVLEM (Massone, López & Kolozvari, 2021).

Tanto la deformación axial vertical  $\epsilon_y$  como la deformación de corte  $\gamma_{xy}$  se calculan en base a los seis grados de libertad ubicados arriba y abajo del elemento usando la hipótesis de Bernoulli junto con el supuesto de que las deformaciones de corte se distribuyen de manera uniforme. Adicionalmente, cada fibra vertical es dotada de un grado de libertad horizontal que se calcula bajo el supuesto de que la resultante de esfuerzo horizontal  $\sigma_x$  es cero. Así, cada elemento SFI-MVLEM de  $m$  fibras verticales queda definido por  $6+m$  grados de libertad.

Kolozvari et al., 2019 [6] indican que si bien el supuesto de  $\sigma_x = 0$  es razonable para muros en voladizo con relación de aspecto mayor a 1.0, en muros chatos lleva a una subestimación significativa de la capacidad y rigidez del muro.

## E-SFI-MVLEM

Con el objeto de extender la formulación a un universo más amplio de muros, Massone et al. (2021) [7] desarrollan el modelo *Efficient Shear-Flexure Interaction (E-SFI)* basado directamente en el trabajo realizado con el SFI-MVLEM. En la figura 2.4 se aprecia cómo se tienen los mismos seis grados de libertad en el elemento y los mismos paneles verticales de hormigón armado cuyo comportamiento también está descrito por el modelo FSAM. Además, al igual que en el SFI-MVLEM, se asume que la curvatura del elemento es uniforme y que el giro resultante se concentra a una altura  $ch$ , donde  $h$  es la altura del muro y  $c$  es una constante que se recomienda establecer en 0.4 según Vulcano et al. (1988) [2].

La diferencia viene a estar dentro de cada panel, donde en el modelo previo SFI-MVLEM la deformación axial  $\epsilon_x$  se calculaba imponiendo  $\sigma_x = 0$  mientras que ahora se calcula mediante el uso de una expresión calibrada que depende de la deformación de corte  $\gamma_{xy}$  y de la cuantía de refuerzo horizontal  $\rho_h$ . Gracias a la expresión para  $\epsilon_x$ , desaparece el grado de libertad horizontal que tenía cada fibra vertical y con ello cada elemento E-SFI queda descrito completamente por los grados de libertad que posee en el nodo superior y nodo inferior, por lo que cada elemento tiene seis grados de libertad independiente del número  $m$  de fibras que posea internamente.

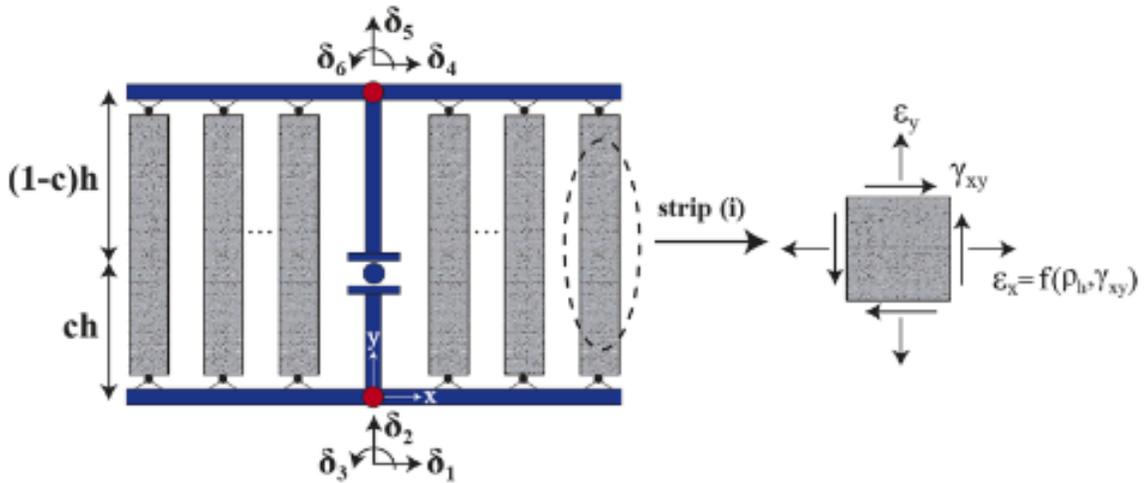


Figura 2.4: Diagrama del modelo E-SFI (Massone, López & Kolozvari, 2021).

## E-SFI-MVLEM-3D

Esta formulación bidimensional se extiende a tres dimensiones con Kolozvari et al. (2023) [8] siguiendo el mismo objetivo de optimizar la formulación tridimensional que también había adquirido el modelo SFI-MVLEM. En esta formulación se le aplican transformaciones geométricas a los grados de libertad del elemento base y pasa de ser un elemento de dos nodos a uno de cuatro.

Con el paso a las tres dimensiones aparece el comportamiento fuera del plano, que se modela de manera lineal-elástica siguiendo el modelo de placas de Kirchhoff. Así, en la figura 2.5 se muestra que un elemento ESFI-3D se compone por una formulación dentro del plano

siguiendo la teoría ya descrita en dos dimensiones, y por una formulación fuera del plano de la mano del modelo de placas. Este comportamiento dentro y fuera del plano se mantiene desacoplado en la presente formulación.

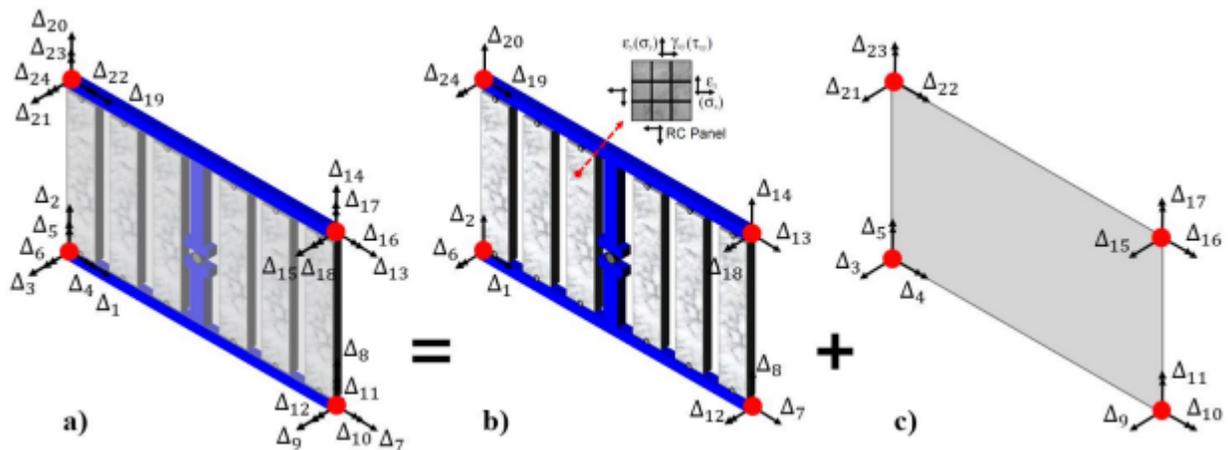


Figura 2.5: Diagrama del modelo E-SFI-3D (Kolozvari, López & Massone, 2023).

De manera similar al escenario bidimensional, aquí un elemento SFI-MVLEM-3D posee  $24 + m$  grados de libertad: 6 grados de libertad en cada esquina y  $m$  grados de libertad horizontales por cada fibra que lo compusiera. El E-SFI-MVLEM-3D elimina los  $m$  grados de libertad de las fibras igual que en 2D, haciendo uso de una expresión calibrada que depende de  $\gamma_{xy}$  y  $\rho_h$ . Así, el elemento queda descrito mediante 24 grados de libertad: 12 dentro del plano y 12 fuera del plano. Esto se traduce en una formulación más eficiente computacionalmente y al mismo tiempo más estable (Kolozvari et al., 2023 [8]).

## MEFI

Estas formulaciones basadas en el MLVEM no son las únicas que se han desarrollado. Anteriormente se habló acerca de que los modelos microscópicos son valiosos por su precisión mientras que los macroscópicos por su simplicidad. En esa línea, López, Rojas y Massone (2022) [1] intentan combinar lo mejor de ambos mundos, resultando en la formulación de un modelo macroscópico tipo membrana llamado *Membrane Fiber Element (MEFI)*.

Como se puede observar en la figura 2.6, en esta formulación el elemento de hormigón armado se describe por cuatro nodos en sus esquinas con 3 grados de libertad por nodo (dos traslaciones y una rotación dentro del plano). El cuadrilátero se divide en varias fibras verticales y el comportamiento del hormigón sigue el *Fixed-Strut-Angle-Model (FSAM)*, el cual fija las direcciones principales paralelas y perpendiculares a la orientación de la primera grieta que ocurra. Las leyes constitutivas que se usan para el hormigón y el acero corresponden a modelos simples uniaxiales.

Dentro de las virtudes de este modelo, es que los elementos además de poder conectarse entre sí tanto horizontal como verticalmente, también admite el uso de distintos materiales a lo largo del elemento, permitiendo un refinamiento del elemento similar al que se obtendría

usando un modelo microscópico pero sin la necesidad de utilizar la hipótesis de Bernoulli en el extremo superior o inferior del elemento (López et al., 2022 [1]).

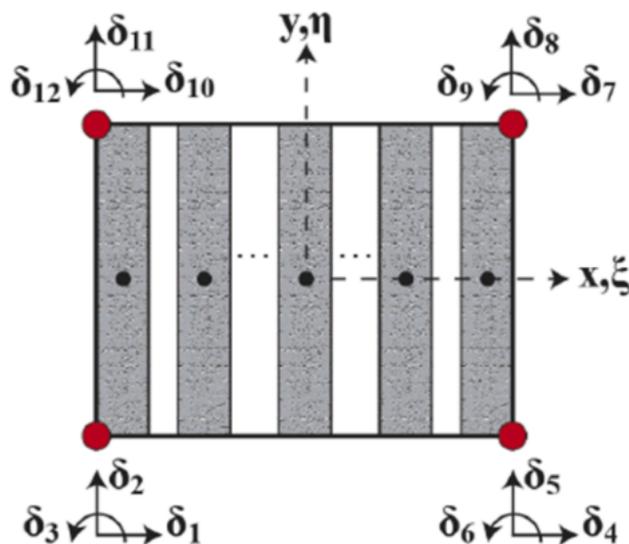


Figura 2.6: Diagrama del modelo MEFI (López, Rojas & Massone, 2022).

## 2.2. Análisis no lineales

Más allá de tener presente algunos de los modelos macroscópicos existentes, es de particular interés estudiar sus aplicaciones a estructuras reales y cómo se desempeñan estos modelos.

Un primer estudio a mencionar es el realizado por Tuna y Wallace (2015) [9], quienes analizan el edificio Alto Río, un edificio de muros de hormigón armado construido el año 2008 y que para el sismo que azotó a Chile el año 2010 sufrió un colapso total.

Los autores analizaron una porción representativa del edificio que capturara todas las características que pudieran ser posible causa del colapso que sufrió la estructura. El modelo se desarrolló en un programa comercial y para los muros se utilizaron *Shear Wall elements*, que corresponden a elementos uniaxiales de cuatro nodos. Estos elementos incluyen un comportamiento no lineal de flexo-compresión y para corte puede tener un material lineal o no lineal pero que se mantiene desacoplado de la respuesta flexural.

Al modelo se le realizó un análisis tipo *pushover*, el cual se indica que fue capaz de obtener resultados consistentes tanto con el daño observado en varias estructuras de la región afectada por el terremoto como con la dirección observada del colapso estructural. Además, se realizó un análisis no lineal tiempo-historia en el que se obtuvo que las deformaciones del hormigón a compresión y de las barras de refuerzo alcanzaron valores sumamente grandes de manera rápida y que, en general, los resultados fueron consistentes con el daño sufrido por la estructura.

Otro estudio de interés, que involucra el uso de uno de los modelos macroscópicos mencionados anteriormente, fue hecho por Kolozvari et al. (2023) [10]. La estructura en análisis es una de muros y marcos de hormigón armado de diez pisos de altura que se ensayó el año

2015 en la mesa vibratoria del E-Defense en Japón, por lo que si bien no es una estructura de uso cotidiano, sigue siendo un objeto tangible.

El modelo se confecciona siguiendo las disposiciones ASCE/SEI 41-17 (uno de los estándares de diseño del código de construcción de Los Ángeles) para procedimientos de evaluación dinámica no lineal y consiste de una base empotrada y el uso de elementos tipo *shell* para los diafragmas semi-rígidos. Columnas y vigas se modelaron usando elementos de fibras basados en desplazamiento mientras que para los muros se utilizó la extensión a tres dimensiones del modelo MVLEM (MVLEM-3D) que posee un comportamiento no lineal dentro del plano y uno elástico fuera del plano. En la imagen 2.7 se observa una representación gráfica de la estructura, con el modelo de fibras para las vigas y el modelo MVLEM-3D para los muros.

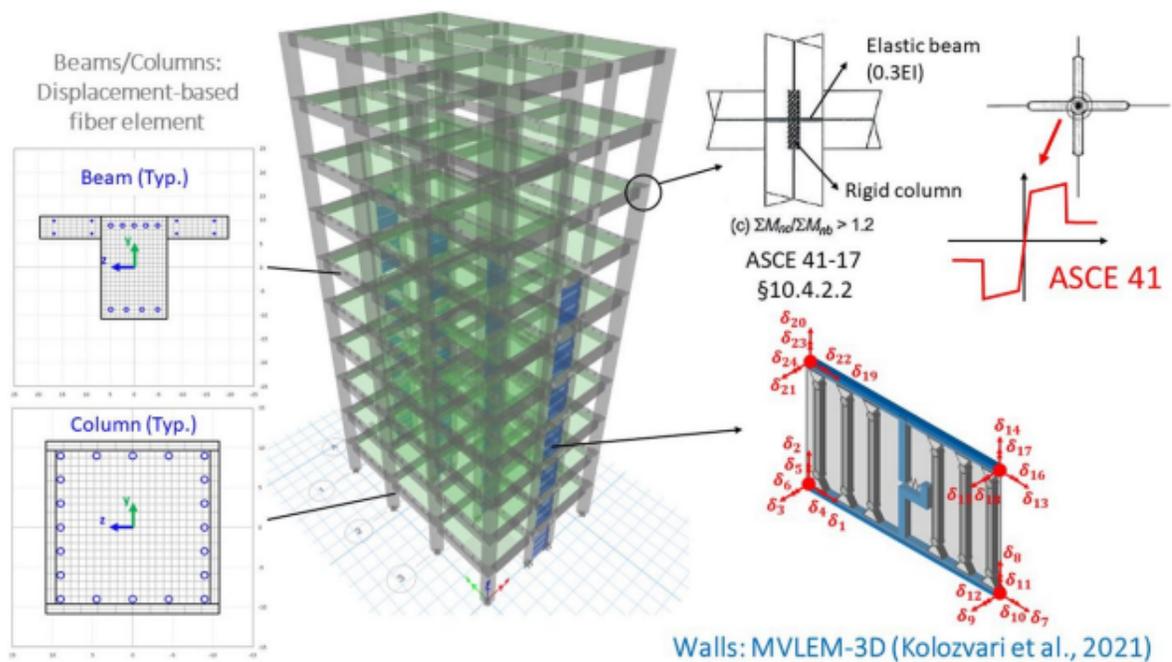


Figura 2.7: Diagrama del modelo de la estructura analizada en el E-Defense con sus componentes (Kolozvari et al., 2023).

La estructura se ensayó en la mesa vibratoria con el registro al 100 % de JMA-Kobe (registro de la estación Japan Meteorological Agency del terremoto de 1995 en Kobe). Luego, se registran las dos aceleraciones horizontales en la base de la mesa vibratoria y son estos registros los que se aplican al modelo en OpenSees con el objetivo de evaluar el desempeño.

En el documento se indica que al seguir los procedimientos de evaluación del ASCE/SEI 41-17 se pudo capturar razonablemente la extensión y distribución del daño en la dirección del marco. Además, se halló buena concordancia para la deriva de techo en el tiempo (con excepción de la parte tardía del registro) y para las derivas máximas de techo. El corte basal no fue predicho satisfactoriamente y en lo que respecta a la dirección de los muros, la ubicación y severidad el daño en la base de éstos fue capturado de buena manera por los modelos no lineales.

Por último se presenta el trabajo de Massone et al. (2021) [11]. El edificio que representa

el foco del trabajo es una estructura chilena clásica de muros de hormigón armado de 23 pisos (de los cuáles dos corresponden a subterráneo) ubicada en la comuna de Ñuñoa, Chile, y que para el terremoto del año 2010 sufrió fallas severas por flexo-compresión en el primer nivel.

El modelo se confeccionó en un programa comercial de análisis estructural, del cual se presenta una vista general en la figura 2.8. Al igual que en modelo del edificio Alto Río de Tuna y Wallace, se usa el elemento *Shear Wall Element* para modelar los muros de hormigón mientras que las vigas se modelan como elementos tipo *frame* de sección elástica a lo largo de la viga con rótulas plásticas en los extremos.

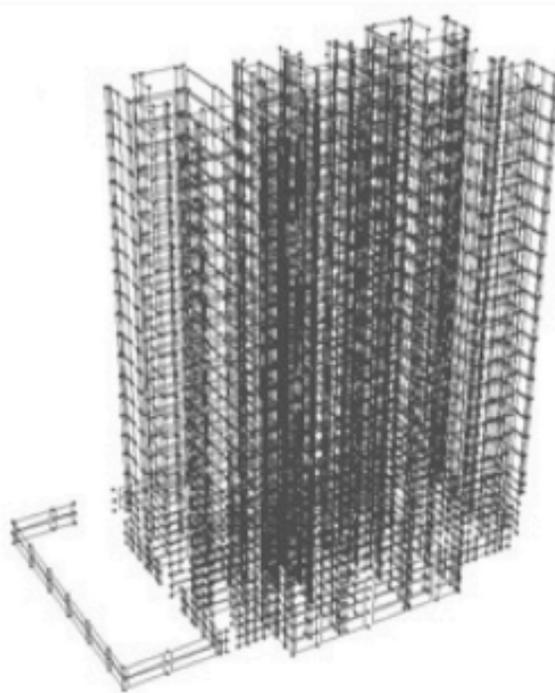


Figura 2.8: Vista general del modelo del edificio confeccionado en Perform 3D (Massone et al., 2021).

El aspecto más importante de este trabajo, por ser una metodología que se replicará más adelante, es el cómo aborda el tema de las losas. Si bien el modelo presenta un diafragma rígido, carece por elementos de losa. La razón de por la que carece de estos elementos es que en particular dentro del programa de análisis usado en el trabajo las losas no son capaces de tener propiedades no lineales, e incorporar las losas con comportamiento lineal causaría efectos de acoplamiento poco realistas y exagerados.

Como de todas maneras tiene que haber algún elemento, la alternativa que proponen es el uso de vigas. Estas vigas tienen un alto igual al espesor de la losa y un ancho igual a 12 veces ese espesor y se ubican de manera tal de modelar el acoplamiento entre muro y losa. Una imagen de cómo quedan distribuidas las vigas de acople en una de las plantas se muestran en la figura 2.9

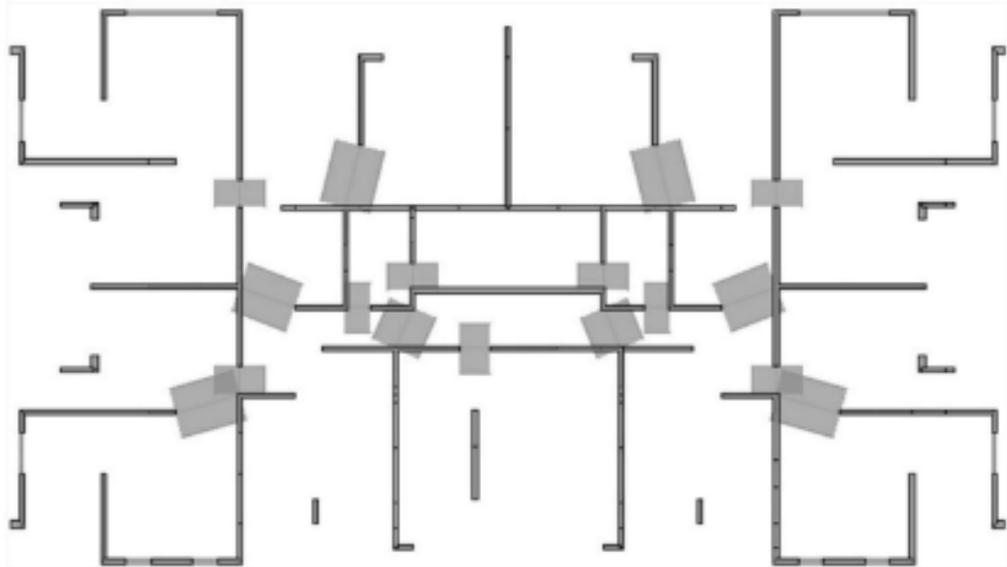


Figura 2.9: Distribución de las vigas de acople en una planta típica del edificio (Massone et al., 2021).

# Capítulo 3

## Antecedentes de la estructura en estudio

### 3.1. Descripción general

La estructura en estudio corresponde al edificio Antígona, ubicado en la ciudad de Viña del Mar. Un mapa con la ubicación geográfica marcada en rojo del edificio se muestra en la figura 3.1

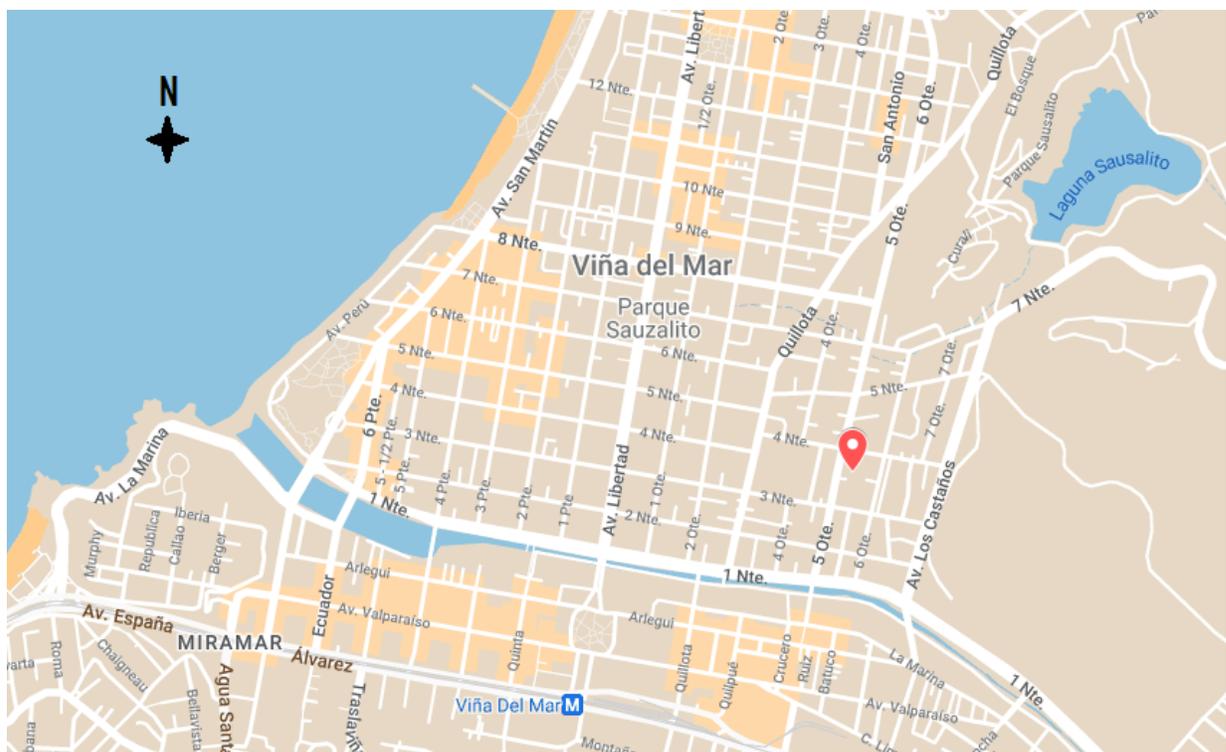


Figura 3.1: Ubicación geográfica del edificio Antígona

El edificio en cuestión fue diseñado por la empresa RDZI Ingeniería Estructural y construido el año 2004 por la constructora TECSA. Su propósito es habitacional y está compuesto en total por 19 niveles, de los cuales dos corresponden a subterráneos, 16 destinados a viviendas y un piso en la cúspide que alberga bodegas y calderas. En cuanto al sistema estructural,

este consiste principalmente de muros de hormigón armado en conjunto con vigas y losas del mismo material. Los primeros son de espesor variable dependiendo de su ubicación y altura en el edificio.

La geometría de la planta es rectangular, con el lado Norte-Sur siendo de aproximadamente 31 metros y el lado Este-Oeste de alrededor de 21 metros lo que resulta en una superficie 651 metros cuadrados. Estas plantas en altura son bastante similares entre sí con una gran excepción correspondiente al primer subterráneo, el cual tiene un área considerablemente mayor para albergar estacionamientos. En las figuras 3.2 y 3.3 se muestran respectivamente la planta correspondiente al primer subterráneo y la correspondiente a la mayoría de los pisos habitables (niveles 9 al 17) donde los muros aparecen en color negro y las vigas en color magenta. El resto de las plantas se adjuntan en el Anexo A.

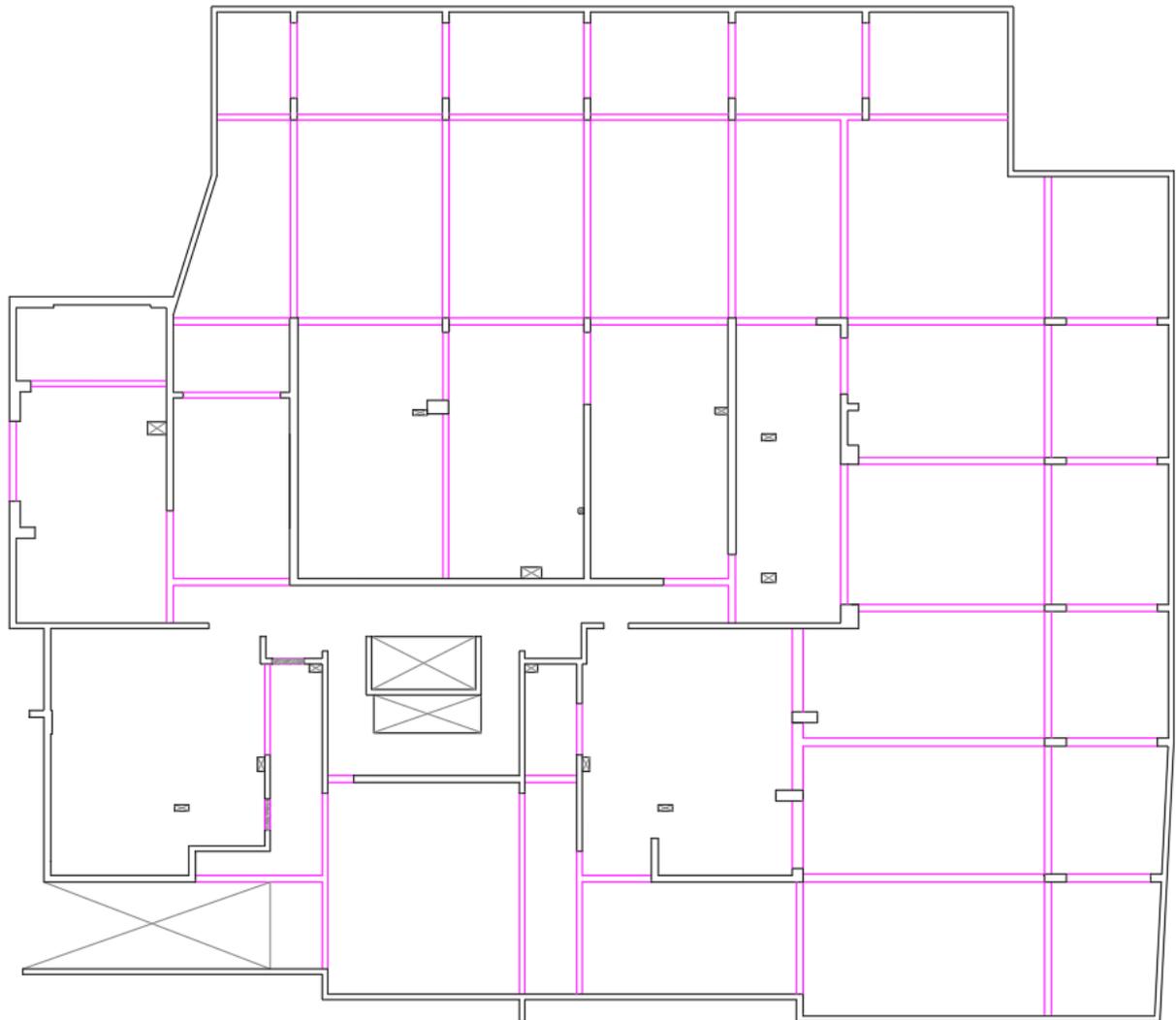


Figura 3.2: Planta del subterráneo 1 (nivel 2). Figura creada a partir de planos originales.

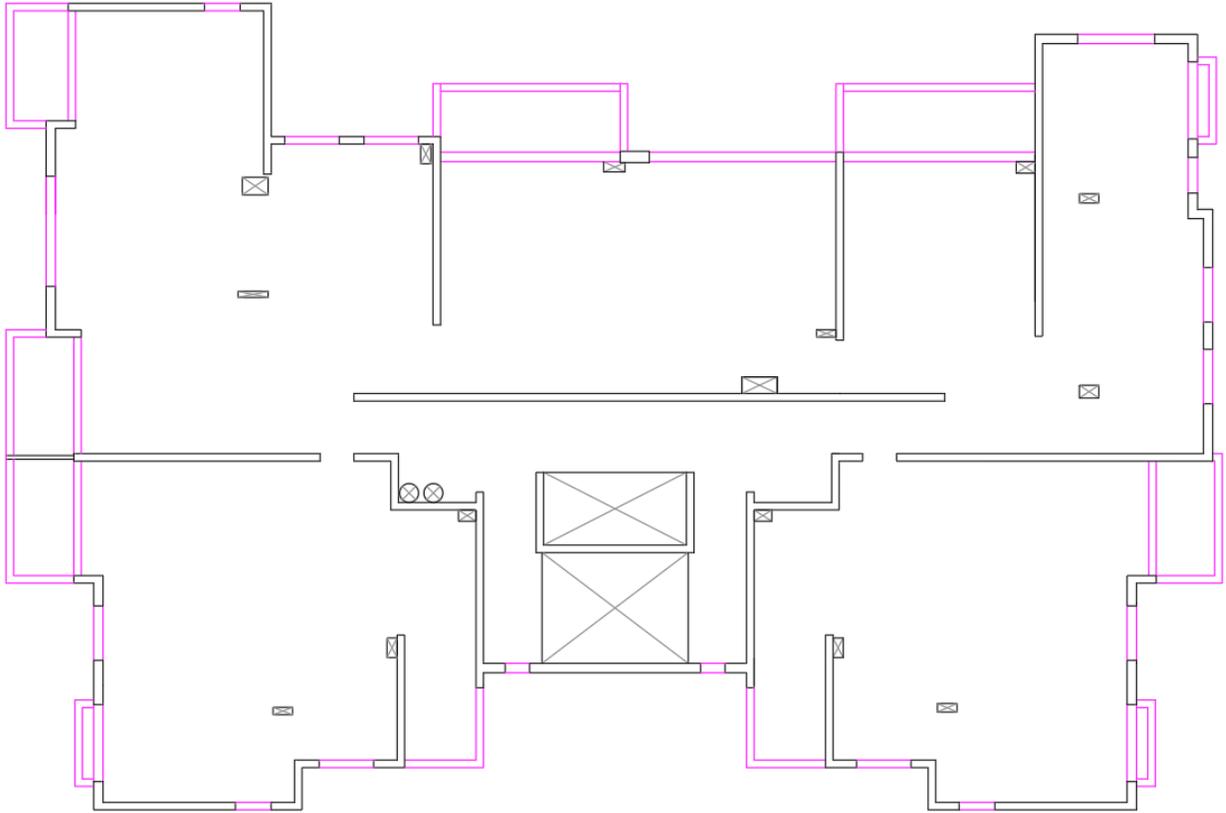


Figura 3.3: Planta tipo de los niveles 9 al 17. Figura creada a partir de planos originales.

## 3.2. Daños debido al terremoto de 2010

El día 27 de febrero del año 2010, la zona centro-sur de Chile fue azotada por un gran terremoto de magnitud 8.8 Mw cuyo epicentro fue en la costa sur de la región del Maule, a aproximadamente 6 kilómetros al oeste de la localidad de Chovellén y a 30.1 kilómetros de profundidad. La magnitud del evento telúrico fue tal que es el segundo terremoto más grande en la historia chilena (solo detrás del terremoto de Valdivia de 1960) y el sexto terremoto más grande en la historia de la humanidad.

Dada la magnitud del terremoto, hubieron numerosas estructuras con daños entre el rango de daño leve y colapso total. En esa línea, el edificio Antígona fue una de las estructuras que sufrió severos daños a su integridad consecuencia de las solicitaciones sísmicas. A grandes rasgos, presentó fallas por flexo-compresión en el primer subterráneo y primer piso y daños por corte en niveles intermedios y superiores, entre otros.

### 3.2.1. Daños por flexo-compresión

Los daños por flexo-compresión están concentrados en el sector superior derecho (noro-riente) del edificio en los niveles 2 y 3 (primer subterráneo y primer piso), con un total de 4 ubicaciones. En el primer subterráneo, los muros afectados se indican en rojo y azul en la

figura 3.4, con una imagen del daño correspondiente al muro rojo en la figura 3.5. El daño en el muro azul corresponde a un desprendimiento de recubrimiento que se muestra en la figura 3.6

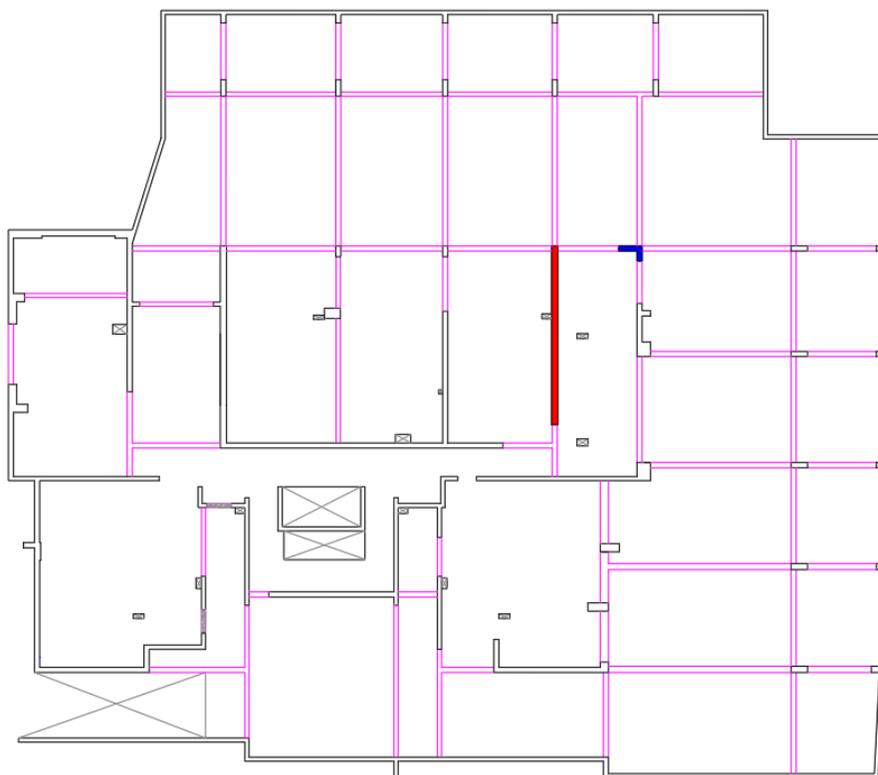


Figura 3.4: Ubicación de los muros dañados en el primer subterráneo. Figura creada a partir de planos originales.

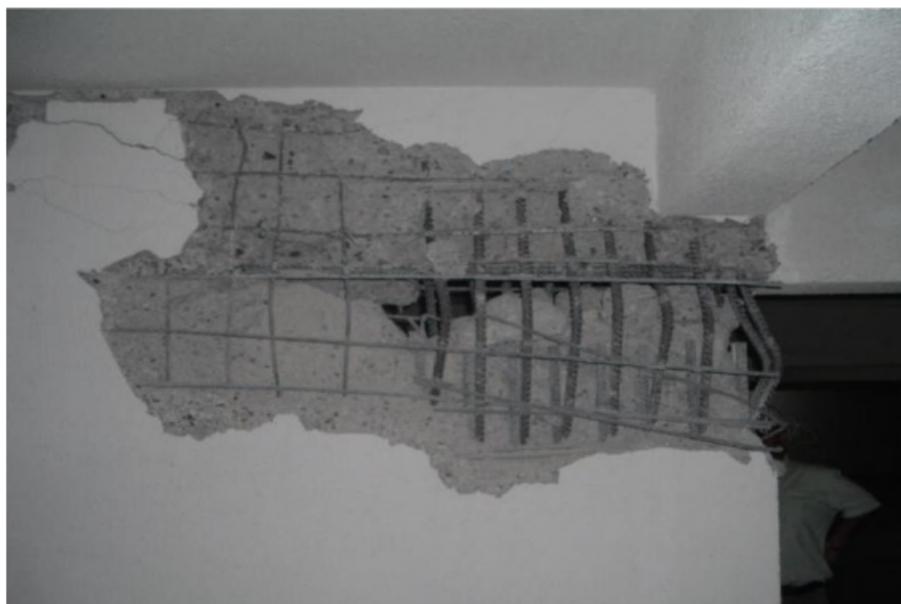


Figura 3.5: Imagen del daño sufrido por el muro marcado en rojo en el primer subterráneo (Leiva et al., 2010).



Figura 3.6: Imagen del daño sufrido por el muro marcado en azul en el primer subterráneo (Leiva et al., 2010).

En el primer piso, se tienen daños en dos ubicaciones. En la imagen 3.7 se indican estas ubicaciones en azul y rojo.

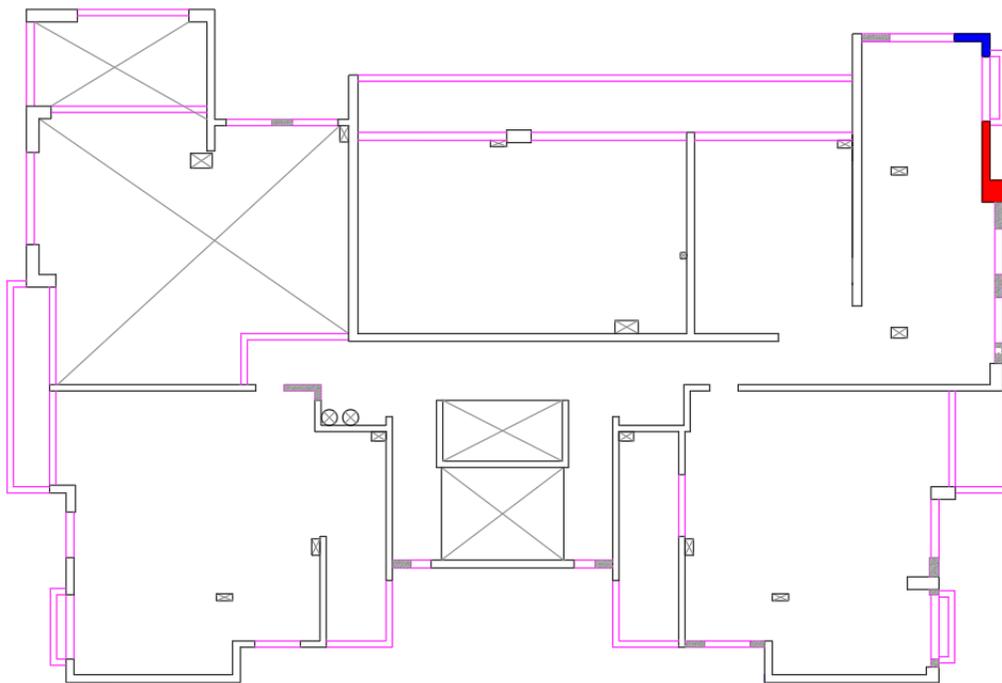


Figura 3.7: Ubicación los muros dañados en el primer piso. Figura creada a partir de planos originales.

En el sector marcado en rojo se tiene un daño severo que se muestra en la figura 3.8 mientras que en el muro marcado en azul se tiene un daño leve correspondiente a desprendimiento de revestimiento.



Figura 3.8: Imagen del daño sufrido por el muro marcado en rojo en el primer piso (Leiva et al., 2010).

### 3.2.2. Daños por corte

En la estructura hubieron dos muros que sufrieron daños debido a corte en su elevación: uno en el sector superior (fachada norte) y otro en el sector derecho (fachada oriente). En la figura 3.9 se indican estas dos ubicaciones en azul y rojo respectivamente.

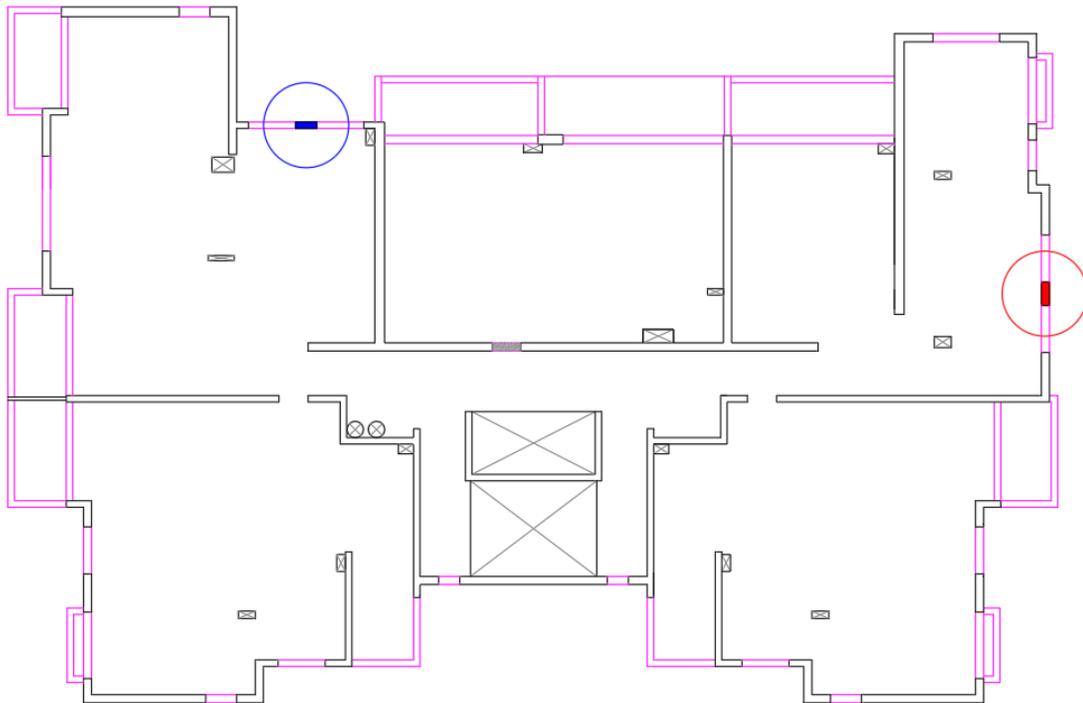


Figura 3.9: Ubicación los muros dañados por corte. Figura creada a partir de planos originales.

Estos daños se extienden a lo largo de la elevación de estos muros como se muestra en las figuras 3.10 y 3.11. Se puede observar como el daño se mueve desde desprendimiento de revestimiento hasta falla completa del elemento estructural.



Figura 3.10: Daño por corte en la fachada norte (Leiva et al., 2010).



Figura 3.11: Daño por corte en la fachada oriente (Leiva et al., 2010).

### 3.2.3. Otros daños

Además de los daños descritos anteriormente, el edificio Antígona también sufrió daños en las losas debido a un efecto de acoplamiento en el sector que se muestra en la figura 3.12.

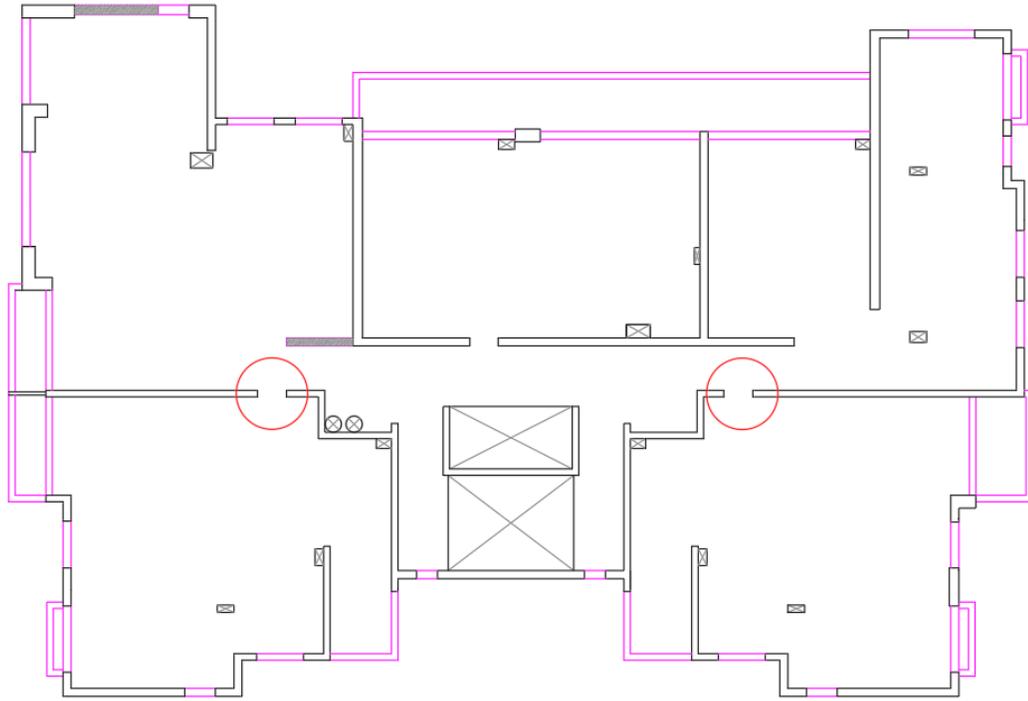


Figura 3.12: Ubicación de la zona dañada en las losas. Figura creada a partir de planos originales.

Un ejemplo de la magnitud del daño en ese sector en el primer piso se presenta en la figura 3.13



Figura 3.13: Daño en una de las losas (Leiva et al., 2010).

También la estructura tuvo un daño menor en el nivel 15 en el muro que se destaca en color rojo en la figura 3.14. El daño corresponde a un desprendimiento y agrietamiento en

la conexión del muro con una de las vigas, del cual se muestra un registro fotográfico en la figura 3.15.

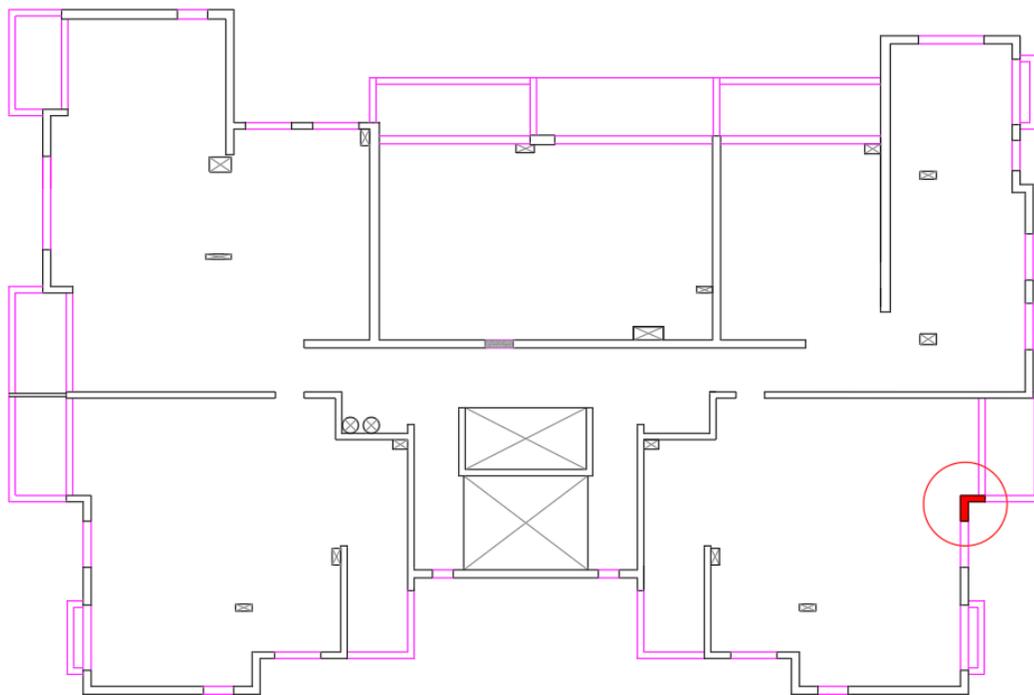


Figura 3.14: Ubicación del muro con la conexión dañada. Figura creada a partir de planos originales.



Figura 3.15: Daño en la conexión muro-viga (Leiva et al., 2010).

Para el propósito del presente estudio, el análisis se concentrará en las fallas relacionadas a flexo-compresión y corte.

### 3.3. Estudio previo

El año 2017, Betzabeth Suquillo realizó su tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería. Dentro de la investigación que llevó a cabo, hizo un estudio del desempeño sísmico del edificio Antígona mediante un análisis no lineal estático de un modelo de elementos finitos en el programa ETABS v16.0.3. Es ese modelo de elementos finitos, del que se muestra una imagen en la figura 3.16, el que sirvió como base para el presente trabajo.

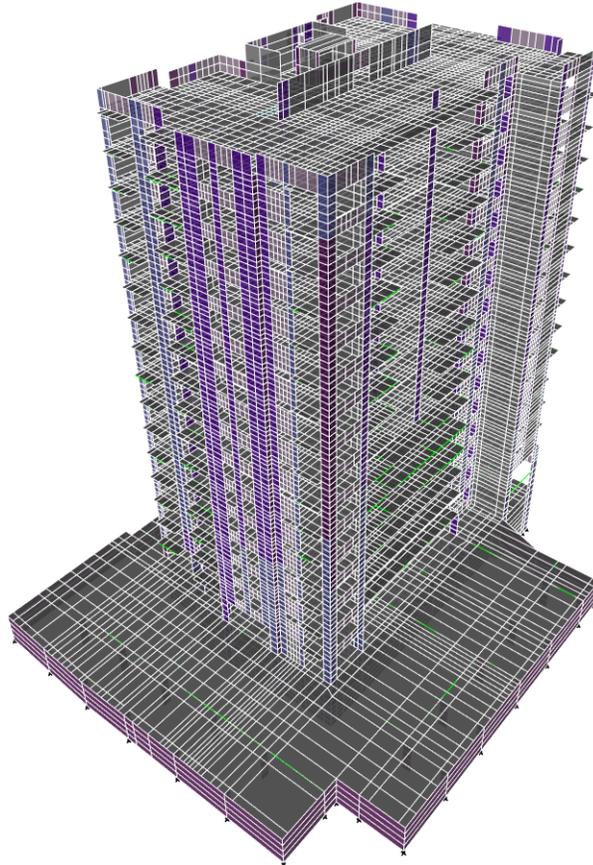


Figura 3.16: Imagen del modelo en ETABS realizado por Suquillo. Imagen extraída de uno de los archivos originales.

Además de usar el modelo como base del cuál extraer información como ubicación de muros, dimensiones, nodos, vigas, entre otras cosas (salvo modificaciones que se abordarán en el capítulo siguiente), del trabajo de Suquillo se rescatan parámetros para ser replicados, tales como:

- Parámetros de leyes constitutivas del hormigón confinado y no confinado.
- Ley constitutiva del acero de refuerzo.
- Magnitud de la demanda por desplazamiento de acuerdo al espectro de desplazamiento del sismo de 2010.

# Capítulo 4

## Modelamiento de la estructura

### 4.1. Modificaciones previas

Al modelo original de Suquillo se le realizan dos modificaciones usando el programa ETABS v16.2.1 antes de extraer la información para pasarla a OpenSees. Al establecer un eje de referencia en la planta tal que el eje  $X$  corresponde al lado longitudinal (norte-sur) y el eje  $Y$  al lado transversal (este-oeste), la primera modificación es a un muro en la dirección  $Y$  del sector superior izquierdo de la planta. El muro en cuestión junto con el sistema de referencia se muestra en la figura 4.1

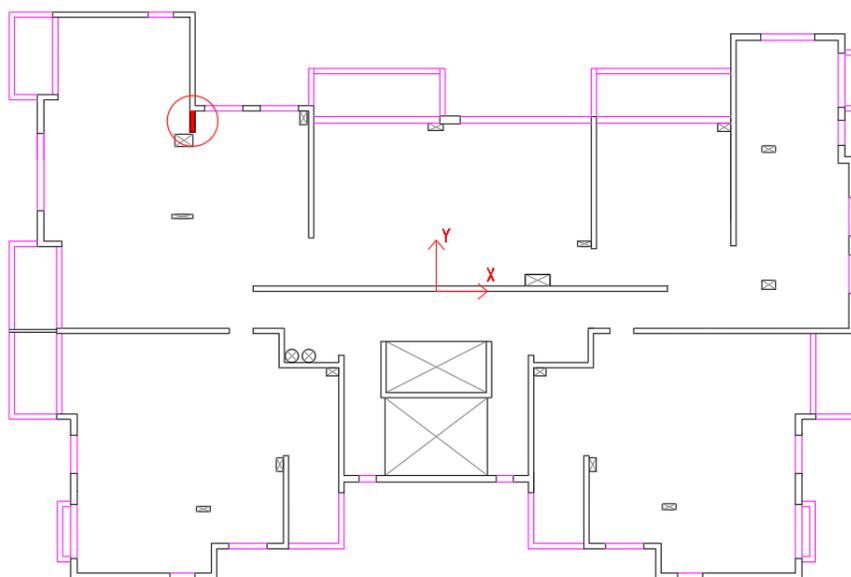


Figura 4.1: Ubicación del muro a modificar en el modelo de Suquillo. Figura creada a partir de planos originales.

Este muro está presente a lo alto de todo el edificio. Acorde a los planos originales, parte en el subterráneo 2 (nivel 1) con un largo de 413.5 centímetros el cual se mantiene en el subterráneo 1. Al pasar al primer piso (nivel 3), el muro se acorta y pasa a tener una longitud de 80 centímetros por el resto de la altura (hasta el nivel 18). Suquillo en su modelo mantiene la longitud del muro en los dos primeros niveles, pero al momento de acortarlo lo deja en 231 centímetros. En la figura 4.2 se puede apreciar cómo en el modelo de Suquillo el muro más extenso de lo que deberían. Así, la primera modificación consiste en acortar el muro al largo

dictado por los planos.

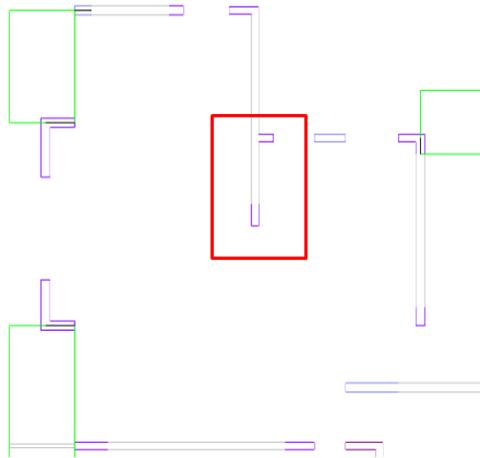


Figura 4.2: Largo del muro en el modelo de Suquillo. Imagen extraída de uno de los archivos originales.

La segunda modificación es de la misma naturaleza. Se modifica un muro orientado en la dirección X del primer subterráneo. Corresponde al extremo inferior izquierdo del muro perimetral que delimita el área de estacionamientos. El muro se destaca en rojo en la figura 4.3

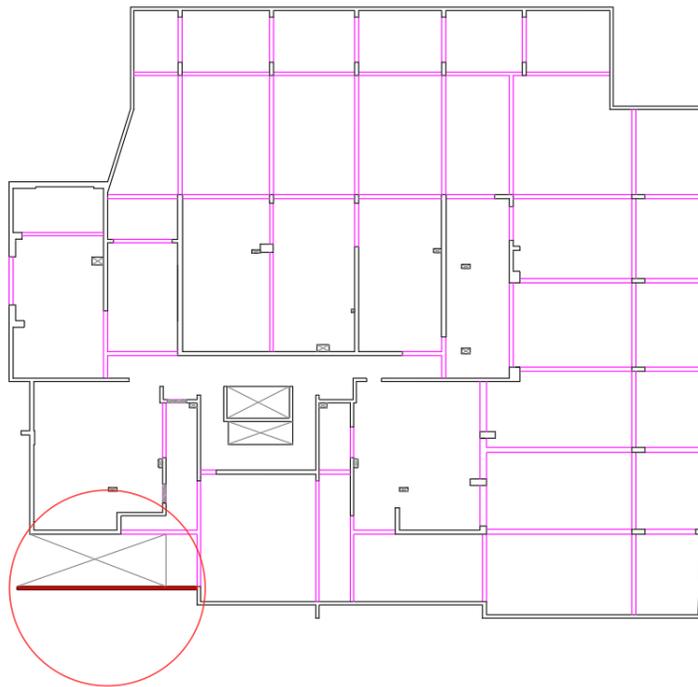


Figura 4.3: Ubicación del muro a modificar en el modelo de Suquillo. Figura creada a partir de planos originales.

El segmento marcado mide 109.44 centímetros en el plano original mientras que Suquillo lo establece en 63.9 centímetros. Así, la segunda modificación corresponde a alargar ese seg-

mento en ETABS para que coincida con la medida original.

Se estudió el impacto de estas dos modificaciones estructurales mediante un análisis modal espectral. Al hacer una comparación entre los períodos fundamentales de la estructura antes y después de las modificaciones, la cual es muestra en la tabla 4.1, se concluye que el impacto es mínimo pero se conservan las modificaciones de todas maneras pues corresponden a una situación más fidedigna del edificio real.

Tabla 4.1: Diferencia en los períodos fundamentales luego de aplicar las modificaciones.

	Período pre-modif. [s]	Período post-modif. [s]
Modo 1	0.875	0.854
Modo 2	0.690	0.675
Modo 3	0.463	0.456
Modo 4	0.232	0.279

## 4.2. Muros y vigas de acople

Con el modelo ya modificado, éste se encuentra listo para extraer los datos referentes a los elementos. En cuanto a los muros, en ETABS se tienen shells de 4 nodos por lo que adaptar a ESFI-3D es relativamente simple: se mantiene el nombre interno del muro (*tag*) y los 4 nodos que lo definen.

El elemento ESFI-3D se define en OpenSees de la siguiente manera:

Código 4.1: Definición del elemento ESFI-3D en OpenSees

```
1 element FourNodeSFI_MVLEM3D_E $Tag $Nodo3 $Nodo2 $Nodo1 $Nodo4 $mfibers $scrot  
  ↪ $poisson $tmod -thick $tw ... -width $dw ... -mat $Tag ...
```

Cada uno de los parámetros significa lo siguiente:

- \$Tag es el identificador numérico único de cada *shell* que genera internamente ETABS (y por ende no es necesario que el usuario lo cree).
- \$Nodo son cada uno de los cuatro nodos que componen el *shell*.
- \$mfibers es el número de fibras verticales en que se dividirá cada elemento y que en este trabajo se utilizará el valor de 8.
- \$scrot es la constante  $c$  que define a qué altura se concentra el giro como se mostraba en la figura 2.4.
- \$poisson es el módulo de Poisson del elemento que se establece en 0.2 para mantener el valor utilizado por Suquillo.
- \$tmod es el multiplicador del espesor de los muros (para modelar flexión fuera del plano) que se deja en 1.0.

- \$tw y \$dw son el espesor y ancho de cada fibra respectivamente. Estos datos salen de ETABS y la geometría de los nodos.
- El último \$Tag corresponde al material que se le asigna a cada fibra.

Como se puede notar, hay tantos materiales como *shells* existen (el \$Tag que aparece en el código es el mismo en ambas posiciones). La razón de aquello es que cada *shell* tiene una cuantía vertical y horizontal propia. A pesar de que lo anterior en estricto rigor no es totalmente cierto, pues existen grupos de *shells* que comparten la misma cuantía como es de esperar naturalmente, es más fácil modelar como si cada *shell* tuviera su propio material asociado.

La cuantía tanto vertical como horizontal se obtiene de los planos originales del edificio. Gracias a que Suquillo dividió el modelo de ETABS en grupos de *shells* similares entre sí, es posible dar a cada uno de estos grupos una cuantía vertical y horizontal característica, por lo que más adelante dado un *shell* sólo es necesario identificar a qué grupo corresponde y se le asignan las cuantías asociadas.

Estas cuantías se incorporan posteriormente en la definición de material que se usará en cada fibra del elemento ESFI. El material se crea como sigue:

Código 4.2: Definición del material para usar en el ESFI-3D

```
1 nDMaterial FSAM $Tag $rho$ $sX $sY $conc $ph $pv $nu $alfadow
```

Donde:

- \$Tag es el identificador que se le asigna al material y es el mismo que dicta el shell.
- \$rho es la densidad que se le asigna al material y que en este caso se utilizará 0 pues la masa se asignará manualmente más adelante.
- \$sX y \$sY son los identificadores de los materiales uniaxiales correspondientes al acero horizontal y vertical respectivamente.
- \$conc es el identificador del material uniaxial correspondiente al hormigón.
- \$ph y \$pv son la cuantía horizontal y vertical respectivamente.
- \$nu es el coeficiente de fricción del hormigón y se usará un valor de 0.35.
- \$alfadow es el coeficiente para la acción de dovela y se fija en 0.0001.

Notar que para que esté bien definido el material falta crear los materiales uniaxiales para el acero y el hormigón. Es aquí donde se usarán las leyes constitutivas indicadas por Suquillo (2017) [13]. Para el acero de refuerzo, Suquillo define una ley constitutiva en base a lo desarrollado por Menegotto y Pinto (1973) para cada diámetro de barra existente entre 8 y 25. Por simplicidad, se usará para todos los aceros la curva correspondiente a la de diámetro 16 milímetros por ser el punto medio entre 8 y 25.

La implementación en OpenSees es mediante el material *SteelMPF* que está basado en el modelo de Menegotto y Pinto extendido por Filippo en 1983. La fluencia a usar es de 359.6 MPa, el módulo de elasticidad de 200 GPa y la pendiente de endurecimiento  $b$  de 0.025. En la figura 4.4 se muestra un gráfico de la ley constitutiva en uso.

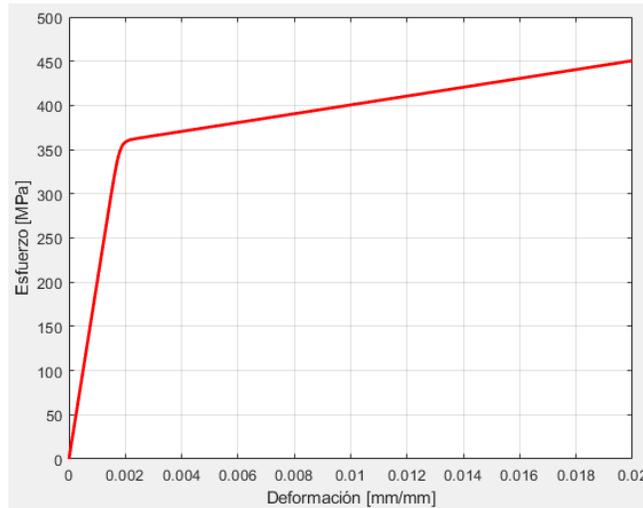


Figura 4.4: Ley constitutiva del acero que se usará en el modelo. La curva es simétrica para la otra dirección de carga.

Esta ley constitutiva se usará tanto para la cuantía horizontal como vertical. En cuanto al hormigón, se definirán dos leyes constitutivas: una para hormigón no confinado y otra para hormigón confinado. Para el hormigón no confinado se toman los parámetros definidos por Suquillo (quien usa el modelo de Mander et al. (1984)), los cuales corresponden a un máximo de compresión de 25 MPa para una deformación unitaria de 0.0025 y un valor último de 21.3 MPa para una deformación de 0.005. En cuanto a tracción, se toma también del modelo ETABS el valor máximo de -1.56 para una deformación de -0.00008, que se originan de la implementación del modelo de Belarbi y Hsu (1995) por parte de Suquillo. Estos parámetros se ingresan en OpenSees para implementar el modelo mediante el material *Concrete02*. En la figura 4.5 se muestra la ley constitutiva a usar del hormigón no confinado.

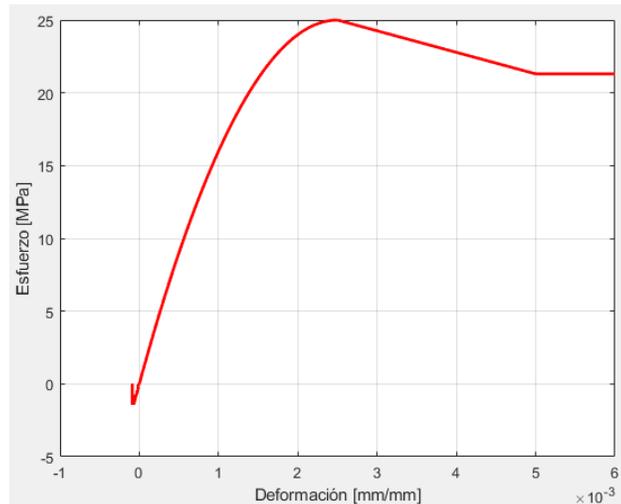


Figura 4.5: Ley constitutiva del hormigón no confinado que se usará en el modelo. Valores positivos son compresión.

Finalmente para el hormigón confinado, Suquillo realiza una base de datos de los tipos de confinamiento presentes y en base a ello define 3 niveles de confinamiento (usando el modelo de Saatcioglu y Razvi (1992)): A, B y C, donde A es el hormigón más confinado y

C el menos confinado. Por simplicidad, en este estudio se utilizará el hormigón confinado B, por representar un punto medio entre los dos extremos. Este hormigón confinado tiene un esfuerzo máximo de 29.71 MPa (en contraste con el máximo de A de 31.13 MPa y el máximo de C de 28.85 MPa) para una deformación unitaria de 0.005 y un valor último de 5.99 MPa para una deformación de 0.02836. Para la tracción se conserva el modelo descrito anteriormente para el hormigón no confinado. En la figura 4.6 se muestra la ley constitutiva a usar para el hormigón confinado.

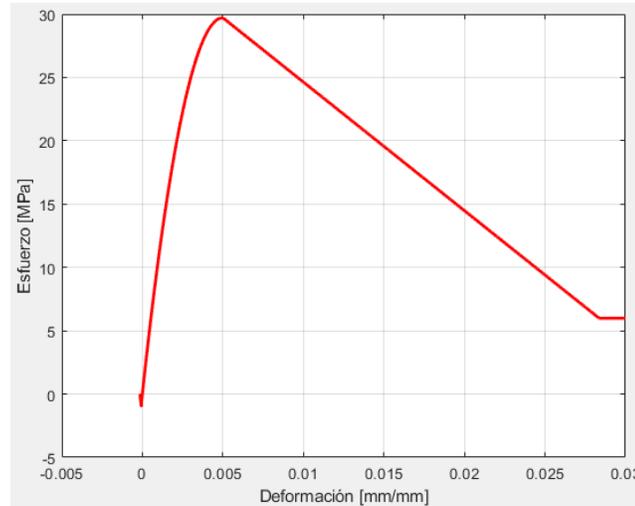


Figura 4.6: Ley constitutiva del hormigón confinado que se usará en el modelo. Valores positivos son compresión.

Con los materiales a utilizar definidos, es posible crear el material *FSAM* que se mostró más atrás. El siguiente paso es discernir si un determinado *shell* usará el hormigón confinado o no confinado, básicamente, si el *shell* en cuestión pertenece o no a un grupo de muros que está confinado o no.

Esta tarea es relativamente sencilla pues como se mencionó anteriormente, Suquillo creó grupos de muros en base a características similares dentro del edificio, y aún dentro de estos grupos, hizo la distinción entre los *shells* que pertenecen al elemento de borde y aquéllos que no. Los *shells* que no pertenecen a un elemento de borde claramente no están confinados por lo que usarán la ley constitutiva pertinente.

Por otro lado, los *shells* que sí pertenecen a un elemento de borde no necesariamente están confinados como puede observarse en la misma falla sufrida en el edificio en la figura 3.8. Para ello se reutiliza la base de datos creada anteriormente para calcular cuantías y se agrega el dato de los estribos presentes. Así, usando el modelo de hormigón confinado de Saatcioglu y Razvi (1992) se calcula el esfuerzo a compresión máximo como:

$$f'_{cc} = f'_c + k_1 k_2 f_l$$

Para establecer si el *shell* está confinado o no, se utiliza un criterio simple, el cual consiste en:

- Si  $f'_{cc}$  es mayor o igual al punto medio entre  $f'_c$  (25 MPa) y el máximo de la ley constitutiva del hormigón confinado (28.75 MPa) entonces se establece como hormigón confinado.

- En otro caso, se establece como hormigón no confinado.

Lo anterior se trabaja con un indicador binario asignado a cada *shell* que indica qué ley constitutiva de hormigón usar.

Esta conversión de *shell* a ESFI-3D no pudo lograrse en todo el edificio. Hay dos escenarios en los que se tuvo que modelar el muro de otra manera. El primer escenario es en los muros de estacionamiento, que se marcan en rojo en la figura 4.7

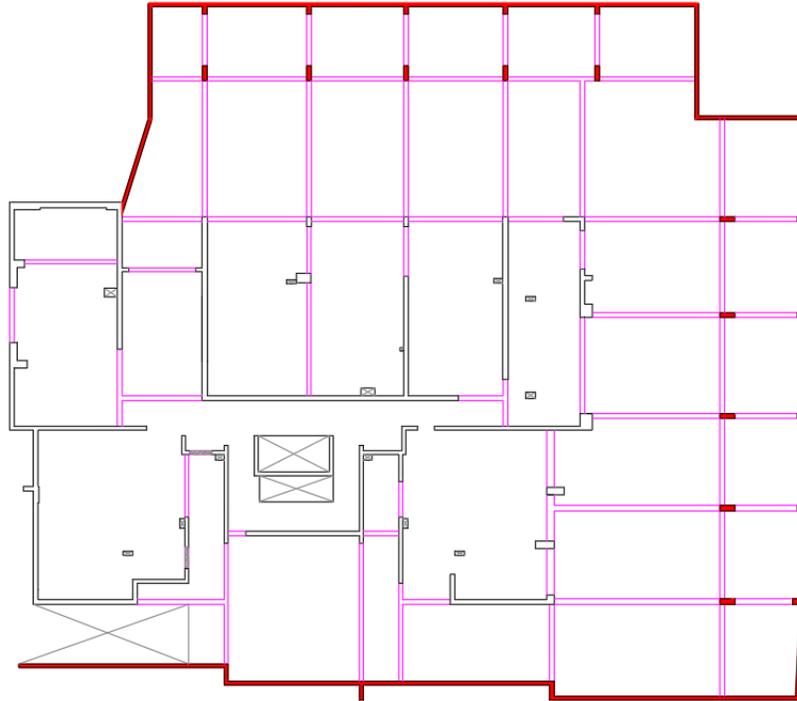


Figura 4.7: Muros del estacionamiento que no pudieron ser modelados mediante ESFI-3D. Figura creada a partir de planos originales.

Se intentó inicialmente modelar estos muros mediante el elemento ESFI-3D, pero por razones desconocidas interfería con el correcto funcionamiento del modelo. Este comportamiento se descubrió al hacer un análisis modal espectral una vez finalizado el modelo en OpenSees, el cual entregó un período fundamental en torno a los 3 segundos. Luego de hacer un análisis de potenciales causas, se encontró que eran los muros del estacionamiento los que eran responsables de este mal funcionamiento. Así, tanto como por simple como por que Suquillo tampoco los modeló de manera no lineal, estos muros se modelaron mediante *shells* lineales elásticos que proporciona la plataforma de OpenSees.

El segundo escenario corresponde a *shells* no rectangulares ubicados en la fachada sur del edificio. Esta fachada posee en cada dos pares de aberturas en desnivel. Por cada par hay en consecuencia 3 *shells* (de los 5 que hay a lo alto de un piso) que tienen forma trapezoidal. Un conjunto de estos *shells* trapezoidales se muestra en la figura 4.8 junto con las dos aberturas mencionadas.

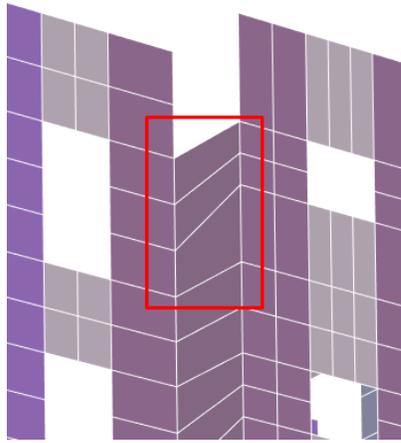


Figura 4.8: Conjunto de *shells* trapezoidales junto con las aberturas en desnivel que los generaron.

El elemento ESFI-3D requiere geometría exclusivamente rectangular o cuadrada pues en caso contrario no es capaz de crear el elemento. En vez de reajustar la geometría estos *shells* (lo cual hubiera impactado en gran manera la geometría de los *shells* adyacentes y por ende del edificio completo), se optó por modelarlos de manera lineal elástica, esperando que al ser solamente 6 por piso y en una fachada que no recibió daños no generaran un impacto dañino significativo en el modelamiento.

Se utilizó en el modelamiento el elemento *ShellMITC4* de OpenSees. Este elemento es un cuadrilátero al igual que el ESFI-3D pero admite formas geométricas trapezoidales. Para crearlo se requiere de una sección (*PlateFiber*) y a la vez esta sección se modela con un material elástico isotrópico. En total se necesitan tres parámetros: el espesor  $t$ , el módulo de elasticidad  $E$  y módulo de Poisson  $\nu$ . El espesor resulta ser 25 centímetros para todos los muros problemáticos mientras que el módulo de elasticidad se extrae el modelo en ETABS como 23437.89 MPa y el módulo de Poisson ya se estableció previamente con un valor de 0.2. El código de la implementación se muestra a continuación:

Código 4.3: Definición del elemento ESFI-3D en OpenSees

```

1 nDMaterial ElasticIsotropic $matTag $E $v;
2 section PlateFiber $secTag $matTag $t;
3 element ShellMITC4 $eleTag $Nodo1 $Nodo2 $Nodo3 $Nodo4 $secTag;

```

En lo que refiere a las vigas de acople, Suquillo las modela como *shell* en su modelo de ETABS por lo que en OpenSees quedarán definidas mediante elementos ESFI-3D. La transición es análoga a lo que se hizo con los muros, con el detalle de que estos elementos no se confinan (se toman todos como hormigón no confinado). Además, por ser vigas sus fibras deben orientarse de manera horizontal (a diferencia de los muros que tienen sus fibras orientadas de manera vertical).

Para lograr este cambio de orientación, se incorpora un nuevo indicador binario a cada *shell*, el cual indica si es un muro o una viga de acople. Como se puede deducir de la figura 2.5, el nodo inicial se encuentra en la esquina inferior izquierda del cuadrilátero (y posee los

primeros 6 GDL). A partir de ahí, el orden de los nodos en el código debe seguir un orden antihorario y el elemento quedará con sus fibras verticales. Si en vez de eso se inicia desde la esquina superior izquierda (manteniendo el orden antihorario), el elemento quedará con sus fibras horizontales y a esto es lo que apunta el indicador binario: ayudar a saber cuál es el nodo inicial en el orden antihorario de éstos.

Teniendo esta distinción, tanto muros como vigas de acople quedan completamente definidas en su transición de ETABS a OpenSees.

### 4.3. Vigas

El modelamiento de las vigas que presenta el edificio se realizan mediante elementos lineales elásticos de dos nodos. La razón de esto es que se juzga que las vigas no juegan un rol lo suficientemente significativo para aumentar la complejidad del modelo usando elementos no lineales. Las vigas presentes en general se concentran en los primeros dos subterráneos (donde no están presentes en gran número) y en los balcones. Sus dimensiones son diversas y poseen anchos que van desde los 15 a los 40 centímetros y alturas que van de 30 a 185 centímetros.

En OpenSees las vigas se modelarán usando el elemento *elasticBeamColumn*. Este elemento requiere de ciertos parámetros geométricos y estructurales de la viga:

- Área, constante de torsión e inercias: estos son parámetros geométricos y se importan fácilmente desde ETABS.
- Módulo de elasticidad  $G$  y módulo de corte  $G$ : el módulo de elasticidad se estableció previamente en 23437.89 y el módulo de corte se extrae de ETABS, siendo su valor 9765.69 MPa. Estos valores son los asociados al hormigón elástico definido por Suquillo.

En el sector de estacionamientos existen vigas no prismáticas, cuya altura es variable a lo largo del elemento. Como ese efecto no se puede capturar con el elemento en OpenSees, se toma de manera conservadora como un elemento de altura constante igual a la menor altura que alcance.

### 4.4. Masa

El modelo original facilitado por Suquillo naturalmente incluye la losa de hormigón armado en cada piso con su respectiva discretización en elementos finitos. Como se verá más adelante, en este trabajo no se modelará la losa mediante elementos finitos, por lo que esos elementos con sus nodos asociados es necesario eliminarlos del modelo para hacer una transición limpia entre plataformas. Sin embargo, al eliminar las losas y nodos, se elimina también su masa del modelo.

No es posible exportar la masa de ETABS antes de remover las losas pues indicaría masa asignada en nodos que posteriormente no existen (como nodos en “vacío” donde antes iban conectados a un elemento finito de losa). Para resolver esto se realiza lo siguiente: se toma el modelo sin losa y se le extrae su masa por nodos tal como lo asigna ETABS internamente.

Luego, para incorporar la masa de losa y sobrecargas, se hace un cálculo manual con las áreas por piso y se distribuye en los nodos a nivel de losa correspondientes.

De los planos originales se tiene que todos los niveles tienen un espesor de losa de 18 centímetros salvo el correspondiente al subterráneo 2 (nivel 1), el cual tiene una losa de 15 centímetros de espesor. Para el cálculo de peso se considerará una densidad del hormigón armado de 24 kN/m<sup>3</sup> al igual que el material creado en ETABS.

En cuanto a sobrecargas de uso, se replicarán las usadas por Suquillo, basadas en la norma NCh 1537 y los informes de rehabilitación estructural. En la tabla 4.2 se muestran los valores a utilizar. La combinación entre cargas muertas y vivas a usar es  $1.0D + 0.25L$ .

Tabla 4.2: Resumen sobrecargas de uso.

	Zona	Valor [kgf/m <sup>2</sup> ]
Cargas vivas	Estacionamientos	500
	Departamentos y pasillos	200
	Balcones	250
Cargas muertas	Tabiquería	100
	Sobrelosa	100

Para repartir el peso y sobrecargas en los nodos, se dividirá cada planta en sectores equitativos, con tal de no crear efectos no deseados al distribuir uniforme en todos los nodos. En la figura 4.9 se muestra cómo una planta tipo se divide en 6 sectores. A cada sector se le calcula su área y con ello se calcula la respectiva masa correspondiente tanto al peso propio como a la sobrecarga y posteriormente se distribuye uniformemente en todos los nodos que conforman el sector. Notar que los balcones no pertenecen a ningún sector, pues éstos se calculan de manera independiente como si fueran su propio sector.

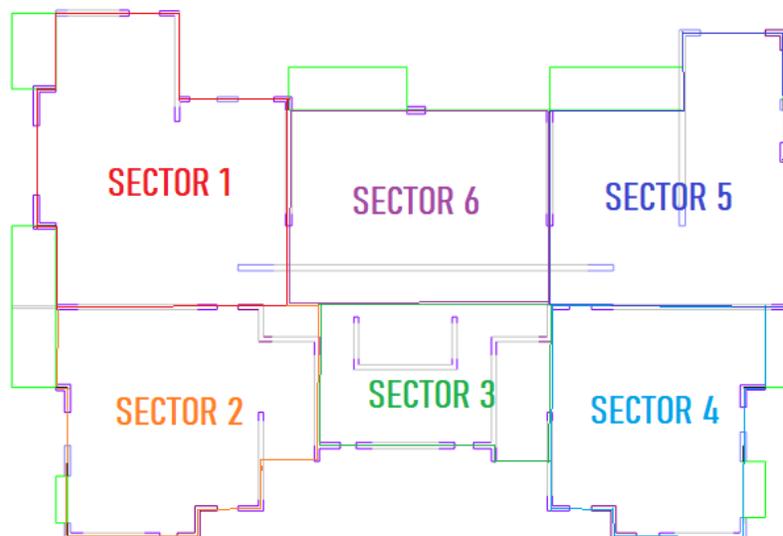


Figura 4.9: División de planta en sectores para cálculo de áreas y masa.

La metodología se replica en cada uno de los niveles y una vez terminado se obtiene un

peso sísmico 11754.93 tonf sobre un área total de 10784.04 m<sup>2</sup>, resultando en un peso sísmico por unidad de área de 1.09 tonf/m<sup>2</sup>.

## 4.5. Losas

Como se mencionó anteriormente, el modelo a confeccionar en OpenSees no incluirá las losas mediante un modelo de elementos finitos. Para simular su efecto se incluirá su masa como se describió en la sección anterior, se aplicará un diafragma rígido en cada nivel y el efecto de acoplamiento se logrará mediante vigas de acople siguiendo la metodología de Massone et al. (2021) [11] mencionada en la sección 2.2.

Las vigas de acople a implementar deben ser cortas y predominantemente orientadas en la dirección flexible (en este caso, la dirección Y o dirección norte-sur). En la figura B.7 se pueden observar en color negro las vigas (no a escala) colocadas en la planta tipo de los pisos 7 al 15. El resto de las vigas se muestran en el anexo B.

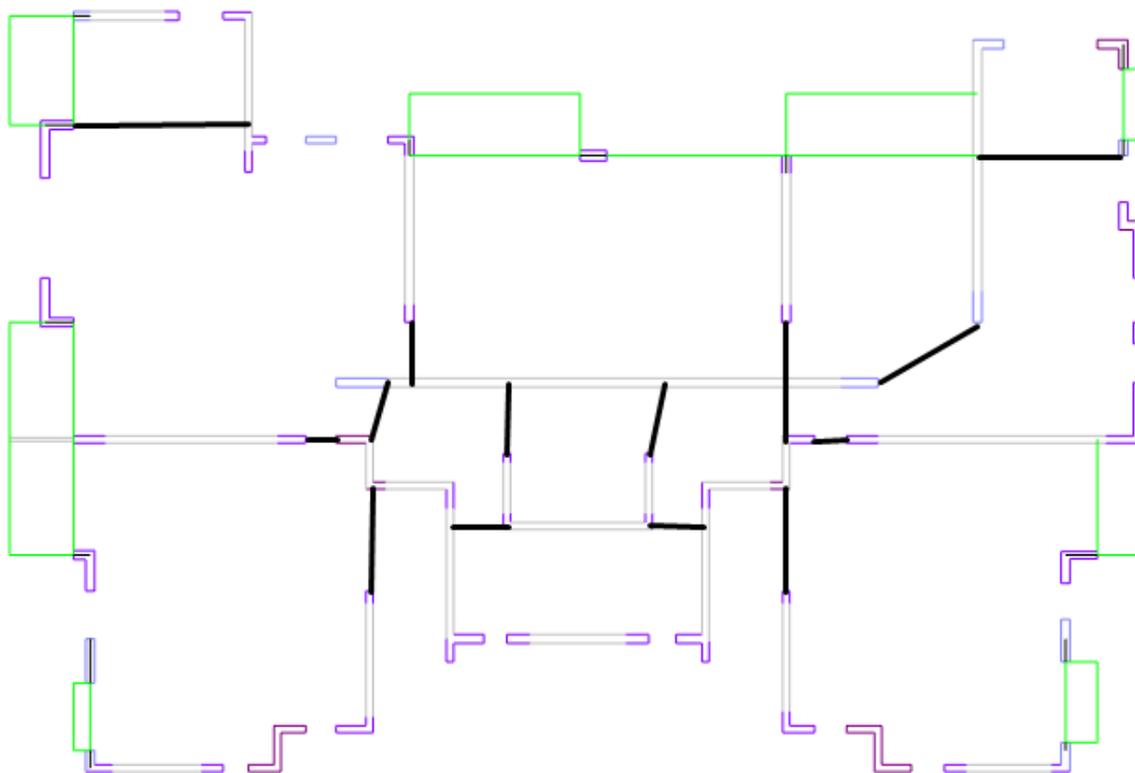


Figura 4.10: Vigas de acople implementadas en una planta tipo.

La geometría de estas vigas es tal que todas tienen una altura igual al espesor de la losa en el piso correspondiente (15 centímetros en el primer subterráneo y 18 en el resto) y un ancho igual a doce veces ese espesor. Además, a diferencia de las vigas tradicionales implementadas anteriormente, estas sí son de naturaleza no lineal. Para capturar esta no linealidad se usa el elemento *forceBeamColumn* de OpenSees.

Este elemento de dos nodos se implementa de la siguiente manera:

Código 4.4: Definición del elemento *forceBeamColumn* en OpenSees

```
1 element forceBeamColumn $eleTag $Nodo1 $Nodo2 $transfTag "IntegrationType arg1 arg2 ...
   ↪ "
```

Como se puede observar, el elemento requiere a modo de input un tipo de integración. El elemento admite varios tipos de integración del tipo plasticidad distribuida o rótula plástica. En este caso, se usará un tipo de integración de la familia de rótula plástica: *Modified Radau Hinge Integration (MRHI)*. En esta familia de tipos de integración se indica el largo de la rótula plástica para cada uno de los extremos y la sección de elemento que queda en medio permanece lineal elástica.

Así, el elemento se implementa como:

Código 4.5: Definición del elemento *forceBeamColumn* con MRHI en OpenSees

```
1 element forceBeamColumn $eleTag $Nodo1 $Nodo2 $transfTag "HingeRadau $secTag1 $Lp1
   ↪ $secTag2 $Lp2 $secTag3"
```

Debe indicarse la sección en un extremo junto con el largo de rótula plástica, la sección en el otro extremo junto al largo de rótula plástica y la sección que se usará para el resto del elemento que queda en medio. Para el largo de rótula plástica se usará 2 veces el espesor de la losa, mientras que para el material se usará un material uniaxial elástico bilineal que simule la curva momento-curvatura de la viga. Sin embargo, el elemento requiere de una sección y no de un material, por lo que se creará una sección que sólo considere la dirección deseada mediante el comando *Aggregator*:

Código 4.6: Adición de secciones en OpenSees

```
1 section Aggregator $secTag $matTag1 P $matTag2 Mz $matTag3 Vy $matTag4 My
   ↪ $matTag5 Vz $matTag6 T;
```

Este comando lo que hace es crear una sección combinando materiales en cada una de las 6 direcciones que puede tener una viga (asociadas al esfuerzo correspondiente). Así, se creará el material elástico bilineal para la dirección Mz (se estableció previamente en el modelo que este es el eje local correspondiente a la flexión que se busca modelar) mientras que para el resto de direcciones se usará un material elástico de baja rigidez.

Código 4.7: Creación del material elástico bilineal y del material elástico en OpenSees

```
1 uniaxialMaterial Elastic $matTag1 0.01; # Material de baja rigidez para otras direcciones
2 uniaxialMaterial ElasticBilin $matTag2 $E1 $E2 $eps2; # Material para momento-curvatura
```

Como se puede ver, el material elástico bilineal requiere de 3 parámetros:

- $E1$ : La pendiente inicial de la curva.
- $eps2$ : Deformación a la cual hay un cambio de pendiente.
- $E2$ : Pendiente de la curva después de  $eps2$ .

Esos tres parámetros se calcularán usando la teoría conocida de vigas de hormigón armado. En una curva de momento-curvatura simple, el comportamiento es lineal elástico hasta que se alcanza la deformación de fluencia  $\phi_y$  con un momento de fluencia  $M_y$  asociado y la pendiente inicial se puede calcular como

$$E1 = \frac{M_y}{\phi_y}$$

Luego, es posible calcular la segunda pendiente calculando el momento nominal  $M_n$  y la deformación a la que ocurre  $\phi_n$ , dando una expresión para  $E2$  como sigue:

$$E2 = \frac{M_n - M_y}{\phi_n - \phi_y}$$

Las cuatro variables  $M_y$ ,  $M_n$ ,  $\phi_y$  y  $\phi_n$  son calculables de manera relativamente simple. Para las dos variables asociadas a la fluencia, primero se calcula la profundidad de la línea neutra  $x$  para ese estado mediante la siguiente ecuación cuadrática:

$$E_c \cdot \epsilon_y \cdot \frac{x}{d-x} \cdot b \cdot \frac{x}{2} = A_s \cdot f_y$$

Donde

- $E_c$  es el módulo de elasticidad del hormigón, que se toma como 23437.89 MPa igual que como se hizo en los muros.
- $\epsilon_y$  es la deformación de fluencia del acero que se establece en 0.0021.
- $d$  es la profundidad del centroide del grupo de barras de refuerzo y se estima en 130 milímetros para las vigas del subterráneo 2 y en 160 centímetros para el resto (altura de la viga menos 20 milímetros) ya que los planos indican un recubrimiento de 15 milímetros para las losas.
- $b$  es el ancho de las vigas que ya fue establecido previamente.
- $A_s$  es al área de la armadura.
- $f_y$  es el esfuerzo de fluencia de las barras. Aquí se usará 344.5 MPa o 348.3 MPa, que corresponden a la fluencia de las barras de diámetro 8 y 10 milímetros respectivamente calculada por Suquillo.

Resolviendo para  $x$  se puede posteriormente calcular  $\phi_y$  y  $M_y$  como sigue:

$$\phi_y = \frac{\epsilon_y}{d-x}$$

$$M_y = A_s f_y \left( d - \frac{x}{3} \right)$$

En cuanto al estado de capacidad nominal, primero se estima el ancho del bloque de hormigón a compresión  $a$ :

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b}$$

Donde  $f'_c$  es la resistencia a compresión del hormigón a compresión (25 MPa). Con  $a$  se calcula la profundidad de la línea neutra así como también  $M_n$ :

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{a}{0.85}$$

$$M_n = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right)$$

Y con la profundidad de la línea neutra se calcula  $\phi_n$ :

$$\phi_n = \frac{\epsilon_c}{c}$$

Donde  $\epsilon_c$  es la deformación última del hormigón que se toma como 0.003. En las figuras 4.11 y 4.12 se muestran las curvas obtenidas luego de calcular todos los parámetros para las vigas de alto 15 y 18 centímetros respectivamente.

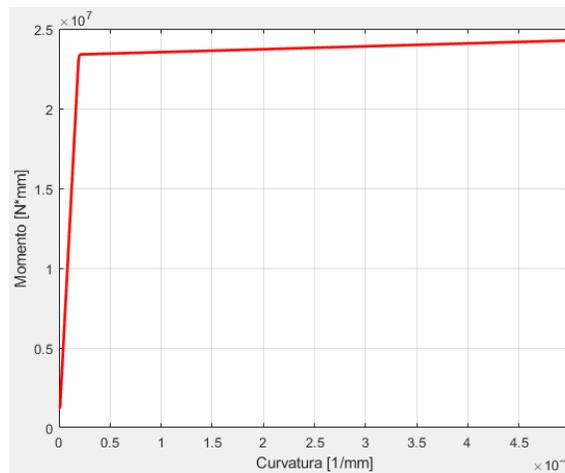


Figura 4.11: Curva momento-curvatura para las vigas de acople de alto 15 centímetros.

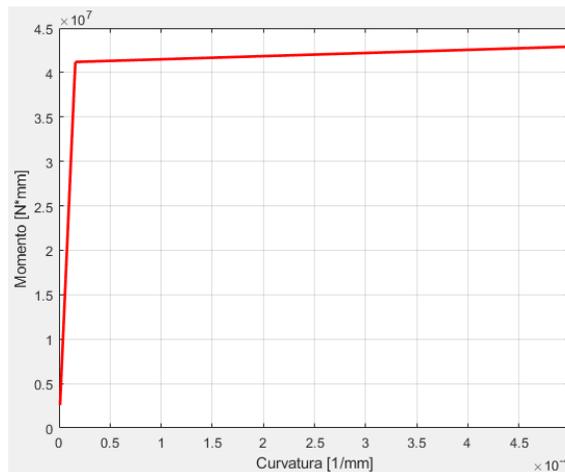


Figura 4.12: Curva momento-curvatura para las vigas de acople de alto 18 centímetros.

Lo que falta por determinar es la cantidad de armadura que tienen las vigas de acople. Para evitar complejizar el modelo, las vigas de acople se dividirán en dos grupos: las que se coloquen en el nivel 1 y las que se coloquen en el resto del edificio.

Para las que se usarán en el nivel 1 (aquellas de altura 15 centímetros), se considerará que tienen armadura distribuida tanto en la parte superior como inferior de la sección igual a barras de 8 milímetros de diámetro cada 16 centímetros, mientras que para el resto del edificio (que usará vigas de 18 centímetros de alto) se considerará una armadura distribuida superior e inferior igual a barras de 10 milímetros de diámetro cada 20 centímetros. La elección de estos valores se basa en que acorde a los planos originales de las losas, estas son las armaduras que predominan en la mayoría de los sectores donde se ubicarán las vigas de acople.

## 4.6. Restricciones

Como último detalle del modelo, en los nodos que corresponden a la base del edificio así como aquellos en la base de los muros del estacionamiento se aplican restricciones de tipo apoyo simple, es decir, se restringe desplazamiento en las 3 direcciones traslacionales pero se permite el giro.

Con las restricciones instauradas finaliza el modelamiento de la estructura. En la figura 4.13 se presenta un renderizado del modelo final con los elementos ESFI-3D. El programa de renderizado reconoce los elementos ESFI-3D como elementos de línea por lo que es difícil distinguir las vigas (también elementos de línea).

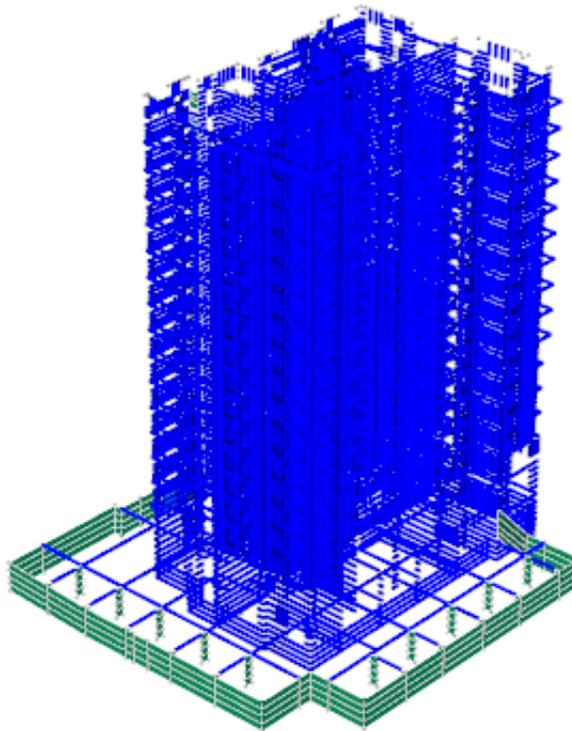


Figura 4.13: Renderizado del modelo completado en OpenSees.

# Capítulo 5

## Metodología generalizada de modelamiento

Como se puede deducir del capítulo anterior, no hay ningún paso en el modelamiento del edificio Antígona que impida realizar lo mismo en otra estructura, por lo que el presente capítulo apunta a generalizar el proceso de modelamiento con el propósito de generar modelos en ESFI-3D de otros edificios en el futuro. A lo largo del capítulo se incluirán fragmentos del código que genera el modelo del edificio Antígona a modo de guía, y el código completo se adjuntará en el anexo C.

El punto inicial es recomendable que sea un modelo confeccionado en ETABS o algún otro programa similar del que se pueda posteriormente extraer información de nodos y elementos estructurales. El modelo dentro del software comercial naturalmente no posee requisitos universales en cuanto a la discretización de los elementos, salvo por la geometría que se debe mantener rectangular o cuadrada, por lo que ese aspecto queda a decisión del usuario.

Con el modelo confeccionado se procede a importar la información de nodos y elementos. Lo primero que se debe importar son los nodos para que más adelante los elementos queden bien definidos en torno a éstos. En un archivo CSV (*Comma-Separated Values*) se ordena por columnas *tag* del nodo, coordenada en *X*, coordenada en *Y* y coordenada en *Z*. Teniendo el archivo CSV de los nodos con esos 4 datos se importa a OpenSees mediante los siguientes comandos:

Código 5.1: Importación y creación de los nodos

```
1 # Abrir archivo
2
3 set inputFile "Nodos/NodosFinal.csv" # Definir ubicación del archivo de los nodos
4 set fileId [open $inputFile r]
5
6 # Leer datos del archivo
7
8 while {[gets $fileId line] >= 0} {
9
10     # Separar la línea en valores individuales
11
12     set values [split $line ","]; # El separador es punto-coma
```

```

13
14 # Extraer la info correspondiente a los nodos
15
16 set NodeLabel [lindex $values 0]; # Primera columna es el label
17 set X         [lindex $values 1]; # Segunda columna es coordenada X
18 set Y         [lindex $values 2]; # Tercera columna es coordenada Y
19 set Z         [lindex $values 3]; # Cuarta columna es coordenada Z
20
21 # Crear los nodos
22
23 node $NodeLabel $X $Y $Z;
24 }
25 # Cerrar el archivo
26 close $fileId

```

Con los nodos creados en OpenSees, es posible ahora crear las restricciones que algunos puedan tener. En el caso del edificio Antígona sólo era necesario crear las condiciones de apoyo en la base y en los muros del estacionamiento, sumado a que todos esos nodos tenían la misma condición de apoyo simple. En otras estructuras, puede que sea necesario separar en nodos que pertenezcan a cierta restricción u otra, pero el código sigue siendo análogo.

En un archivo CSV se inserta el indicador (*tag*) de los nodos a restringir. Como ya se mencionó anteriormente, debido a que todos los nodos en este modelo tienen la misma restricción, el archivo CSV no necesita más información, pero en caso de que hayan condiciones más diversas es posible incorporar una columna con un indicador del tipo de restricción que tiene cada nodo (por ejemplo, 0 si es apoyo simple o 1 si es empotrado) y posteriormente implementar en OpenSees una rutina con condicionales para leer ese indicador.

Código 5.2: Importación y aplicación de las restricciones en nodos

```

1 # Abrir archivo
2
3 set inputFile "Restricciones/RestriccionesFinal.csv" # Definir ubicación del archivo con las
   ↳ restricciones
4 set fileId [open $inputFile r]
5
6 # Leer datos del archivo
7
8 while {[gets $fileId line] >= 0} {
9
10 # Separar la línea en valores individuales
11
12 set values [split $line ","]; # El separador es punto-coma
13
14 # Extraer la info correspondiente a los nodos
15
16 set NodeLabel [lindex $values 0]; # Primera columna es el label
17
18 # Restringir el nodo
19
20 fix $NodeLabel 1 1 1 0 0 0; # Apoyo simple

```

```

21 }
22 # Cerrar el archivo
23 close $fileId

```

El siguiente paso (aunque no es obligatorio seguir este orden en específico) es incorporar los muros. Si se planea usar ESFI-3D en el modelo, antes de importar los archivos de los muros se deben crear los materiales con las leyes constitutivas a usar en el material de hormigón armado. En particular para el edificio Antígona sólo se necesitan 3 materiales: hormigón confinado, hormigón no confinado y acero. Sin embargo, en otro modelo puede que sea necesario incorporar más variedad de hormigones o aceros.

Los materiales, en esta versión de ESFI-3D, solo pueden ser modelados en OpenSees como *Concrete02* y *SteelMPF*. Con los materiales creados es posible pasar a la creación de muros. En caso de que el modelo requiera el uso de *shells* lineales elásticos como lo era en este caso, debe crearse la (o las) secciones tipo *PlateFiber* para usar el elemento *ShellMITC4*. Es posible incluso usar otro elemento. Recordar que la sección *PlateFiber* requiere de un espesor y un material elástico isotrópico de dos variables: módulo de elasticidad y módulo de Poisson, por lo que esos parámetros deben estar definidos previamente.

Código 5.3: Creación de la sección lineal elástica necesaria para el elemento *ShellMITC4*

```

1 # Geometría y hormigón elástico
2
3 set t 250.0;      # Espesor
4 set E 23437.89;  # [N/mm2] Módulo Elasticidad del modelo ETABS para hormigón elástico
5 set v 0.2;       # [-] Módulo Poisson del hormigón elástico
6
7 nDMaterial ElasticIsotropic 1000000000 $E $v;    # Creación del material elástico
8 section PlateFiber 1 1000000000 $t;             # Creación de la sección
9
10 # Tag del material es 1000000000 para evitar repetir el número de los demás materiales (los
    ↪ asociados al tag de los muros).

```

Como último paso antes de empezar a importar los muros, hay que definir los parámetros asociados al elemento ESFI-3D: número de fibras, constante  $c$ , modificador del espesor y módulo de Poisson, así como las constantes para el material *FSAM* de hormigón armado  $\nu$  (coeficiente de fricción del hormigón) y  $\alpha_{dow}$  (coeficiente de acción de dovela). El valor a usar para la constante  $c$  (definición en la figura 2.4) es 0.4 mientras que para  $\nu$  y  $\alpha_{dow}$  se asigna un valor de 0.35 y 0.0001 respectivamente. El resto de los valores queda a juicio del usuario.

Código 5.4: Creación de la sección lineal elástica necesaria para el elemento *ShellMITC4*

```

1 # Parametros ESFI
2
3 set mfibers 8;      # Número de fibras a usar
4 set fibras 8.0;    # Variable auxiliar para calcular ancho de fibra más adelante
5 set crot 0.4;      # Constante c
6 set tmod 1.0;      # Modificador del espesor
7 set poisson 0.2;   # Módulo de Poisson

```

```

8
9 # FSAM nD Reinforced Concrete Materials
10
11 set nu 0.35;
12 set alfadow 0.0001;

```

Ahora sí es posible importar los archivos CSV de los muros. Estos archivos CSV, en el caso de usar ETABS, necesitan como mínimo 10 variables:

- Identificador numérico (*tag*) único del *shell* junto con los 4 nodos que lo definen.
- Espesor y ancho del *shell*.
- Cuantía vertical y horizontal del *shell*.
- Un indicador del orden de los nodos.

Esta última variable relacionada con el orden de los nodos viene de que el elemento ESFI-3D requiere específicamente que se defina recorriendo sus nodos desde la esquina inferior izquierda en sentido antihorario, como muestra la figura 2.5. ETABS por su parte no entrega los nodos siguiendo ese orden en específico.

Afortunadamente pareciera ser que ETABS entrega el orden de los nodos solamente de dos maneras: en sentido horario empezando en la esquina inferior izquierda, o en sentido horario empezando en la esquina inferior derecha. La manera de distribuir internamente ETABS qué *shell* lleva una u otra orientación no fue descubierta durante el desarrollo de este trabajo y es un patrón aparentemente aleatorio. La manera más simple de abordar este problema es trabajar con un algoritmo en una planilla de cálculo como sigue:

1. Se toman las coordenadas  $X$  e  $Y$  del segundo y tercer nodo que indique el orden de ETABS. Por ejemplo, si ETABS indica que el *shell* 15 tiene como conexión los nodos 100, 101, 102 y 103, se trabajará con los nodos 101 y 102.
2. Se calcula la diferencia entre coordenadas  $X$  y coordenadas  $Y$ . Lo que hace esto es básicamente revisar si estos nodos están en el mismo punto del plano (solo que a distinta altura) o en distintas posiciones en el plano.
3. Si alguna de las dos diferencias es mayor a 0, significa que están en puntos distintos del plano. Eso significa que si o si el orden que le dio ETABS al *shell* fue el de sentido horario empezando por la esquina inferior izquierda. En este caso, si el orden que da ETABS es Nodo1, Nodo2, Nodo3, Nodo4, entonces se ingresa a OpenSees como Nodo1, Nodo4, Nodo3, Nodo2.
4. Si ambas diferencias son 0, los nodos sólo difieren en altura por lo que necesariamente el *shell* debe estar ordenado en sentido horario empezando desde la esquina inferior derecha. Aquí si el orden que da ETABS es Nodo1, Nodo2, Nodo3, Nodo4, entonces se debe ingresar en OpenSees como Nodo2, Nodo1, Nodo4, Nodo3.

El algoritmo descrito se puede resumir en la figura 5.1 que se muestra a continuación:

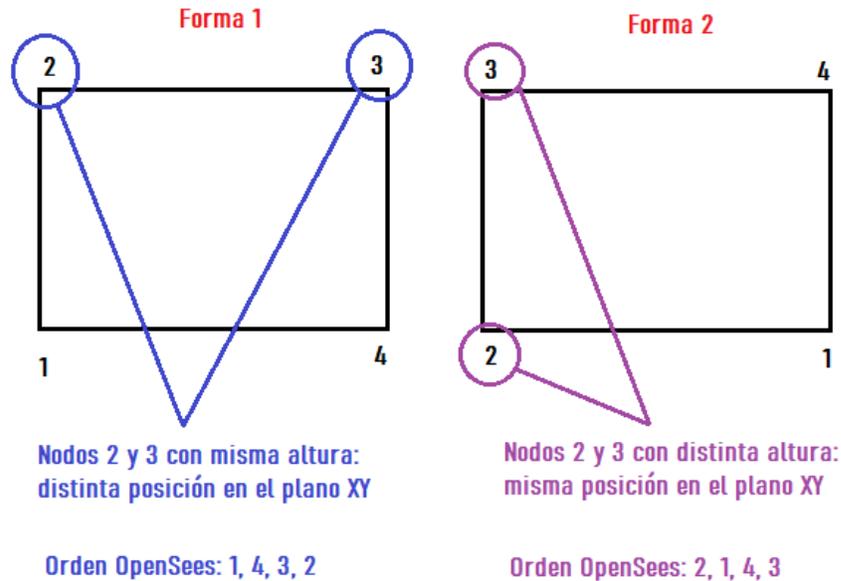


Figura 5.1: Resumen del algoritmo usado para definir el orden de los nodos.

Los pasos 3 y 4 se pueden resumir en entregar una variable binaria a cada *shell* que indique a qué grupo corresponde. Las otras dos variables que podrían ser necesarias en un modelo son los indicadores binarios de elemento de borde y los indicadores binarios de vigas de acople. Los primeros permiten discernir si un *shell* pertenece o no a un elemento de borde para asignar la ley constitutiva de hormigón correspondiente y los segundos se usan en caso de que las vigas de acople hayan sido modeladas como *shell* como en el caso del modelo confeccionado por Suquillo. La razón de por qué incorporar un indicador de vigas de acople tiene que ver nuevamente con el orden de nodos que requiere el ESFI-3D y cómo las vigas necesitan que sus fibras estén de manera horizontal, aspecto que ya fue discutido en la sección 4.2.

Una vez ordenado el archivo de los muros con cada una de las variables a usar, el código de importación es similar a lo hecho anteriormente con los nodos y restricciones como se puede ver a continuación:

Código 5.5: Importación de la información de los muros y creación de éstos.

```

1  # Abrir archivo
2
3  set inputFile "Muros/MurosP1.csv" # Definir ubicación del archivo de los muros
4  set fileId [open $inputFile r]
5
6  # Leer datos del archivo
7
8  while {[gets $fileId line] >= 0} {
9
10     # Separar la línea en valores individuales
11
12     set values [split $line ";"];    # El separador es punto-coma
13
14     # Extraer la info correspondiente a los nodos y nombre del elemento
15

```

```

16 set Tag [lindex $values 0]; # Primera columna es el label
17 set Nodo1 [lindex $values 1]; # Segunda columna es el primer nodo
18 set Nodo2 [lindex $values 2]; # Tercera columna es el segundo nodo
19 set Nodo3 [lindex $values 3]; # Cuarta columna es el tercer nodo
20 set Nodo4 [lindex $values 4]; # Quinta columna es el cuarto nodo
21 set tw [lindex $values 5]; # Sexta columna es el espesor
22 set pv [lindex $values 6]; # Séptima columna es la cuantía vertical
23 set ph [lindex $values 7]; # Octava columna es la cuantía horizontal
24 set indicadorEB [lindex $values 8]; # Novena columna es indicador si el elemento se
    ↪ confina o no
25 set L [lindex $values 9]; # Décima columna es el largo del elemento
26 set indicador [lindex $values 10]; # Undécima columna es el indicador de orientación
27 set indicadorAcop [lindex $values 12]; # Duodécima columna es el indicador de viga de
    ↪ acople
28
29 set dw [expr $L/$fibras]; # Cálculo del ancho de cada fibra
30
31 if {$indicadorEB == 1} {nDMaterial FSAM $Tag 0.0 301 301 202 $ph $pv $nu $alfadow}
    ↪ else {
32 nDMaterial FSAM $Tag 0.0 301 301 201 $ph $pv $nu $alfadow} # Aplicación del hormigó
    ↪ n confinado o no confinado dependiendo del indicador de elemento de borde
33
34 # Crear el elemento
35
36 if {$indicador == 0} {
37     if {$indicadorAcop == 0} {element FourNodeSFI_MVLEM3D_E $Tag $Nodo2
    ↪ $Nodo1 $Nodo4 $Nodo3 $mfibers $scrot $spoisson $tmod -thick $tw $tw $tw $tw $tw
    ↪ $tw $tw $tw -width $dw $dw $dw $dw $dw $dw $dw $dw -mat $Tag $Tag $Tag $Tag
    ↪ $Tag $Tag $Tag $Tag}
38     .
39     .
40     . # Los condicionales hacen este fragmento bastante largo. Revisar anexo C para có
    ↪ digo completo.
41 }
42 }
43 # Cerrar el archivo
44 close $fileId

```

Se puede notar por la segunda línea del código que este fragmento corresponde solo a los muros del nivel 1. No existe obligación de replicar la metodología de ir piso por piso ya que para este trabajo en particular se siguió esa ruta sólo por la precaución de identificar en qué piso ocurría un error en caso de aparecer.

Además, el código anterior es bastante específico al elemento ESFI-3D. En caso de realizar un modelo con otro tipo de elemento, se tiene que estudiar de antemano cuáles son los parámetros que se requieren y cuáles no (por ejemplo, si se usara el elemento MVLEM-3D, éste no requiere de cuantía horizontal mientras que al mismo tiempo requiere un material de corte). El hecho de que distintos elementos requieran distintos parámetros dificulta el proceso de reemplazo pero sigue siendo una tarea fácilmente automatizable.

El siguiente elemento a importar son las vigas. Éstas, a diferencia de los muros, no requieren de tantas variables. Son necesarias:

- Identificador numérico (*tag*) único de la viga junto a los 2 nodos que la definen.
- Área de la sección.
- Constante de torsión de la sección.
- Inercias en torno a los ejes que viven en el plano de la sección.

También es necesario el módulo de elasticidad y el módulo de corte, pero como esas dos variables son globales para todas las vigas, se definen por fuera. La creación de las vigas se realiza como sigue:

Código 5.6: Importación de la información de las vigas y creación de éstas.

```

1 set E 23437.89; # [N/mm2] Módulo de elasticidad
2 set G 9765.79; # [N/mm2] Módulo de corte
3
4 # Transformation
5
6 geomTransf Linear 1 1 1 0; # La elección del vector (1,1,0) asegura que los ejes locales de
   ↪ cada sección son los ejes Y y Z, con Y el eje vertical.
7
8 # Abrir archivo
9
10 set inputFile "Vigas/VigasFinalv2.csv" # Definir ubicación del archivo de las vigas
11 set fileId [open $inputFile r]
12
13 # Leer datos
14
15 while {[gets $fileId line] >= 0} {
16
17     # Separar la línea en valores individuales}
18
19     set values [split $line ";"]; # El separador es punto-coma
20
21     # Extraer la info correspondiente a los nodos y nombre del elemento
22
23     set Tag [lindex $values 0]; # Primera columna es el primer nodo
24     set Nodo1 [lindex $values 1]; # Segunda columna es el segundo nodo
25     set Nodo2 [lindex $values 2]; # Tercera columna es el tercer nodo
26     set A [lindex $values 3]; # Cuarta columna es el área
27     set J [lindex $values 4]; # Quinta columna es la constante de torsión
28     set Iy [lindex $values 5]; # Sexta columna es la inercia en Y
29     set Iz [lindex $values 6]; # Séptima columna es la inercia en Z
30     set TagViga [expr 100000+$Tag]; # Nuevo tag de la viga. Se hace para no interferir
   ↪ con los tags ya creados en los elementos de muros.
31     element elasticBeamColumn $TagViga $Nodo1 $Nodo2 $A $E $G $J $Iy $Iz 1
32 }
33 # Cerrar el archivo
34 close $fileId

```

Junto con las vigas, se procede también con las vigas encargadas de modelar el acoplamiento de las losas. Como se discutió en el capítulo previo, éstas requieren de una ley constitutiva (curva momento curvatura) en vez de parámetros como el área o la inercia (aunque estos parámetros juegan un rol implícito en la curva).

Para la ley constitutiva hay varios parámetros que dependen del caso que se esté estudiando, como se pudo apreciar en el capítulo anterior. A grandes rasgos los aspectos más importantes son la armadura que tiene cada viga, fluencia del acero y geometría de la viga. Otro aspecto crucial es la ubicación de las vigas. A modo de recuerdo, se vuelve a mencionar que idealmente deben ser elementos cortos y priorizando la dirección más flexible y las zonas más importantes como el centro (en el caso de un edificio tradicional de muros).

Una manera de abordar el modelamiento de la no linealidad de las vigas fue expuesta en el capítulo anterior, aunque es importante recalcar que no es la única manera y que en OpenSees hay diversas maneras de realizarlo, por ejemplo, mediante el uso de otros elementos disponibles en la plataforma.

El siguiente paso es colocar un diafragma rígido. Este paso puede ser delicado en ciertas estructuras, ya que OpenSees trae incorporado un comando de diafragma rígido, pero no hay nada relacionado con diafragmas semi-rígidos. En caso de enfrentarse a una estructura que requiera de una restricción de ese estilo, el modelamiento debe cambiar de manera acorde.

Para el diafragma la sintaxis es relativamente sencilla. Las dos cosas necesarias son un nodo auxiliar que indique la posición del centro de masa y los nodos de la planta que estén a nivel de losa. Se define el nodo, se indica la dirección perpendicular al plano de acción (en este caso 3, correspondiente al eje Z global) junto a la lista de nodos y se restringen los GDL del nodo auxiliar asociados a la altura y giros en X e Y, como se puede ver a continuación:

Código 5.7: Creación del diafragma rígido de un nivel.

```
1 node 10000002 18610 17100 5450;           # Centro de masa
2 rigidDiaphragm 3 10000002 15645 4 8 10 11 ... ; # Son más nodos pero se acortó para ser
   ↪ mostrado en el documento
3 fix 10000002 0 0 1 1 1 0;           # Restringir Z, RX y RY del nodo auxiliar
```

Finalmente se asigna la masa a los nodos. En caso de usar ETABS, es posible usar la función *Assembled Joint Masses* que indica cómo el programa internamente asignó masa a los nodos. Importar esa información está íntimamente ligado con lo realizado con los nodos, por lo que podrían combinarse los dos archivos en uno solo y optimizar el código.

Un aspecto de cuidado sería el tema de losas y sobrecargas. En el capítulo anterior se describió la solución utilizada, pero el problema puede abordarse de distintas maneras (más división en sectores o división ponderada entre nodos). La implementación de las masas una vez listas es como sigue:

Código 5.8: Importación y asignación de la masa en los nodos.

```
1 # Abrir archivo
2
3 set inputFile "MasaLosav2/MasaFinalv3.csv" # Definir ubicación del archivo de la masa
```

```

4 set fileId [open $inputFile r]
5
6 # Leer datos
7
8 while {[gets $fileId line] >= 0} {
9
10     # Separar la línea en valores individuales
11
12     set values [split $line ";"];    # El separador es punto-coma
13
14     # Extraer la info correspondiente a los nodos y nombre del elemento
15
16     set Nodo      [lindex $values 0];  # Primera columna es nodo
17     set mx        [lindex $values 1];  # Segunda columna es la masa traslacional en X
18     set my        [lindex $values 2];  # Tercera columna es la masa traslacional en Y
19     mass $Nodo    [expr $mx] [expr $my] 0.0 0.0 0.0 0.0; # Asignación de masa
20 }
21 # Cerrar el archivo
22 close $fileId

```

Ya con las masas asignadas, lo siguiente que se puede hacer en caso de necesitarlo, es la asignación de cargas gravitacionales (necesarias para un análisis *pushover* o un análisis dinámico por ejemplo). Es necesario definir el valor de la aceleración de gravedad (en unidades consistentes). Con ello se calcula el peso multiplicando masa por aceleración y se aplica la carga haciendo uso del comando *load*.

La aceleración de gravedad se puede definir por fuera, y dentro del código que importa y asigna masa se pueden agregar dos líneas para aplicar la carga gravitacional:

Código 5.9: Importación y asignación de la masa en los nodos.

```

1 .
2 .
3 .
4 set Nodo      [lindex $values 0];  # Primera columna es nodo
5 set mx        [lindex $values 1];  # Segunda columna es la masa traslacional en X
6 set my        [lindex $values 2];  # Tercera columna es la masa traslacional en Y
7 set W         [expr -$mx*$g];      # Cálculo de peso. Tanto mx como my son iguales así
8     ↪ que es irrelevante cuál usar
9 mass $Nodo    [expr $mx] [expr $my] 0.0 0.0 0.0 0.0; # Asignación de masa
10 load $Nodo    0.0 0.0 $W 0.0 0.0 0.0; # Asignación del peso en la dirección Z
11 }
12 # Cerrar el archivo
13 close $fileId

```

Con eso finaliza la fase de modelamiento, ya que lo asociado a los códigos de análisis depende netamente de lo que desee realizar el usuario con el modelo y bajo qué parámetros.

# Capítulo 6

## Resultados y discusión

### 6.1. Análisis modal espectral

Como primer estudio, se realiza un análisis modal espectral del modelo a modo de usarlo para discernir si el modelo está funcionando correctamente o no. En la tabla 6.1 se muestran los valores obtenidos para los cuatro primeros períodos y su comparación con el modelo base de Suquillo e ETABS.

Tabla 6.1: Comparación de los 4 primeros períodos entre OpenSees y ETABS.

	Período en OpenSees [s]	Período en ETABS [s]	Variación c/r a ETABS
Modo 1	0.849	0.854	-0.59 %
Modo 2	0.678	0.675	+0.44 %
Modo 3	0.408	0.456	-10.53 %
Modo 4	0.221	0.279	-20.79 %

Se observa una diferencia despreciable para los dos primeros modos y diferencias considerables para los dos siguientes, siendo el cuarto modo el más afectado. Sin embargo, la tabla anterior está comparando modelo no lineal contra modelo no lineal, y estos dos modelos en particular no son aptos para un análisis modal espectral representativo.

La razón principal de lo anterior es la ley constitutiva del hormigón confinado: al aumentar la deformación para el esfuerzo máximo (aumentó de 0.0025 a 0.005) cambia la pendiente inicial de la curva y eso puede tener efectos no deseados en la rigidez inicial que usa internamente el programa para calcular los períodos.

Teniendo eso en mente, se modifica la ley constitutiva del hormigón confinado para que tenga la misma pendiente inicial que el hormigón no confinado. Luego, se realiza un análisis modal espectral y se compara con los resultados del modelo en ETABS pero modificado al reemplazar todos los elementos por su análogo lineal elástico, como se presenta en la tabla 6.2.

Tabla 6.2: Comparación de los 4 primeros períodos entre OpenSees (modificado) y ETABS (modificado).

	Período en OpenSees [s]	Período en ETABS [s]	Variación c/r a ETABS
Modo 1	0.786	0.810	-2.96 %
Modo 2	0.639	0.651	-1.84 %
Modo 3	0.389	0.443	-12.19 %
Modo 4	0.204	0.226	-9.73 %

Esta vez para los primeros dos modos aumenta la diferencia pero sigue estando en un rango aceptable, mientras que para los dos siguientes hay diferencias de mayor magnitud pero sin caer en un espectro intolerable. Las diferencias pueden ser fácilmente atribuibles a, por ejemplo, el cómo se asignó la masa en el modelo de OpenSees. Recordar que en el caso de la losa y sobrecarga (correspondiente a la mayoría de la masa del edificio), ésta se asignó siguiendo una metodología relativamente simple. Otro aspecto que podría influir es el criterio usado para asignar leyes constitutivas de hormigón, o el mismo hecho de simplificar el problema a usar 2 leyes constitutivas en vez de 4.

Cabría esperar que realizar un modelo más minucioso y realista en los aspectos previamente mencionados se estabilizarían los resultados, pero aún así, el modelo actualmente presenta un estado satisfactorio para seguir con los análisis. En particular, algo relevante para los análisis siguientes, es que los períodos siguen prácticamente la misma estructura que aquellos indicados por Suquillo.

Debido a la razón anterior es que se opta por realizar el análisis estático con el mismo desplazamiento objetivo que calculó Suquillo (15.5 centímetros). Aquel desplazamiento fue calculado primero simulando un estado de losas cargadas (reduciendo su rigidez a flexión) y evaluando el período correspondiente a la dirección flexible en el espectro de desplazamiento, como se observa en la figura 6.1. Ya que el período asociado a la dirección flexible corresponde al segundo modo, el cual según las tablas anteriores tiene un error bastante bajo, se considera apropiado usar el mismo valor de desplazamiento para los análisis.

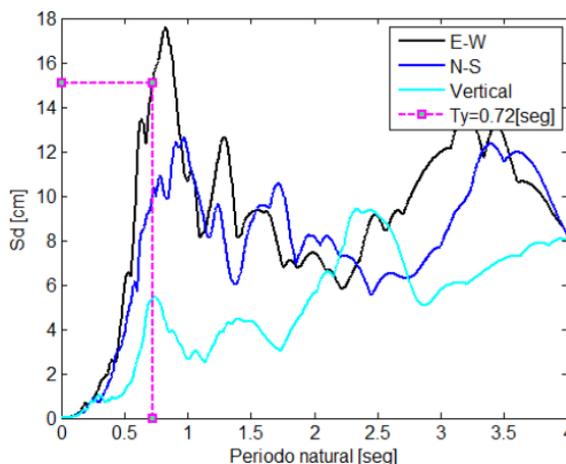


Figura 6.1: Espectro de desplazamiento y obtención del desplazamiento objetivo (Suquillo, 2017).

El desplazamiento objetivo se impone por separado (4 análisis en total) en los dos ejes principales del edificio y en ambas direcciones, que se denominan  $X^+$ ,  $X^-$ ,  $Y^+$  e  $Y^-$  siguiendo el mismo sistema de referencia de la figura 4.1. La carga lateral se aplica en todos los nodos a nivel de losa desde el nivel 2 hasta el 18 en un patrón triangular invertido.

## 6.2. Carga lateral versus desplazamiento de techo

Al registrar el corte basal de la estructura junto con el desplazamiento de techo, se obtienen las curvas de capacidad para cada dirección que se muestran en la figura 6.2

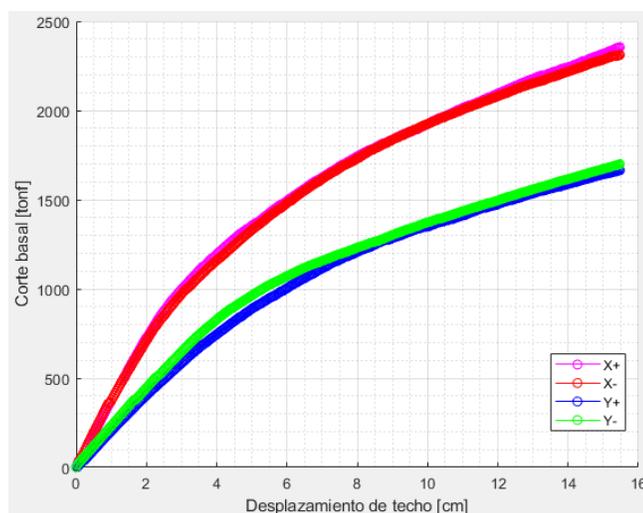


Figura 6.2: Curva de capacidad obtenida del modelo.

A modo de referencia, en la figura 6.3 se muestran las curvas obtenidas por Suquillo en su trabajo.

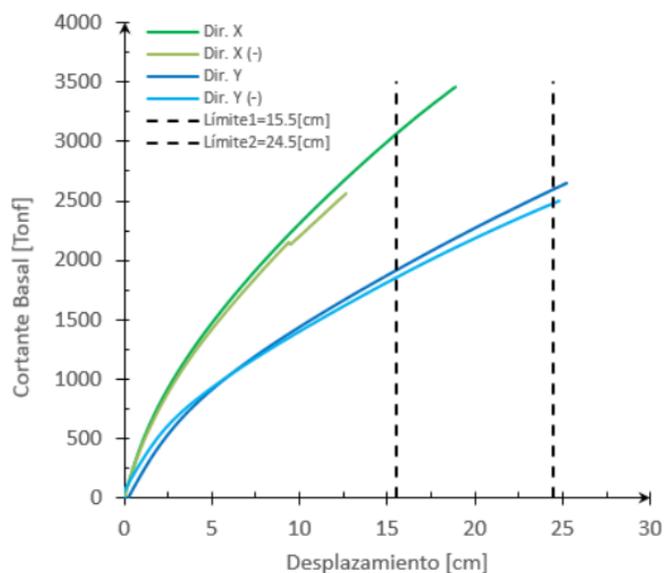


Figura 6.3: Curva de capacidad obtenida del modelo de Suquillo, considerando hormigón confinado en todos los elementos de borde (Suquillo, 2017).

Es posible apreciar que en principio los valores son sumamente similares (hasta aproximadamente los 5 centímetros para la dirección  $X$  y 10 centímetros para la dirección  $Y$ ), sin embargo, las curvas del modelo ESFI-3D a partir de esos puntos decaen de manera más rápida, lo que puede explicarse en el hecho de que el modelo no tiene todos sus elementos de borde confinados a diferencia del modelo que usó Suquillo para obtener sus curvas.

### 6.3. Deformaciones unitarias axiales en planta

Para cada uno de los 4 análisis realizados, se obtuvieron las deformaciones unitarias axiales a nivel de planta (del primer elemento finito en altura, en ambas fibras extremas) para los primeros 3 niveles: ambos subterráneos y primer piso, las que se muestran en las figuras 6.4 a 6.9 (sectores dañados marcados en rojo). Valores positivos son tracciones y negativos compresiones.

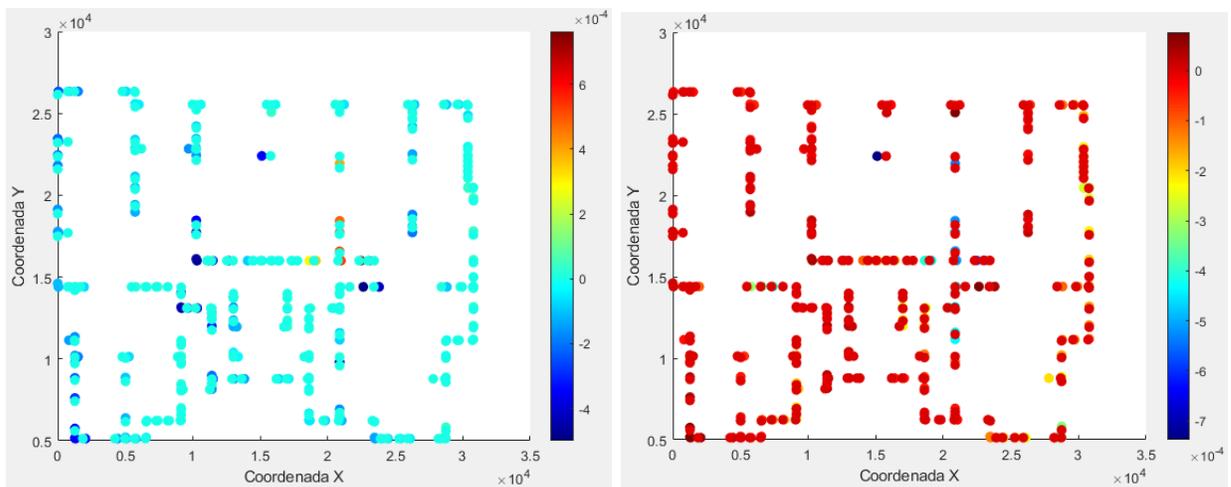


Figura 6.4: Deformaciones unitarias axiales en planta para el subterráneo 2 en dirección  $X-$  (izquierda) y  $X+$  (derecha).

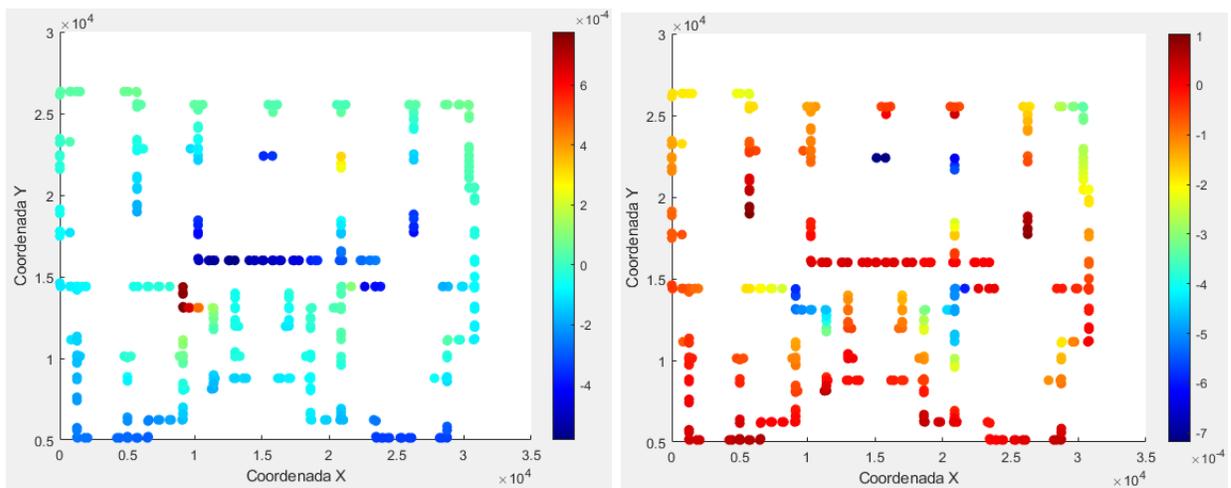


Figura 6.5: Deformaciones unitarias axiales en planta para el subterráneo 2 en dirección  $Y-$  (izquierda) y  $Y+$  (derecha).

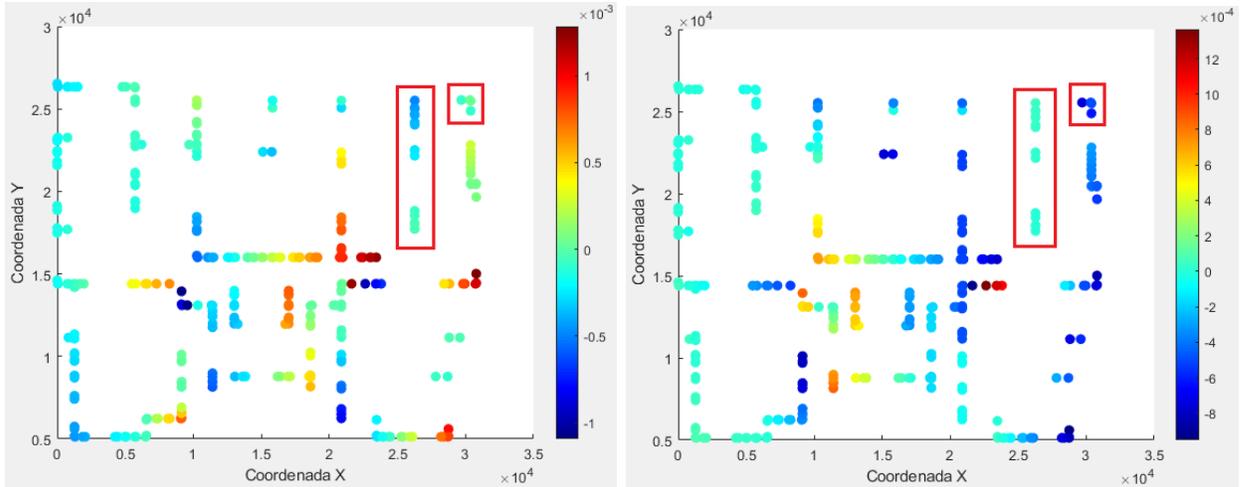


Figura 6.6: Deformaciones unitarias axiales en planta para el subterráneo 1 en dirección  $X-$  (izquierda) y  $X+$  (derecha).

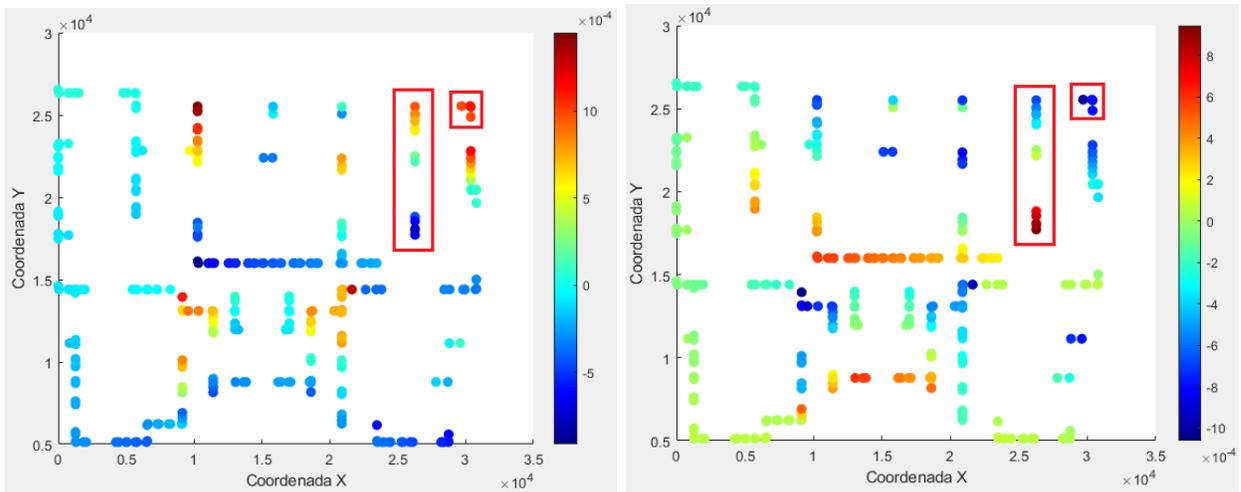


Figura 6.7: Deformaciones unitarias axiales en planta para el subterráneo 1 en dirección  $Y-$  (izquierda) y  $Y+$  (derecha).

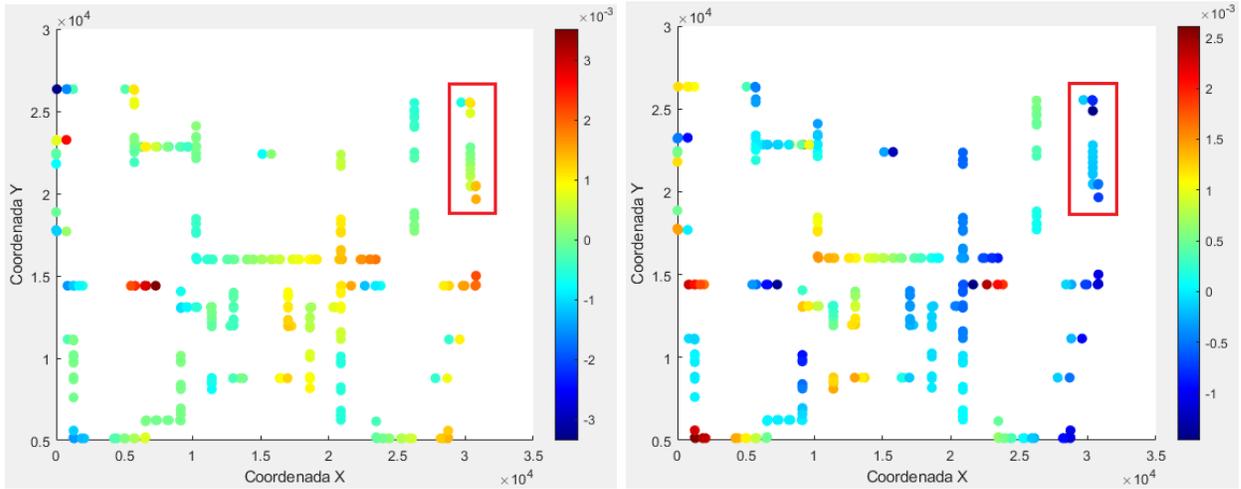


Figura 6.8: Deformaciones unitarias axiales en planta para el piso 1 en dirección  $X-$  (izquierda) y  $X+$  (derecha).

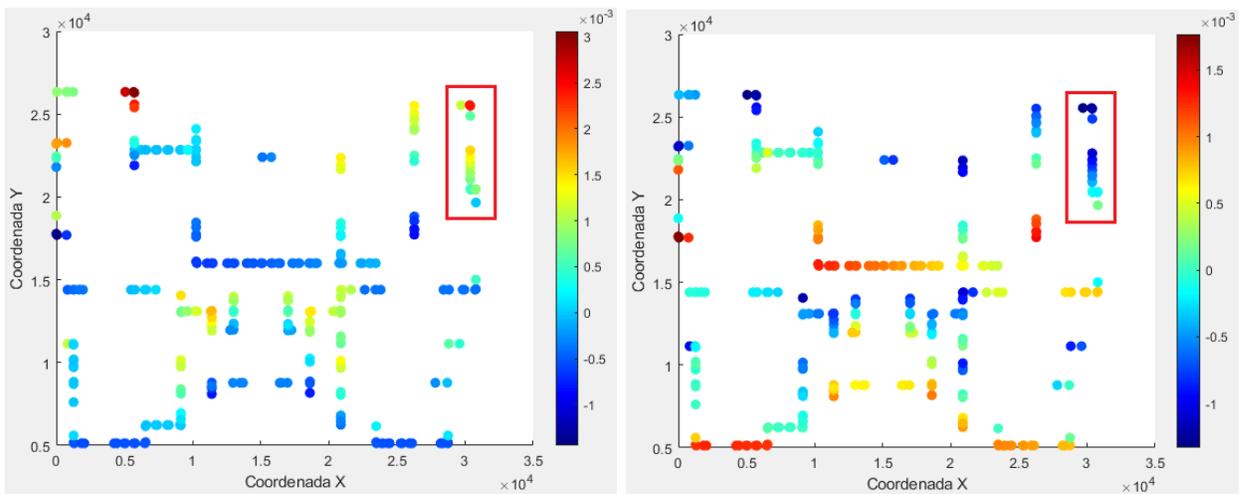


Figura 6.9: Deformaciones unitarias axiales en planta para el piso 1 en dirección  $Y-$  (izquierda) y  $Y+$  (derecha).

Lo primero que se puede comentar de las figuras es que el subterráneo 2, que no sufrió ningún tipo de daño durante el terremoto, posee las deformaciones más bajas de los 3 pisos. Para la dirección  $X$  (ambos sentidos) se puede ver que según la escala de colores las deformaciones son prácticamente nulas para la mayoría de los elementos, mientras que en la dirección  $Y$  una gran mayoría se encuentra en el espectro cercano al 0 de la escala de color, pero posee algunos elementos en torno al centro y esquinas que alcanzan una mayor compresión o tracción en comparación a los demás. Aún así, relativo a otros pisos, estos extremos son menores en magnitud por lo que en ese sentido el modelo captura la predicción de que el nivel en cuestión no presenta daño.

En cuanto al subterráneo 1, según las figuras en 6.6 y 6.7, es posible ver que la magnitud de las deformaciones crece de manera general en la planta, y que es la dirección  $X$  quien alcanza mayores deformaciones con respecto a la dirección  $Y$ .

Para la dirección  $Y$  es posible ver cómo los sectores con daño (marcados en rojo) son efectivamente un foco de grandes deformaciones relativo al resto de la planta. Si bien no corresponden a la ubicación del máximo alcanzado en planta, la escala de color de todas maneras los indica como zonas de interés. Por otro lado, en la dirección  $X$  los sectores dañados no sufren gran deformación. Se encuentran todos en compresión pero en valores bajos, salvo la esquina superior derecha para el caso  $X+$ .

Tanto para la dirección  $X$  como la  $Y$ , lo que se hace evidente es que hay sectores que tienen relativamente grandes deformaciones tanto para compresión como tracción, como ocurre en la zona central-derecha (aprox 22 metros en  $X$  y 16 metros en  $Y$ ) o en la zona central-izquierda (10 metros en  $X$  y 14 metros en  $Y$ ), así como también hay sectores del lado inferior que muestran compresiones significativas en  $Y-$  (aunque con tracciones despreciables), pero que no sufrieron daño durante el terremoto. Este hecho puede estudiarse con ayuda del nivel del nivel de confinamiento de los elementos analizados, que se muestra en la figura 6.10. Color azul simboliza que el elemento fue modelado con hormigón no confinado mientras que color rojo indica que fue modelado con hormigón confinado.

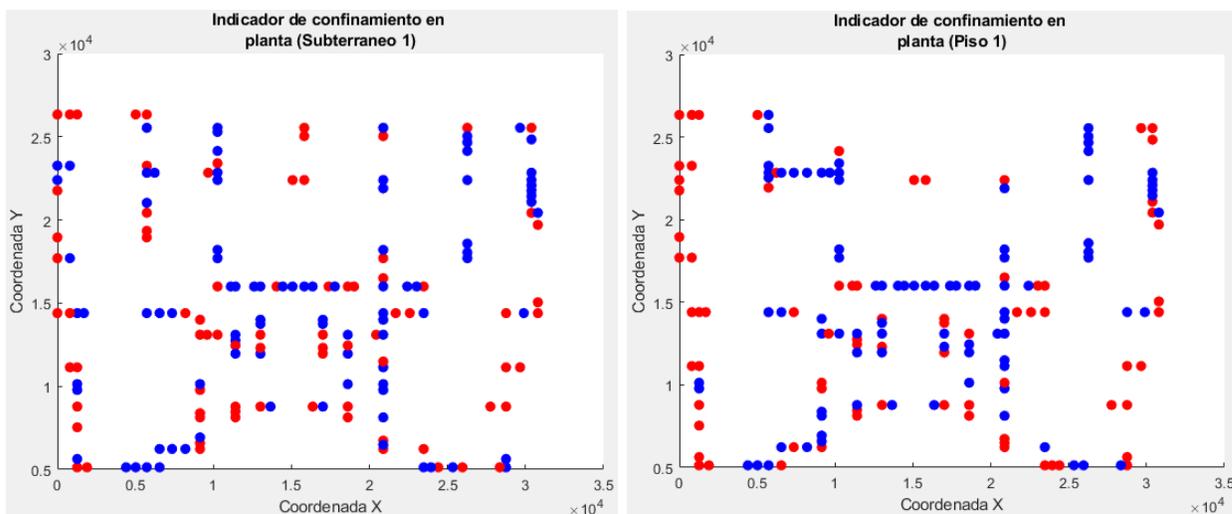


Figura 6.10: Indicador de confinamiento de los elementos analizados en el subterráneo 1 (izquierda) y piso 1 (derecha)

Según estos indicadores de confinamiento, para el subterráneo 1, es posible apreciar que en los dos sectores centrales mencionados anteriormente hay mayoría de elementos confinados a diferencia de los sectores dañados. Aún así eso no es capaz de explicar por completo el fenómeno, pues por ejemplo en el sector en torno a los 10 metros en  $X$  y 25 metros en  $Y$ , los análisis en la dirección  $Y$  también muestran grandes compresiones y tracciones, en especial en el extremo norte del muro, pero que según el indicador de confinamiento no usa hormigón confinado.

En el piso 1 ocurre un fenómeno similar en cuanto al comportamiento general del nivel. De acuerdo a las figuras 6.8 y 6.9, en este nivel las deformaciones que se alcanzan son mayores que en los dos anteriores y es la dirección  $X$  quien tiene mayores máximos absolutos al igual que en el subterráneo 1. Los sectores dañados para la dirección  $X-$  son opacados debido a los máximos absolutos de la escala, pero alcanzan tracciones del orden de  $10^{-3}$ , similar a la zona con daño del subterráneo 1. En la dirección  $X+$  los sectores dañados representan un

foco de altas compresiones pero no son los únicos ya que los mismos dos sectores anómalos vistos anteriormente (central-derecho y central-izquierdo) presentan compresiones de magnitud comparable y en particular el sector central-izquierdo viene acompañado de grandes tracciones. Incluso aparecen dos zonas más de las mismas características. La primera es la esquina inferior izquierda, que alcanza las tracciones más grandes de la escala, y en compresión viene acompañada por un valor considerable en torno a los  $10^{-3}$ . La segunda es el extremo superior izquierdo, que en el sentido  $X-$  representa el máximo de las compresiones (y es en realidad la compresión más grande de los resultados), mientras que en tracción alcanza un valor considerable en torno a los  $1.2 \cdot 10^{-3}$ .

En cuanto a la dirección  $Y$  para el primer piso, en compresión (sentido  $Y+$ ) se ve que el sector dañado es poseedor de las mayores compresiones (poco mayores que  $10^{-3}$ ), aunque en conjunto con una esquina superior izquierda y un punto aislado del sector central-izquierdo. Respecto al otro sentido ( $Y-$ ) el sector dañado tiene tracciones considerables pero la misma esquina superior izquierda es quien presenta el valor máximo. Así, si bien se captura en cierta medida la ubicación del daño real, aparecen dos sectores con comportamiento anómalo: una esquina superior izquierda y el extremo central izquierdo.

Si se miran los indicadores de confinamiento de la figura 6.10 para el primer piso, los dos sectores que presentan anomalía en la dirección  $X$  (esquina superior izquierda y sector central-izquierdo) no presentan al 100% elementos confinados, por lo que en teoría se esperaría daño. Por otro lado, en la dirección  $Y$  aparecieron sectores anómalos en una de las esquinas superiores izquierdas y en el extremo central izquierdo. En el primero se observa un confinamiento para un solo elemento del muro en  $L$  y en el segundo están todos confinados, por lo que bajo un criterio simple cabría esperar daño en el sector de la esquina superior izquierda. Respecto al sector dañado, el muro en  $L$  está confinado mientras que el otro no, lo que sería consistente con el hecho de que el primero sólo sufrió desprendimiento del recubrimiento y el segundo una falla por flexocompresión.

Estudiando sólo los sectores que concentran las mayores deformaciones (sin mirar aún la magnitud), el modelo a grandes rasgos predice la localización de los sectores dañados pero sin una precisión absoluta. El modelo presenta sectores en los dos niveles con daño que, de regirse por el mismo criterio de los sectores verdaderamente dañados, cabría esperar algún tipo de daño también cuando en realidad no es así. Este hecho es complejo de explicar y dentro de las posibilidades se encuentra una debilidad inherente del modelo, o concentración de deformaciones debido a la interacción del ESFI-3D con otros elementos, ya que como se puede ver en las figuras B.2 y B.3, en los sectores anómalos hay presente ya sea vigas de acople o vigas tradicionales, aunque el hecho de que el fenómeno no se replique en otros sectores que también presentan vigas desalienta esta teoría.

Respecto a la magnitud de las deformaciones como tal, es evidente que aún si se considerara los sectores con valores de deformación en torno a los máximos absolutos como propensos a daño, la magnitud de estas deformaciones no es demasiado consistente con lo que se espera para generar daño. De manera general, los sectores en los que cabría esperar daño tienen tracciones entre  $10^{-3}$  (mitad de la fluencia del acero) y  $3 \cdot 10^{-3}$  (1.5 veces la fluencia) mientras que en compresión los valores oscilan están más cercanos a  $10^{-3}$  que si bien es similar a lo obtenido por Suquillo (2017) [13], está bastante lejos de ser consistente con lo que se observa

en las fotografías del daño, y del límite de aplastamiento de hormigón del  $3 \cdot 10^{-3}$ .

Una posible explicación del fenómeno descrito es considerar que el mismo elemento, al estar sometido a tracción y compresión de manera cíclica, la tracción que alcance merma la capacidad compresiva del muro. En particular, Welt et al. (2017) [14] indican que un elemento sometido a una tracción del  $10^{-3}$  disminuye la capacidad compresiva en un 80 % aproximadamente, y si la tracción aumenta a un  $2 \cdot 10^{-3}$ , la capacidad compresiva disminuye aún más hasta un 50 %. Así, cabría esperar un cierto grado de daño aún cuando las deformaciones no eran tan grandes como se esperaba.

## 6.4. Distorsión por corte en altura

Ya que el edificio Antígona también sufrió daños por corte en dos de sus muros (los cuales se encuentran en distintas fachadas), se estudió la distorsión por corte en altura de todos los muros que forman parte de las dos fachadas dañadas: la fachada norte y la oriente. En total, se registraron las distorsiones de 7 muros (3 de la fachada oriente y 4 de la fachada norte).

En cada muro se intentó registrar en altura su distorsión a lo largo de 3 ubicaciones distintas: su extremo izquierdo (I), su parte central (C) y su extremo derecho (D), usando como referencia su vista desde el exterior del edificio. La nomenclatura de los muros registrados sigue aquella asociada a los ejes en los que estaban en ETABS. Así, por ejemplo uno de los muros analizados es aquél de la fachada oriente en el eje Q, que se denota como MQ. Al muro MQ es posible analizarle sus tres ubicaciones, que se denotan MQI, MQC y MQD.

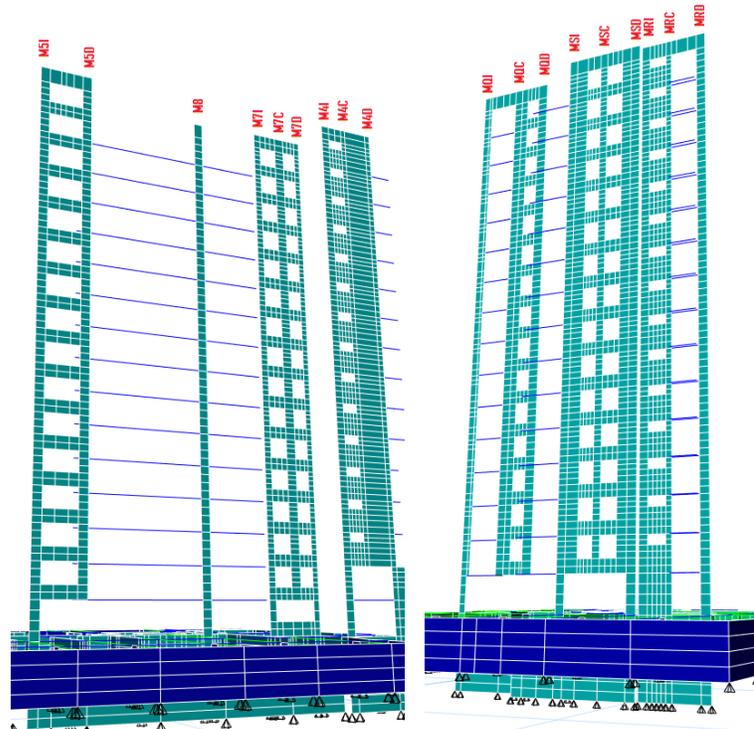


Figura 6.11: Imagen de la fachada norte (izquierda) y oriente (derecha) junto con el nombre y ubicación de las zonas a analizar.

En la figura 6.11 se muestran las dos fachadas junto con las zonas a analizar. Del elemento ESFI-3D es posible extraer la deformación (en unidad de longitud) por corte de cada elemento. Como se extraerá la deformación de cada elemento en altura, y cada piso está compuesto en altura por varios elementos (entre 4 y 6), para cada piso se calculará la distorsión de cada elemento que lo componga como

$$\theta = \frac{\delta}{H}$$

Donde  $\delta$  es la deformación por corte y  $H$  es la altura del elemento. Luego, se promediarán las distorsiones de todos los elementos de un determinado piso como se muestra en la figura 6.12, y se graficará la distorsión angular media por piso en altura. En las figuras 6.13 a la 6.15 se muestran estos resultados para los muros de la fachada norte en los dos sentidos de análisis correspondientes ( $X-$  y  $X+$ ).

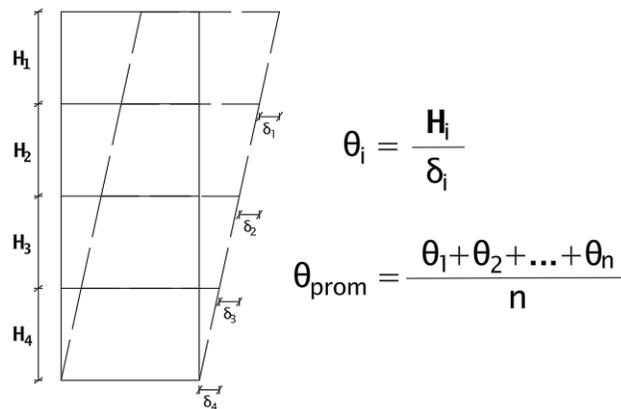


Figura 6.12: Ilustración de cómo se calcula la distorsión promedio a graficar por piso.

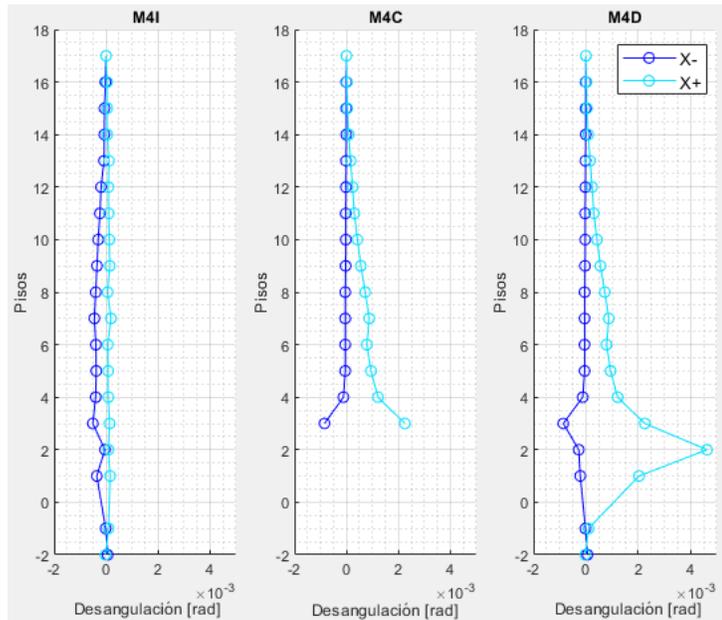


Figura 6.13: Distorsión angular por piso del muro M4 para la dirección  $X-$  (azul) y  $X+$  (celeste).

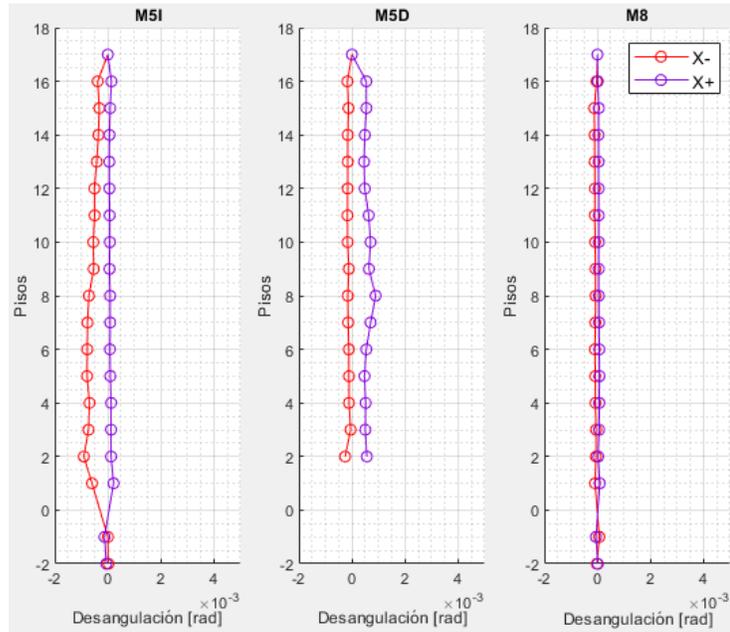


Figura 6.14: Distorsión angular por piso del muro M5 y M8 para la dirección  $X-$  (rojo) y  $X+$  (morado).

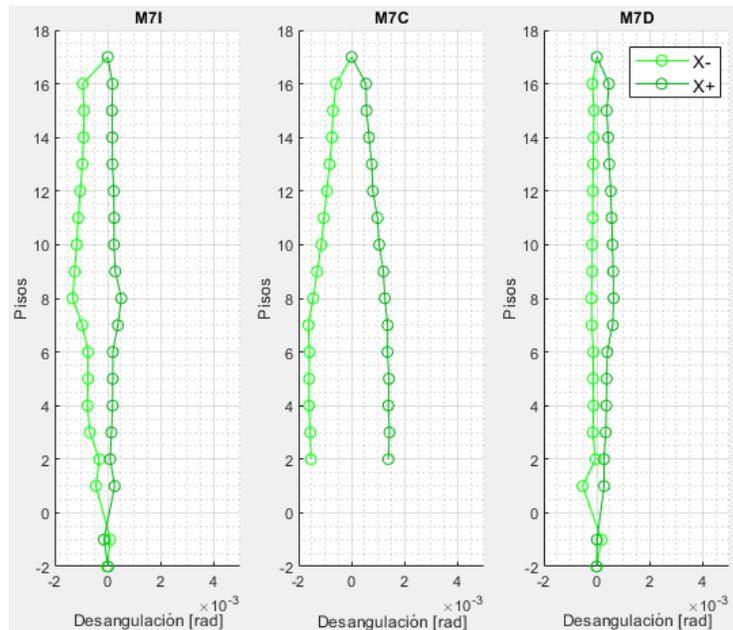


Figura 6.15: Distorsión angular por piso del muro M7 para la dirección  $X-$  (verde claro) y  $X+$  (verde oscuro).

A modo de referencia, en esta fachada es el muro M7C el que sufrió daños (figura 3.10). De los resultados, se aprecia inmediatamente que la magnitud de la distorsión para el muro M5 y M8 es notoriamente menor a la de los otros dos muros. Esto es consistente con el hecho de que en estos dos muros no hubo daño durante el terremoto.

Para el muro M4, la franja izquierda tiene deformaciones menores a las franjas centrales y

derechas, por lo que no se espera daño. En la franja central, para la dirección  $X-$  alcanza un máximo cercano al  $10^{-3}$  pero a partir del cuarto piso tiene distorsiones despreciables mientras que en la dirección  $X+$  las distorsiones empiezan en un valor considerable ligeramente superior a  $2 \cdot 10^{-3}$ , pero también decae considerablemente en altura. Respecto a la franja derecha, en la dirección  $X-$  exhibe un comportamiento similar a la franja central en que alcanza un máximo en el tercer piso pero luego tiene distorsiones despreciables para el resto de los pisos. Por otro lado en la dirección  $X+$  se observa un gran máximo de aproximadamente  $4.5 \cdot 10^{-3}$  que luego decrece y se mantienen valores en torno a  $10^{-3}$  entre los pisos 4 y 7 para luego decrecer.

Viendo el muro M7, se hace claro que para la franja derecha en ambos sentidos y para la franja izquierda en el sentido  $X+$  las deformaciones no son lo suficiente grandes en comparación al resto de los resultados para indicar daño. En la franja izquierda en dirección  $X-$ , es notoria la sección entre los pisos 7 y 16 con relativamente altas distorsiones en el rango de  $10^{-3}$  y  $1.3 \cdot 10^{-3}$ . En lo que refiere a la franja central, ésta alcanza en ambos sentidos deformaciones en torno a  $1.4 \cdot 10^{-3}$  y  $1.5 \cdot 10^{-3}$  entre los pisos 2 y 7.

Los valores que alcanza la franja central del muro 7 son, en general, las distorsiones más grandes entre los muros para ambos sentidos, por lo que de ocurrir daño, se esperaría que fuera en esta franja y en ese sentido el modelo captura correctamente la ubicación del daño. Sin embargo, al igual que lo que ocurría en las deformaciones axiales, existen puntos que exhiben una distorsión merecedora de esperar daño cuando en realidad no es así, como lo son los pisos 1-3 de la franja M4D en dirección  $X+$ , el piso 3 de la franja M4C en  $X+$  y el piso 8 en la franja M7I en dirección  $X-$ .

Si se estudian las armaduras transversales, la franja M7C usa estribos y 1 traba de 10 milímetros cada 12 centímetros, mientras que la franja M4I usa estribos de 10 milímetros cada 12 centímetros en el piso 2. Lo anterior quiere decir que no cabe una justificación de estas anomalías desde la perspectiva de las armaduras, donde una menor cuantía transversal en la franja M7C podría explicar el daño y confinarlo en esa franja exclusivamente, ya que la franja M4I tiene menor cuantía transversal en el piso que exhibió el máximo de  $4.5 \cdot 10^{-3}$ .

Pasando al análisis de los muros de la fachada oriente, en las figuras 6.16 a 6.18 se muestran las distorsiones angulares por piso en altura para los dos sentidos correspondientes ( $Y-$  e  $Y+$ ). En esta fachada y bajo esta nomenclatura, es la franja MSC la que sufrió daños (figura 3.11).

Lo primero que se hace notar es la magnitud de las distorsiones obtenidas. Dentro de las distorsiones de las nueve franjas de esta fachada, en valor absoluto la mayor ocurre en la franja MSI en la dirección  $Y-$  (figura 6.18) con un valor de  $8 \cdot 10^{-4}$ . Comparando sólo magnitudes, se destaca que si se consideran los valores de distorsión obtenidos en la fachada norte, éste máximo no alcanza a implicar daño. Incorporando la armadura transversal, la franja MSI tiene estribos de 10 milímetros cada 15 centímetros, lo cual si bien es menor a lo exhibido por las zonas con daño esperado en la fachada norte, la diferencia no es lo suficientemente grande como para esperar daño con distorsiones 2 o más veces menores.

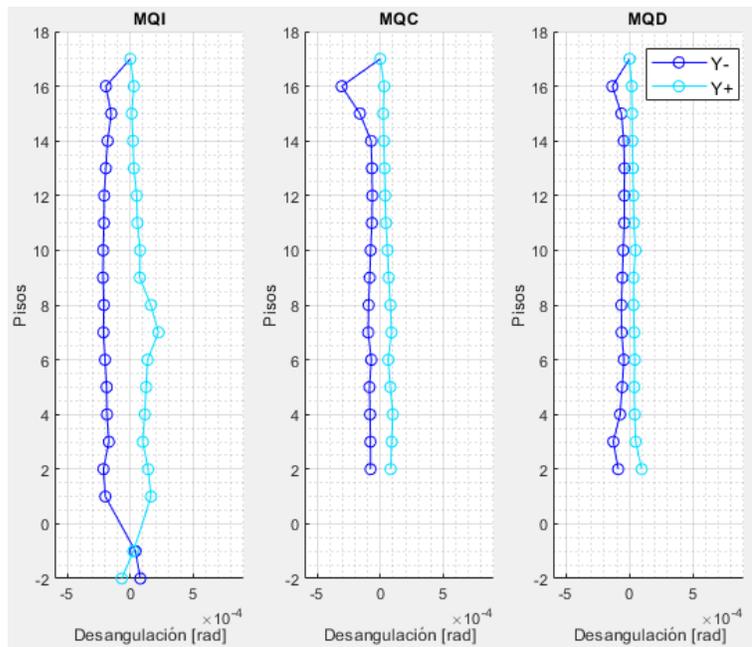


Figura 6.16: Distorsión angular por piso del muro MQ para la dirección  $Y-$  (azul) e  $Y+$  (celeste).

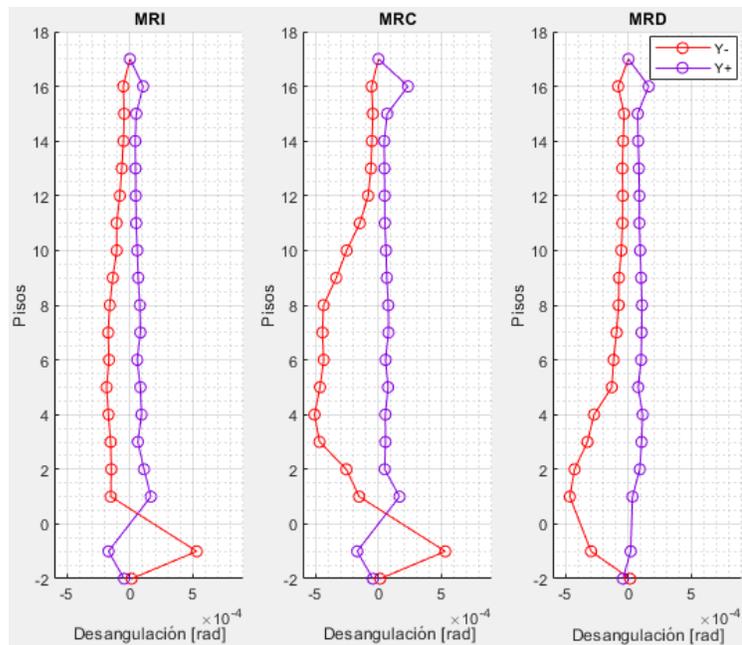


Figura 6.17: Distorsión angular por piso del muro MR para la dirección  $Y-$  (rojo) e  $Y+$  (morado).

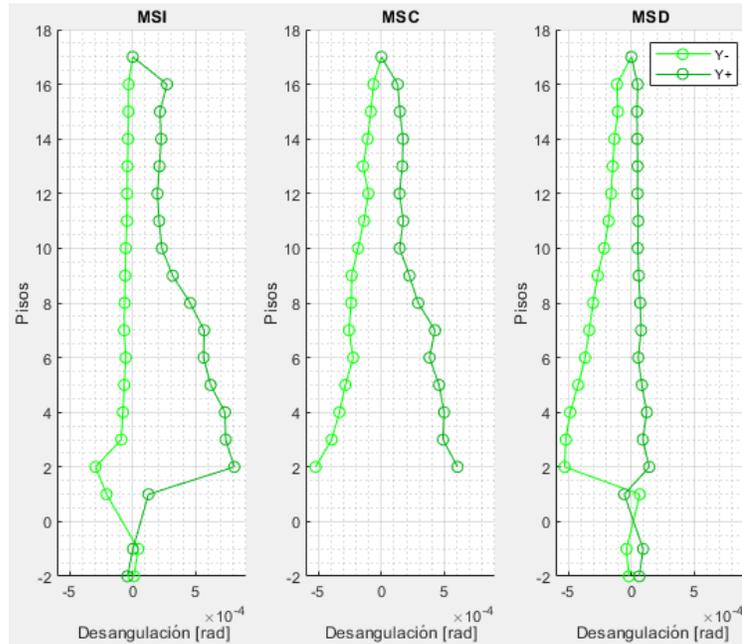


Figura 6.18: Distorsión angular por piso del muro MS para la dirección  $Y-$  (verde claro) e  $Y+$  (verde oscuro).

De manera general, se aprecia que el muro MQ posee bajas distorsiones, con sus franjas alcanzando valores entre  $0.5 \cdot 10^{-4}$  y  $10^{-4}$ . Lo más destacable es la franja MQI para la dirección  $Y-$  que tiene una distorsión casi constante en altura de  $2 \cdot 10^{-4}$  y la franja MQC para la dirección  $Y-$  que muestra un máximo en el piso 16 de  $3 \cdot 10^{-4}$ .

En cuanto al muro MR, las desangulaciones también son relativamente bajas en general dentro de las franjas, donde lo más destacable se obtiene en la franja MRC para la dirección  $Y-$  que alcanza distorsiones de  $5 \cdot 10^{-4}$  entre los pisos 3 y 8, y la franja MRD para la dirección  $Y-$  que tiene deformaciones un poco mayores a  $4 \cdot 10^{-4}$  en los pisos 1 y 2.

Finalmente el muro MS muestra a grandes rasgos distorsiones relativamente más grandes en la franja MSC en ambas direcciones, MSI para  $Y+$  y MSD para  $Y-$ . En el resto las desangulaciones no son de carácter destacable. Mirando la fachada de manera global, la franja MSC sí está presente dentro de las franjas con mayor distorsión, aunque no posee los máximos valores, por lo que en la dirección  $Y$  el modelo predice de manera mucho más dispersa la ubicación del posible daño, ya que si bien la franja MSC aparece como candidata, hay muchas más anomalías que en la dirección  $X$ . Cabe destacar además que la franja MSC tiene estribos y 1 traba de 10 milímetros cada 12 centímetros (idéntica configuración a la franja M7C), por lo que en teoría, de ocurrir daño, debería exhibir menos que la franja MSI por ejemplo, cosa que no ocurre.

El modelo aparentemente reproduce de buena manera el hecho de que es la dirección  $X$  la más golpeada por los daños por corte pues los valores máximos de los gráficos son claramente mayores en esta dirección. Tal como se podía ver en las figuras 3.10 y 3.11, es evidente que el machón de la fachada norte resultó considerablemente más dañado.

# Capítulo 7

## Conclusiones

A lo largo de la presente memoria, se trabajó en la confección de un modelo del edificio Antígona, usando el elemento no lineal ESFI-3D en el modelamiento de los muros de hormigón armado, para su posterior análisis mediante un análisis estático (*pushover*). Al respecto es posible concluir acerca de dos grandes ejes que abarca la memoria.

El primero es respecto al proceso de modelamiento en sí. El modelo en OpenSees se basó en un modelo de elementos finitos ya existente, por lo que más que construcción desde cero de éste, se trabajó en una metodología que se concentrara en traspasar información de un lado a otro de la manera más simple y eficiente.

En ese ámbito, la metodología desarrollada posee una gran simplicidad en lo que refiere a traspaso y recreación de elementos estructurales. Afortunadamente los programas comerciales de análisis estructural hoy en día poseen numerosas herramientas que permiten tanto confeccionar un modelo de manera sencilla e intuitiva, como también tener acceso a una gran cantidad de información de éste y por ende, se reconoce como un buen punto inicial por encima de la plataforma sin interfaz gráfica y menos intuitiva como lo es OpenSees.

Gracias a que también los programas comerciales organizan internamente cada unos de los elementos estructurales que componen el modelo, gran parte del proceso de modelamiento se reduce a extraer esa información del programa en forma de archivos de valores e importarla a OpenSees, pudiendo recrear miles de elementos con un sólo archivo y una rutina de importación de pocas líneas de código, lo que implica un aumento marginal en la dificultad del proceso completo.

Los únicos procesos que añaden cierto grado de complejidad son aquellos que tuvieron que realizarse manualmente: agregar la masa de losa y sobrecarga, y la creación de las vigas de acople para simular las losas. Si bien estos procesos pueden resultar tediosos, no son inherentemente difíciles y son fácilmente replicables para otra estructura.

Así, en general la metodología propuesta es lo suficientemente sencilla (si se posee la información necesaria del edificio) para replicarla y para además no estar tan ligada exclusivamente al uso del elemento ESFI-3D. Si bien no todos los elementos macroscópicos usan los mismos parámetros en el mismo orden, el uso de archivos de valores implica que realizar los cambios pertinentes no va más allá de modificar pocas líneas de código. En lo referente al

modelo obtenido, se concluye que la metodología en sí es funcional ya que el modelo creado funciona y fue capaz de reproducir de buena manera parámetros básicos como peso sísmico y períodos fundamentales

El segundo eje hace referencia a los resultados del análisis realizado. La estructura utilizada como caso de estudio había sufrido daños tanto por flexo-compresión como por corte durante el sismo de 2010, y en esa línea se encontró que el modelo confeccionado es capaz de predecir parcialmente la ubicación del daño.

Si se ocupa como guía la ubicación de las máximas deformaciones, el modelo es capaz de indicar que las zonas dañadas son sectores de riesgo y potencial daño, aunque con menor medida en la falla por corte en la fachada oriente. No obstante, aparece el problema de que no captura con precisión la magnitud del daño ya que las deformaciones máximas no se condicen con el nivel de daño esperado, y al mismo tiempo indica zonas con el mismo o mayor nivel de deformaciones pero que no sufrieron daño en el sismo, por lo que en este particular caso de estudio el modelo funciona con una precisión media.

Aún así, es importante mencionar que la implementación de la metodología propuesta posee un número no menor de pasos simplificados en pos de no complejizar excesivamente el modelo, como por ejemplo en lo que refiere a la determinación de elementos confinados (y ley constitutiva usada en sí) o en la metodología simplista usada para simular la losa (como elementos tipo viga). Es de esperar que de poder pulirse estas consideraciones y otras en trabajos futuros, mejoraría la precisión del modelo.

# Bibliografía

- [1] López, C. N., Rojas, F., Massone, L. M. *Membrane fiber element for reinforced concrete walls - the benefits of macro and micro modeling approaches*. Engineering Structures, 2022:254.
- [2] Vulcano, A., Bertero, V. V., Colotti, V. *Analytical Modeling of RC Structural Walls*. Proceedings, 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, 6 , 41–46, 1988.
- [3] Massone, L. M., Orakcal, K., Wallace, J. W. *Modeling of Squat Structural Walls Controlled by Shear*. ACI Structural Journal, 2009.
- [4] Massone, L. M., Orakcal, K., Wallace J. W. *Shear-Flexure Interaction for Structural Walls*. SP-236, ACI Special Publication - Deformation Capacity and Shear Strength of Reinforced Concrete Members Under Cyclic Loading (pp.127-150), 2006.
- [5] Orakcal, K., Massone, L. M., Ulugtekin, D. *A Hysteretic Constitutive Model for Reinforced Concrete Panel Elements*. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2019.
- [6] Kolozvari, K., Kalbasi, K., Orakcal, K., Massone L. M., Wallace, J. *Shear-flexure-interaction models for planar and fanged reinforced concrete walls*. Bulletin of Earthquake Engineering, 2019.
- [7] Massone, L. M., López, C. N., Kolozvari, K. *Formulation of an efficient shear-flexure interaction model for planar reinforced concrete walls*. Engineering Structures, 2021:243.
- [8] Kolozvari, K., López, C. N., Massone, L. M. *Efficient three-dimensional shear-flexure interaction model for reinforced concrete walls*. Engineering Structures, 2023:294.
- [9] Tuna, Z., Wallace, J. W. *Collapse Assessment of the Alto Rio Building in the 2010 Chile Earthquake*. Earthquake Spectra, 2015.
- [10] Kolozvari, K., Abdullah, S., Wallace, J., Kajiwara, K. *Assessment of the 2015 full-scale ten-story RC test Structure using ASCE/SEI 41*. Bulletin of Earthquake Engineering, 2023.
- [11] Massone, L. M., Bedecarratz, E., Rojas, F., Lafontaine, M. *Nonlinear modeling of a damaged reinforced concrete building and design improvement behavior*.
- [12] Leiva, G., Bravo, M., Matus, F., Riquelme, J. *Informe técnico edificio Antígona: Estudio de diagnóstico estructural - Análisis causas del daño*. 2010.
- [13] Suquillo, B. *Validación de los límites para distintos niveles de desempeño en edificios con muros de hormigón armado (typical chilean RC building)*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Universidad de Chile, 2017.
- [14] Welt, T. S., Massone, L. M., LaFave, J. M., Lehman, D. E., McCabe, S. L., Polanco,

P. *Confinement Behavior of Rectangular Reinforced Concrete Prisms Simulating Wall Boundary Elements*. Journal of Structural Engineering, 2017.

# Anexos

## Anexo A

### Plantas edificio Antígona

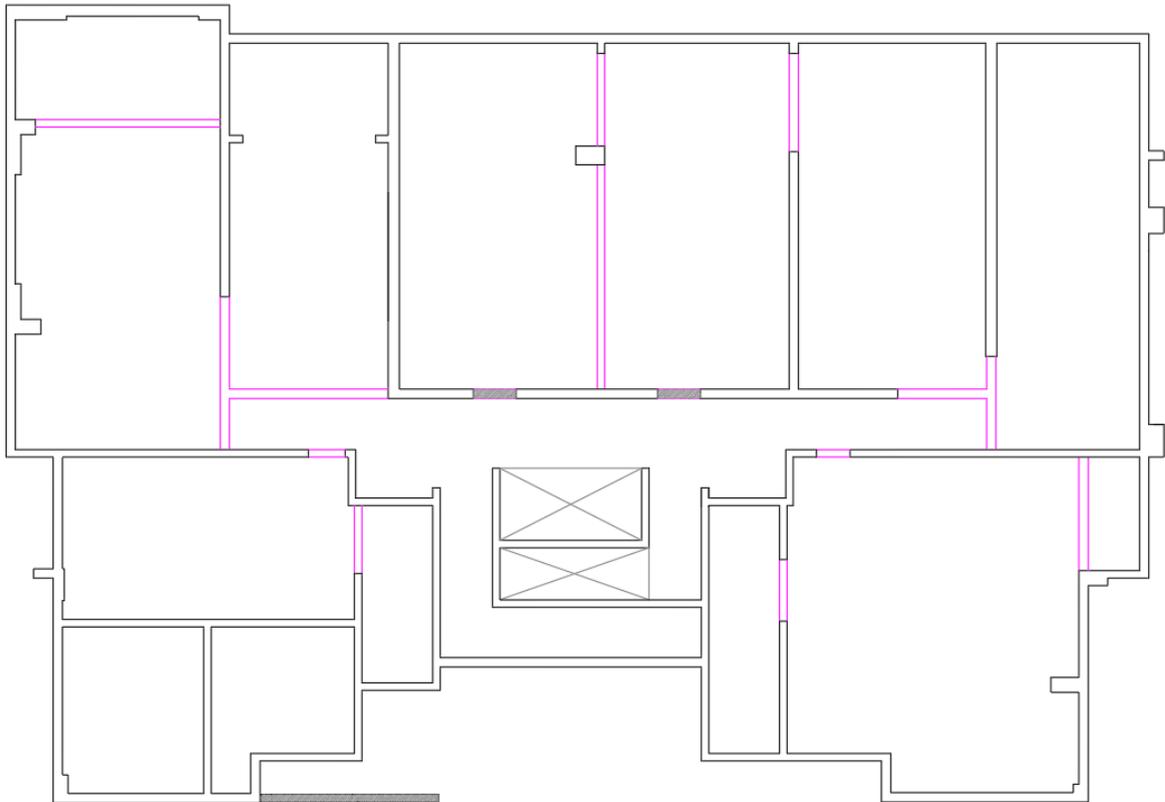


Figura A.1: Planta tipo del subterráneo 2 (nivel 1). Figura creada a partir de planos originales.

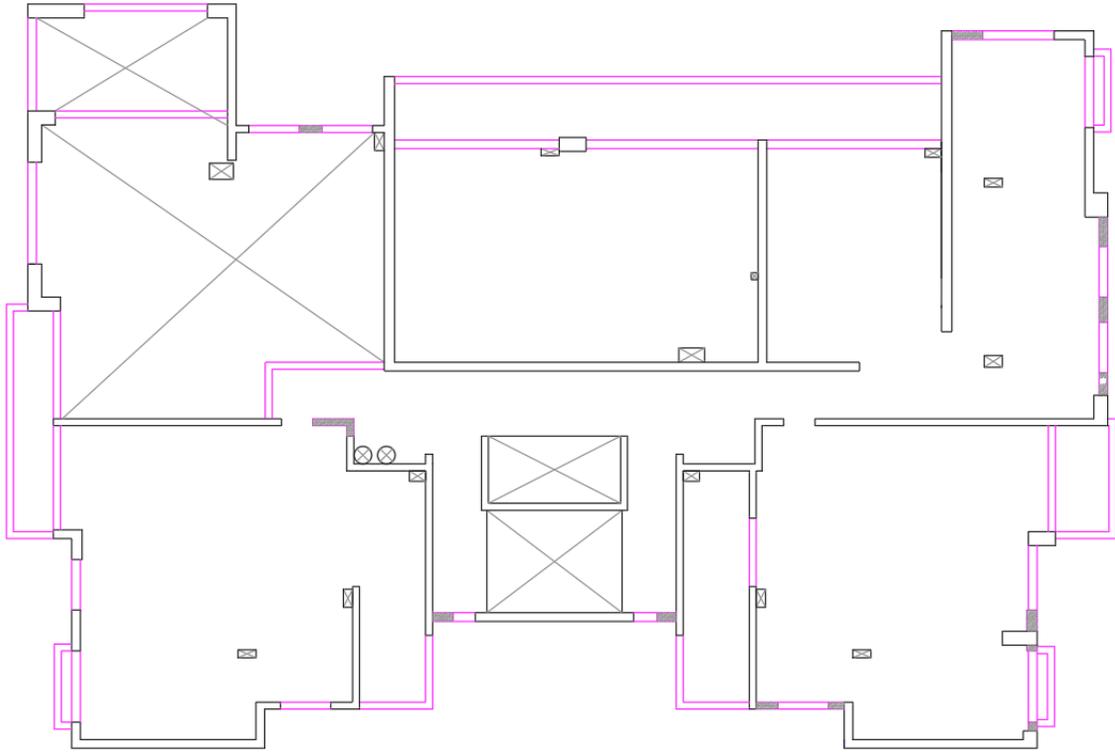


Figura A.2: Planta tipo del nivel 3. Figura creada a partir de planos originales.

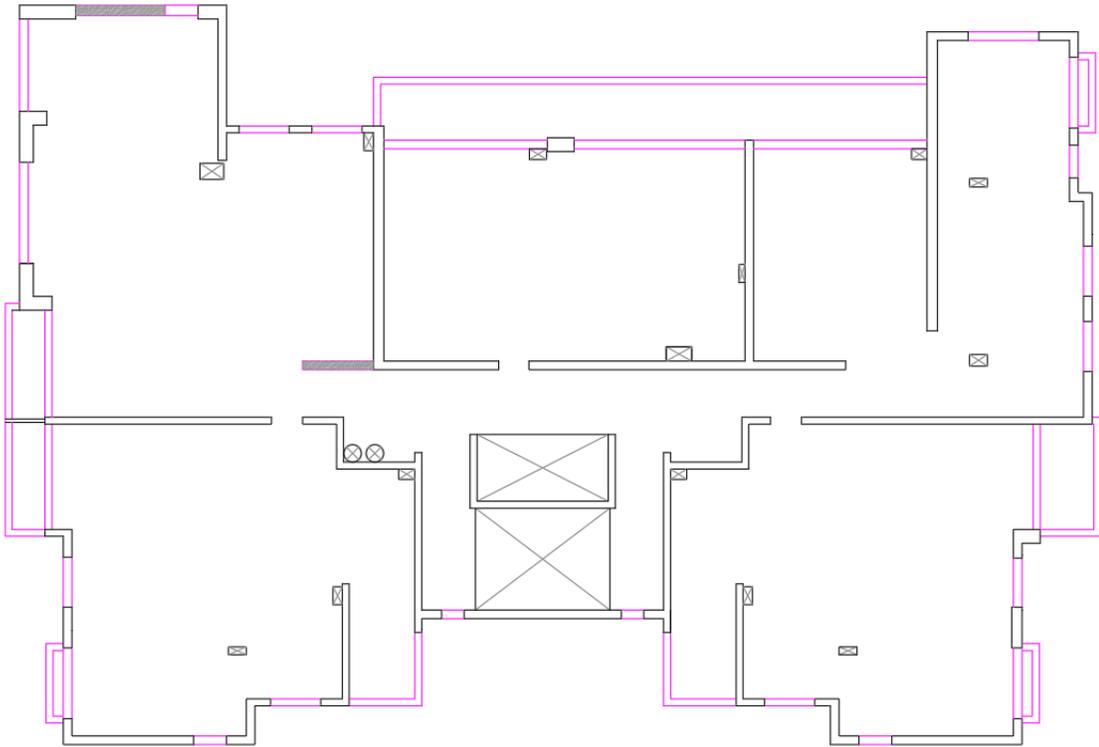


Figura A.3: Planta tipo del nivel 4. Figura creada a partir de planos originales.

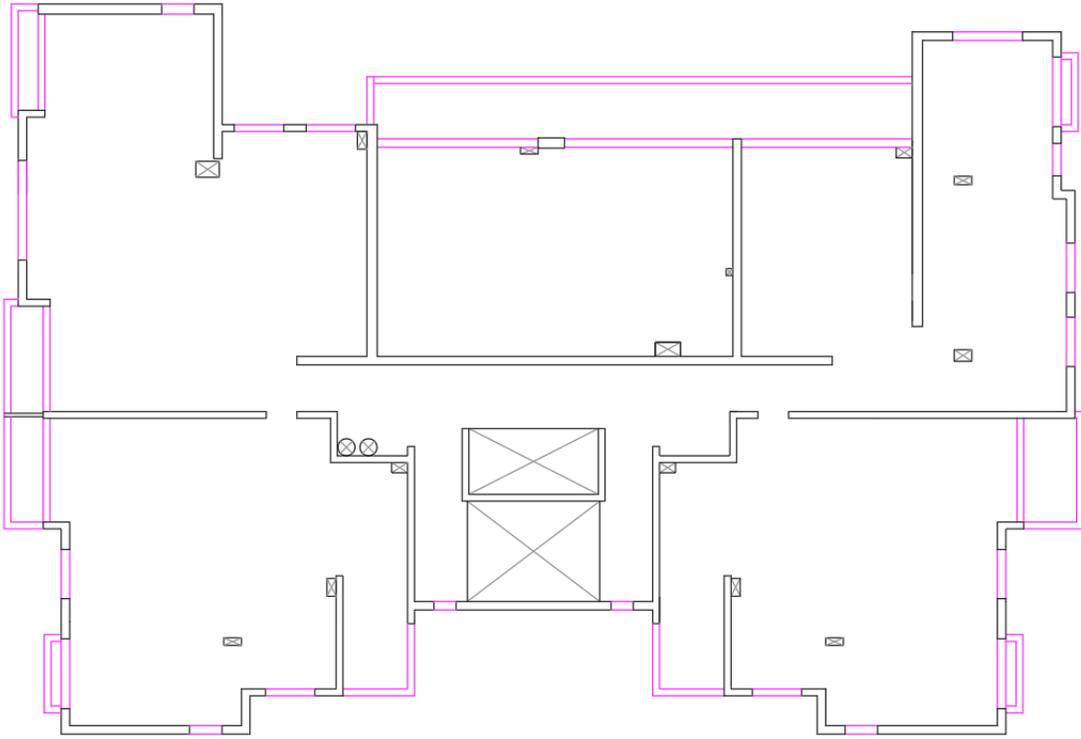


Figura A.4: Planta tipo del nivel 5 al 7. Figura creada a partir de planos originales.

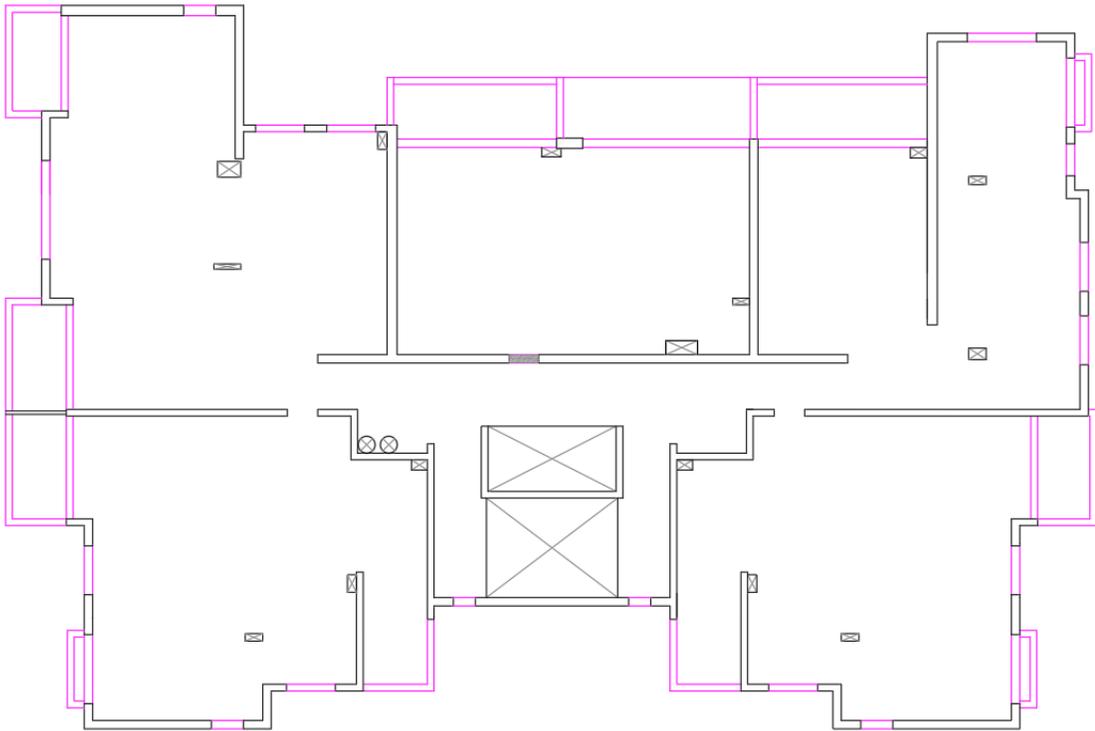


Figura A.5: Planta tipo del nivel 8. Figura creada a partir de planos originales.

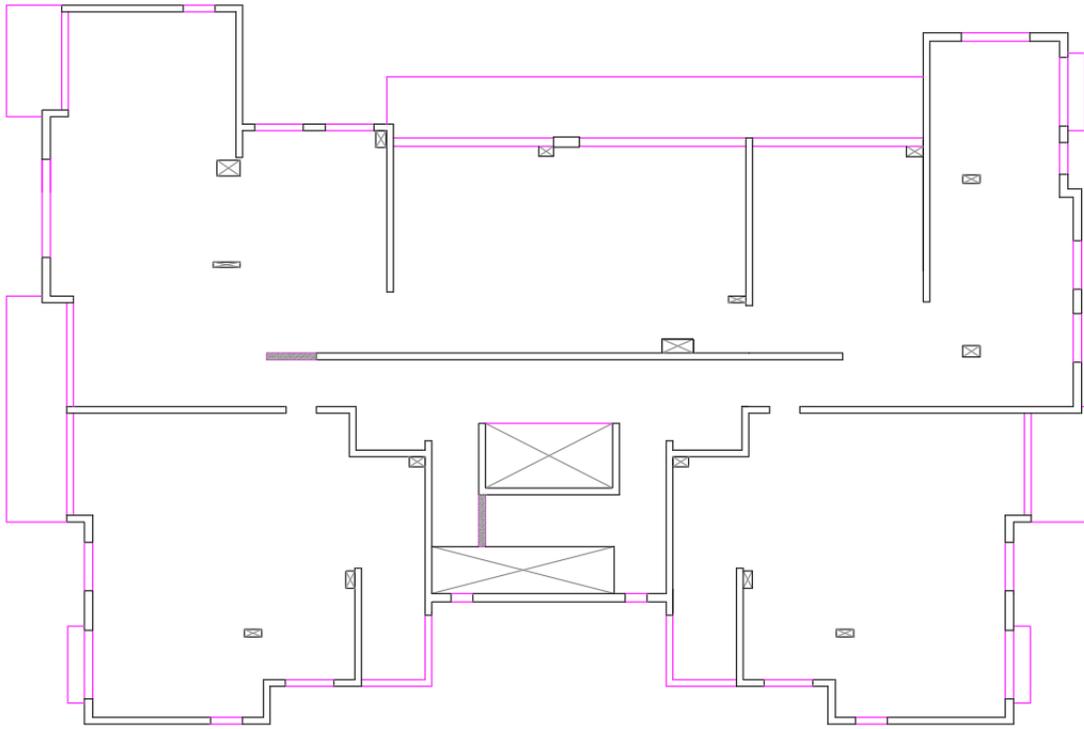


Figura A.6: Planta tipo del nivel 18. Figura creada a partir de planos originales.

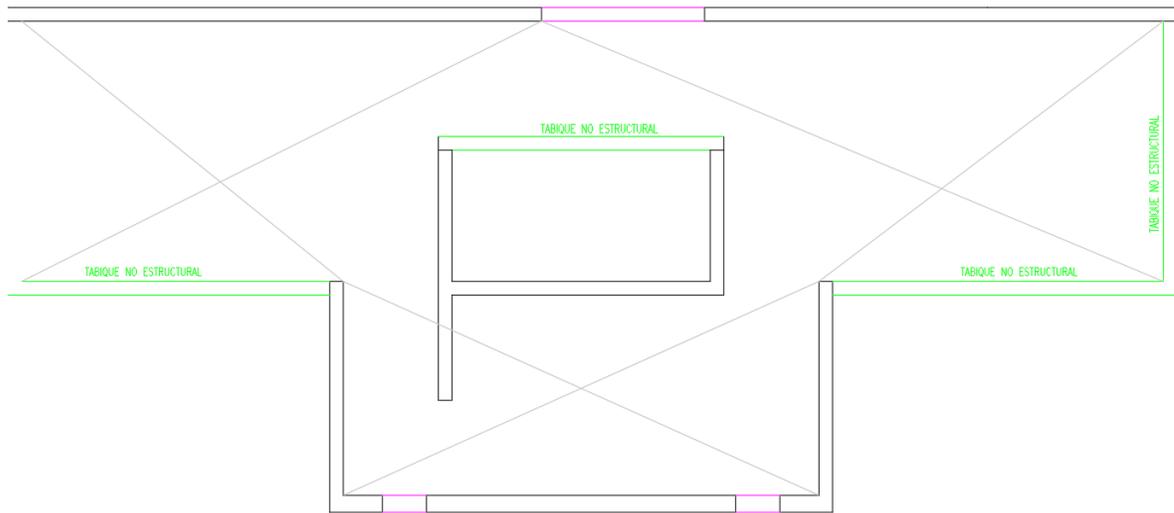


Figura A.7: Planta tipo del nivel 19. Figura creada a partir de planos originales.

## Anexo B

# Ubicación vigas para simular acople de losas

A continuación se muestran las vigas de acople ubicadas en las plantas para simular el efecto de acople de las losas. El último nivel naturalmente no posee vigas de acople por tener losa sólo en la caja de ascensor como se observa en la figura A.7.

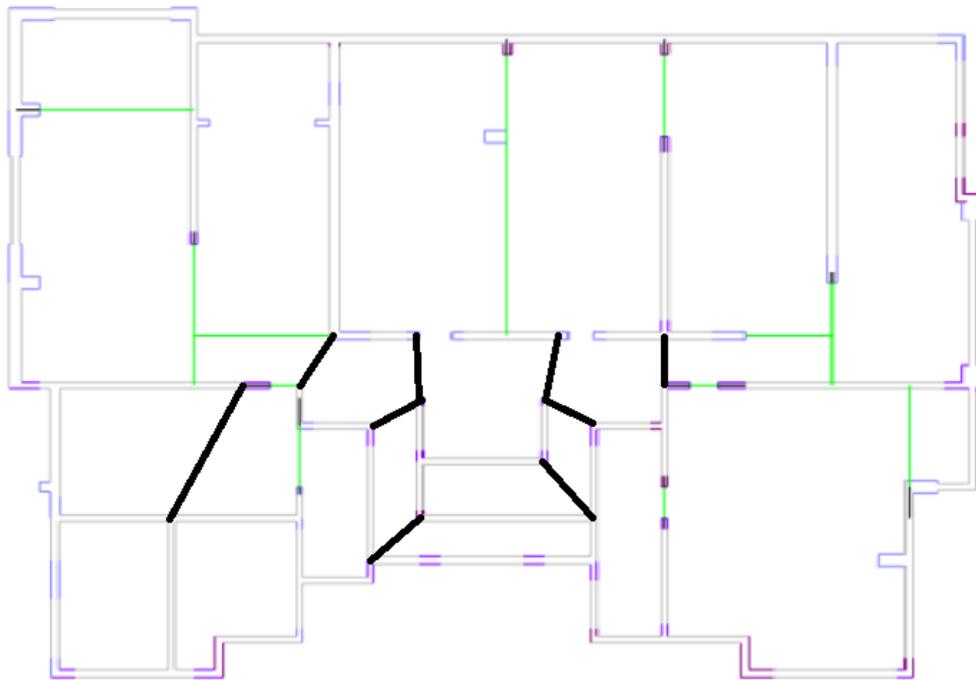


Figura B.1: Vigas de acople implementadas en el subterráneo 2 (nivel 1).

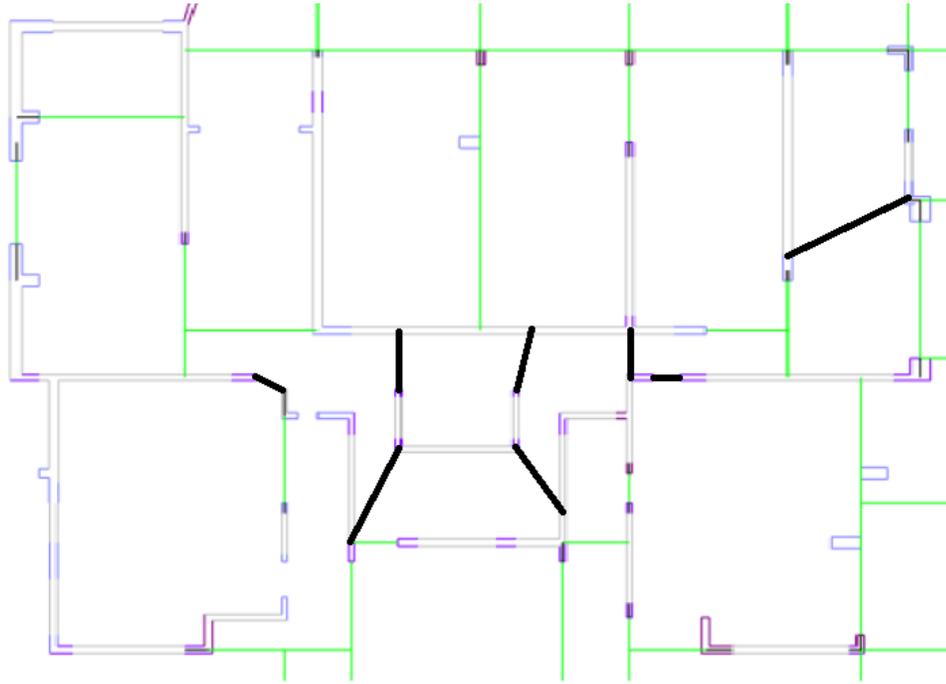


Figura B.2: Vigas de acople implementadas en el subterráneo 1 (nivel 2).

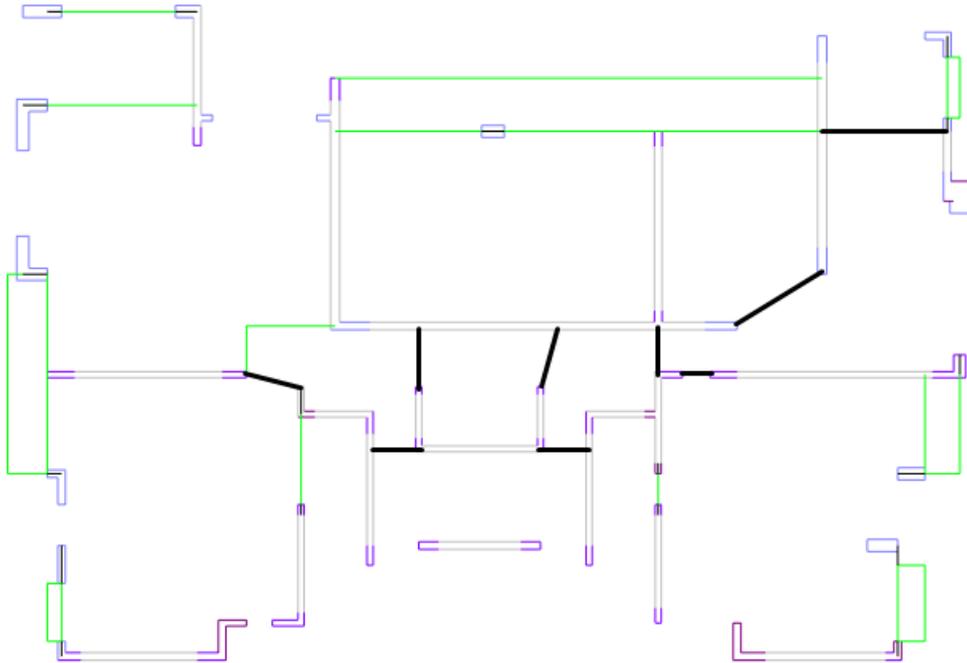


Figura B.3: Vigas de acople implementadas en el nivel 3.

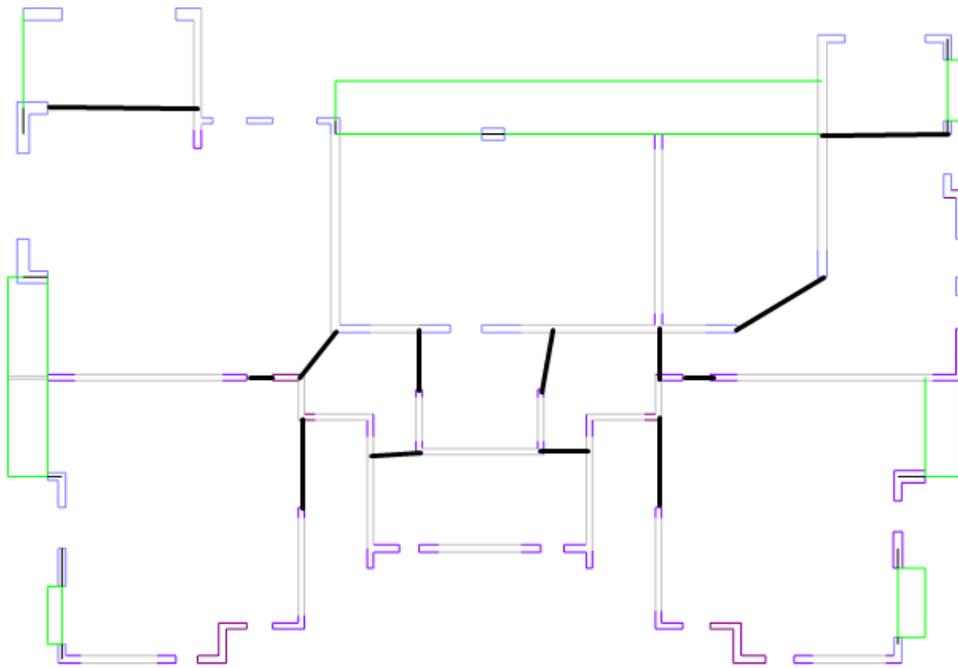


Figura B.4: Vigas de acople implementadas en el nivel 4.

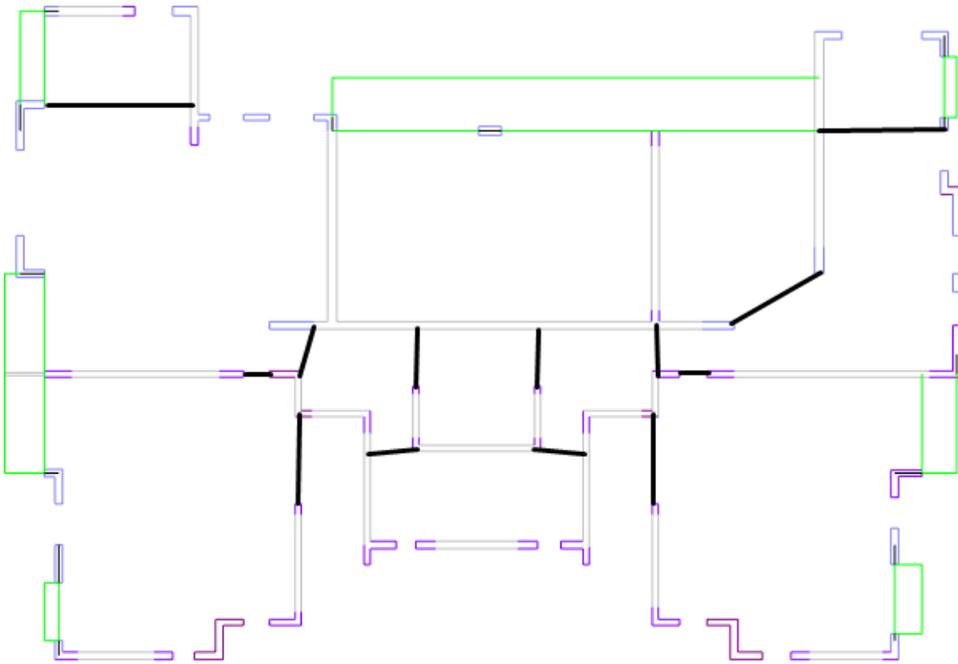


Figura B.5: Vigas de acople implementadas en los niveles 5 al 7.

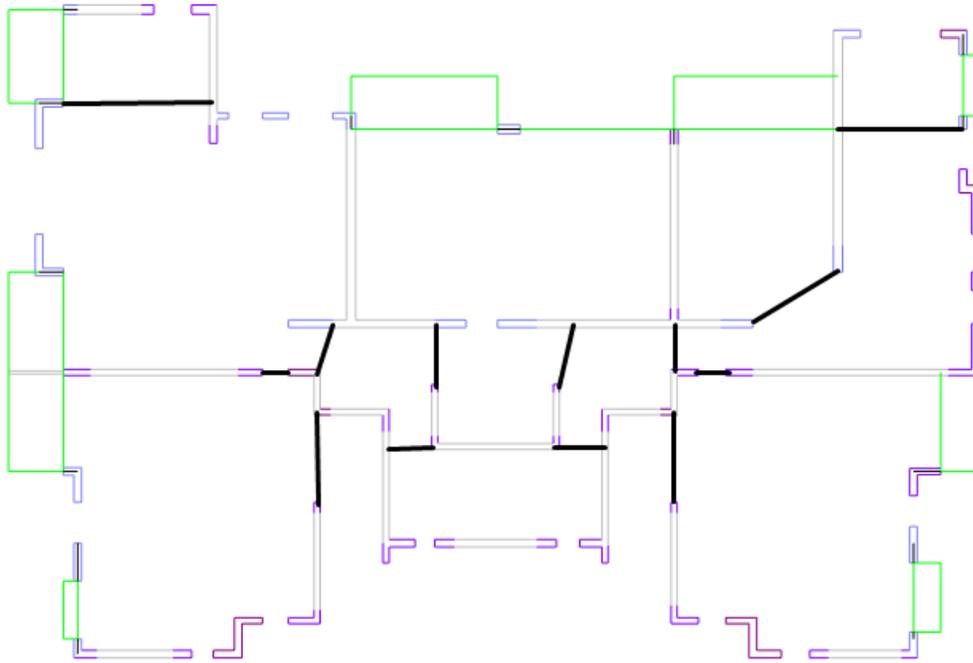


Figura B.6: Vigas de acople implementadas en el nivel 8.

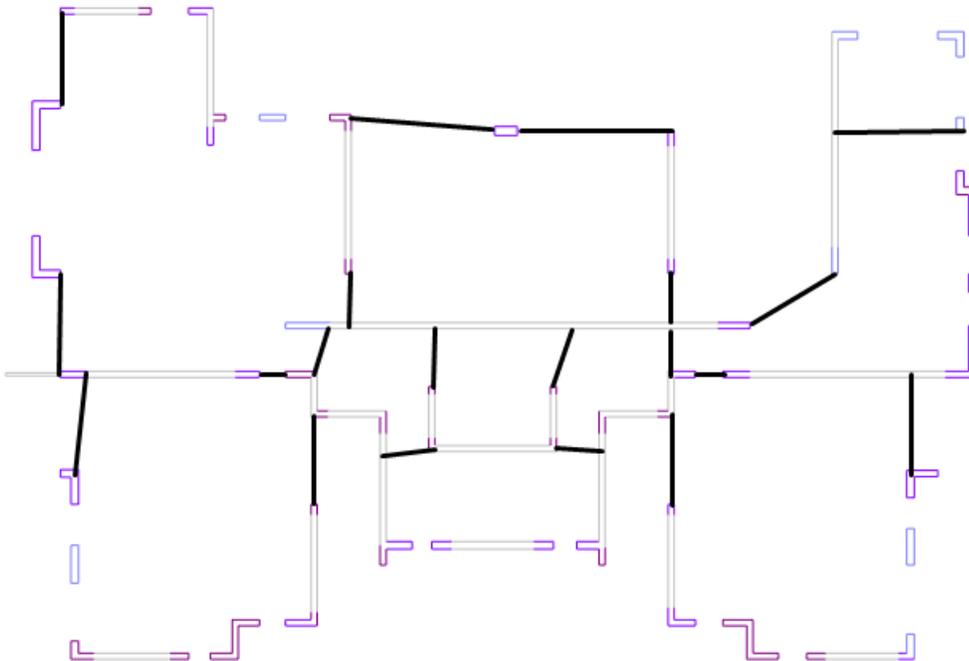


Figura B.7: Vigas de acople implementadas en el nivel 18.

# Anexo C

## Código en OpenSees del modelo

Código C.1: Definición del elemento ESFI-3D en OpenSees

```
1 model BasicBuilder -ndm 3 -ndf 6;
2
3 # NODOS -----
4
5 # Abrir archivo
6 set inputFile "Nodos/NodosFinal.csv"
7 set fileId [open $inputFile r]
8 # Leer datos del archivo
9 while {[gets $fileId line] >= 0} {
10     # Separar la línea en valores individuales
11     set values [split $line ","]; # El separador es punto-coma
12     # Extraer la info correspondiente a los nodos
13     set NodeLabel [lindex $values 0]; # Primera columna es el label
14     set X [lindex $values 1]; # Segunda columna es coordenada X
15     set Y [lindex $values 2]; # Tercera columna es coordenada Y
16     set Z [lindex $values 3]; # Cuarta columna es coordenada Z
17     # Crear los nodos
18     node $NodeLabel $X $Y $Z;
19 }
20 # Cerrar el archivo
21 close $fileId
22
23 # CONDICIONES DE BORDE NODOS -----
24
25 # Abrir archivo
26 set inputFile "Restricciones/RestriccionesFinal.csv"
27 set fileId [open $inputFile r]
28 # Leer datos del archivo
29 while {[gets $fileId line] >= 0} {
30     # Separar la línea en valores individuales
31     set values [split $line ","]; # El separador es punto-coma
32     # Extraer la info correspondiente a los nodos
33     set NodeLabel [lindex $values 0]; # Primera columna es el label
34     fix $NodeLabel 1 1 1 0 0 0; # Apoyo simple
35 }
36 # Cerrar el archivo
```

```

37 close $fileId
38
39 # DEFINIR MATERIALES -----
40
41 # Concrete Materials - Hormigón NO CONFINADO
42 # Para significado de los parámetros ver documentación de los materiales en enciclopedia de
   ↪ OpenSees
43 set fpc [expr -25.0];
44 set ec0 [expr -0.0025];
45 set fpcu [expr -21.3];
46 set ecu [expr -0.005];
47 set lambda 0.1;
48 set ft [expr 1.56];
49 set Ets [expr 5.0e5];
50 uniaxialMaterial Concrete02 201 $fpc $ec0 $fpcu $ecu $lambda $ft $Ets;
51
52 # Concrete Materials - Hormigón CONFINADO
53 set fpc [expr -29.71];
54 set ec0 [expr -0.005];
55 set fpcu [expr -5.99];
56 set ecu [expr -0.02836];
57 set lambda 0.1;
58 set ft [expr 1.56];
59 set Ets [expr 5.0e5];
60 uniaxialMaterial Concrete02 202 $fpc $ec0 $fpcu $ecu $lambda $ft $Ets;
61
62 # Steel Materials
63 set fy [expr 359.6];
64 set b 0.025;
65 set Es [expr 200000.0];
66 set R0 20.0;
67 set A1 0.925;
68 set A2 0.15;
69 uniaxialMaterial SteelMPF 301 $fy $fy $Es $b $b $R0 $A1 $A2;
70
71 # MUROS -----
72
73 # Geometría y hormigón elástico
74 set t 250.0; # Espesor de los muros lineales (son todos de 25 cm).
75 set E 23437.89; # [N/mm2] Módulo Elasticidad del modelo ETABS para hormigón elástico
76 set v 0.2; # [-] Módulo Poisson del hormigón elástico
77
78 nDMaterial ElasticIsotropic 1000000000 $E $v; # Creación del material elástico
79 section PlateFiber 1 1000000000 $t; # Creación de la sección
80
81 # Parametros ESFI
82 # Para significado de cada parámetro ver documentación del ESFI
83 set mfibers 8;
84 set fibras 8.0;
85 set crot 0.4;
86 set tmod 1.0;
87 set poisson 0.2;

```

```

88 set rho 2.449e-9;
89
90 # FSAM nD Reinforced Concrete Materials
91 set nu 0.35;
92 set alfadow 0.0001;
93
94 # Abrir archivo
95 set inputFile "Muros/MurosEstac.csv"
96 set fileId [open $inputFile r]
97
98 # Leer datos
99 while {[gets $fileId line] >= 0} {
100     # Separar la línea en valores individuales
101     set values [split $line ","];    # El separador es punto-coma
102
103     # Extraer la info correspondiente a los nodos y nombre del elemento
104     set Tag      [lindex $values 0];    # Primera columna es el label
105     set Nodo1    [lindex $values 1];    # Segunda columna es el primer nodo
106     set Nodo2    [lindex $values 2];    # Tercera columna es el segundo nodo
107     set Nodo3    [lindex $values 3];    # Cuarta columna es el tercer nodo
108     set Nodo4    [lindex $values 4];    # Quinta columna es el cuarto nodo
109
110     # Crear el elemento
111     element ShellMITC4 $Tag $Nodo1 $Nodo2 $Nodo3 $Nodo4 1; # Creación del elemento
112     ↪ con su tag, los 4 nodos y usando el PlateFiber section.
113 }
114 # Cerrar el archivo
115 close $fileId
116
117 # Abrir archivo
118 set inputFile "Muros/MurosP1.csv"
119 set fileId [open $inputFile r]
120
121 # Leer datos
122 while {[gets $fileId line] >= 0} {
123     # Separar la línea en valores individuales
124     set values [split $line ","];    # El separador es punto-coma
125
126     # Extraer la info correspondiente a los nodos y nombre del elemento
127     set Tag      [lindex $values 0];    # Primera columna es el label
128     set Nodo1    [lindex $values 1];    # Segunda columna es el primer nodo
129     set Nodo2    [lindex $values 2];    # Tercera columna es el segundo nodo
130     set Nodo3    [lindex $values 3];    # Cuarta columna es el tercer nodo
131     set Nodo4    [lindex $values 4];    # Quinta columna es el cuarto nodo
132     set tw       [lindex $values 5];    # Sexta columna es el espesor
133     set pv       [lindex $values 6];    # Séptima columna es la cuantía vertical
134     set ph       [lindex $values 7];    # Octava columna es la cuantía horizontal
135     set indicadorEB [lindex $values 8]; # Novena columna es indicador si el elemento se
136     ↪ confina o no
137     set L        [lindex $values 9];    # Décima columna es el largo del elemento

```

```

137 set indicador [lindex $values 10]; # Undécima columna es el indicador de orientació
    ↪ n
138 set indicadorAcop [lindex $values 11]; # Duodécima columna es el indicador de viga de
    ↪ acople
139
140 set dw [expr $L/$fibras]; # Cálculo del ancho de cada fibra
141
142 if {$indicadorEB == 1} {nDMaterial FSAM $Tag 0.0 301 301 202 $ph $pv $nu $alfadow}
    ↪ else {
143 nDMaterial FSAM $Tag 0.0 301 301 201 $ph $pv $nu $alfadow} # Aplicación del hormig
    ↪ ón confinado o no confinado dependiendo del indicador de confinamiento
144
145 # Crear el elemento
146
147 if {$indicador == 0} {
148     if {$indicadorAcop == 0} {element FourNodeSFI_MVLEM3D_E $Tag $Nodo2
    ↪ $Nodo1 $Nodo4 $Nodo3 $mfibers $scrot $poisson $tmod -thick $tw $tw $tw $tw $tw
    ↪ $tw $tw $tw -width $dw $dw $dw $dw $dw $dw $dw $dw -mat $Tag $Tag $Tag $Tag
    ↪ $Tag $Tag $Tag $Tag} else {
149     element FourNodeSFI_MVLEM3D_E $Tag $Nodo3 $Nodo2 $Nodo1 $Nodo4 $mfibers
    ↪ $scrot $poisson $tmod -thick $tw $tw $tw $tw $tw $tw $tw $tw -width $dw $dw $dw
    ↪ $dw $dw $dw $dw $dw -mat $Tag $Tag $Tag $Tag $Tag $Tag $Tag $Tag}
150 } else {
151     if {$indicadorAcop == 0} {element FourNodeSFI_MVLEM3D_E $Tag $Nodo1
    ↪ $Nodo4 $Nodo3 $Nodo2 $mfibers $scrot $poisson $tmod -thick $tw $tw $tw $tw $tw
    ↪ $tw $tw $tw -width $dw $dw $dw $dw $dw $dw $dw $dw -mat $Tag $Tag $Tag $Tag
    ↪ $Tag $Tag $Tag $Tag} else {
152     element FourNodeSFI_MVLEM3D_E $Tag $Nodo2 $Nodo1 $Nodo4 $Nodo3 $mfibers
    ↪ $scrot $poisson $tmod -thick $tw $tw $tw $tw $tw $tw $tw $tw -width $dw $dw $dw
    ↪ $dw $dw $dw $dw $dw -mat $Tag $Tag $Tag $Tag $Tag $Tag $Tag $Tag}
153 }
154 } # Creación del elemento usa condicionales para cambiar el orden de los nodos dependiendo
    ↪ del indicador de orientación y del indicador de viga de acople
155 close $fileId
156 .
157 .
158 .
159 # Se replica el código para los otros niveles del edificio. La sintaxis es análoga y se omite por
    ↪ propósitos de espacio.
160
161 # VIGAS -----
162
163 set E 23437.89; [N/mm2] Módulo de elasticidad
164 set G 9765.79; [N/mm2] Módulo de corte
165
166 # Transformation
167
168 geomTransf Linear 1 1 1 0; # La elección del vector (1,1,0) asegura que los ejes locales de
    ↪ cada sección son los ejes Y y Z, con Y el eje vertical.
169
170 # Abrir archivo
171 set inputFile "Vigas/VigasFinalv2.csv"

```

```

172 set fileId [open $inputFile r]
173
174 # Leer datos
175 while {[gets $fileId line] >= 0} {
176     # Separar la línea en valores individuales
177     set values [split $line ","]; # El separador es punto-coma
178     # Extraer la info correspondiente a los nodos y nombre del elemento
179     set Tag [lindex $values 0]; # Primera columna es el primer nodo
180     set Nodo1 [lindex $values 1]; # Segunda columna es el segundo nodo
181     set Nodo2 [lindex $values 2]; # Tercera columna es el tercer nodo
182     set A [lindex $values 3]; # Cuarta columna es el área
183     set J [lindex $values 4]; # Quinta columna es la constante de torsión
184     set Iy [lindex $values 5]; # Sexta columna es la inercia en Y
185     set Iz [lindex $values 6]; # Séptima columna es la inercia en Z
186     set TagViga [expr 100000+$Tag]; # Nuevo tag de la viga. Se hace para no
    ↪ interferir con los tags ya creados en los elementos de muros
187     element elasticBeamColumn $TagViga $Nodo1 $Nodo2 $A $E $G $J $Iy $Iz 1
188 }
189 # Cerrar el archivo
190 close $fileId
191
192 # VIGAS ACOUPLE -----
193
194 # Datos viga acople subt
195 set A1 [expr 150.0*12*150.0]; # [mm2] Área de las vigas
196 set E1 23300; # [N/mm2] Módulo de elasticidad
197 set G1 9708.33; # [N/mm2] Módulo de corte
198 set J1 1918687927.2; # [mm4] Constante de torsión
199 set Iz1 [expr 12*(150.0**4)/12]; # [mm4] Inercia en Z
200 set Iy1 [expr 150.0*(12**3)*(150.0**3)/12]; # [mm4] Inercia en Y
201 set Lp1 [expr 2*150.0]; # Largo rótula plástica
202
203 # Material hiper flexible para direcciones no relevantes
204
205 uniaxialMaterial Elastic 2000001 0.01;
206
207 # Material para momento-curvatura
208
209 uniaxialMaterial ElasticBilin 2000002 1.207e12 1.821e9 1.937e-5;
210 section Aggregator 4000001 2000001 P 2000002 Mz 2000001 Vy 2000001 My 2000001 Vz
    ↪ 2000001 T;
211
212 # Abrir archivo
213 set inputFile "VigasAcople/VigasSubt.csv"
214 set fileId [open $inputFile r]
215
216 # Leer datos
217 while {[gets $fileId line] >= 0} {
218     # Separar la línea en valores individuales
219     set values [split $line ","]; # El separador es punto-coma
220     # Extraer la info correspondiente a los nodos y nombre del elemento
221     set Tag [lindex $values 0]; # Primera columna es el primer nodo

```

```

222 set Nodo1      [lindex $values 1];    # Segunda columna es el segundo nodo
223 set Nodo2      [lindex $values 2];    # Tercera columna es el tercer nodo
224 element forceBeamColumn $Tag $Nodo1 $Nodo2 1 "HingeRadau 4000001 $Lp1 4000001
    ↪ $Lp1 4000001";
225 }
226 # Cerrar el archivo
227 close $fileId
228
229 # Datos viga acople pisos
230 set A2      [expr 180.0*12*180.0];
231 set E2      23300;
232 set G2      9708.33;;
233 set J2      3978591285.9;
234 set Iz2     [expr 12*(180.0**4)/12];
235 set Iy2     [expr 180.0*(12**3)*(180.0**3)/12];
236 set Lp2     [expr 2*180.0];
237
238 # Material para momento-curvatura
239
240 uniaxialMaterial ElasticBilin 2000003 2.636e12 3.175e9 1.570e-5;
241 section Aggregator 4000002 2000001 P 2000003 Mz 2000001 Vy 2000001 My 2000001 Vz
    ↪ 2000001 T;
242
243 # Abrir archivo
244 set inputFile "VigasAcople/VigasAcop.csv"
245 set fileId [open $inputFile r]
246
247 # Leer datos
248 while {[gets $fileId line] >= 0} {
249     # Separar la línea en valores individuales
250     set values [split $line ";"];    # El separador es punto-coma
251     # Extraer la info correspondiente a los nodos y nombre del elemento
252     set Tag      [lindex $values 0];    # Primera columna es el primer nodo
253     set Nodo1    [lindex $values 1];    # Segunda columna es el segundo nodo
254     set Nodo2    [lindex $values 2];    # Tercera columna es el tercer nodo
255     element forceBeamColumn $Tag $Nodo1 $Nodo2 1 "HingeRadau 4000002 $Lp2 4000002
        ↪ $Lp2 4000002";
256 }
257 # Cerrar el archivo
258 close $fileId
259
260 # DIAFRAGMAS -----
261 node 1000001 14900 16700 2500; # Centro del diafragma
262 rigidDiaphragm 3 1000001 3443 97 106 105 116 95 101 112 121 150 175 107 141 127 128 129
    ↪ 130 131 132 133 135 136 137 148 144 51 146 1 151 156 177 168 155 167 159 290 291
    ↪ 286 292 293 162 163 164 179 99 192 92 191 3923 96 98 91 109 108 113 114 115 119
    ↪ 140 142 143 145 149 147 160 154 166 173 174 176 178 187 190 238 241 243 245 244
    ↪ 287 295 296 382 385 388 391 390 122 297 329 384 289 398 406 410 2756 444 1295
    ↪ 1622 3439 3435 4069 418 2864 2870 2874 1297 2762 1471 2907 3791 27602 27603 2562
    ↪ 2561 2935 2946 2850 27931 27934 2953 3763 2822 2824 40212 3804 3856 3858 1548
    ↪ 3884 2818 3895 3442 3461 1638 371 3950 4023 4024 4038 4075 4086 4101 4103 2851
    ↪ 2852 14652 14654 14645 14649 14693 14694 14786 5889 5934 5937 6656 6695 9721

```

```

↳ 10430 13409 14788 14879 14880 14990 14960 15024 15088 15274 15861 15279 15289
↳ 15318 15325 15356 13532 15371 13705 15380 13725 15376 15381 15382 15436 15481
↳ 15482 15506 15548 15573 15577 24005 340 39812 15637 15647 40014 3216 3256 16612
↳ 15856 15866 2948 40210 3812 16469 16470 16471 16613 16614 5654 4043 4189 4178
↳ 28101 27743 27777 27825 27913 27997 28040 28074 40479 16288;
263 # Centro del diafragma controla toda la lista de nodos del piso a nivel de losa
264 fix 10000001 0 0 1 1 1 0; # Se restringe el nodo auxiliar creado
265 .
266 .
267 .
268 # El resto de los diafragmas tiene una sintaxis análoga y se omite por espacio
269
270 # MASA -----
271
272 # Abrir archivo
273 set inputFile "MasaLosav2/MasaFinalv3.csv"
274 set fileId [open $inputFile r]
275
276 # Leer datos
277 while {[gets $fileId line] >= 0} {
278     # Separar la línea en valores individuales
279     set values [split $line ","]; # El separador es punto-coma
280     # Extraer la info correspondiente a los nodos y nombre del elemento
281     set Nodo [lindex $values 0]; # Primera columna es el nodo
282     set mx [lindex $values 1]; # Segunda columna es la masa traslacional en X
283     set my [lindex $values 2]; # Tercera columna es la masa traslacional en Y
284     mass $Nodo [expr $mx] [expr $my] 0.0 0.0 0.0 0.0; # Asignación de masa
285 }
286 # Cerrar el archivo
287 close $fileId
288
289 # CARGAS GRAVITACIONALES -----
290
291 set g 9810.0; # Aceleración de gravedad [mm/s2]
292
293 set inputFile "MasaLosav2/MasaFinalv3.csv"
294 set fileId [open $inputFile r]
295 pattern Plain 101 Linear {
296     while {[gets $fileId line] >= 0} {
297         # Separar la línea en valores individuales
298         set values [split $line ","]; # El separador es punto-coma
299         # Extraer la info correspondiente a los nodos y nombre del elemento
300         set Nodo [lindex $values 0]; # Primera columna es el label
301         set Masa [lindex $values 1]; # Segunda columna es la masa traslacional
302         set W [expr -$Masa*$g]; # Cálculo de peso. Tanto mx como my son
           ↳ iguales así que es irrelevante cuál usar
303         load $Nodo 0.0 0.0 $W 0.0 0.0 0.0; # Asignación del peso en el eje Z
304     }
305 }
306 close $fileId

```