



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

MODELACIÓN NO LINEAL, BIDIMENSIONAL Y TRIDIMENSIONAL DE UN
EDIFICIO DE HORMIGÓN ARMADO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

RODRIGO EDUARDO PLAZA ASCENCIO

PROFESOR GUÍA:
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FABIÁN ROJAS BARRALES
MARIO LAFONTAINE ROTH

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: RODRIGO EDUARDO PLAZA ASCENCIO
FECHA: 2017
PROF. GUÍA: SR. LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

MODELACIÓN NO LINEAL, BIDIMENSIONAL Y TRIDIMENSIONAL DE UN EDIFICIO DE HORMIGÓN ARMADO

El presente trabajo consiste en la modelación no lineal y tridimensional en el software comercial CSI Perform-3D, de un edificio habitacional de hormigón armado ubicado en Iquique, el cual fue instrumentado en junio del 2014. Se contaba para este edificio con un modelo 3D en desarrollo, que mostraba acoplamiento de muros mediante los diafragmas.

Se realiza el refinamiento de dicho modelo, y con él se estudia el comportamiento sísmico de sistemas de muros acoplados frente a registros de aceleraciones con diferentes niveles de amplificación, con énfasis en la distribución de las cargas laterales sobre ellos. Posteriormente, se desarrolla un modelo bidimensional para el estudio de un muro particular del edificio, en una sola dirección. Utilizando los modelos 2D y 3D, se analiza el impacto de la modelación no lineal en los resultados, el efecto de las cargas de acople en la posición de la resultante de carga lateral en los muros, las diferencias entre los modelos tridimensional y bidimensional, y el efecto de amplificar la demanda sísmica en el análisis. En el modelo bidimensional se estudian además los límites elásticos del muro escogido, y se hace un análisis de esfuerzos y deformaciones post-fluencia.

Se observa, entre otros resultados, que la posición de la resultante de carga lateral se ubica bajo el valor esperado de dos tercios de la altura del muro, y que las fuerzas axiales en los elementos de acople son las que más incidencia tienen en esa distribución. Al descontar su efecto, la posición de la resultante sube más de un 20 % en los casos estudiados. Por otra parte, el modelo 2D, si bien reproduce el fenómeno estudiado, también presenta un nivel de acoplamiento bajo y un nivel de daño considerablemente inferior al del modelo completo. Al amplificar la sollicitación sísmica se observa una baja de la posición de la resultante de carga lateral, debido a la mayor incidencia de modos superiores y al incremento del nivel de acoplamiento. Finalmente, se observa que luego de la fluencia en la base del edificio, se produce también la fluencia de pisos superiores, donde usualmente ya no se encuentra detallamiento de bordes.

En base a lo estudiado, se proponen algunas recomendaciones. No es aconsejable utilizar modelos de fibras que no consideren la altura completa de los muros. En cuanto a análisis bidimensional, un modelo 2D puede reproducir correctamente ciertos fenómenos, pero en algunos casos no es posible omitir el componente tridimensional pues determina el comportamiento del muro.

Para mis padres, que han estado incondicionalmente en cada paso.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Alcance	2
1.4. Metodología	2
2. Revisión bibliográfica	3
2.1. Introducción	3
2.2. Desarrollo	3
3. Descripción del edificio tipo y del modelo computacional	12
3.1. Introducción	12
3.2. Edificio de estudio	12
3.3. Modelación del edificio de estudio	15
3.3.1. Instrumentación del edificio	15
3.3.2. Calibración del modelo lineal	16
3.3.3. Modelo no lineal en Perform-3D	17
4. Análisis del comportamiento sísmico de ciertos muros, en modelo tridimensional	23
4.1. Introducción	23
4.2. Muros de estudio	24
4.3. Registros sísmicos para estudio	24
4.4. Deformación axial para muros de estudio	27
4.5. Distribución de esfuerzos en altura para muros de estudio	28
4.6. Relación Momento/Corte para los muros de estudio	31
4.7. Efecto de las cargas de las vigas de acople en la relación M/V	36
5. Análisis bidimensional para uno de los muros de estudio	45
5.1. Introducción	45
5.2. Modelo para análisis bidimensional	45
5.3. Resultados del análisis bidimensional	47
5.3.1. Respuesta en desplazamiento	47
5.3.2. Deformación axial en altura	48
5.3.3. Relación Momento/Corte y efecto de las vigas de acople	51
5.4. Análisis del muro 13T bajo registro amplificado	54
5.5. Estudio de comportamiento post-fluencia	61

5.5.1. Cálculo de límites elásticos	61
5.5.2. Análisis de esfuerzos y deformaciones post-fluencia	63
6. Comentarios y conclusiones	68
Bibliografía	71
A. Características del muro de estudio	73

Índice de Tablas

3.1. Periodos y amortiguamientos modales según MOESP. Fuente: Bustos (2016).	15
3.2. Comparación entre periodos instrumentales y del modelo lineal en Perform-3D. Fuente: Bustos (2016)	17
3.3. Valores modales obtenidos del modelo completamente no lineal en Perform-3D.	22
4.1. Principales modelos utilizados, con abreviaturas y características respectivas.	23
4.2. Periodos obtenidos del modelo NL con RL y su comparación con el modelo NL completo.	37
5.1. Periodos obtenidos del modelo bidimensional y su comparación con el modelo NL completo.	47
5.2. Parámetros para el cálculo de los límites elásticos	62
5.3. Valores de los límites elásticos calculados y obtenidos del modelo en Perform-3D.	62
A.1. Características geométricas y de enfierradura por piso, para muro 13T	74

Índice de Ilustraciones

2.1.	Daño presentado en uno de los muros del edificio. Fuente: Kozmidis <i>et al.</i> (2014)	4
2.2.	Análisis de la capacidad al corte de uno de los muros. Fuente: Kozmidis <i>et al.</i> (2014)	5
2.3.	Esquema de un sistema de muros de dos pisos. En (a) las propiedades del sistema, en (b) fuerzas de pisos y deformada de los elementos. Fuente: Rutenberg (2004)	6
2.4.	Modelo utilizado para el análisis de muros acoplados. Fuente: Beyer <i>et al.</i> (2014)	7
2.5.	Esquema de la ecuación 2.4.	9
2.6.	Distribución aproximada de momento en la altura para un muro acoplado. Fuente: Massone y Alfaro (2016).	10
3.1.	Vista aérea sobre la Torre A (recuadro verde). Fuente: Google Earth, 2016.	13
3.2.	Planta Cielo 3 ^{er} Subterráneo. Fuente: René Lagos Ingenieros Asociados, en Bustos (2016).	14
3.3.	Planta Cielo Piso Tipo. Fuente: René Lagos Ingenieros Asociados, en Bustos (2016).	15
3.4.	Planta piso tipo con vigas de acople, en el modelo en ETABS. Fuente: Bustos (2016).	16
3.5.	Modelo momento-rotación para rótulas. Fuente: Perform Components and Elements (2006).	17
3.6.	Extracto del plano de enfierradura de losa para el cielo del piso tipo, con la armadura dispuesta para algunos refuerzos de losa. Fuente: René Lagos Ingenieros Asociados.	18
3.7.	Curva tensión-deformación utilizada para el acero. Fuente: Bustos (2016).	19
3.8.	Curva compresión-deformación utilizada para ambos tipos de hormigón. Fuente: Bustos (2016).	20
3.9.	Proceso de modelación de los muros en Perform-3D. Fuente: René Lagos Ingenieros Asociados (arriba) y Perform-3D (abajo).	20
3.10.	Envolvente de curvatura en el eje Y para los muros de estudio, registro de Concepción x2,5. Fuente: Bustos (2016).	22
4.1.	Muros escogidos para análisis y los nombres asignados a cada uno.	24
4.2.	Envolvente de deformación axial en tracción, para cada nodo de cada muro. Registro de Iquique Chipana.	25
4.3.	Componentes en aceleración registradas de la estación Concepción Centro para el terremoto del Maule de 2010, amplificadas por 1,5.	26

4.4. Espectros de desplazamiento relativo para ambas componentes horizontales del registro de Concepción. Diferentes niveles de amplificación.	26
4.5. Envoltente de deformación axial en tracción, para fibra más traccionada de cada muro. Modelos NL incompleto y NL completo. Registro de Concepción x1,5.	28
4.6. Envoltente de carga axial en altura para cada muro. Modelos NL incompleto y NL completo. Registro de Concepción x1,5.	29
4.7. Envoltente de corte en eje X en altura para cada muro. Modelos NL incompleto y NL completo. Registro de Concepción x1,5.	29
4.8. Envoltente de corte en eje Y en altura para cada muro. Modelos NL incompleto y NL completo. Registro de Concepción x1,5.	30
4.9. Envoltente de momento con respecto al eje Y en altura para cada muro. Modelos NL incompleto y NL completo. Registro de Concepción x1,5.	30
4.10. Envoltente de momento con respecto al eje X en altura para cada muro. Modelos NL incompleto y NL completo. Registro de Concepción x1,5.	31
4.11. Momento en el tiempo en el subterráneo -3 para el muro 13T, junto con los valores seleccionados para el cálculo de la razón M/V . Registro de Concepción x1,5.	32
4.12. Relación M/V en el tiempo, para los muros de estudio y en ambas direcciones, con respecto al subterráneo -3. Registro de Concepción x1,5.	33
4.13. Promedio y dispersión de la relación M/V para los muros de estudio y en ambas direcciones, con respecto al subterráneo -3. Registro de Concepción x1,5.	33
4.14. Relación M/V en el tiempo, para los muros de estudio y en ambas direcciones, con respecto al piso 1. Registro de Concepción x1,5.	34
4.15. Promedio y dispersión de la relación M/V para los muros de estudio y en ambas direcciones, con respecto al piso 1. Registro de Concepción x1,5.	34
4.16. Promedio y dispersión de la relación M/V para la planta completa, en ambas direcciones y con respecto al subterráneo -3 y al piso 1. Registro de Concepción x1,5.	35
4.17. Planta tipo en Perform-3D. Los elementos en rojo representan vigas de acople entre muros.	36
4.18. (a) Diafragma aplicado en el piso tipo, los círculos rosados definen los nodos que están considerados en el <i>constraint</i> ; (b) diafragma aplicado en el nuevo modelo, dejando libre los nodos en el rectángulo verde cercanos al muro 13T.	38
4.19. Esquema que representa el proceso seguido para recoger el efecto de las cargas axiales de acople sobre la razón M/V . (a) Muro no acoplado; (b) muro acoplado mediante refuerzos de losa.	39
4.20. Refuerzos de losa (en rojo) que llegan al muro 13T, en Perform-3D.	40
4.21. Cargas de acople del piso i sobre el muro 13T al moverse en la dirección flexible (eje Y).	41
4.22. Ubicación de la resultante de carga lateral para el muro 13T, con respecto al subterráneo -3 y al piso 1. Aporte del momento en extremos de vigas de acople. Registro de Concepción x1,5.	41
4.23. Ubicación de la resultante de carga lateral para el muro 13T en el eje Y, con respecto al subterráneo -3. Aportes de cargas axiales y corte. Registro de Concepción x1,5.	43

4.24. Ubicación de la resultante de carga lateral para el muro 13T en el eje Y, con respecto al piso 1. Aportes de cargas axiales y corte. Registro de Concepción x1,5.	43
5.1. Planta tipo del modelo 2D en Perform-3D. Se ve en (a) los refuerzos de losa en rojo; en (b) el diafragma utilizado en la planta tipo.	46
5.2. Comparación de respuesta en desplazamiento de techo en el eje Y, muro 13T. Modelos 2D y 3D. Registro de Concepción x1,5.	48
5.3. Comparación de respuesta en desplazamiento de techo en el eje X, muro 13T. Modelos 2D y 3D. Registro de Concepción x1,5.	48
5.4. Identificación de los diferentes nodos donde se calcula deformación, para el muro 13T.	49
5.5. Envolvente de deformación axial en tracción, para cada nodo del muro 13T, en modelos 2D y 3D. Registro de Concepción x1,5.	49
5.6. Movimiento de la sección del muro 13T en el piso 21, para un mismo instante de tiempo. Registro de Concepción x1,5.	50
5.7. Resultante de la carga lateral para el muro 13T en modelo 2D, con respecto al subterráneo -3 y al piso 1. Registro de Concepción x1,5.	51
5.8. Distribución de momento en la altura, para algunos de los instantes utilizados en el análisis. Modelo 2D, registro de Concepción x1,5.	52
5.9. Distribución de momento en la altura, para algunos de los instantes utilizados en el análisis. Modelo 3D, registro de Concepción x1,5.	53
5.10. Envolvente de deformación axial en tracción, para cada nodo del muro 13T, en modelo 2D. Registro de Concepción x2,5 y x3,5.	54
5.11. Resultante de la carga lateral para el muro 13T en modelo 2D, con respecto al subterráneo -3 y al piso 1. Registro de Concepción x2,5.	55
5.12. Resultante de la carga lateral para el muro 13T en modelo 2D, con respecto al subterráneo -3 y al piso 1. Registro de Concepción x3,5.	56
5.13. Distribución de momento en la altura, para algunos de los instantes utilizados en el análisis. Modelo 2D, registro de Concepción x2,5.	57
5.14. Distribución de momento en la altura, para algunos de los instantes utilizados en el análisis. Modelo 2D, registro de Concepción x3,5.	57
5.15. Resultante de la carga lateral para la planta completa y el muro 13T en modelo 2D, con respecto al subterráneo -3.	58
5.16. Resultante de la carga lateral para la planta completa y el muro 13T en modelo 2D, con respecto al piso 1.	58
5.17. Resultante de la carga lateral para el muro 13T en modelo 3D, con respecto al subterráneo -3 y al piso 1. Registro de Concepción x1,5 y x2,5.	60
5.18. Planta del modelo bidimensional con los dos muros que forman el sistema estructural.	61
5.19. Desplazamiento de techo para el nodo 2 del muro 13T (arriba), instantes de tiempo relevantes para el análisis en verde (abajo). Registro de Concepción x5.	63
5.20. Distribución de momento y corte en la altura del muro 13T para los instantes de interés, así como las razones M/V respectivas. Registro de Concepción x5.	64
5.21. Distribución de deformaciones en altura del muro 13T para los instantes de interés. Registro de Concepción x5.	65

5.22. Distribución de deformaciones en altura del muro 13T para instantes posteriores ($t = 30,5$ [s]). Registro de Concepción x5.	66
5.23. Distribución de deformaciones en altura del muro 13T para instantes posteriores ($t = 31$ [s]). Registro de Concepción x5.	66

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Debido a la alta sismicidad de nuestro país, la normativa que rige el diseño de estructuras debe mantenerse en constante revisión. En particular, luego del terremoto de magnitud M8.8 del 27 de febrero del 2010, las normas chilenas oficiales NCh433 (que regula el diseño sísmico de edificios) y NCh430 (que regula el cálculo y diseño en hormigón armado) sufrieron cambios que se vieron reflejados en la emisión de decretos supremos en los años posteriores.

Esto se tomó como medida de emergencia, ya que después del terremoto quedaron en evidencia ciertas falencias de la normativa chilena vigente hasta ese momento, en especial en cuanto al diseño de muros de hormigón armado (y que de hecho motivaron la publicación del DS60, que reemplaza a la NCh430). A partir de ese momento, se han desarrollado diferentes estudios que buscan predecir o comprender de mejor manera el comportamiento sísmico de muros de hormigón armado, y cómo se produce la falla de éstos ante un terremoto importante.

En este contexto, se cuenta con un edificio de hormigón armado de uso habitacional, ubicado en Iquique, instrumentado con una red de acelerómetros. Bustos (2016) desarrolló un modelo según la práctica tradicional de las oficinas de cálculo, obteniendo una buena correlación con el periodo y respuesta a una de las réplicas del terremoto de Iquique (2014). Además, comenzó a desarrollar un modelo no lineal de la estructura, cuya continuación podría arrojar nueva información sobre su comportamiento.

1.2. Objetivos

Generales

Desarrollar un modelo que represente el comportamiento no lineal en muros de hormigón armado, en particular al considerar muros acoplados en distintas direcciones.

Específicos

- Refinar el actual modelo 3D para representar el comportamiento no lineal del edificio.
- Analizar el comportamiento sísmico de determinados muros del edificio, con énfasis en la distribución de esfuerzos frente a un sismo de gran magnitud.
- Realizar un modelo bidimensional para estudiar un eje resistente en particular del edificio. El modelo 3D actual muestra un acoplamiento de los muros a través de los diafragmas, y se desea ver si ese efecto se captura al considerar un modelo 2D.
- De ser pertinente, en base a los resultados obtenidos proponer recomendaciones para la modelación y estudio de este tipo de casos.

1.3. Alcance

El tema corresponde a la continuación de un trabajo en desarrollo, donde se modeló según la práctica tradicional un edificio de hormigón armado. Se preparó, además, un modelo utilizando un software de análisis no lineal, el cual requiere refinamiento.

1.4. Metodología

El edificio en cuestión corresponde a una estructura habitacional de hormigón armado de 32 pisos + 3 subterráneos (considerado como edificio “alto”, para los estándares chilenos), ubicado en Iquique. La estructura sismorresistente del edificio corresponde básicamente a muros de corte de hormigón armado de diferentes espesores, lo que representa la práctica usual en el país.

El modelo 3D del edificio con el que se contaba en un principio fue desarrollado por Bustos (2016) en el software comercial CSI Perform-3D, y considera no linealidad hasta cierto nivel del edificio. Utilizando el mismo programa, se refina el modelo aumentando el efecto no lineal a toda la altura del edificio, y se analiza el impacto que esto tiene sobre los resultados. Se estudia también la ubicación de la resultante de la carga lateral sobre la estructura para determinados registros sísmicos, y qué implicancias tienen estos resultados sobre el comportamiento sísmico de los muros.

Posteriormente y también utilizando el CSI Perform-3D, se realiza un análisis bidimensional del edificio, analizando un eje resistente aislado (sin la intervención del resto de la estructura). De este modo, se busca comparar estos resultados con los del modelo 3D. Se analiza el impacto que tiene aumentar la demanda sísmica en la distribución de los esfuerzos laterales en los muros. Finalmente se realiza para un muro en particular un estudio de su comportamiento posterior a la fluencia.

Capítulo 2

Revisión bibliográfica

2.1. Introducción

En el presente capítulo, se recopilan antecedentes sobre validación y comparación del comportamiento sísmico de edificios de hormigón armado en base a muros de corte, con respecto a sus correspondientes modelos en software de análisis no lineal.

Se describen trabajos que buscan obtener modelos capaces de reproducir fielmente el comportamiento de una estructura frente a sismos de diseño, para lo cual se ha recurrido a análisis no lineales. También se describen los trabajos que han realizado diversos autores sobre el estudio de sistemas de muros acoplados, y cómo dicha condición genera resultados diferentes a los que se obtienen de considerar muros que actúan de forma independiente.

Finalmente, se describe a grandes rasgos el trabajo realizado por Bustos (2016), que da origen a algunas de las interrogantes que el presente trabajo busca resolver.

2.2. Desarrollo

El terremoto de magnitud M8.8 ocurrido el 2010 en la zona del Maule en Chile interesó a diversos investigadores al ocurrir en un país con un código de diseño considerado internacionalmente como moderno, donde además se tienen buenas prácticas tanto de diseño como de construcción de estructuras. Esto hace que este terremoto y sus efectos constituyan una excelente fuente de información para encontrar vulnerabilidades en los códigos de diseño actuales.

Kozmidis *et al.* (2014) utilizaron un programa estándar de la industria para predecir el comportamiento de un edificio de hormigón armado durante un terremoto de gran magnitud. Para ello, escogieron un edificio de 18 pisos + 2 subterráneos ubicado en la ciudad de Santiago, representativo de la práctica usual chilena. El edificio, según la Inspección Técnica, presentó daño por flexocompresión (fractura del concreto y posterior pandeo del refuerzo longitudinal)

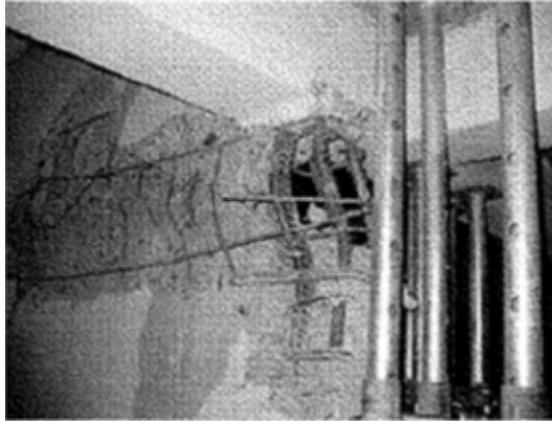


Figura 2.1: Daño presentado en uno de los muros del edificio. Fuente: Kozmidis *et al.* (2014)

a nivel de la losa de trancamiento (losa del primer piso), como se observa en la Figura 2.1.

Para la modelación del edificio, los autores eligieron el software de la compañía CSI, Perform-3D. Este programa está especializado en diseño por desempeño y análisis no lineal de estructuras, y es estándar de la industria.

Los autores utilizan un modelo de fibras para representar los muros del edificio. Dado que el modelo de fibras representa el comportamiento a flexión, el corte se modela de forma independiente. Debido a las deformaciones observadas y al tipo de daño que se registró, el material se consideró elástico frente al corte. Como sollicitación sísmica, se analizó el comportamiento de la estructura bajo los registros tiempo-historia en aceleración, obtenidos de las estaciones Centro de Salud de Maipú y Villa Andalucía en Santiago, para el terremoto del 2010.

Los resultados arrojados por el modelo muestran niveles considerables de deformación del concreto que en varios casos superan la deformación última en compresión, por lo que se debería observar fractura y desprendimiento del recubrimiento en esas zonas. Sin embargo, las locaciones donde se observó el daño estructural no coinciden con las que predice el programa.

Se analizó además para un muro en particular su capacidad al corte, observándose que en niveles cercanos a la losa de trancamiento (primer nivel y primer subterráneo) se alcanzan esfuerzos de corte que superan considerablemente la capacidad del elemento (Figura 2.2). Sin embargo, el daño observado fue producto de la flexión en las armaduras longitudinales. Estos resultados plantean dos interrogantes: cómo modelar el efecto del suelo sobre los subterráneos de la estructura, y cómo modelar correctamente la interacción entre esfuerzos de flexión y corte.

En la misma línea, Jünemann *et al.* (2016) presentaron dos modelos inelásticos de un edificio real que resultó dañado el año 2010 durante el terremoto del Maule, con el objetivo de reproducir las fallas reportadas. En este edificio se observó la falla frágil de ciertos muros críticos ubicados en el primer subterráneo, similar a lo observado en la mayoría de los edificios que presentaron daño estructural severo (según lo descrito por Wallace *et al.* (2012)) y que a su vez coincide con las fallas del edificio escogido por Kozmidis *et al.* (2014).

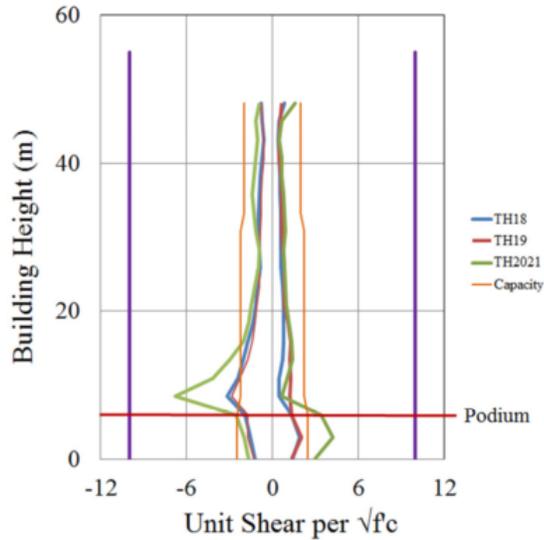


Figura 2.2: Análisis de la capacidad al corte de uno de los muros. Fuente: Kozmidis *et al.* (2014)

Los autores también incluyeron no linealidad en el modelo estructural, pero ésta se consideró solamente en algunos muros del primer subterráneo, dado que fue ahí donde se concentró el daño, mientras que el resto de la estructura se asumió que se mantuvo en el rango elástico.

Un muro en particular se estudió mediante un análisis bidimensional inelástico de *pushover*, con un modelo de elementos finitos utilizando el software DIANA 0. Para simular la sollicitación sísmica, se aplicaron desplazamientos laterales correspondientes al primer modo traslacional en cada piso, mientras que desplazamientos verticales simulan la interacción del muro con el resto de la estructura. El modelo logró predecir con éxito el patrón inicial del daño, sin embargo, la grieta no se propaga hacia el interior del muro (en contraste con lo observado). Cabe mencionar también que las propiedades de los materiales incluidas no consideraban el efecto de pandeo y fractura de barras en el análisis.

Los autores desarrollaron también un modelo de elementos finitos tridimensional del edificio. En este modelo incluyeron elementos de fibras para el análisis no lineal de algunos de los muros del subterráneo. Los resultados del análisis dinámico mostraron que el muro falla abruptamente debido a un aumento considerable de la fuerza axial sobre el elemento. Estos se correlacionan bien con lo observado, y de paso validan los resultados obtenidos por el modelo 2D. Sin embargo, cabe mencionar que la respuesta inelástica del modelo 3D resultó ser extremadamente sensible frente a variaciones de ciertos parámetros.

Tanto Kozmidis *et al.* (2014) como Jünemann *et al.* (2016) trabajaron con modelos que incorporan no linealidad con el objetivo de reproducir daños observados, dejando algunas interrogantes como el nivel de detalle que deben tener estos modelos o cómo considerar interacciones entre ciertos efectos. En el caso del presente trabajo, el edificio objetivo no presentó daño estructural, de modo que lo que se busca es hacer un análisis no lineal que permita predecir cómo se comportaría la estructura frente a un evento sísmico de gran magnitud.

Uno de los objetivos centrales del presente trabajo es estudiar el comportamiento de sistemas de muros acoplados mediante losas (que es el caso del edificio de estudio). En este contexto, Rutenberg (2004) estudió el corte sísmico en sistemas de muros dúctiles, poniendo énfasis en la distribución de corte entre los muros y en las fuerzas que se generan dentro del plano de las losas que los unen.

En el esquema de la Figura 2.3 se ve un edificio de dos pisos compuesto por un sistema de dos muros conectados mediante losas, siendo el segundo muro considerablemente más largo que el primero. Considerando la relación¹ presentada por Priestley *et al.* (2007) entre curvatura de fluencia ϕ_y y largo de muro l_w :

$$\phi_y = \frac{2\varepsilon_y}{l_w} \quad (2.1)$$

donde ε_y es la deformación de fluencia del acero, el muro más largo fluirá primero, formándose una rótula plástica en su base (razón por la cual el muro 2 tiene un apoyo rotulado en la Figura 2.3). El autor plantea que tras la fluencia del primer muro, si una carga lateral ΔH actúa empujando el edificio en el piso superior, el muro 2 se va a deformar como un cuerpo rígido, forzando la deformada del muro más corto, aún sin fluir. Esto provocaría una redistribución de los esfuerzos en la base de los muros, así como fuerzas axiales en las losas que los conectan.

De acuerdo a los modelos numéricos desarrollados en el mismo trabajo, las fuerzas axiales en las losas aparecen luego de la fluencia del primer muro, no pueden ser detectadas con análisis lineal, y pueden alcanzar una magnitud considerable.

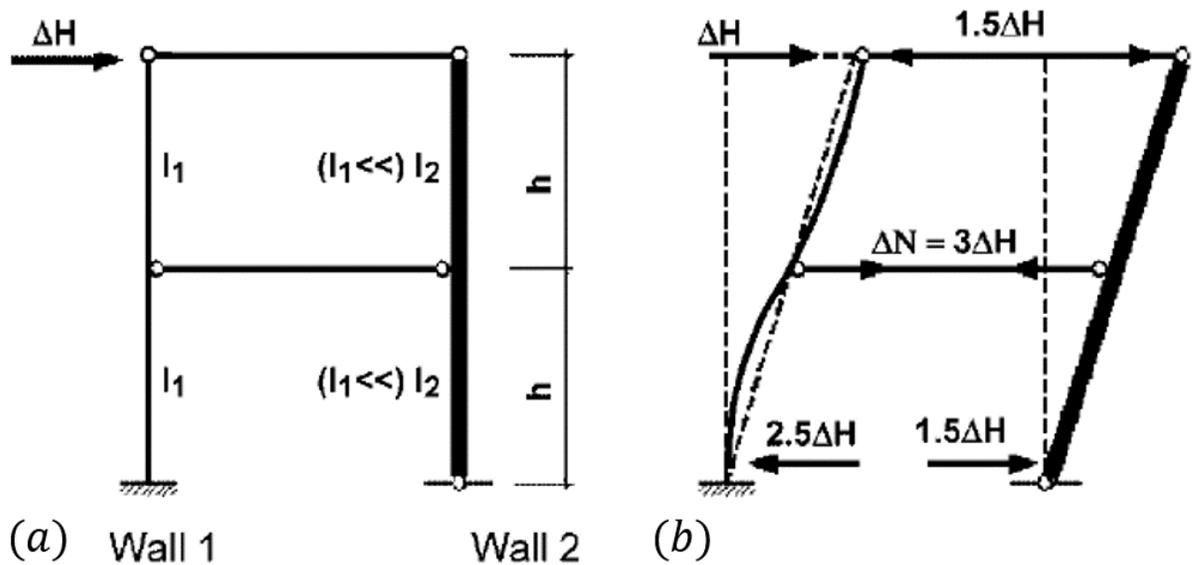


Figura 2.3: Esquema de un sistema de muros de dos pisos. En (a) las propiedades del sistema, en (b) fuerzas de pisos y deformada de los elementos. Fuente: Rutenberg (2004)

Otro de los trabajos que estudiaron este fenómeno es el de Beyer *et al.* (2014), quienes

¹Según Priestley *et al.* (2007), esta relación se cumple en promedio $\pm 15\%$, para muros rectangulares.

analizaron la distribución del corte sísmico entre muros en cantiléver de diferentes largos, acoplados mediante diafragmas de piso.

Utilizando VecTor2, un programa de elementos finitos desarrollado para el análisis plano de estructuras de hormigón armado, realizaron un análisis bidimensional de muros acoplados en base a elementos tipo *shell* (el modelo se observa en la Figura 2.4). Las interconexiones mediante losas (infinitamente rígidas en el plano) se modelaron imponiendo desplazamientos laterales idénticos para ambos muros en cada nivel de piso. Esta condición provoca la aparición de fuerzas de compatibilidad en los muros que a su vez alteran la distribución del esfuerzo de corte en la base.

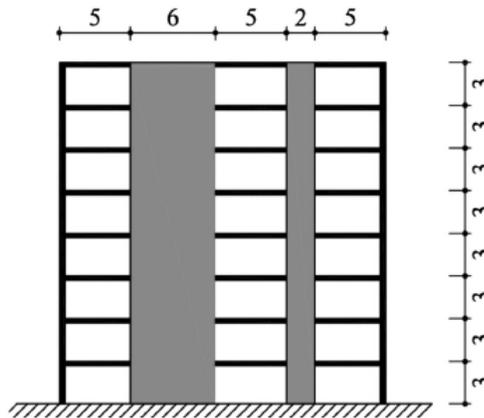


Figura 2.4: Modelo utilizado para el análisis de muros acoplados. Fuente: Beyer *et al.* (2014)

Los resultados del análisis de *pushover* mostraron que antes de que alguno de los muros alcance la fluencia en la base, el corte basal en cada uno es proporcional a su rigidez lateral, como sería si los muros se movieran independientes. Sin embargo, una vez que el muro más largo fluye, el corte se comporta proporcional al momento basal. Mientras el corte basal del sistema se mantiene inalterado, las fuerzas de compatibilidad aumentan la demanda de corte en el muro más corto y la disminuyen en el más largo.

Los autores contrastaron estos resultados con los de otros dos modelos: por un lado, utilizaron elementos viga con plasticidad concentrada en rótulas plásticas que se forman en la base, y por otro, elementos viga con plasticidad distribuida (en base a fibras), que eran capaces de capturar la no linealidad en la altura del muro. Los análisis demostraron que éste último se correlaciona mucho mejor con el elemento tipo *shell*.

A modo de recomendación, los autores plantearon que este tipo de modelos, ampliamente utilizados en oficinas de cálculo, pueden mejorarse considerablemente si se considera la flexibilidad al corte. Esto dado que los efectos de flexión y corte en elementos de hormigón armado que entran en fluencia están fuertemente acoplados, y los modelos estándares actuales no son capaces de considerar dicha interacción.

Al igual que los estudios anteriormente mencionados, estos resultados verifican que los análisis no lineales pueden ser más precisos y lograr mejores correlaciones. Sin embargo, sigue presente el hecho de que hay ciertos efectos que los programas estándares aún no pueden considerar.

Por otra parte, se valida que la interacción entre muros mediante diafragmas rígidos hacen que éstos se comporten de forma diferente a como lo harían se fueran muros independientes en cantiléver. Este punto es de gran importancia dado uno de los objetivos del presente trabajo, que es el estudiar el acoplamiento de muros tanto en 3D como en 2D.

En este contexto interesa estudiar el comportamiento de los muros al entrar en el rango no lineal, es decir, una vez que se produce la fluencia. Dado que los sismos imponen una demanda de desplazamiento sobre la estructura, interesa saber si esta demanda es mayor al desplazamiento elástico o de fluencia δ_y (desplazamiento de techo tal que produce la fluencia en el muro). Si este valor es superado, es posible pensar en el desplazamiento total δ_u como la suma de dos partes, una elástica y otra plástica (δ_p):

$$\delta_u = \delta_y + \delta_p \quad (2.2)$$

Para estimar el comportamiento plástico del muro, es que se recurre al modelo de la rótula plástica, que supone que post-fluencia las deformaciones inelásticas se concentran en una zona específica (denominada rótula plástica) de largo l_p , típicamente ubicada en la parte inferior del muro. No hay un consenso en cuanto a cómo calcular algunos de estos parámetros, que son relevantes en el diseño de muros, particularmente en el detallamiento de los bordes. Bohl y Adebar (2011) propusieron la siguiente ecuación para estimar la cota inferior de la longitud de la rótula plástica:

$$l_p = (0,2l_w + 0,05z) \left(1 - \frac{1,5P}{f'_c A_g} \right) \leq 0,8l_w \quad (2.3)$$

donde P es la fuerza axial a la que está sometido, f'_c es la resistencia a la compresión del hormigón, A_g es el área bruta en compresión y z es la razón momento-corte ($z = M/V$) en la base del muro.

Esta razón representa la ubicación de la resultante de la carga lateral, y es uno de los parámetros de interés en el presente estudio, en particular, cómo se ve afectada por el acoplamiento de los muros mediante losas.

Si se tiene un muro aislado en cantiléver moviéndose principalmente en el primer modo de vibración, la carga lateral sobre él puede asemejarse a una carga distribuida triangular cuya resultante se ubica a dos tercios de la altura del muro. De este modo,

$$\frac{M}{V} = z = \frac{2h_w}{3} \quad (2.4)$$

donde h_w es la altura del muro. Un esquema de esto se observa en la Figura 2.5. Típicamente esta situación es considerada para estimar la razón momento-corte, sin embargo, Bustos (2016) observó para un edificio de hormigón armado de estructuración típica chilena, que este valor disminuye considerablemente para varios de los muros de estudio. Se presume que esto se puede deber al efecto de acoplamiento de muros mediante las losas.

En el presente estudio, se trabaja en base al modelo desarrollado por Bustos (2016), quien trabajó con un edificio habitacional de hormigón armado de 32 pisos + 3 subterráneos, ubicado en la ciudad de Iquique, al norte de Chile. Este edificio fue instrumentado en junio del

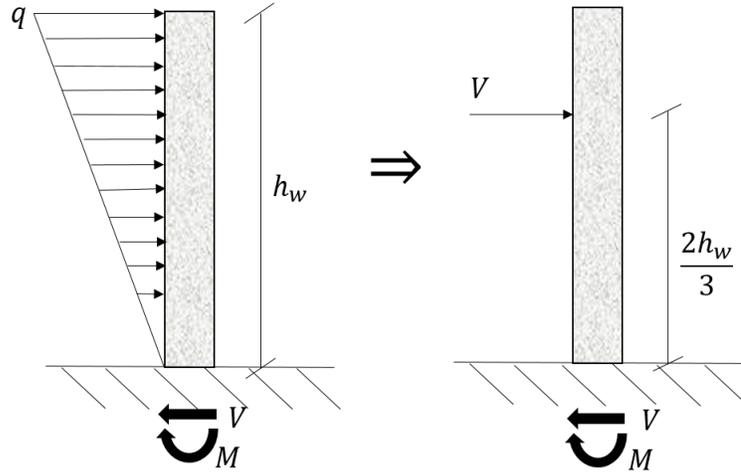


Figura 2.5: Esquema de la ecuación 2.4.

2014, dos meses después del terremoto M8.2 que azotó esa zona del país. Los acelerómetros que fueron instalados en el edificio (uno sobre las fundaciones, que se asume como input de campo libre en la base, y dos en altura) registraron réplicas del terremoto. Estos registros permitieron obtener las propiedades dinámicas reales de la estructura.

Teniendo los periodos y la respuesta de la estructura frente a réplicas, Bustos validó un modelo del edificio, desarrollado en el software ETABS de la compañía CSI. Posteriormente, con el objetivo de llevar a cabo un análisis no lineal, a partir de ese modelo desarrolló otro simplificado utilizando Perform-3D. Este modelo cuenta con rótulas plásticas en los extremos de los refuerzos de losa, y los muros de los 6 primeros niveles cuentan con un modelo de fibras a flexocompresión. Siguiendo las recomendaciones del manual de Perform-3D en su apartado de *Components and Elements* (2006), se consideró comportamiento diferenciado para acero y hormigón.

Una vez validado el modelo, se analizó el comportamiento del edificio frente a un registro sísmico del terremoto M8.8 del 2010 ocurrido en el Maule, amplificado por 2,5 de modo de asegurar la incursión del edificio en el rango no lineal. En los resultados se observa que la interfaz entre el modelo de fibras y el modelo lineal, en el piso 3, podría inducir ciertas condiciones de borde ficticias. Es por esto que el primer objetivo del presente trabajo es continuar con el desarrollo del modelo de modo de expandir las fibras en toda la altura de los muros.

Posteriormente y con el objetivo de estudiar los límites elásticos para uno de los muros, se utilizan las expresiones propuestas por Massone y Alfaro (2016) para el desplazamiento de fluencia y la curvatura de fluencia (ϕ_y):

$$\delta_y = \alpha \phi_y h_w^2 \quad (2.5)$$

$$\phi_y = K \frac{\varepsilon_y}{l_w} \quad (2.6)$$

donde los coeficientes K y α fueron calibrados mediante análisis paramétrico, para muros rectangulares y muros con sección T. Los autores entregan expresiones para el cálculo de estos coeficientes para diferentes casos, dependientes del nivel de carga axial y de la cuantía de refuerzo en los bordes (ρ_b).

Para el caso estudiado, correspondiente a una sección T con el alma en compresión, las expresiones de estos coeficientes son las siguientes:

$$K = 1,32 + 1,67 \frac{P}{f_c' A_g} + 0,54 \rho_b \quad (2.7)$$

$$\alpha = 0,315 \rho_b^{0,15} \quad (2.8)$$

En este mismo trabajo, los autores estudiaron como el acoplamiento de muros puede afectar el desplazamiento de fluencia. Cuando uno de los muros en el sistema es más largo, fluirá primero que el muro más corto, pudiendo provocar que este último fluya para una demanda menor a la esperada. Este valor de desplazamiento elástico para un muro acoplado, δ_{ye} , depende del valor de demanda elástica para el muro aislado, δ_y , y del nivel de acoplamiento del sistema. Para medir este último, los autores usan como parámetro la altura del punto de inflexión del diagrama de momento, entendiendo que a mayor acoplamiento, el diagrama de momento ya no será siempre de un mismo signo, sino que cambiará en algún punto de la altura del muro, cada vez más bajo. A esta altura se le denomina h_0 , como se observa en la Figura 2.6.

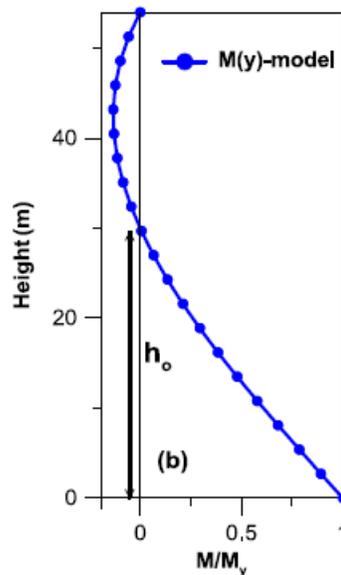


Figura 2.6: Distribución aproximada de momento en la altura para un muro acoplado. Fuente: Massone y Alfaro (2016).

De esta manera, el desplazamiento de fluencia para un muro acoplado se puede estimar como:

$$\delta_{y_c} = \delta_y \left(1,4 \frac{h_0}{h_w} - 0,37 \right)^{0,4} \quad (2.9)$$

Por último, cabe mencionar que el modelo a utilizar, a diferencia de las experiencias mencionadas anteriormente, corresponde a un edificio real instrumentado, lo que permitió su calibración. De esta manera, se cuenta con un modelo que representa fielmente el comportamiento de la estructura, que además corresponde a un edificio habitacional representativo de la práctica chilena. De ahí su utilidad para investigar como se comportaría la estructura frente a eventos hipotéticos de gran magnitud, o estudiar fenómenos como el acoplamiento de muros, que no se pueden estudiar correctamente mediante análisis lineal.

Capítulo 3

Descripción del edificio tipo y del modelo computacional

3.1. Introducción

Como se mencionó anteriormente, Bustos (2016) desarrolló y calibró un modelo en un software de análisis no lineal, correspondiente a un edificio de hormigón armado ubicado en Iquique, al norte de Chile. Con este modelo se estudió el comportamiento inelástico de la estructura al verse sometida a registros sísmicos de gran magnitud.

En el presente capítulo se describen las características del edificio tipo: su ubicación, estructuración en altura y en planta, los materiales utilizados y los parámetros considerados para el diseño sismorresistente.

Se describe también su proceso de modelación: el modelo original lineal elástico que utilizó la oficina de cálculo en el diseño estructural del edificio; el modelo calibrado mediante las propiedades dinámicas reales de la estructura, que considera comportamiento no lineal en los primeros niveles; y finalmente el modelo refinado que considera la no linealidad en toda la altura del edificio, que se desarrolla como parte del presente trabajo.

3.2. Edificio de estudio

El edificio modelado corresponde a una torre de 32 pisos (llegando a una altura máxima de 83 metros para algunos muros) y 3 subterráneos, ubicada en la ciudad de Iquique, Región de Tarapacá, Chile, y corresponde a la “Torre A” del condominio “Velamar”, ubicado entre las calles Manuel Jesús Silva y José Francisco Vergara (Figura 3.1), en el sector de Playa Brava, al sur de la ciudad (Bustos (2016)). Es de uso habitacional, con los subterráneos dedicados principalmente a estacionamientos y bodegas. Está construido completamente a base de hormigón armado. Los departamentos del edificio fueron entregados a los propietarios durante el segundo semestre del año 2014.

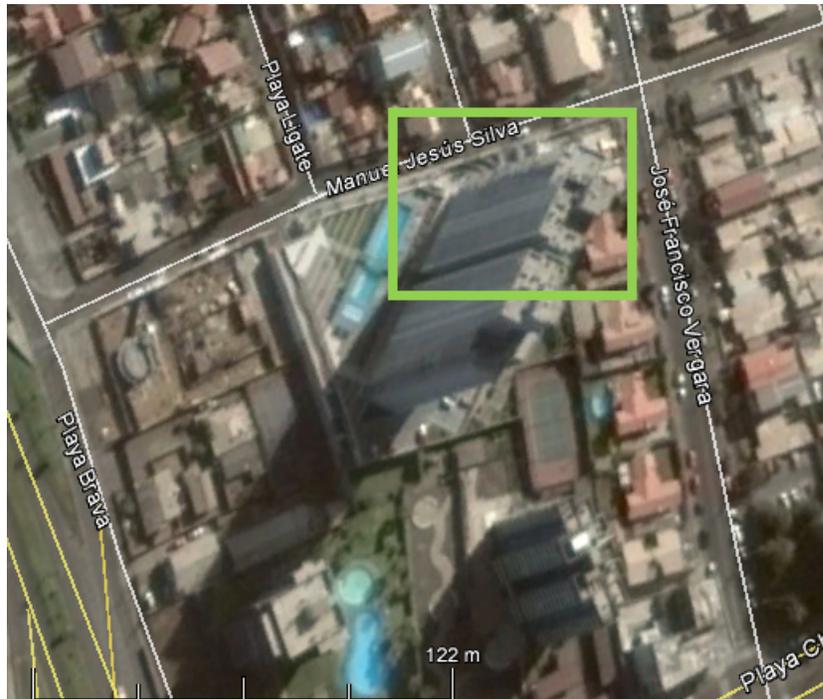


Figura 3.1: Vista aérea sobre la Torre A (recuadro verde). Fuente: Google Earth, 2016.

Su estructuración es típica de los denominados “edificios de corte” de hormigón armado, con un núcleo para el tránsito vertical (ascensores y caja escalera) cerca del centro de la planta; y una serie de muros internos con un pasillo central, la mayoría de ellos con las formas típicas que se pueden ver en la práctica chilena: muros T, C o rectangulares. Los muros constituyen el principal sistema resistente frente a cargas laterales y verticales, y tienen un espesor que varía desde los 50 cm en algunos casos en los primeros subterráneos, hasta los 20 cm en la mayoría de los muros al llegar a los últimos niveles, con diversos espesores a lo alto. Las losas, por su parte, actúan como diafragma rígido uniendo los muros. Tienen un espesor de 16 cm en los subterráneos y bajo las áreas públicas del primer nivel, y de 14 cm en el resto de la estructura. Vigas de alturas variables, perimetrales e internas, y refuerzos de losa (vigas embebidas en la losa) completan la estructuración en altura del edificio. Estos últimos además actúan como vigas de acople entre muros. La fundación, por su parte, corresponde a una losa de fundación masiva de 2 metros de altura.

La planta tiene un área mayor en los subterráneos en relación con los pisos superiores, como se ve en las Figuras 3.2 y 3.3. En altura, el edificio presenta un “piso tipo” entre los niveles 2 y 27, luego el área disminuye en alrededor de un 50 % entre los pisos 28 y 30, para finalmente reducirse a la sala de máquinas y ducto de ascensores en los últimos 2 pisos. De las plantas además se aprecia que el edificio es considerablemente más esbelto en una dirección (la vertical, en el caso de las Figuras). Esta se considera la dirección “flexible” de la estructura (o eje Y), mientras que la perpendicular es la “rígida” (o eje X).

Como se mencionó anteriormente, el edificio está construido totalmente con hormigón armado. El hormigón utilizado es un H40 desde la fundación hasta el piso 15. A partir del piso 16, se utiliza para todos los elementos un hormigón H30. Todos los hormigones utilizados son de un nivel de confianza de un 90 %.

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO TIPO Y DEL MODELO COMPUTACIONAL

El diseño sísmico del edificio se realizó en base a la Norma Chilena Oficial NCh433 modificada el 2009, sin considerar el Decreto Supremo N° 61, pues en la fecha de su diseño éste aún no entraba en vigencia. Según la misma normativa, la estructura se emplaza en la zona sísmica 3, corresponde a un edificio categoría II (para uso habitacional privado) y de acuerdo a la mecánica de suelos el suelo sobre el que se funda es tipo III.

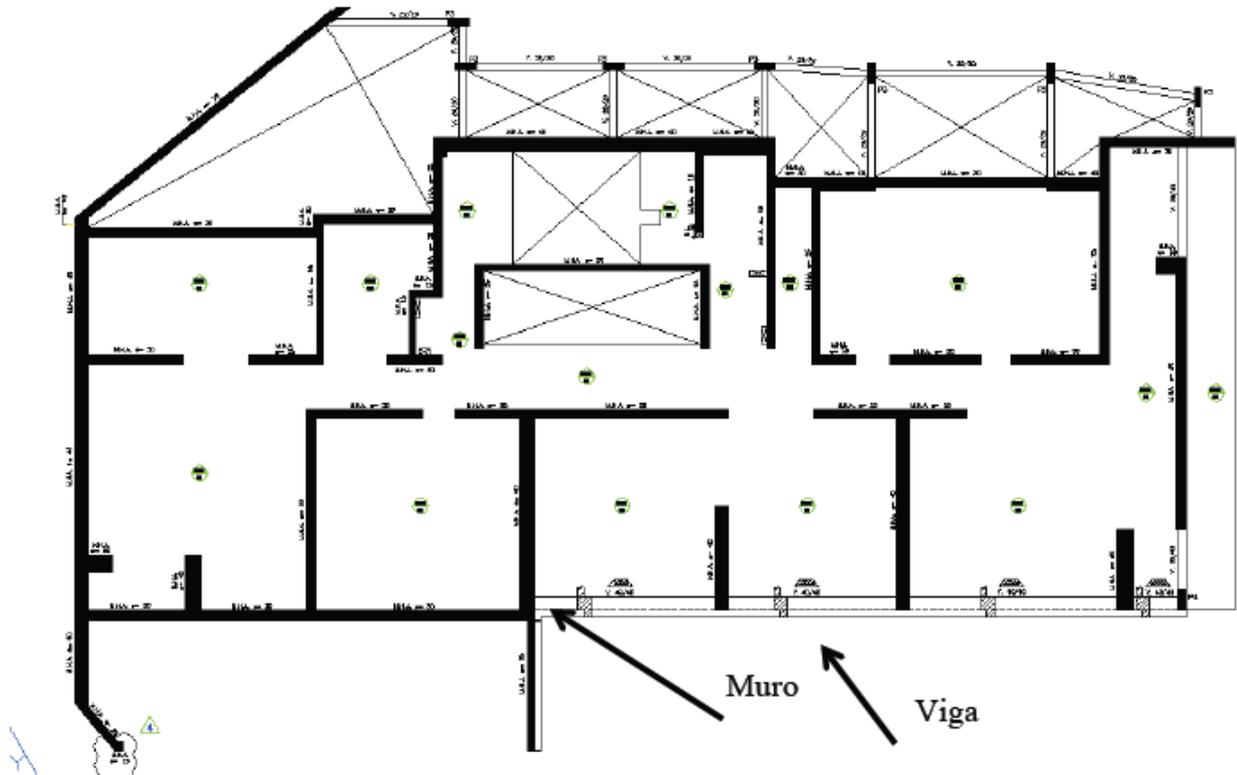


Figura 3.2: Planta Cielo 3^{er} Subterráneo. Fuente: René Lagos Ingenieros Asociados, en Bustos (2016).



Figura 3.3: Planta Cielo Piso Tipo. Fuente: René Lagos Ingenieros Asociados, en Bustos (2016).

3.3. Modelación del edificio de estudio

3.3.1. Instrumentación del edificio

En junio del 2014, la torre A fue instrumentada mediante 3 acelerómetros. Estos fueron ubicados uno en el subterráneo -3 (y que por lo tanto sus registros se asumen como el movimiento libre del terreno), otro en el piso 13 y el último en el piso 26. Dado que el 1° de abril de ese mismo año se había registrado un terremoto M8.2 con epicentro en la zona de Iquique, los instrumentos fueron capaces de registrar réplicas de este evento, una de ellas alcanzando un *peak* de aceleración de 0,08g en las fundaciones. A este registro se le aplicó el método MOESP (*Multivariable Output-Error State Space*) descrito por Yoshimoto *et al.* (2005) para obtener las propiedades dinámicas del edificio. Estas se presentan en la tabla a continuación:

Tabla 3.1: Periodos y amortiguamientos modales según MOESP. Fuente: Bustos (2016).

Periodo instrumental [s]	Amortiguamiento	Dirección
1.748	1 %	Y
1.618	3.3 %	X
0.860	1.1 %	X
0.863	2 %	Y
0.428	2.2 %	X
0.432	2.2 %	Y
0.383	2.8 %	X
0.251	1.5 %	Y

3.3.2. Calibración del modelo lineal

A partir de los periodos modales señalados en la Tabla 3.1 y de la respuesta en aceleración y desplazamiento registrada por los acelerómetros para la réplica del terremoto de Iquique, Bustos (2016) comenzó por calibrar el modelo lineal elástico elaborado por la oficina que calculó la torre A, en el software ETABS de la compañía CSI (*Computers and Structures, Inc.*). Tras modificar la rigidez de ciertos elementos estructurales (suponiendo que quizás había ocurrido una leve pérdida de rigidez de la estructura tras el terremoto) se obtuvo una buena correlación tanto en la respuesta en desplazamiento como en los periodos de la estructura. Se utilizó un amortiguamiento del 3 % para el primer modo y de un 1,5 % para todos los demás.

Posteriormente, el modelo se ajustó para su exportación al programa Perform-3D. Si bien ambos programas son de la misma compañía, tanto la interfaz como el procedimiento de modelación es diferente, siendo considerablemente más trabajoso en Perform-3D. Por lo anterior, Bustos (2016) realizó ciertos cambios en ETABS antes de exportar el modelo.

En particular, uno de estos cambios fue remover las losas de todos los niveles. Esto se hizo dado que Perform-3D solo tiene un modelo elástico de losas, y se suponía que en ciertos puntos de la planta ésta actuaba como acople entre diferentes muros (los llamados “refuerzos de losa”), y que entraban en el rango no lineal mediante la formación de rótulas plásticas en los extremos. Por lo tanto, se mantuvo el diafragma rígido o *constraint* para mantener unidos todos los puntos de la planta, pero se agregaron vigas de acople en aquellas zonas donde se creía que los refuerzos de losa tenían dicho efecto entre los muros. Estas vigas tienen un ancho igual a 12 veces el espesor de la losa, y su distribución para la planta tipo se puede observar en la Figura 3.4.

Una vez en Perform-3D, se verificó que el modelo mantenía su buen comportamiento en relación con los datos extraídos de las réplicas. En la Tabla 3.2 se pueden observar los periodos obtenidos y su comparación con los valores “reales” de la estructura.

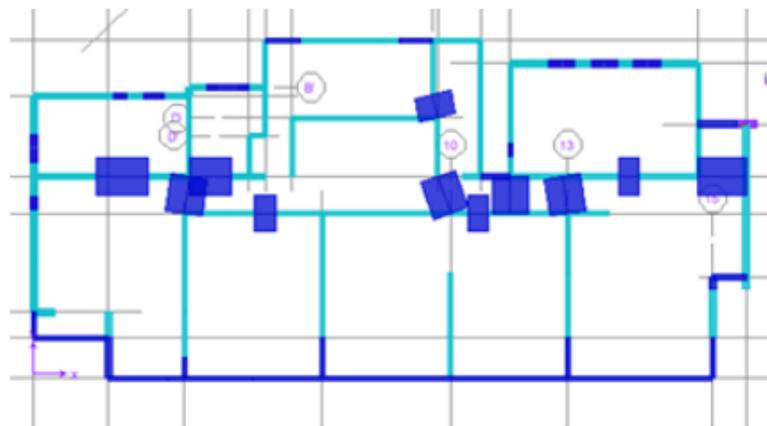


Figura 3.4: Planta piso tipo con vigas de acople, en el modelo en ETABS. Fuente: Bustos (2016).

Tabla 3.2: Comparación entre periodos instrumentales y del modelo lineal en Perform-3D. Fuente: Bustos (2016)

Periodo Modelo P3D lineal [s]	Periodo Instrumental [s]	Error	Participación Masa X	Participación Masa Y
1.82	1.75	4.2 %	2.74 %	52.25 %
1.55	1.62	4.5 %	37.26 %	5.64 %
0.75	0.86	12.6 %	25.74 %	0.24 %
0.44	0.43	2.6 %	5.76 %	5.87 %
0.40	0.38	4.3 %	4.04 %	11.94 %
0.22	0.25	11 %	6.59 %	0.13 %

3.3.3. Modelo no lineal en Perform-3D

Una vez comprobado que el modelo se comporta como se esperaba, Bustos (2016) comenzó el proceso de modelación no lineal. El comportamiento no lineal de la estructura se asume que se concentra principalmente en dos tipos de elementos: en la plastificación de los extremos de las vigas de acople, y en el comportamiento a flexión en los muros, que fluyen y se rotulan en la base. La modelación en ambos casos es diferente:

Rótulas plásticas en vigas de acople

Para las vigas de acople se utiliza un modelo rígido plástico (*rigid-plastic hinge*), según el cual la rótula es inicialmente rígida, y una vez alcanza su momento nominal, comienza a rotar. A partir de ese punto la rótula no es capaz de tomar más momento, de modo que en el gráfico de la Figura 3.5 los puntos Y, U, L y R se encuentran a la misma altura (el mismo momento).

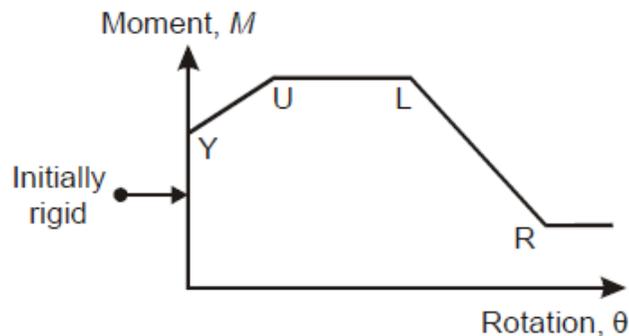


Figura 3.5: Modelo momento-rotación para rótulas. Fuente: Perform Components and Elements (2006).

Para estos elementos, el momento nominal se calculó como si fueran vigas, cuyo alto es el de la losa y su ancho es de 12 veces el alto, valor recomendado por Powell (2007) para

modelar edificios de hormigón en Perform-3D. Así, los refuerzos de losa de los subterráneos tendrían 192 [cm] de ancho, mientras que del piso 1 hacia arriba, serían de 168 [cm].

La cantidad de acero, por su parte, se obtuvo de los planos de enfierradura de losas, considerando todo el acero que caía dentro del ancho del elemento. Un extracto de este plano para el cielo de la planta tipo se muestra en la Figura 3.6. Por ejemplo, para el refuerzo de losa orientado verticalmente en la Figura, se consideró tanto el acero entre muros ($F = F' = 4\phi 12$) más el acero de la losa del pasillo y de la losa a la derecha, que entren en una franja de 168 centímetros, para calcular la cuantía positiva y negativa.

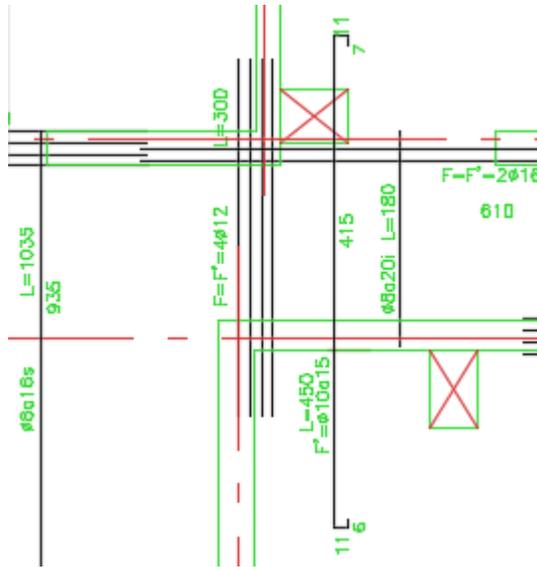


Figura 3.6: Extracto del plano de enfierradura de losa para el cielo del piso tipo, con la armadura dispuesta para algunos refuerzos de losa. Fuente: René Lagos Ingenieros Asociados.

Modelo de fibras para los muros

En el caso de los muros, a cada elemento de muro se le asigna una sección de fibras. Esta sección puede estar conformada por hasta 16 fibras entre acero y hormigón, y tienen como objetivo representar el comportamiento de la sección a flexión cuando entre en el rango no lineal (ya sea mediante la fluencia del acero o la fractura del hormigón).

Por esta razón, para ambos materiales debe modelarse su comportamiento no lineal mediante una curva de tensión deformación. En el caso del edificio de estudio, se utilizaron para propósitos de modelación, 3 materiales diferentes:

- **Acero A630-420H:** Bustos (2016) definió la curva tensión-deformación del acero según el modelo de Menengotto y Pinto en su versión monotónica, que considera luego de alcanzar la tensión de fluencia (f_y) un endurecimiento hasta $1,5f_y$ con una deformación de un 10%; luego una zona de tensión constante hasta un 13% de deformación, para finalmente comenzar a degradar su resistencia hasta llegar a tensión nula con una deformación de un 20%. La curva se muestra en la Figura 3.7.

- **Hormigón H40 confinado:** Se utilizó hormigón confinado para aquellas zonas de los muros donde se cumplía la cuantía transversal mínima que indica la ACI 318-05 para elementos confinados. En estos casos, el hormigón alcanza hasta un 30 % más del valor de f'_c . Bustos (2016) definió la curva de tensión-deformación como una aproximación discreta del modelo de Saatcioglu y Razvi.
- **Hormigón H40 no confinado:** Donde no se cumplía la cuantía mínima de confinamiento, se utilizó hormigón no confinado. En este caso, el material alcanza una tensión máxima de f'_c para luego caer en resistencia rápidamente. La curva tensión-deformación corresponde a una aproximación discreta del modelo de Hognestad modificado. Ambas curvas se pueden observar en la Figura 3.8.

Cabe mencionar que tanto para el hormigón confinado como para el no confinado, el modelo de corte se considera lineal-elástico. La resistencia a tracción del hormigón, por su parte, se desprecia.

Además, como se mencionó en la sección 3.1, el edificio a partir del piso 16 está construido con hormigón H30. A partir de este nivel, no se encuentran secciones confinadas, por lo que un modelo no lineal de hormigón H30 confinado no es necesario. Sin embargo, tampoco se modela el hormigón H30 no confinado, debido a que a partir del piso 16 ya no se presentan compresiones importantes, por lo que se estima que utilizar el hormigón H40 no confinado en el resto de la altura del edificio no supondría un efecto considerable en su respuesta.

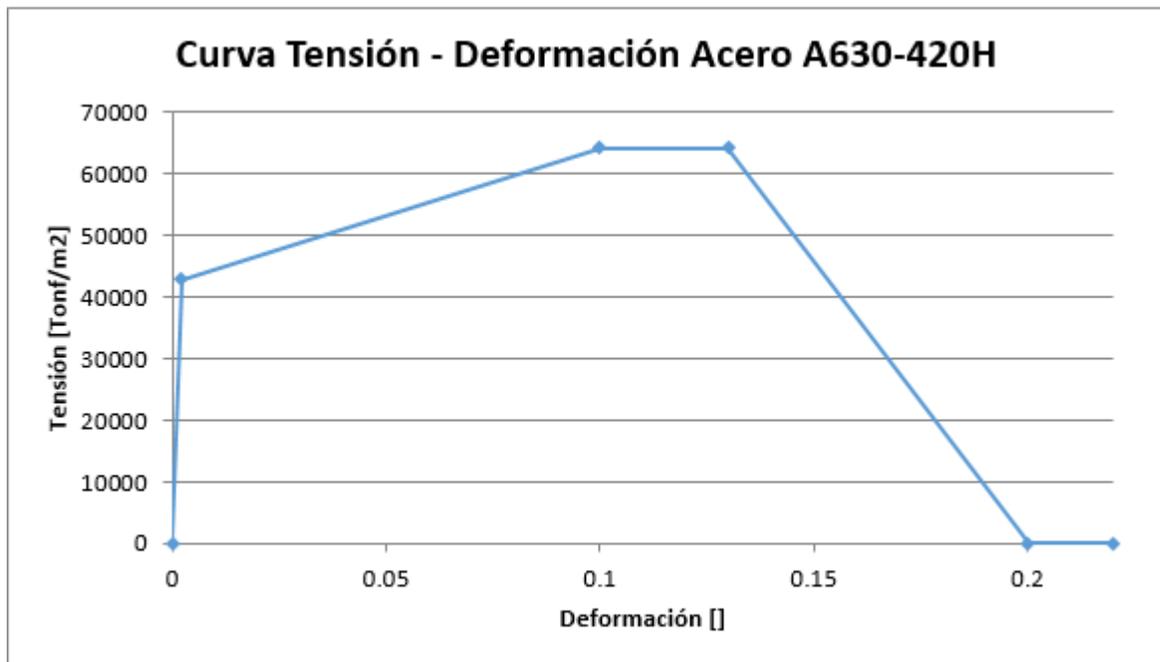


Figura 3.7: Curva tensión-deformación utilizada para el acero. Fuente: Bustos (2016).

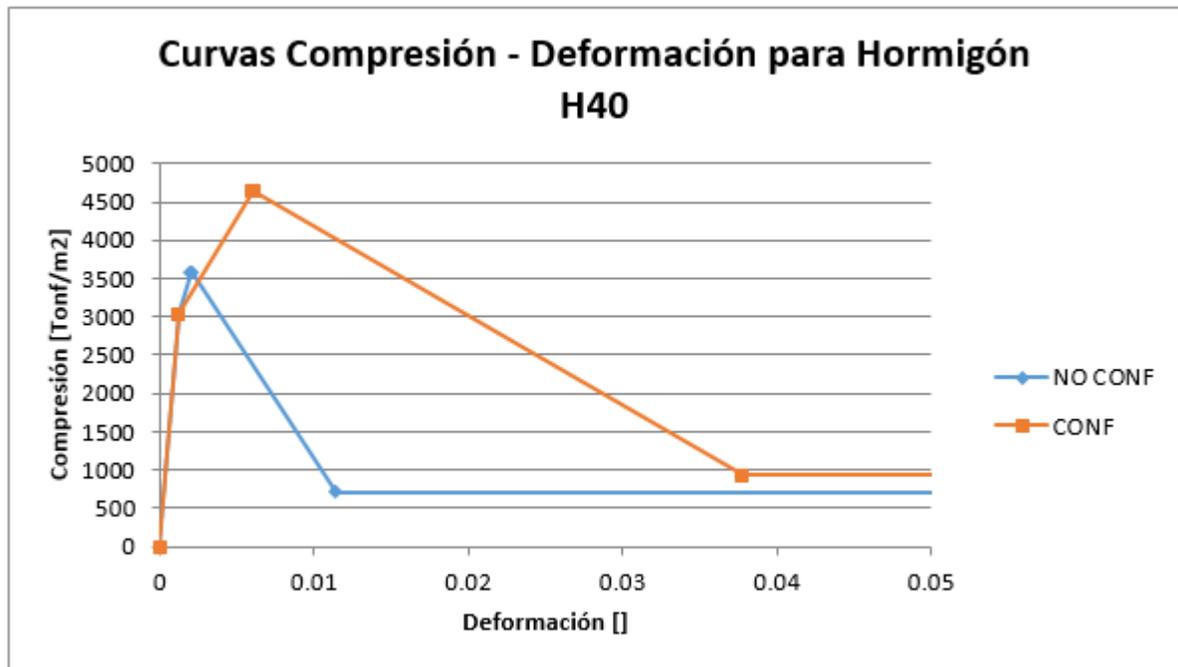


Figura 3.8: Curva compresión-deformación utilizada para ambos tipos de hormigón. Fuente: Bustos (2016).

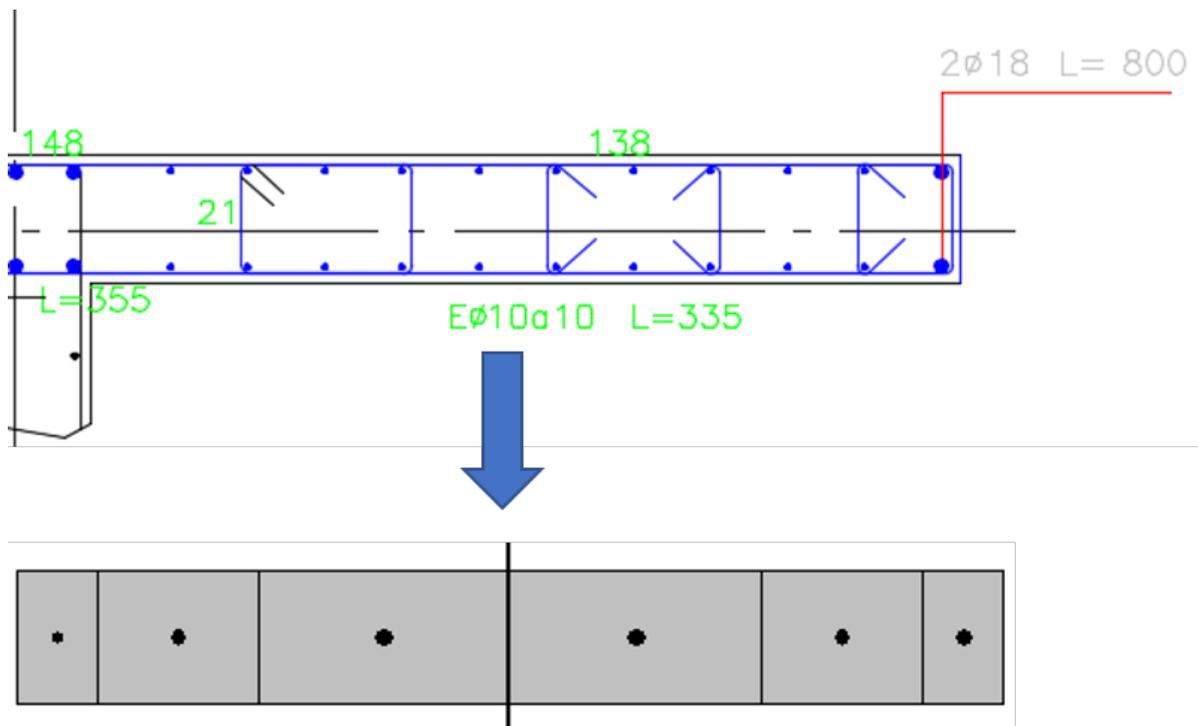


Figura 3.9: Proceso de modelación de los muros en Perform-3D. Fuente: René Lagos Ingenieros Asociados (arriba) y Perform-3D (abajo).

Definidos los materiales, se debe asignar la sección de fibras correspondiente a cada muro, en cada piso. Esta sección debe considerar el área de hormigón (sea confinado o no confinado), así como el área correspondiente de acero en la sección longitudinal, la cual se obtiene de los planos de enfierradura de las distintas elevaciones del edificio (como se observa en la Figura 3.9).

Bustos (2016) realizó este proceso hasta el tercer piso en todos los muros. Es decir, en su modelo los primeros seis pisos en cada muro podían entrar en el rango no lineal, el resto de la altura del edificio se comportaba elásticamente (a excepción de las rótulas plásticas en los extremos de las vigas de acople, las cuales fueron añadidas en toda la altura). Esto bajo la suposición de que las deformaciones inelásticas en los muros se concentran en la base de los elementos, por lo que no sería necesario modelar el comportamiento no lineal hacia arriba.

Una vez completado dicho modelo, se comprobó que el comportamiento de la estructura siguiera en buena correlación con los datos de los acelerómetros. Los periodos del edificio cambian ligeramente al incluir la no linealidad, pero las variaciones para los primeros seis modos son del orden de milésimas de segundo, por lo que los valores de la Tabla 3.2 en la columna “Periodo modelo P3D lineal”, siguen siendo los mismos.

Utilizando un amortiguamiento del 1,5 % para el primer modo y del 3 % para todos los demás, Bustos (2016) analizó el comportamiento de la estructura bajo el registro sísmico de Concepción Centro para el terremoto del Maule de 2010, tanto con el registro original en aceleración, como con los valores amplificados por 2,5 de modo de asegurar la incursión del edificio en el rango no lineal.

Luego de realizar numerosos análisis de ciertos muros de estudio con los dos registros mencionados, Bustos observó que en general la estructura respondía como se esperaba, arrojando interesantes conclusiones sobre las diferencias que se observan al incluir el comportamiento no lineal en el modelo computacional.

Sin embargo, se observó además que el hecho considerar modelamiento no lineal hasta el piso 3 provoca ciertos resultados anómalos. Al graficar algunos parámetros en la altura de los muros, se puede ver un *peak* en la interfaz cuando las secciones de los muros pasan a ser no lineales a lineales. En la experiencia con el uso del software en oficinas de cálculo, se ha observado que si no se modelan los muros para incluir el comportamiento no lineal en toda la altura, se provocan condiciones de borde ficticias que pueden alterar los resultados.

Un ejemplo de lo anterior se observa en un gráfico de envolvente de curvatura para los muros de estudio (línea roja en los gráficos de la Figura 3.10). Se puede ver en todos los muros un máximo a una altura de 8,15 metros, es decir, en la interfaz donde el modelo pasa de ser no lineal a lineal elástico.

Esta situación motivó la continuación del desarrollo de este modelo, parte del presente trabajo. Así, el modelo computacional del edificio se refinó, se asignaron fibras a todas las secciones de los muros de la estructura desde el piso 4 hasta el último nivel (32 para algunos de los muros).

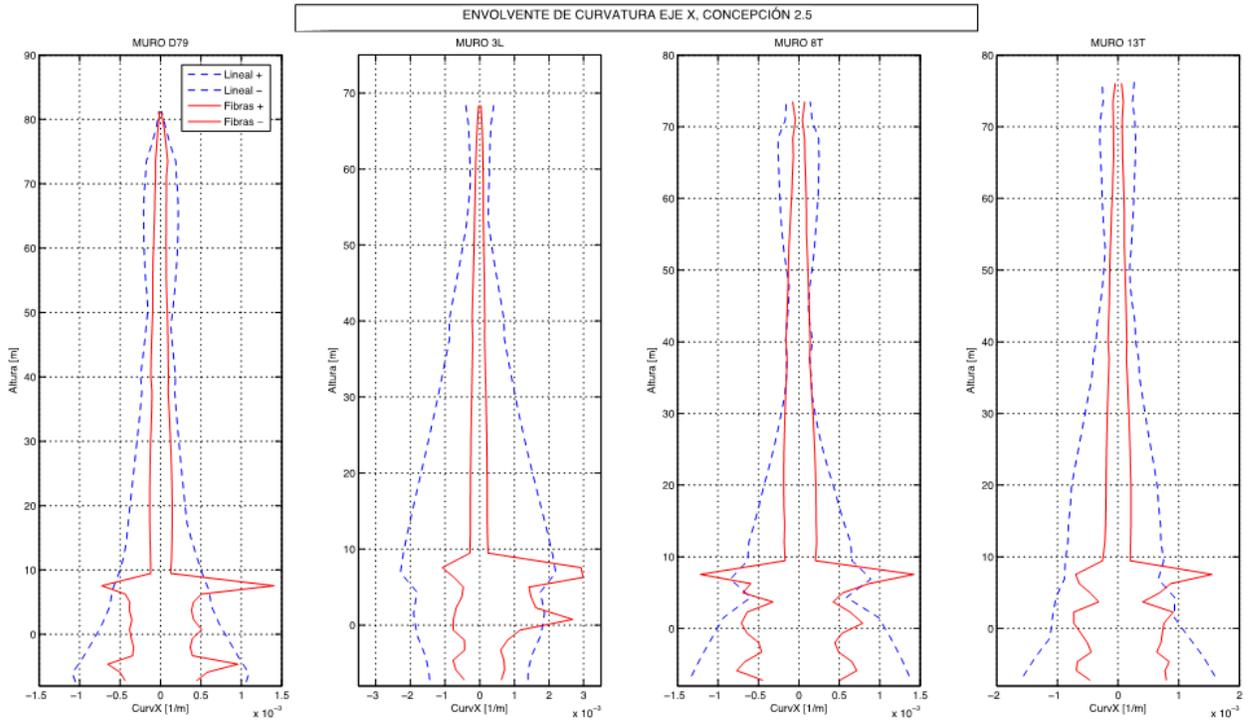


Figura 3.10: Envolvente de curvatura en el eje Y para los muros de estudio, registro de Concepción x2,5. Fuente: Bustos (2016).

Una vez terminado el proceso de modelación, se obtienen los periodos de los 6 primeros modos de la estructura, así como los porcentajes de participación, para corroborar que el comportamiento dinámico no se haya visto afectado por las secciones de fibras añadidas. Estos valores se observan en la Tabla 3.3, en la columna “Periodo Modelo P3D completo”.

Tabla 3.3: Valores modales obtenidos del modelo completamente no lineal en Perfor-3D.

Periodo Modelo P3D completo [s]	Periodo Instrumental [s]	Error	Participación Masa X	Participación Masa Y
1,81	1,75	3,6 %	2,74 %	52,48 %
1,54	1,62	4,8 %	37,56 %	5,53 %
0,75	0,86	13,1 %	25,43 %	0,22 %
0,43	0,43	1,5 %	6,31 %	5,30 %
0,40	0,38	3,3 %	3,73 %	12,75 %
0,22	0,25	11,7 %	6,32 %	0,12 %

Como se puede observar, los errores en comparación con los periodos instrumentales siguen siendo bajos, en especial en los dos primeros modos. Más aún, comparando los valores de los periodos con los observados en la Tabla 3.2, se concluye que al aumentar la no linealidad en toda la altura cambian solo algunos valores en centésimas de segundo.

De este modo, se valida el modelo no lineal refinado para el estudio del comportamiento de ciertos muros, lo que se describe en el siguiente capítulo.

Capítulo 4

Análisis del comportamiento sísmico de ciertos muros, en modelo tridimensional

4.1. Introducción

Una vez finalizado el modelo tridimensional, se comenzó por estudiar el comportamiento de la estructura mediante análisis no lineales tiempo-historia. En particular, se analizaron ciertos muros y su respuesta, en comparación con los resultados obtenidos por Bustos (2016).

En el presente capítulo se describe la elección de los muros de estudio y los registros sísmicos a utilizar, así como los principales resultados obtenidos. Se estudia también el acoplamiento entre muros: cómo éste afecta el comportamiento de los muros y otros elementos de la estructura como los refuerzos de losa.

Para la generación de los resultados se utilizaron diferentes versiones de los modelos en Perform-3D. En la tabla 4.1 se presentan las abreviaturas con las que se refiere a dichos modelos, y sus principales características.

Tabla 4.1: Principales modelos utilizados, con abreviaturas y características respectivas.

Modelo	Características
NL incompleto	Modelo que considera comportamiento no lineal en muros desde el tercer subterráneo hasta el piso 3, desarrollado por Bustos (2016).
NL completo	Modelo que considera comportamiento no lineal en toda la altura de los muros.
NL con RL	Modelo no lineal en toda la altura de los muros, que además permite recoger las cargas en los refuerzos de losa (RL).
NL con RL 2D	Extracto del modelo anterior, para el estudio de uno de los muros en una dirección.

4.2. Muros de estudio

Uno de los principales objetivos del trabajo realizado era el estudio del comportamiento de los muros de la estructura. Dado que la planta posee gran cantidad de muros, se seleccionaron 5 de ellos para su análisis. Estos fueron los mismos que escogió Bustos (2016) para su trabajo, de modo que sea posible realizar un análisis comparativo con posterioridad. Su elección se basó en el hecho de que representan formas que se ven típicamente en un edificio de estas características, con sección en forma de T, L o C, o con cambios del largo del muro en la altura.

Los muros escogidos así como el nombre que les fue asignado se presentan en Figura 4.1. De estos, el muro 10F es de los llamados “muro bandera”, que presenta un aumento de longitud a partir del segundo piso hacia arriba. Se observan además las direcciones de estudio de la estructura, siendo el eje Y la dirección flexible y el eje X, la rígida.

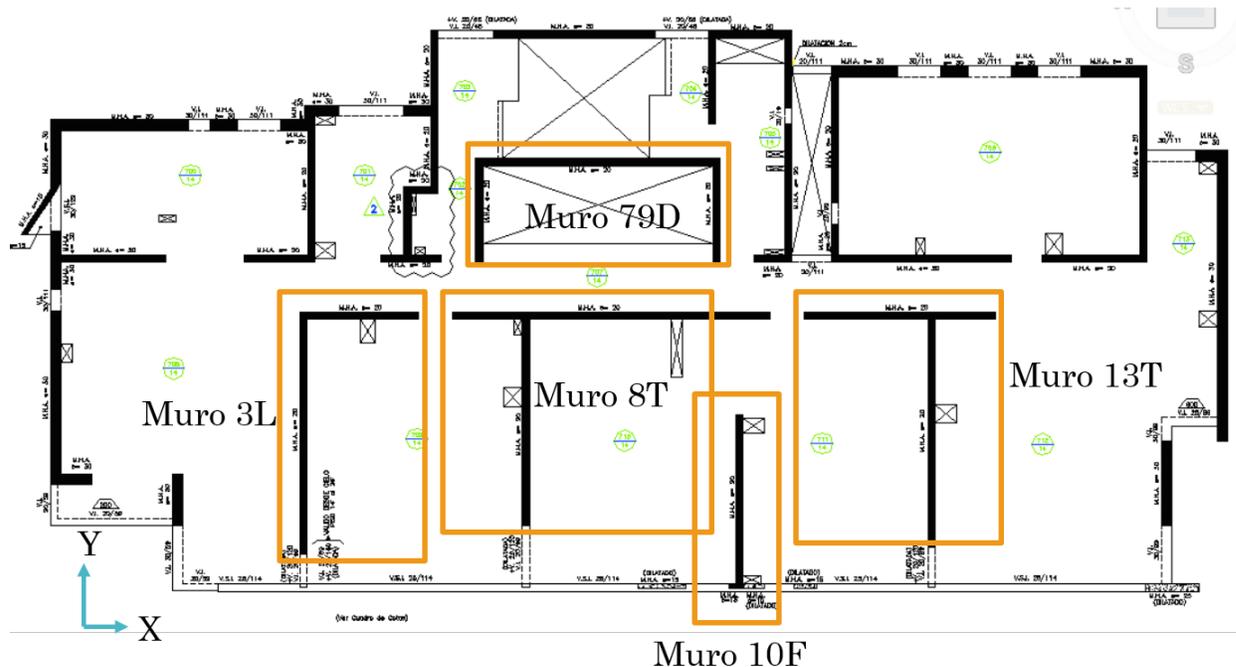


Figura 4.1: Muros escogidos para análisis y los nombres asignados a cada uno.

4.3. Registros sísmicos para estudio

Como se mencionó anteriormente, el edificio fue instrumentado meses después del terremoto M8.2 con epicentro en la zona de Iquique, en abril del 2014. Se cuenta con registros de este terremoto, en especial con el registro de Iquique Chipana, recogido en las proximidades del edificio, por que lo que representa un caso interesante de estudio. Sin embargo, luego de analizar los resultados para dicho terremoto, se observa que el edificio es lo suficientemente rígido como para mantenerse en el rango lineal durante el evento.

Esto se puede observar en el gráfico de la Figura 4.2, donde se tiene para cada nodo de cada muro, la máxima deformación axial en tracción en cada piso. Además la línea punteada en azul representa la deformación de fluencia ($\varepsilon_y = 0,21\%$), por lo que se concluye que los muros no incursionan en el rango no lineal para este terremoto.

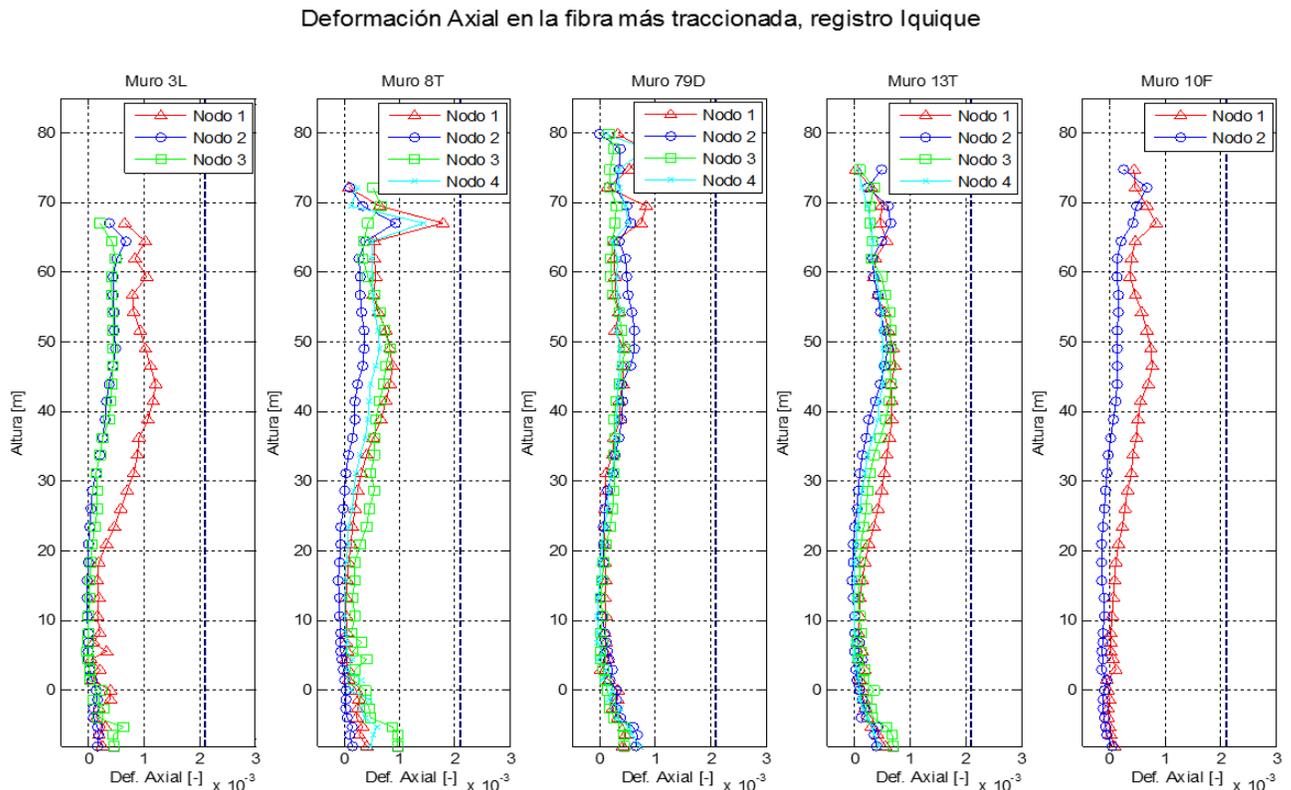


Figura 4.2: Envolvente de deformación axial en tracción, para cada nodo de cada muro. Registro de Iquique Chipana.

Dado que se cuenta con un modelo no lineal, es deseable estudiar el comportamiento de la estructura cuando ésta se encuentra exigida, es decir, sometida a eventos sísmicos de gran magnitud. Debido a lo anterior, se decidió trabajar con el registro de Concepción Centro para el terremoto del Maule de febrero del 2010. Bustos (2016) también trabajó con este registro, en dos versiones: una sin amplificar, y otra amplificada por 2,5 (multiplicación simple del registro de aceleraciones). Esto debido a que aún utilizando el registro de un terremoto M8.8, varios de los muros del edificio permanecían en el rango lineal. En el presente trabajo, se utilizó en general el registro de Concepción amplificado por 1,5. De esta manera, el edificio se encuentra exigido, y a la vez se considera un terremoto “factible” para su estudio.

En Perform-3D se pueden ingresar las tres componentes del registro de aceleraciones para correr un análisis tiempo-historia no lineal. Estas componentes (dos horizontales, H1 y H2, y una vertical, V) se pueden ver en el tiempo en la Figura 4.3. Las aceleraciones máximas horizontales del registro amplificado son de $0,6g$ para la componente H1 y de $0,43g$ para la componente H2.

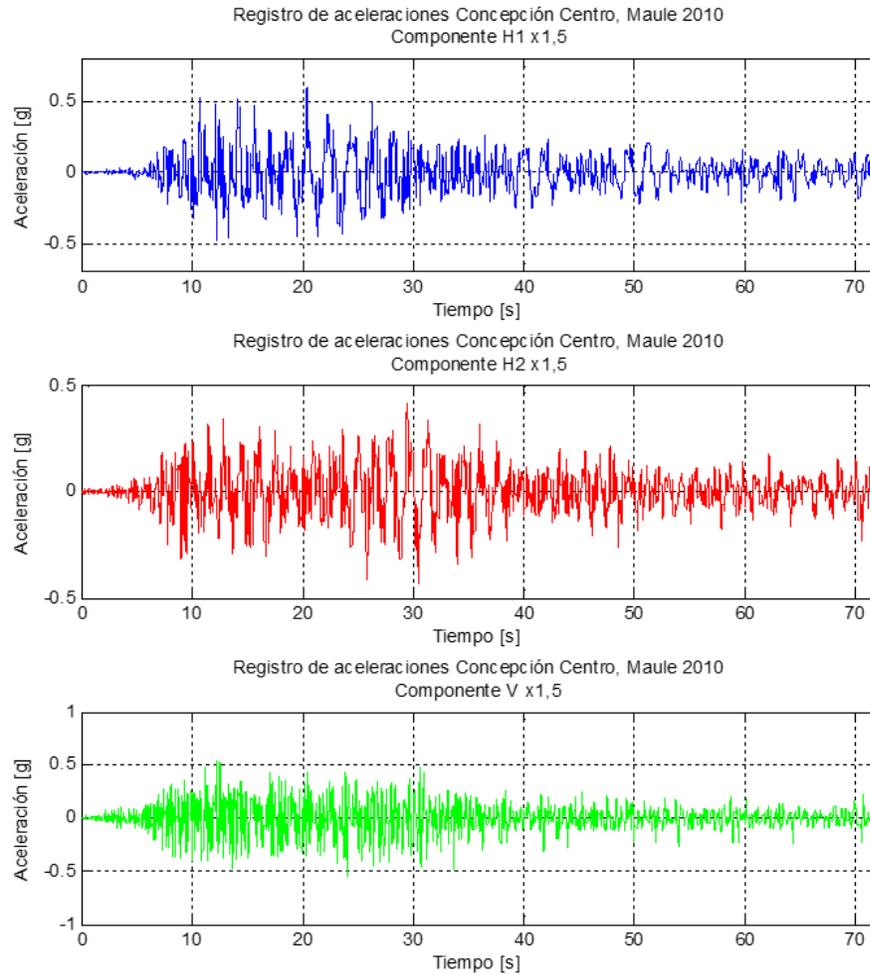


Figura 4.3: Componentes en aceleración registradas de la estación Concepción Centro para el terremoto del Maule de 2010, amplificadas por 1,5.

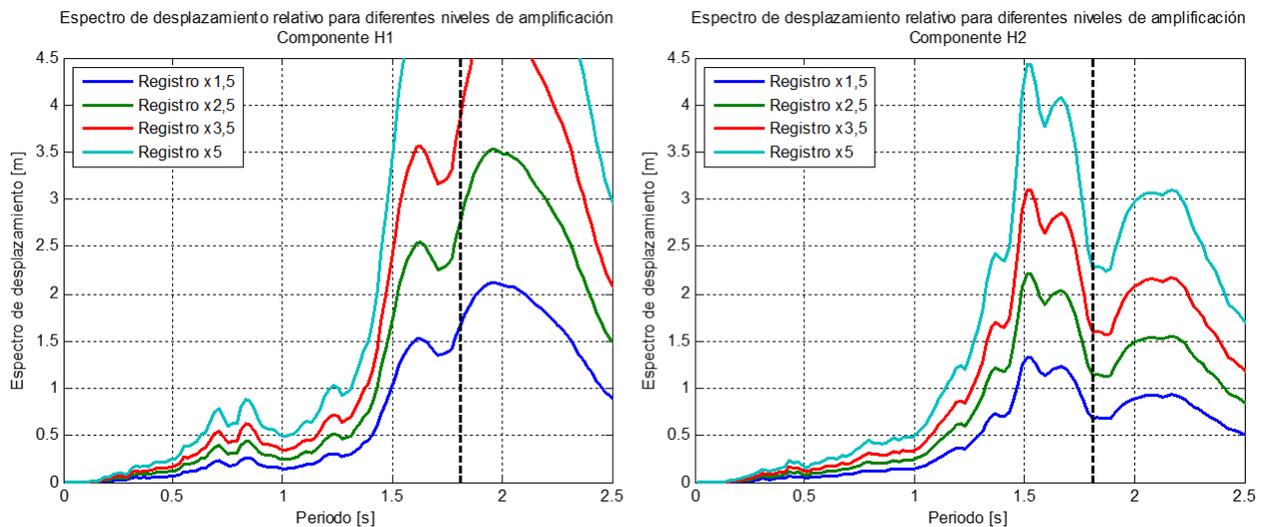


Figura 4.4: Espectros de desplazamiento relativo para ambas componentes horizontales del registro de Concepción. Diferentes niveles de amplificación.

Como se mencionó anteriormente, se usó principalmente el registro de aceleraciones amplificado por 1,5. Sin embargo, también se usaron otros niveles de amplificación superiores, particularmente para el modelo bidimensional que se estudia con posterioridad. En la Figura 4.4 se muestran los espectros de desplazamiento relativo para las dos componentes horizontales, para los diferentes niveles de amplificación. Estos fueron calculados para una razón de amortiguamiento de $\beta = 3\%$, que es el correspondiente al primer modo en la modelación.

Además, a los 1,81 segundos se muestra una línea negra punteada, que indica el periodo fundamental de la estructura, de modo que se puedan identificar los desplazamientos de techo esperados para cada nivel de amplificación en la componente respectiva.

4.4. Deformación axial para muros de estudio

Tal como se indicó anteriormente, en el modelo no lineal con el que se contaba, se observaban condiciones de borde ficticias a la altura del tercer piso. Esta situación se repetía en varios de los parámetros de interés, siendo uno de ellos la deformación axial.

La Figura 4.5 muestra la deformación de la fibra más traccionada para cada muro, utilizando el registro de Concepción amplificado por 1,5. Como se puede observar, el modelo NL incompleto (triángulo rojo en la leyenda) muestra *peaks* a la altura de la interfaz entre las secciones lineales y no lineales. Por otra parte, el modelo completo (círculo azul en la leyenda) no muestra dichos máximos, como era de esperarse. Más aún, a partir del cuarto piso (10,7 metros), el modelo incompleto muestra deformaciones cercanas a cero, mientras que el modelo completo muestra deformaciones importantes e incluso superiores a la fluencia (línea punteada azul) para el caso del muro 3L.

Según el modelo anterior, 4 de los muros (todos a excepción del 79D) alcanzaban la fluencia en algún punto de los primeros 6 niveles. Al refinar el modelo, sin embargo, se observa que sólo dos muros, el 3L y el 8T, fluyen en esos niveles, y con deformaciones considerablemente menores. Se puede concluir, entonces, que al menos para estudiar la deformación axial es ideal contar con un modelo de muros completamente no lineales, para evitar la aparición de condiciones de borde ficticias.

Deformación Axial en la fibra más traccionada, comparación modelos NL incompleto y NL completo

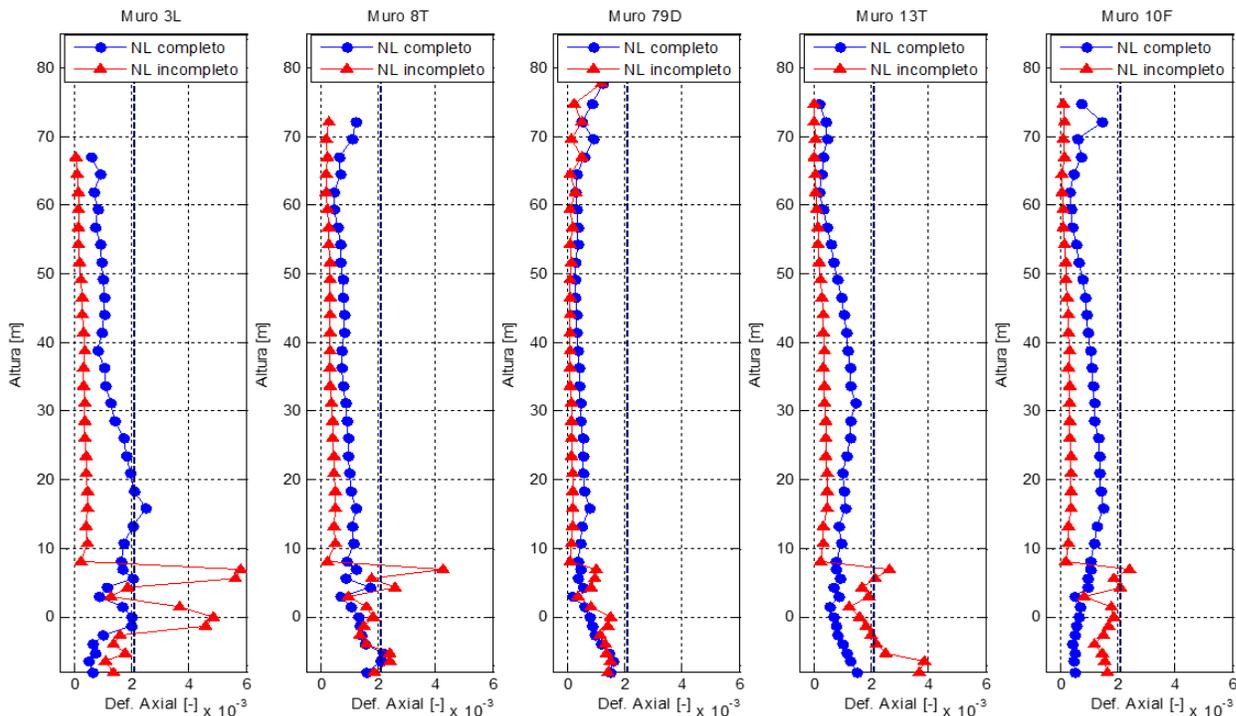


Figura 4.5: Envoltura de deformación axial en tracción, para fibra más traccionada de cada muro. Modelos NL incompleto y NL completo. Registro de Concepción x1,5.

4.5. Distribución de esfuerzos en altura para muros de estudio

Para cada uno de los muros, se obtiene en cada nivel el máximo de los esfuerzos de la sección, para el registro de Concepción amplificado por 1,5. Esto se hace para los modelos NL incompleto y NL completo, de modo de poder comparar los resultados arrojados por ambos. En los gráficos de Corte en el eje X y Momento con respecto al eje Y no aparece el muro 10F, pues al ser rectangular, no trabaja en la dirección rígida (o eje X).

En la Figura 4.6 se muestra la envoltura de carga axial para los 5 muros, comparando los valores obtenidos por ambos modelos. Se puede ver que en términos de envoltura no hay grandes diferencias entre ambos. De la misma manera, se observa en las Figuras 4.7 y 4.8, que hay diferencias menores al comparar las envolturas de Corte de los modelos NL incompleto y NL completo. Cabe mencionar que el primero (línea roja en los gráficos) presenta nuevamente ciertos *peaks* en el tercer piso. Esto se ve, por ejemplo, en el corte en X para el muro 13T, o en el corte en Y para los muros 3L o 8T. Sin embargo, desaparecen en el modelo NL completo (círculos azules en los gráficos), lo que reafirma la presencia de condiciones de borde ficticias en el primer caso. Sin considerar dichos máximos u otros puntos inusuales (como el corte en la parte superior del muro 79D, que viene dado por una gran reducción de la planta), las diferencias entre las envolturas de ambos modelos van entre un 30 % y un 40 %, observándose

solo en dos o tres pisos. En algunos de los muros, las diferencias no pasan de un 20 %.

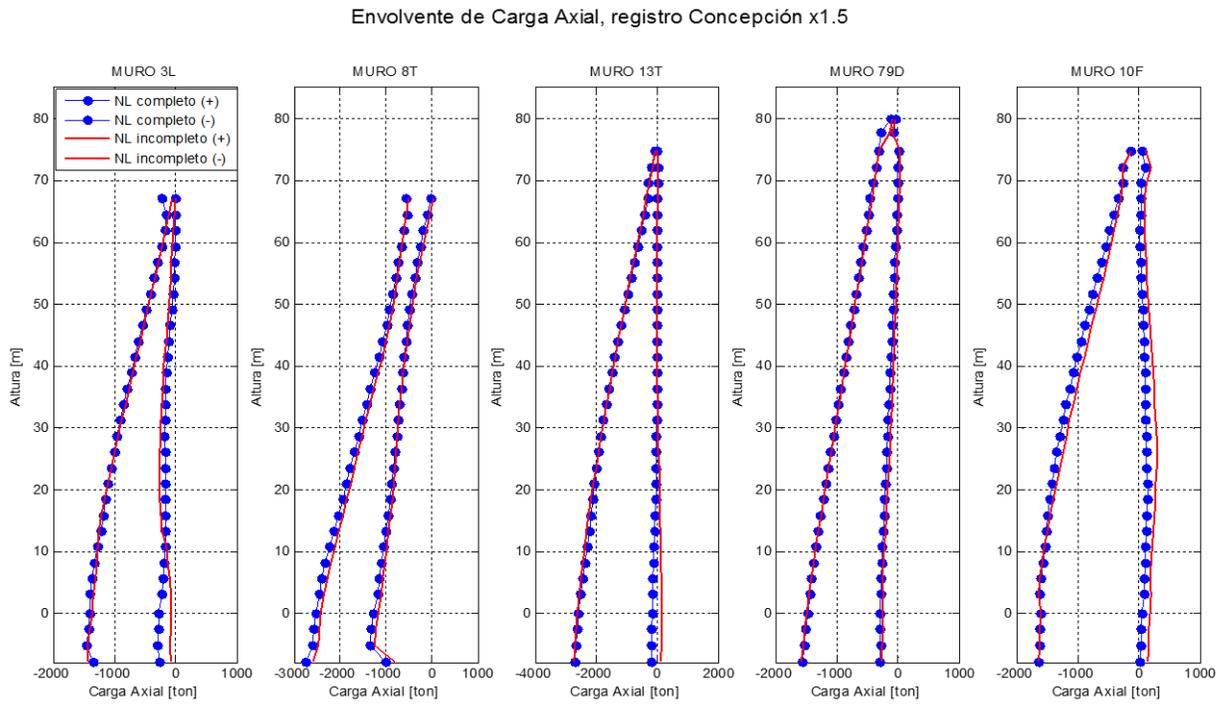


Figura 4.6: Envolvente de carga axial en altura para cada muro. Modelos NL incompleto y NL completo. Registro de Concepción x1,5.

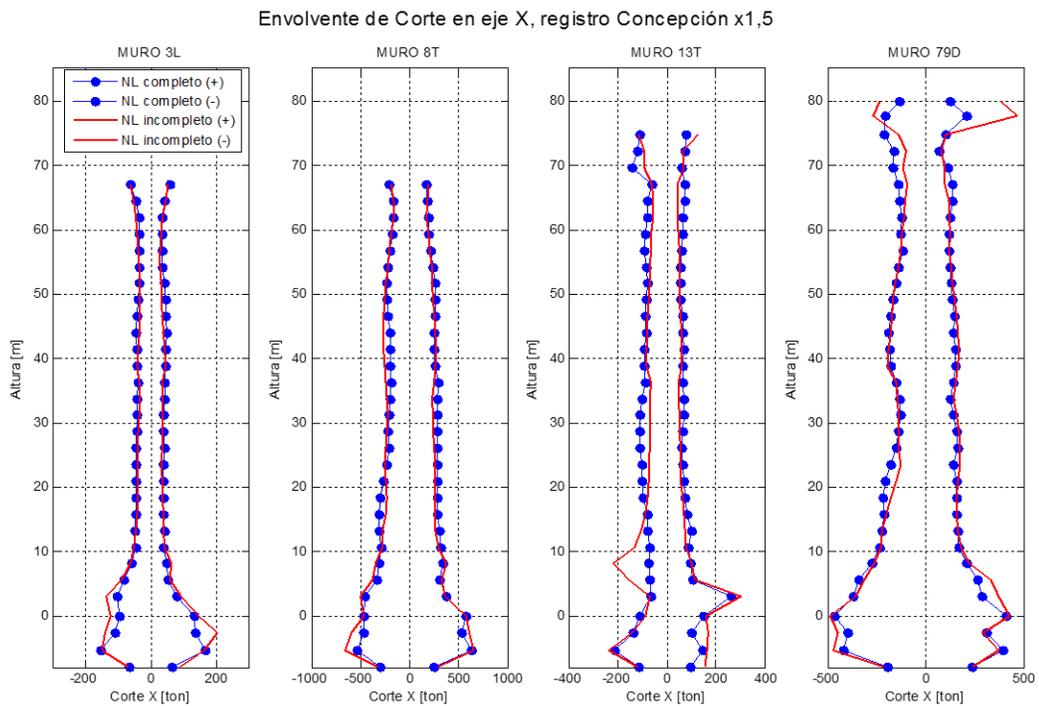


Figura 4.7: Envolvente de corte en eje X en altura para cada muro. Modelos NL incompleto y NL completo. Registro de Concepción x1,5.

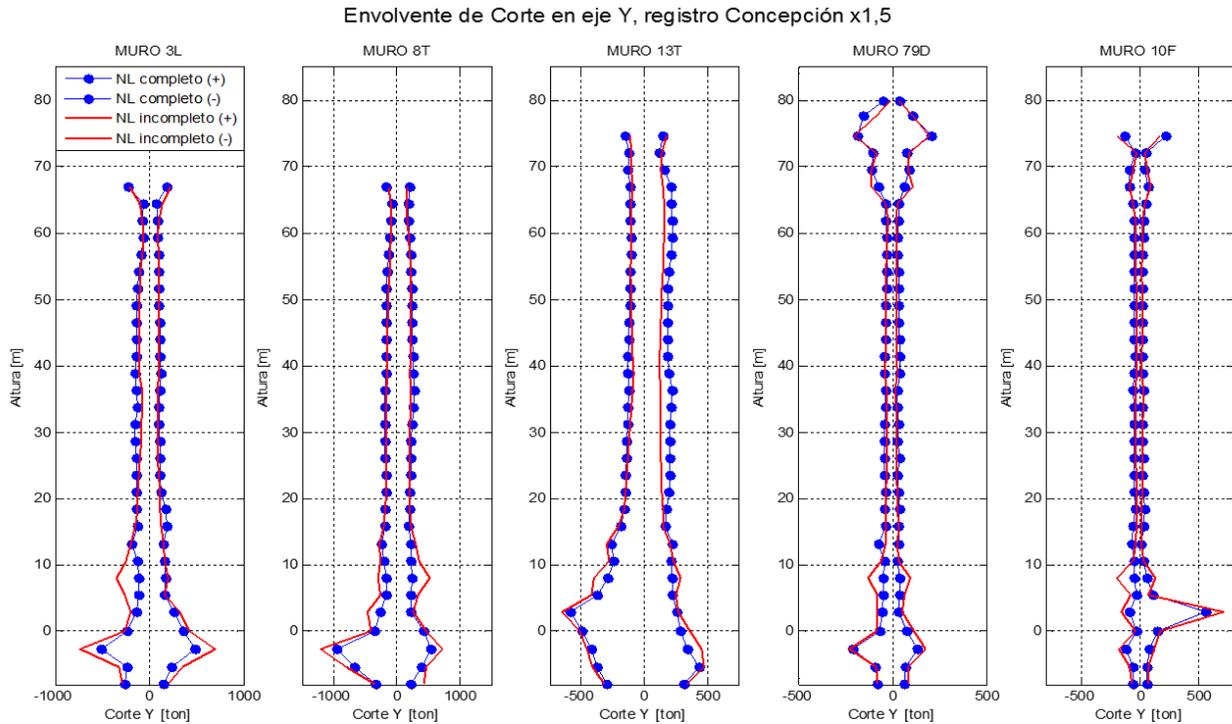


Figura 4.8: Envoltura de corte en eje Y en altura para cada muro. Modelos NL incompleto y NL completo. Registro de Concepción x1,5.

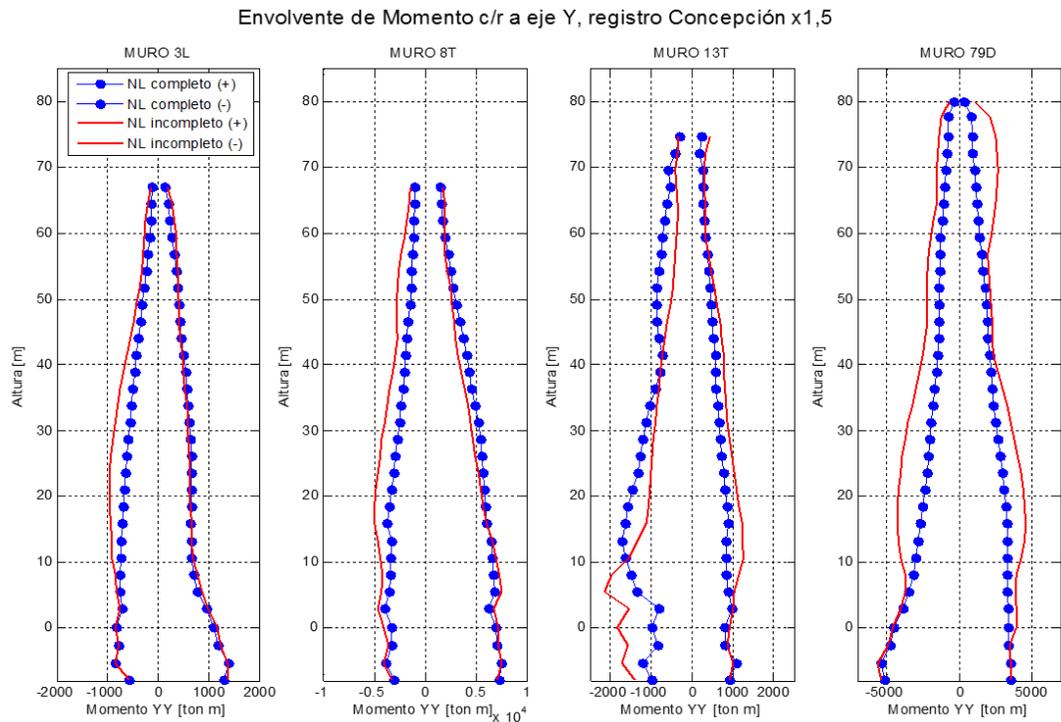


Figura 4.9: Envoltura de momento con respecto al eje Y en altura para cada muro. Modelos NL incompleto y NL completo. Registro de Concepción x1,5.

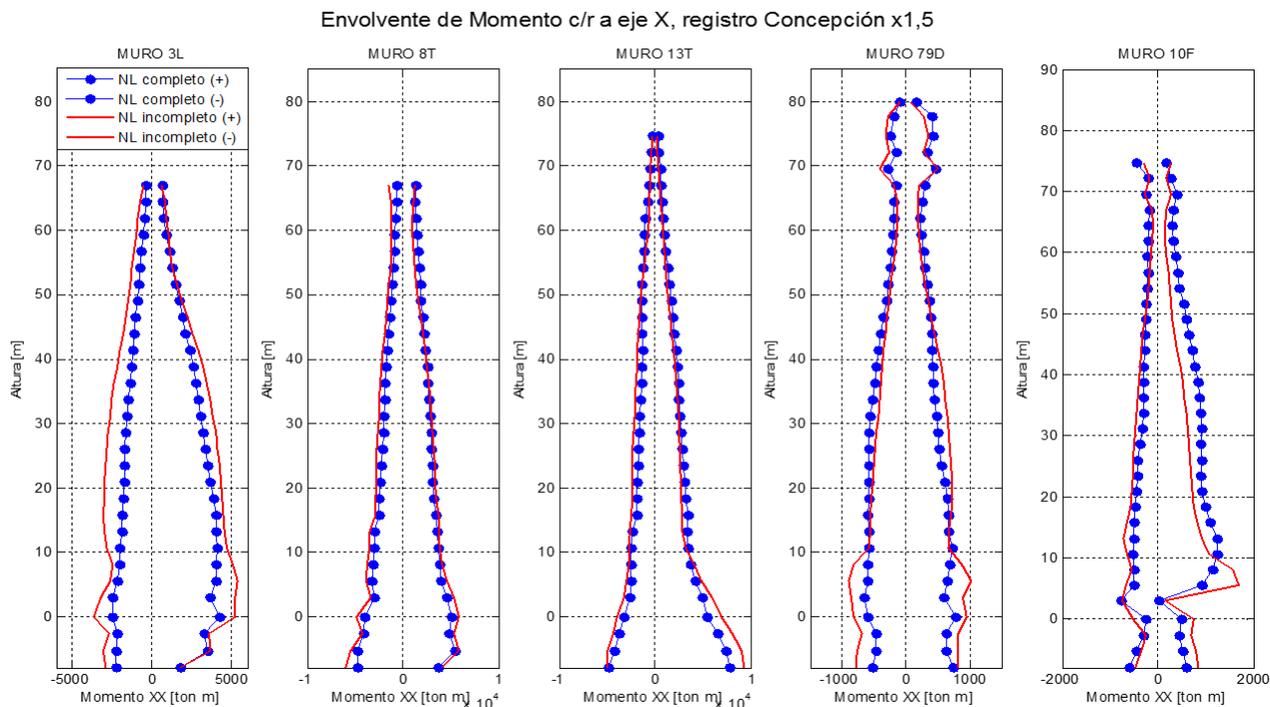


Figura 4.10: Envolvente de momento con respecto al eje X en altura para cada muro. Modelos NL incompleto y NL completo. Registro de Concepción x1,5.

En el caso del Momento, sin embargo, se notan más diferencias. Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran las envolventes de Momento para ambos modelos, con respecto a ambos ejes. Si bien la forma de las envolventes suele ser la misma, se observan diferencias más grandes de magnitud. Por ejemplo, con respecto a la dirección flexible (o eje Y), el muro 13T muestra diferencias del orden del 50 % en los primeros niveles, mientras que en el 79D hay diferencias de entre un 30 y 40 % en varios niveles. Una situación similar se tiene en las envolventes de momento con respecto al eje X.

4.6. Relación Momento/Corte para los muros de estudio

Uno de los principales objetivos del presente trabajo es estudiar la posición de la resultante de la carga lateral sobre los muros de la estructura, y cómo se ve afectada por el acoplamiento de muros. Como se mencionó anteriormente, se asume que si un muro aislado se mueve en el primer modo de vibración, la carga lateral sobre él tendrá su resultante a dos tercios de la altura del muro ($z = 2h_w/3$).

Para encontrar la posición de la resultante de la carga lateral para los muros de estudio, se siguió el mismo procedimiento utilizado por Bustos (2016). Usando una rutina de MATLAB, con los resultados del análisis tiempo-historia del modelo NL completo se obtuvieron los máximos locales de momento en la base, y de éstos se consideró entre el 30 % y el 40 % mayor para el análisis (como se puede ver a modo de ejemplo en la Figura 4.11); esto con el objetivo de estudiar los instantes donde la estructura se encuentre exigida, y al mismo tiempo obtener

una cantidad de puntos razonable. A estos valores se les asoció el corte en la base en el mismo instante, calculando así la razón M/V .

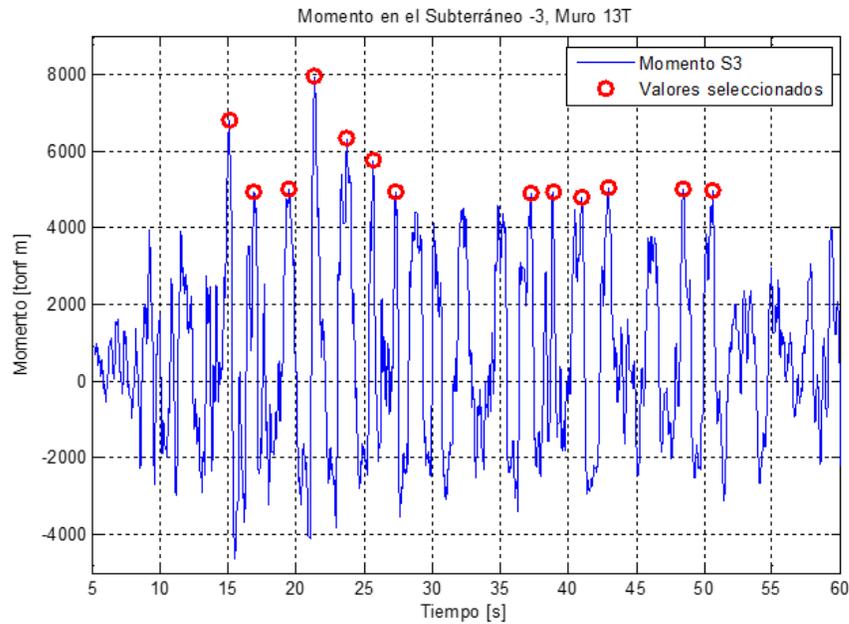


Figura 4.11: Momento en el tiempo en el subterráneo -3 para el muro 13T, junto con los valores seleccionados para el cálculo de la razón M/V . Registro de Concepción x1,5.

Este procedimiento se llevó a cabo para ambos ejes, y tomando como base el piso 1 y el subterráneo -3. Si bien en general se considera que el edificio queda empotrado en el primer piso debido a la losa de trancamiento, en el caso de la estructura en estudio la diferencia entre las plantas de los subterráneos y la del primer piso no es tan pronunciada, por lo que el análisis se realizó para ambos niveles.

Se consideran para el análisis los valores de M/V que no sobrepasen la altura de la estructura (que en general se observan cuando el corte V es muy pequeño). Al graficar estos valores en el instante del sismo en el que se registran, se obtienen los gráficos Altura v/s Tiempo que se observan en la Figura 4.12.

De modo de poder ver la posición de la resultante para cada muro con mayor claridad, se generan los gráficos de la Figura 4.13. En estos se tiene, para cada muro, el promedio de la relación M/V y la dispersión de los valores utilizados. Se grafica además para cada muro una línea roja punteada a los dos tercios de su altura.

En estos gráficos se puede observar que, en general, **la razón de aspecto se ubica por debajo de los dos tercios de la altura del muro**. Más aún, para algunos de ellos, en promedio la resultante se ubica cerca de $1/3$ de la altura, como es el caso del muro 10F y el 79D en la dirección flexible. En el eje X, en tanto, los valores de M/V para los muros 79D y 8T se ubican razonablemente cerca del valor $2h_w/3$ esperado.

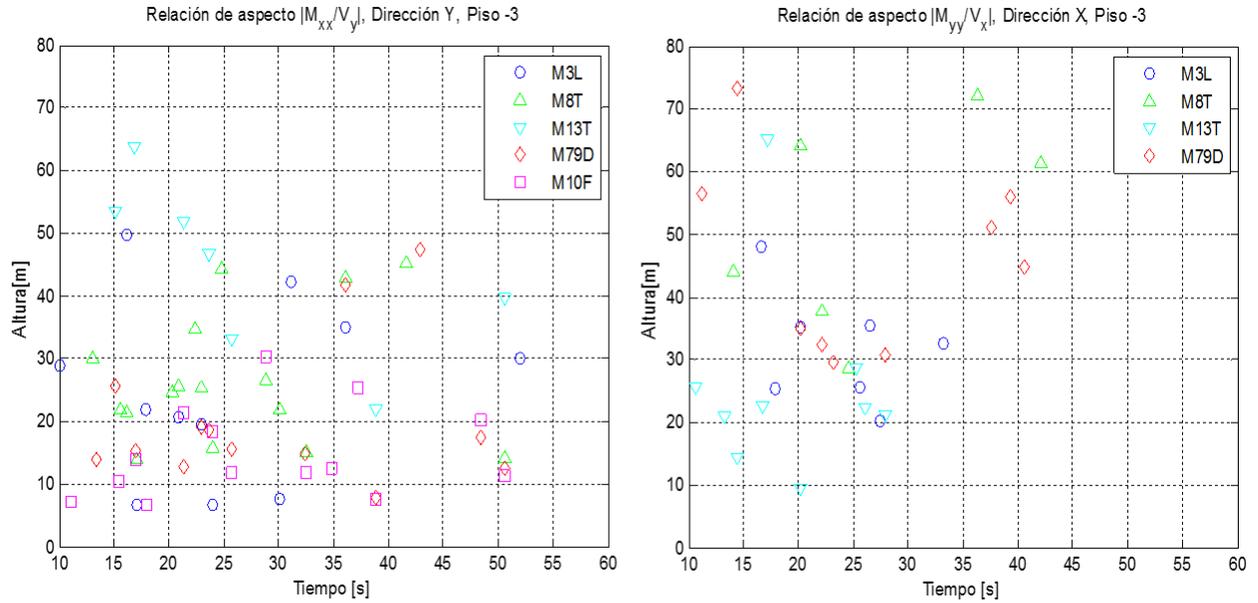


Figura 4.12: Relación M/V en el tiempo, para los muros de estudio y en ambas direcciones, con respecto al subterráneo -3. Registro de Concepción x1,5.

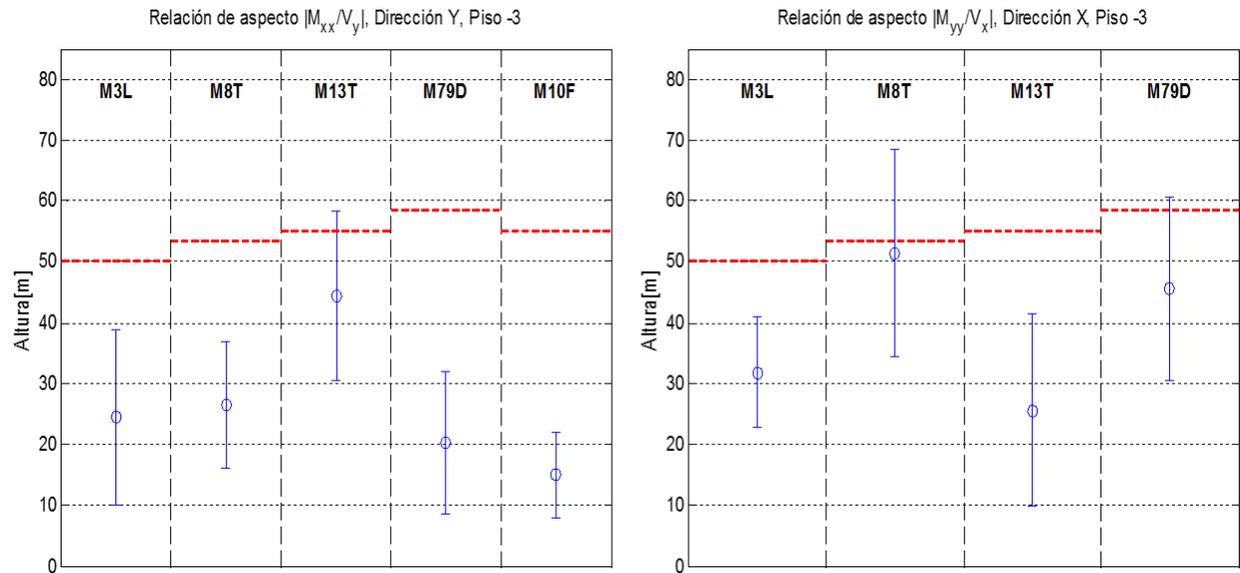


Figura 4.13: Promedio y dispersión de la relación M/V para los muros de estudio y en ambas direcciones, con respecto al subterráneo -3. Registro de Concepción x1,5.

Las Figuras 4.14 y 4.15 muestran el mismo análisis, pero considerando que el empotramiento del edificio se da en el primer piso. En este caso, se ve que a excepción del muro 3L con respecto al eje Y, todos los otros casos arrojan que la resultante de carga lateral se ubica por debajo de los dos tercios de la altura del muro. En la mayoría de los casos, el promedio de los valores M/V se encuentra bajo los $0,5h_w$.

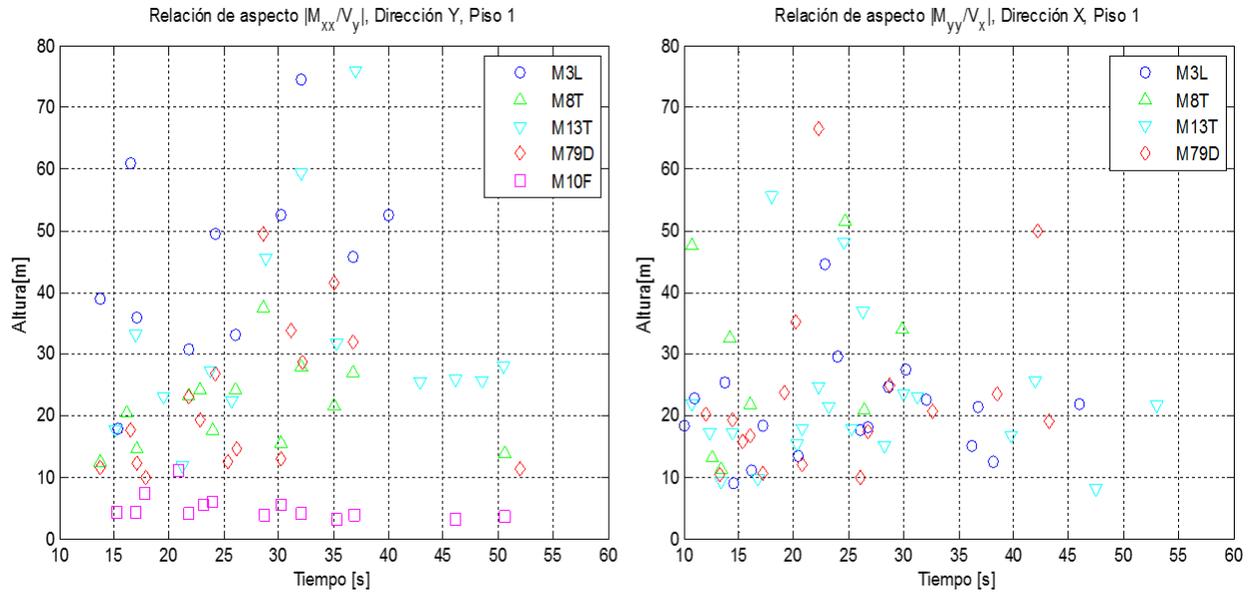


Figura 4.14: Relación M/V en el tiempo, para los muros de estudio y en ambas direcciones, con respecto al piso 1. Registro de Concepción x1,5.

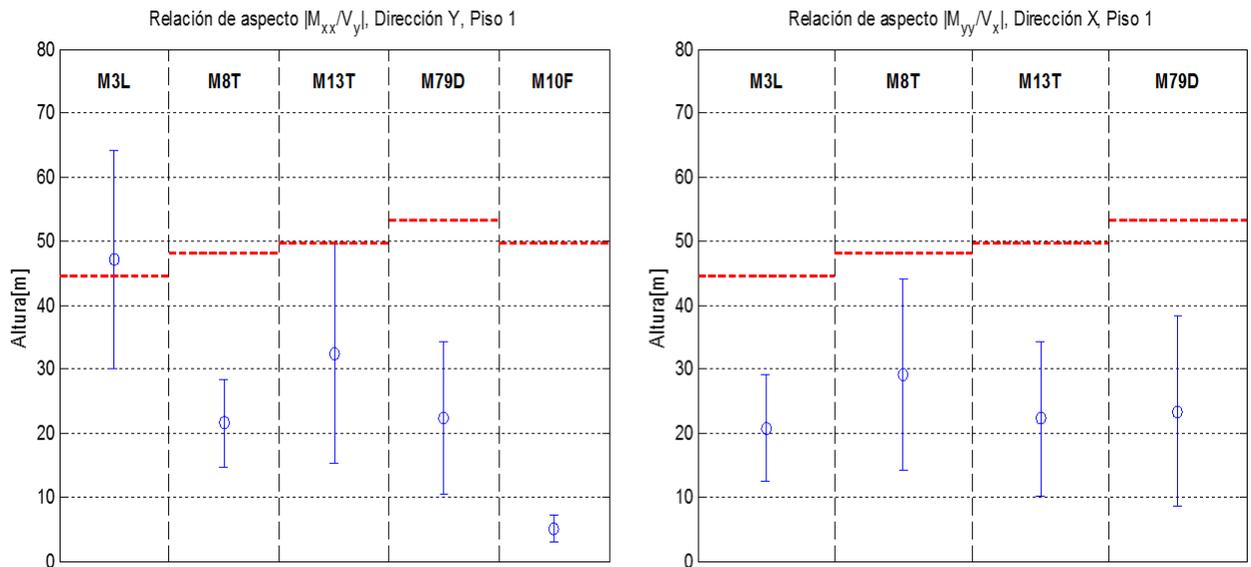


Figura 4.15: Promedio y dispersión de la relación M/V para los muros de estudio y en ambas direcciones, con respecto al piso 1. Registro de Concepción x1,5.

Estos resultados se condicen con los que presentó Bustos (2016), quien utilizando el modelo NL incompleto obtuvo gráficos similares. La resultante de carga lateral se presentaba en general por debajo de los $2h_w/3$, con algunos casos extremos (como el muro 10F con respecto al primer piso) donde el valor del promedio alcanzaba solamente un 10 % de lo esperado.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE CIERTOS MUROS, EN MODELO TRIDIMENSIONAL

Para contrastar estos resultados con el comportamiento de la estructura en general, se obtuvieron los esfuerzos a nivel de planta completa, tanto en el subterráneo -3 como en el piso 1. Los promedios de las razones M/V obtenidas para los diferentes casos se tienen en la Figura 4.16. De estos gráficos se puede observar que para ambas direcciones y para ambos pisos de referencia (especialmente para el tercer subterráneo), la resultante de la carga lateral se ubica cerca de los dos tercios de la altura del edificio.

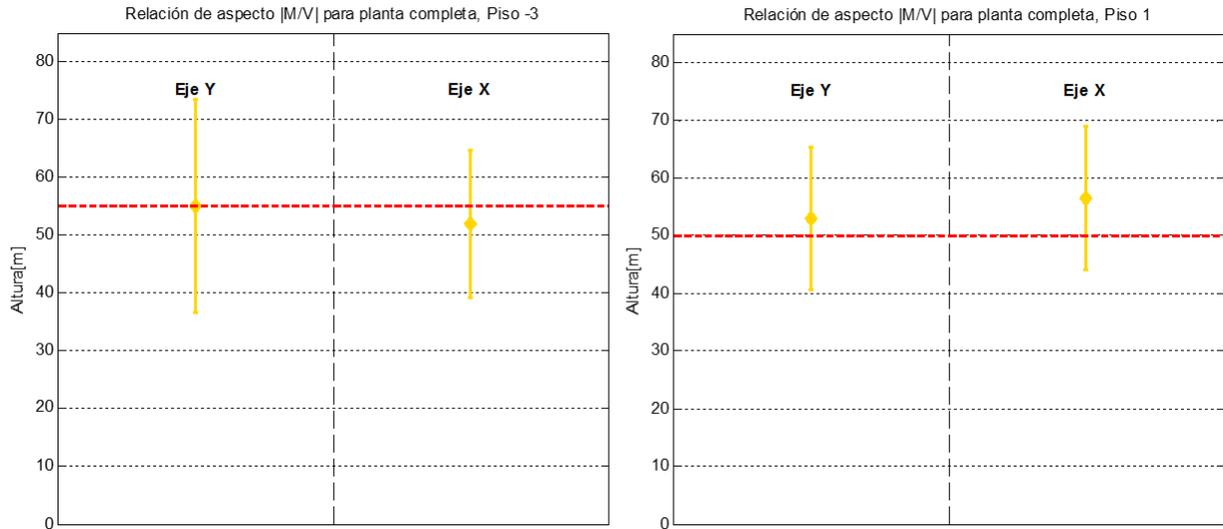


Figura 4.16: Promedio y dispersión de la relación M/V para la planta completa, en ambas direcciones y con respecto al subterráneo -3 y al piso 1. Registro de Concepción x1,5.

De lo anterior se puede deducir que para el registro utilizado la estructura de forma global se mueve como un muro en cantiléver vibrando principalmente en el primer modo, pese a que los muros en su interior no lo hagan. Debe haber, por tanto, fuerzas adicionales que los afecten y bajen la posición de la resultante.

Se presume que la baja en la ubicación de la resultante viene del acoplamiento de muros. Dado que los muros no se mueven de forma independiente sino que están conectados piso a piso mediante diafragmas rígidos, estos actuarían traspasando cargas entre los muros y afectando la distribución de cargas laterales, disminuyendo la altura de la resultante de carga.

4.7. Efecto de las cargas de las vigas de acople en la relación M/V

Como se explicó en el Capítulo 3, el modelo no lineal en Perform-3D no cuenta con elementos de losa, pero sí con vigas de acople en las zonas donde se pensaba que los refuerzos de losa actuaban acoplando muros. Dichos elementos fueron modelados de modo que al alcanzar su momento nominal, se formaran rótulas plásticas en los extremos. Su distribución en planta en Perform-3D se puede ver en la Figura 4.17. En general, los valores máximos de momento que se generan en esas vigas de acople no superan las 7 [ton·m], lo que comparado con el momento en las bases de los muros (que van desde 500 hasta sobre 8000 [ton·m], dependiendo el caso), es muy poco. Es por esta razón que se presume que **las cargas axiales y de corte a través de los refuerzos de losa** actúan acoplando los muros.

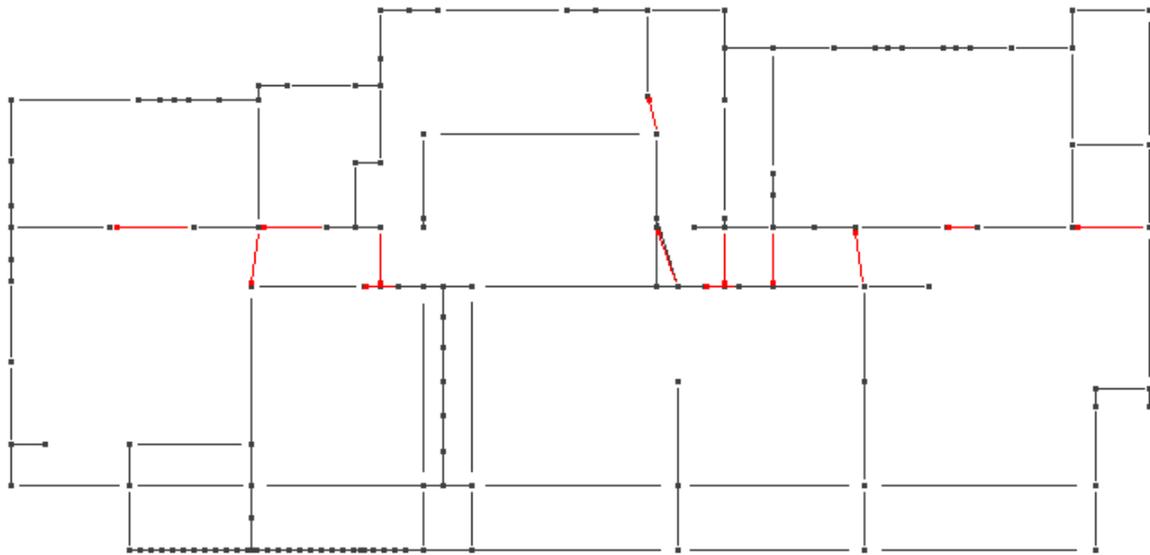


Figura 4.17: Planta tipo en Perform-3D. Los elementos en rojo representan vigas de acople entre muros.

Cabe mencionar que no se usaron elementos de losa pues el foco estaba en el comportamiento no lineal (y estos elementos son lineales en Perform-3D). El ancho de los elementos de acople ha sido aumentado de modo de representar de mejor manera el trabajo de la losa, pero esto no quiere decir que las cargas que se estudien se traspasen exclusivamente a través de estos elementos. Por ejemplo, hay zonas de la planta del modelo donde no hay vigas de acople, pero las losas en la estructura real probablemente traspasen corte y carga axial en esas zonas también, y no es posible estudiarlas con el modelo actual. Una forma de medir esto podría ser utilizar elementos tipo *shell* para las losas, pero con una inercia fuera del plano disminuida, de modo que no consideren el efecto de acoplamiento en ese sentido que es altamente no lineal (y lo toman los refuerzos de losa).

En un sistema de muros tridimensional como el del caso estudiado, las fuerzas de acople

pueden venir de dos direcciones: a través de las vigas de acople en forma de carga axial cuando dos muros se mueven en la misma dirección, uno tras otro; o a través del corte en los elementos de acople cuando dos muros se mueven en la misma dirección, uno al lado del otro.

Por lo tanto, es deseable estudiar las cargas axiales y de corte que se produce en las vigas de acople. El corte no representa un problema, sin embargo, como el modelo NL completo cuenta con diafragmas rígidos o *constraints* en cada piso (obligando a que todos los puntos de la planta se muevan lo mismo en el plano), los dos puntos que definen un refuerzo de losa no se pueden separar y, al no haber deformación, la carga axial es nula. Es por esto que el modelo se modificó de modo de poder rescatar dichos valores.

En un principio, se pensó en remover completamente el diafragma, dejando que las vigas de acople se encargaran de mantener unidos los elementos de la planta. Sin embargo, dado que no todos los elementos estaban conectados mediante vigas, se optó por colocar un *constraint* en el perímetro de la planta y en ciertas zonas del interior donde no habían elementos de acople y, por lo tanto, el movimiento de los muros generaba periodos con participación de masa prácticamente nula, que no aparecían en el modelo original.

Se probó dicha versión del modelo, encontrando que los principales periodos no sufrían grandes diferencias con respecto a los del modelo NL completo. No obstante, al momento de correr el registro sísmico, se observó que la velocidad de cálculo disminuía drásticamente y habían problemas de convergencia. Por esta razón, finalmente se decide volver a modificar el diafragma, esta vez dejando libres los nodos asociados al acople de uno solo de los muros, el 13T. Este *constraint* y el utilizado originalmente se muestran en la Figura 4.18.

Se observa que de esta manera, el modelo es capaz de analizar registros sísmicos sin problemas de convergencia y a una velocidad de cálculo razonable. Los primeros seis periodos de este modelo se presentan en la Tabla 4.2, de donde se ve que las diferencias con respecto a los periodos del modelo NL completo no superan el 3 %.

Tabla 4.2: Periodos obtenidos del modelo NL con RL y su comparación con el modelo NL completo.

Periodo Modelo NL con RL [s]	Periodo Modelo NL completo [s]	Error	Participación Masa X	Participación Masa Y
1,820	1,821	0,0 %	1,97 %	53,67 %
1,534	1,546	0,8 %	38,05 %	4,22 %
0,769	0,752	2,3 %	25,69 %	0,21 %
0,434	0,439	1,3 %	5,00 %	7,13 %
0,400	0,400	0,0 %	4,64 %	10,59 %
0,230	0,224	2,9 %	5,56 %	0,03 %

Se comprueba que utilizando dicho *constraint* es posible recoger las cargas en las vigas de acople que llegan al muro 13T. Lo primero que se observa luego de correr el registro sísmico de Concepción (amplificado por 1,5) es la gran magnitud de carga axial transferida, que para los últimos pisos supera las 50 [ton] por viga. Dado que el modelo arroja resultados razonables,

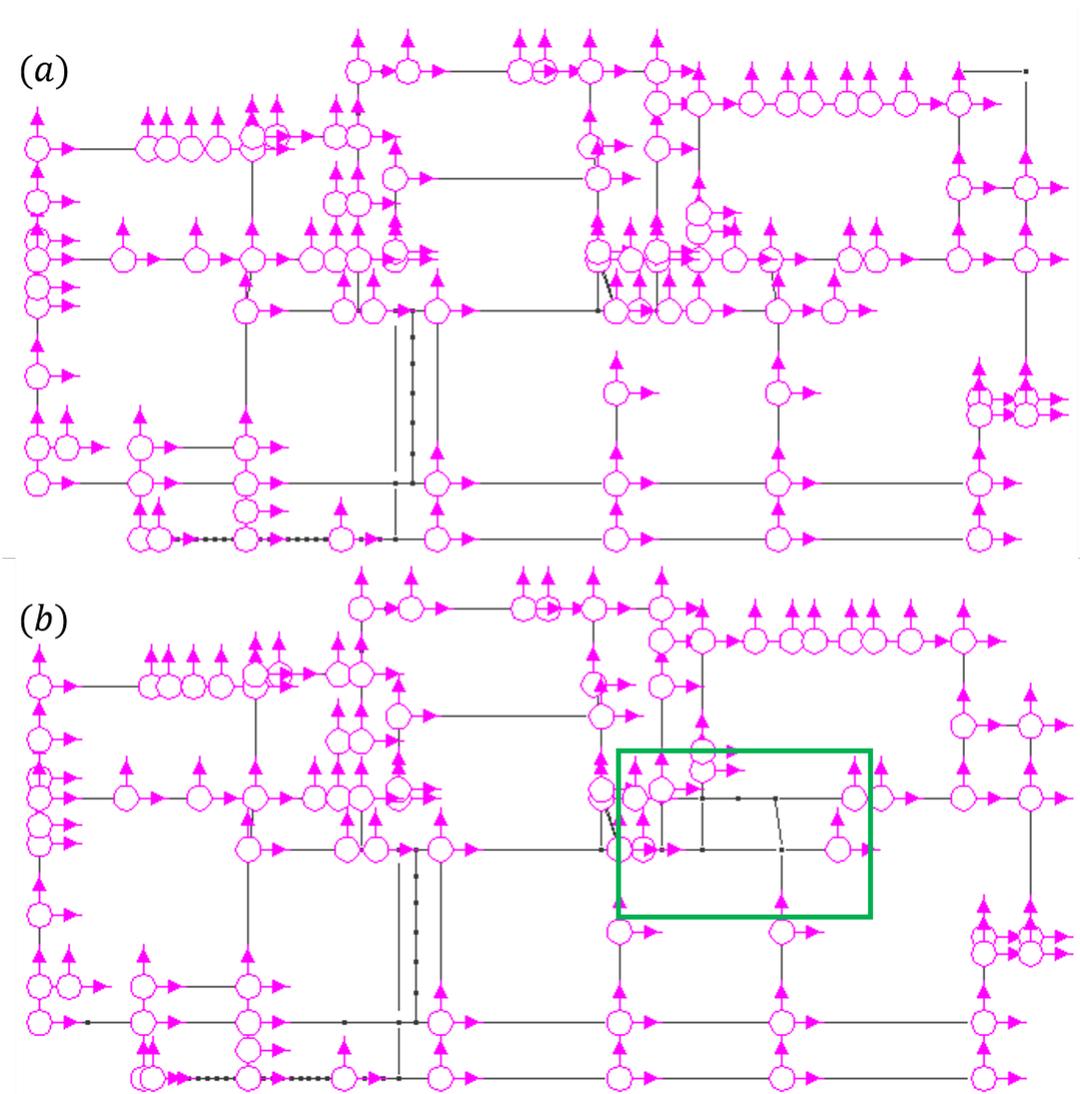


Figura 4.18: (a) Diafragma aplicado en el piso tipo, los círculos rosados definen los nodos que están considerados en el *constraint*; (b) diafragma aplicado en el nuevo modelo, dejando libre los nodos en el rectángulo verde cercanos al muro 13T.

se procede a estudiar el efecto de dichas cargas en el acople de los muros, y en particular, en la ubicación de la resultante de carga lateral.

Para recoger el efecto que tienen las cargas axiales y de corte transmitidas por los refuerzos de losa en la razón M/V , se procede según el esquema de la Figura 4.19.

Suponiendo que el muro no está acoplado, al hacer un corte en la base y recoger los valores del momento y corte, se obtendrían los datos M_{b_0} y V_{b_0} . Sin embargo, como el muro se encuentra acoplado los valores que se obtienen del modelo son en realidad M_{b_m} y V_{b_m} . Además, del modelo se pueden recoger para cada nivel, las fuerzas axiales A_i y las de corte Q_i , transmitidas a través de las vigas de acople. También es posible recoger los momentos M_i que se generan en los extremos de estos elementos.

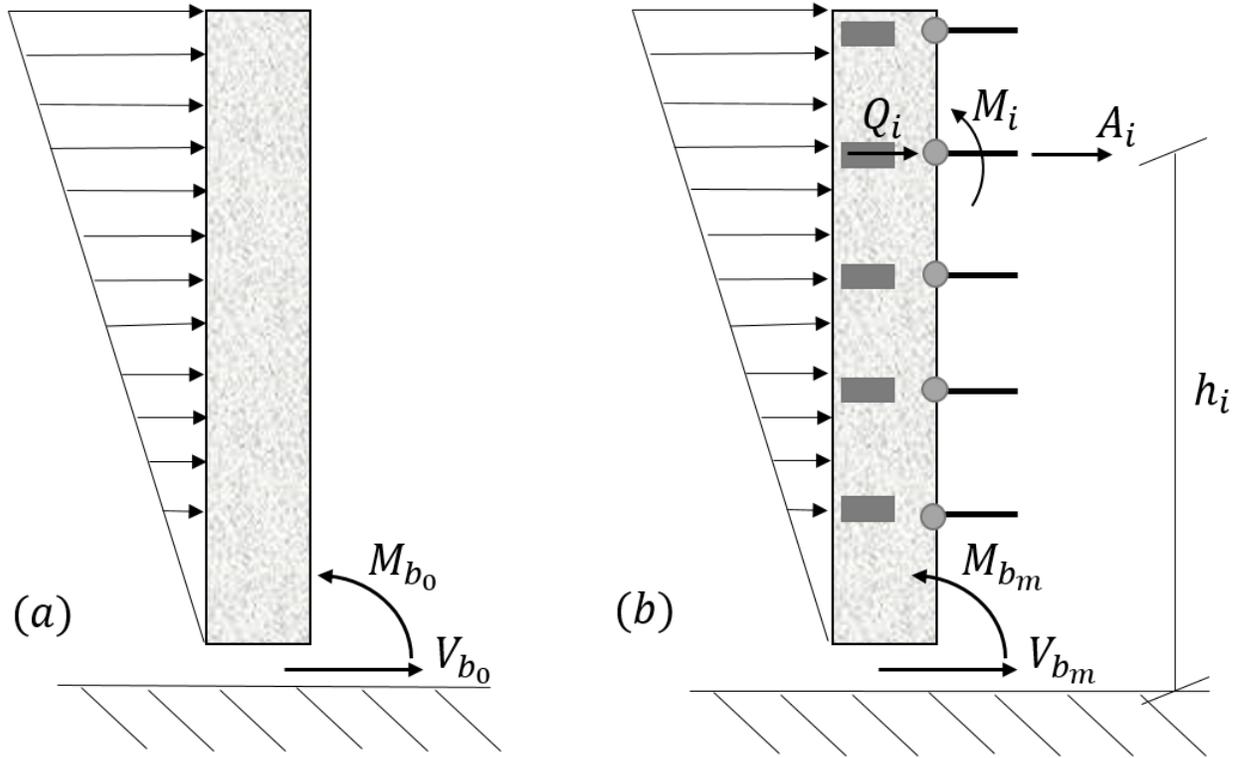


Figura 4.19: Esquema que representa el proceso seguido para recoger el efecto de las cargas axiales de acople sobre la razón M/V . (a) Muro no acoplado; (b) muro acoplado mediante refuerzos de losa.

Considerando ahora las cargas axiales a través de las vigas de acople, se puede calcular la contribución que hacen al corte basal y al momento basal como:

$$\Delta V_A = \sum_i^n A_i \quad (4.1)$$

$$\Delta M_A = \sum_i^n A_i \cdot h_i \quad (4.2)$$

Donde ΔV_A y ΔM_A serían las contribuciones que hacen estas cargas al corte y momento en la base del muro, y h_i es la altura del piso i . El cálculo es análogo para obtener las contribuciones de las fuerzas de corte, ΔV_Q y ΔM_Q :

$$\Delta V_Q = \sum_i^n Q_i \quad (4.3)$$

$$\Delta M_Q = \sum_i^n Q_i \cdot h_i \quad (4.4)$$

Mientras que los momentos en los extremos de las vigas aportan solo al momento basal

con un ΔM_M , de la siguiente manera:

$$\Delta M_M = \sum_i^n M_i \quad (4.5)$$

Así, sería posible recuperar los esfuerzos en el muro no acoplado (M_{b_0} y V_{b_0}) “restando” de los valores obtenidos del modelo las contribuciones de los elementos de acople. Este paso no es tan directo debido al sistema de signos que tiene Perform-3D, pero siguiendo lo que se expone en el manual de Perform en su apartado *Components and Elements* (2006), se obtiene que:

$$V_{b_0} = V_{b_m} - \Delta V_A - \Delta V_Q \quad (4.6)$$

$$M_{b_0} = M_{b_m} + \Delta M_A + \Delta M_Q - \Delta M_M \quad (4.7)$$

De esta manera, se calcula el corte y el momento basal que tendría el muro sin las vigas de acople en cada instante del registro, y luego se obtiene la razón M_{b_0}/V_{b_0} (utilizando el procedimiento descrito en la sección anterior) para observar el efecto que tienen las cargas de acople en la ubicación de la resultante de carga lateral.

Ahora bien, el muro 13T cuenta con 3 refuerzos de losa que lo conectan con el resto de la planta. Estos se han denominado RL1, RL2 y RL3, como se observa en la Figura 4.20. Mientras RL1 y RL2 están orientados únicamente en una dirección, RL3 está inclinado, por lo que su aporte se proyecta en ambas direcciones. Los distintas fuerzas de estos elementos que afectan al muro 13T cuando se mueve **en la dirección Y** se pueden ver en la Figura 4.21.

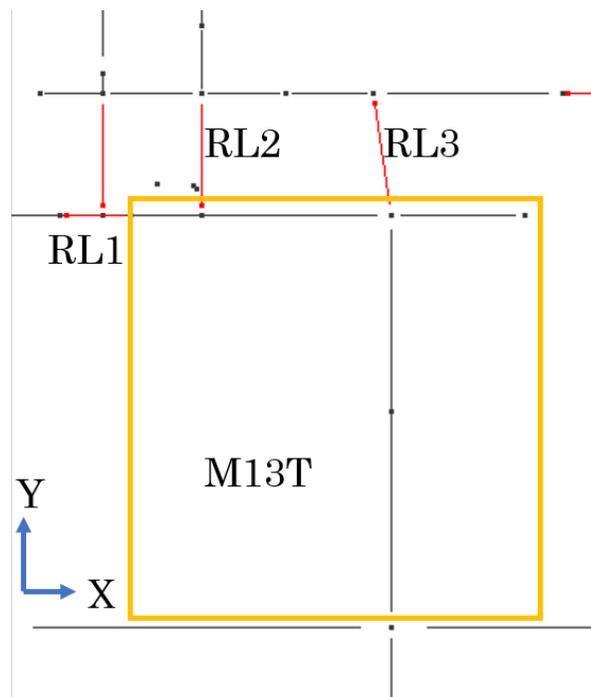


Figura 4.20: Refuerzos de losa (en rojo) que llegan al muro 13T, en Perform-3D.

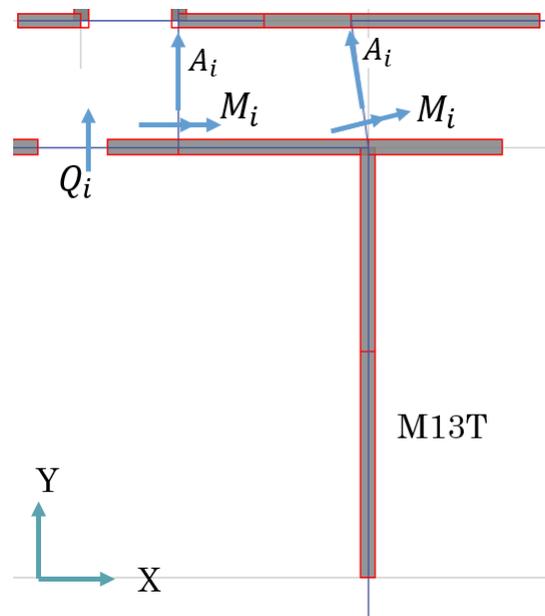


Figura 4.21: Cargas de acople del piso i sobre el muro 13T al moverse en la dirección flexible (eje Y).

Una vez realizado el proceso descrito anteriormente, se grafica la posición de la resultante de la carga lateral para el muro 13T, considerando los valores que arroja directamente el modelo (M_{b_m} y V_{b_m} de la Figura 4.19) y los que se obtienen luego de restar el aporte de los diferentes esfuerzos en las vigas de acople. Se comienza por estudiar la incidencia de los momentos en los extremos de las rótulas plásticas, calculando el aporte al momento basal ΔM_M , mediante la ecuación 4.5. Los resultados se muestran en los gráficos de la Figura 4.22.

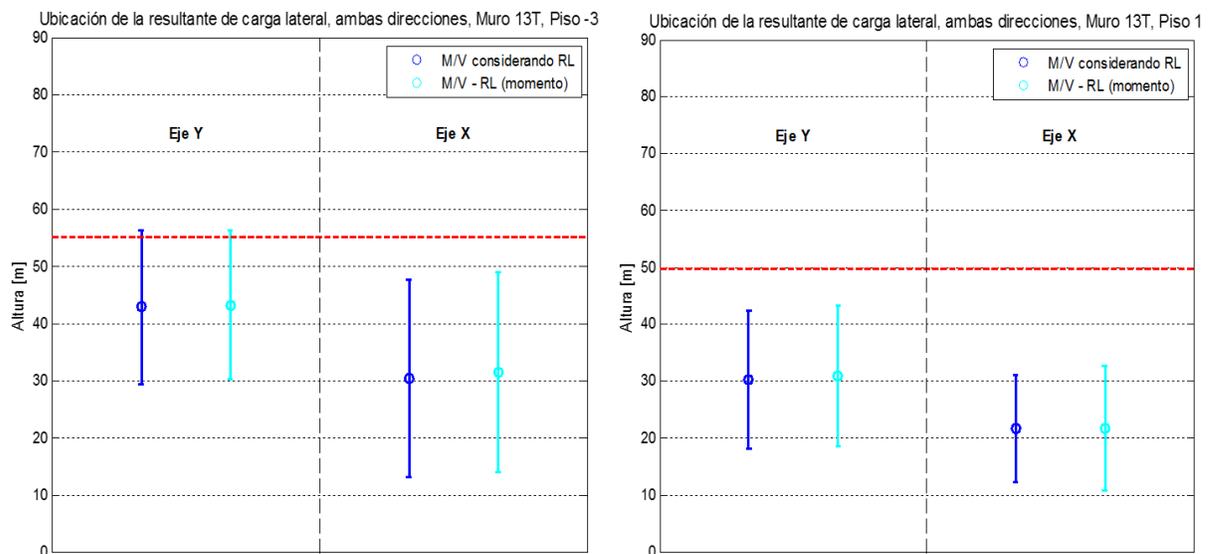


Figura 4.22: Ubicación de la resultante de carga lateral para el muro 13T, con respecto al subterráneo -3 y al piso 1. Aporte del momento en extremos de vigas de acople. Registro de Concepción x1,5.

Como se puede observar, al descontar el efecto de los momentos en los extremos de las rótulas los resultados que se obtienen para las razones M/V son prácticamente los mismos que los obtenidos directamente del modelo: las diferencias no superan el 4 % del valor del promedio, y la dispersión de los resultados tampoco se ve alterada. De esta manera, se puede concluir que el aporte del momento en las rótulas plásticas es prácticamente despreciable y no se considera en el resto de los análisis, concentrándose en los efectos de las cargas axiales y de corte a través de las vigas de acople. **Este análisis se realiza exclusivamente en la dirección flexible**, pues es la de mayor interés al ser aquella según la cual la sección T del muro está orientada, además de ser donde se producen los mayores esfuerzos en términos de momento y corte.

En los gráficos de las Figuras 4.23 y 4.24, donde se tomó como referencia el subterráneo -3 y el piso 1 respectivamente, se pueden observar los promedios y las dispersiones para cuatro casos: los valores de M/V obtenidos directamente del modelo (círculo azul), los valores de M/V descontando únicamente el aporte de las cargas axiales (círculo verde), los mismos valores pero restando el aporte de las cargas de corte (círculo celeste), y finalmente, las razones M/V descontando ambos efectos (círculo rojo). Nuevamente la línea punteada roja marca los dos tercios de la altura del muro para ambos casos.

Lo primero que se puede observar de estos gráficos es que la posición de la resultante de la carga lateral al considerar los refuerzos de losa (círculo azul) es muy cercana en todos los casos a los valores obtenidos de M/V en el modelo NL completo para el muro 13T, de las Figuras 4.13 y 4.15. Las mayores diferencias entre ambos modelos no superan el 10 %. Esto era de esperarse pues, aunque se haya modificado el modelo alterando los diafragmas de piso, esto se hizo de manera que el comportamiento de la estructura no se viera afectado.

Luego, al comparar los valores promedios entre ambos pisos de referencia, se puede observar que el muro 13T presenta menos acoplamiento con respecto al subterráneo -3 (donde la resultante baja en un 15 %) que con respecto al piso 1 (donde baja en un 39 %).

Además, al comparar estos valores con la posición de la resultante de carga cuando se ha descontado el aporte de las cargas axiales de las vigas de acople (círculo verde), se puede observar que **en ambos los casos, el promedio de la razón M/V sube, acercándose a los dos tercios de la altura del muro**. La resultante también sube cuando se descuenta únicamente el aporte del corte (círculo celeste), pero su efecto parece ser menos significativo: en el caso del subterráneo -3, la resultante sube en un 20 % sin las cargas axiales, mientras que solo aumenta en un 3 % sin las de corte. De la misma manera, con respecto al piso 1 el promedio de la altura de la resultante sube en un 43 % al descontar las fuerzas axiales contra un 12 % al descontar las de corte.

En ambos casos, la posición de las razones M/V al descontar ambos efectos (círculo rojo) se ubica ligeramente por sobre los dos tercios de la altura del muro, y su valor se condice con los obtenidos al descontar los aportes axiales y de corte por separado.

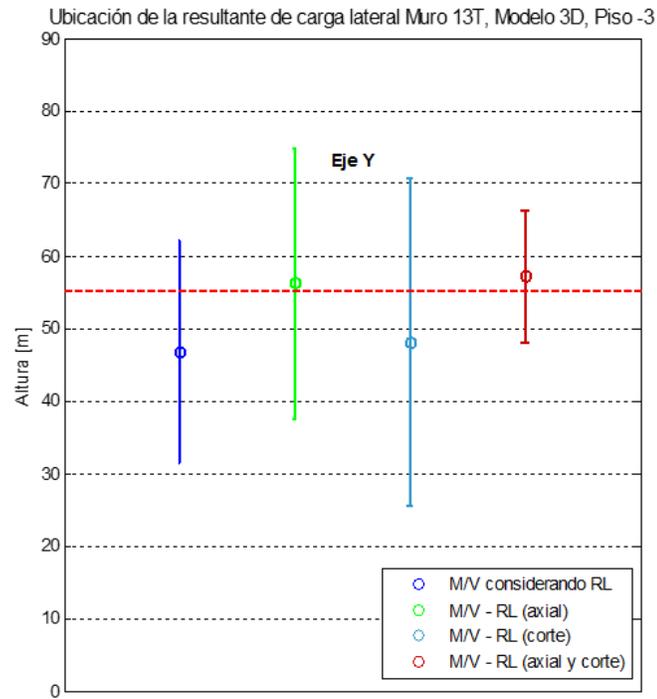


Figura 4.23: Ubicación de la resultante de carga lateral para el muro 13T en el eje Y, con respecto al subterráneo -3. Aportes de cargas axiales y corte. Registro de Concepción x1,5.

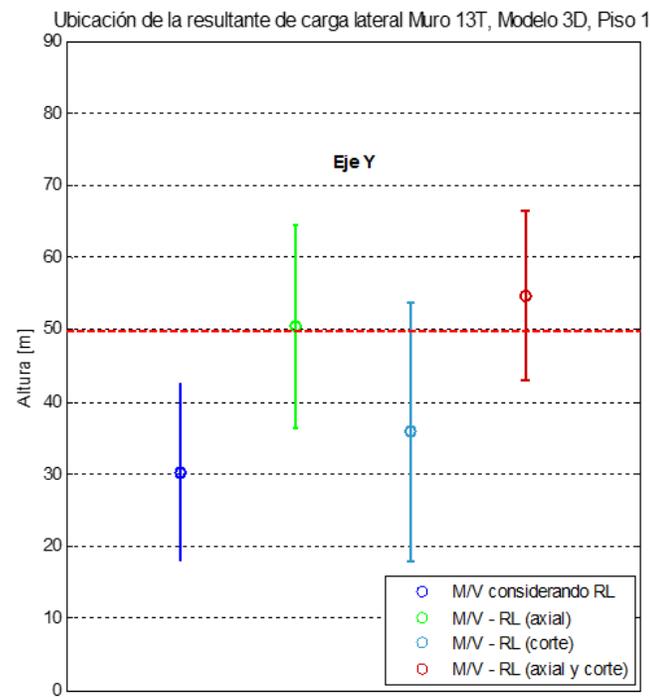


Figura 4.24: Ubicación de la resultante de carga lateral para el muro 13T en el eje Y, con respecto al piso 1. Aportes de cargas axiales y corte. Registro de Concepción x1,5.

Los resultados anteriores respaldan la teoría antes presentada, de que los elementos de acople traspasan cargas entre muros acoplados, disminuyendo la posición de la resultante de carga lateral con respecto a la que se esperaría si los muros se movieran de forma independiente. A continuación se realiza un análisis bidimensional para uno de los muros, con el objetivo de ver si este efecto sigue apareciendo al estudiar solo una dirección, o es producto de la distribución tridimensional que tienen los elementos en la estructura.

Capítulo 5

Análisis bidimensional para uno de los muros de estudio

5.1. Introducción

Como se mencionó anteriormente, una vez realizado el análisis del comportamiento de los muros y el efecto que tienen los refuerzos de losa para un muro en particular, se desea estudiar si este efecto aparece de igual manera al hacer un análisis en una sola dimensión.

En el presente capítulo, se describe el modelo utilizado para el estudio en dos dimensiones, los resultados que arroja y su comparación con los presentados en el capítulo anterior, del modelo tridimensional. Cabe mencionar que si bien se hace referencia a un modelo “bidimensional”, este no es un modelo *plano*; los elementos siguen teniendo tres dimensiones, pero el movimiento de la estructura se estudia en una sola dirección.

5.2. Modelo para análisis bidimensional

Dado que el modelo NL con RL permite recoger las cargas en los refuerzos de losa en toda la altura, pero solo para el muro 13T, se decide de igual manera estudiar este muro mediante un análisis bidimensional. Como dirección de estudio se escoge **la dirección flexible**, o eje Y, por las razones expuestas en el capítulo anterior.

De esta manera, se procede a cortar la estructura de modo de obtener una franja en la dirección del eje Y. El objetivo era que dicha franja cumpliera con los siguientes requisitos:

- Contener al muro 13T, acoplado con otro(s) muro(s).
- Que los periodos principales sean similares a los de la estructura completa.
- Que en el primer modo, la dirección de movimiento principal sea en el eje Y.

Se consideran diferentes formas de seccionar la estructura, tratando de cumplir con las

características mencionadas. Finalmente, se opta por utilizar el modelo cuya planta tipo se ve en la Figura 5.1, que consiste en el muro 13T acoplado mediante dos vigas de acople a una serie de muros con forma de cajón. Al igual que en el modelo anterior, se deja sin *constraint* la zona de los refuerzos de losa que llegan al muro 13T.

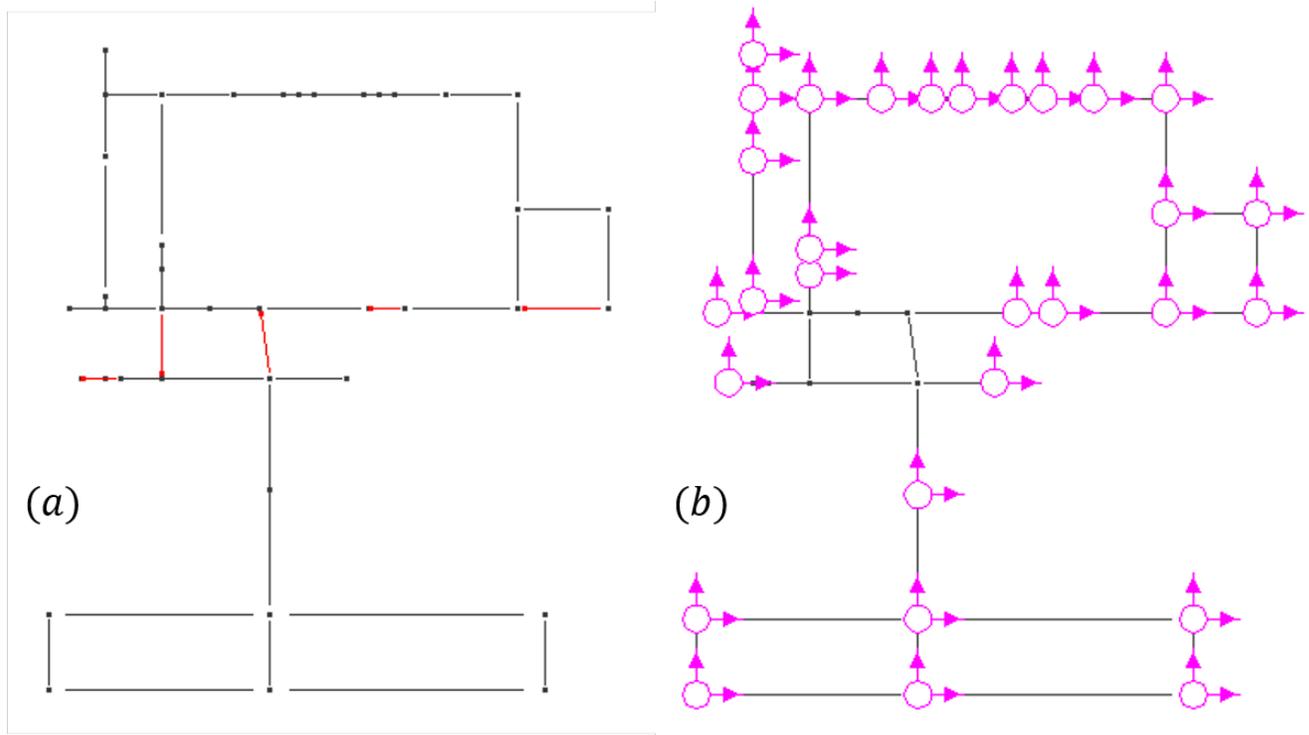


Figura 5.1: Planta tipo del modelo 2D en Perform-3D. Se ve en (a) los refuerzos de losa en rojo; en (b) el diafragma utilizado en la planta tipo.

Dicho modelo, además de contener el muro 13T, cumple con restringir su movimiento prácticamente por completo al eje Y para el primer modo traslacional. Sin embargo, dado que la planta fue modificada drásticamente, se volvió más flexible, elevando su periodo. Como se desea que el comportamiento dinámico global de la estructura seccionada sea comparable al del modelo 3D completo, se altera su masa de modo volverla más rígida, lo que se hace en Perform-3D mediante un factor de escala. En el caso del muro de estudio, se utilizó factor de 0,54 con lo que se obtiene un set de periodos cercanos al del modelo NL con RL. Estos se pueden ver en la Tabla 5.1.

Como se puede observar de los datos presentados, el modelo con las modificaciones descritas posee un set de periodos principales cercanos a los del modelo 3D (la mayor diferencia se encuentra en el quinto modo, y es de un 8,2%), siendo el primer modo prácticamente igual, y con movimiento restringido al eje Y, que es la dirección de estudio.

Finalmente, utilizando nuevamente el registro de Concepción, pero considerando solo la componente vertical y una de las horizontales (en el eje Y), se procede a analizar el comportamiento sísmico del muro. Los resultados se describen a continuación.

Tabla 5.1: Periodos obtenidos del modelo bidimensional y su comparación con el modelo NL completo.

Periodo Modelo NL con RL 2D [s]	Periodo Modelo NL con RL [s]	Error	Participación Masa X	Participación Masa Y
1,814	1,821	0,4 %	2,25 %	55,55 %
1,491	1,546	3,5 %	55,76 %	2,21 %
0,718	0,752	4,6 %	2,15 %	0,03 %
0,407	0,439	7,4 %	10,49 %	6,73 %
0,367	0,400	8,2 %	7,36 %	11,41 %
0,218	0,224	2,7 %	2,17 %	0,07 %

5.3. Resultados del análisis bidimensional

5.3.1. Respuesta en desplazamiento

Como primer parámetro de comparación, se comienza por contrastar la respuesta en desplazamiento del techo del muro 13T del modelo bidimensional, con la que tenía en el modelo de la estructura completa. En los gráficos de las Figuras 5.2 y 5.3 se observa la respuesta en ambas direcciones, comparando la del modelo 2D (línea roja) con la del 3D (línea azul).

Cabe mencionar que producto del protocolo de carga (análisis previo al registro sísmico, donde se asignan las masas a los nodos de la estructura), el edificio tiende a inclinarse en la dirección Y. Estos valores de desplazamiento inicial, $\Delta_{y_{3D}}$ y $\Delta_{y_{2D}}$ (para el modelo 3D y 2D, respectivamente) **son restados de la respuesta** pues se asume que, en un proceso constructivo real, a medida que el edificio se va cargando cualquier nivel de inclinación se corrige con el avance de la construcción, y la desviación debería ser nula una vez terminado el edificio. De todas formas, los valores iniciales de desplazamiento se reportan a continuación:

$$\Delta_{y_{3D}} = -0,033[\text{m}]$$

$$\Delta_{y_{2D}} = -0,13[\text{m}]$$

Como se puede ver de los gráficos, la respuesta en la dirección de análisis coincide en frecuencia (lo cual se esperaba dada la semejanza en los periodos). En amplitud, sin embargo, hay ciertas diferencias, en especial en el sentido positivo del eje Y, donde el muro en el modelo 3D alcanza mayores desplazamientos. En el eje X, como es de esperarse, la respuesta del modelo bidimensional es prácticamente nula, al no utilizarse la componente del registro en esa dirección, y dado el hecho de que la estructura se mueve casi totalmente en el eje Y.

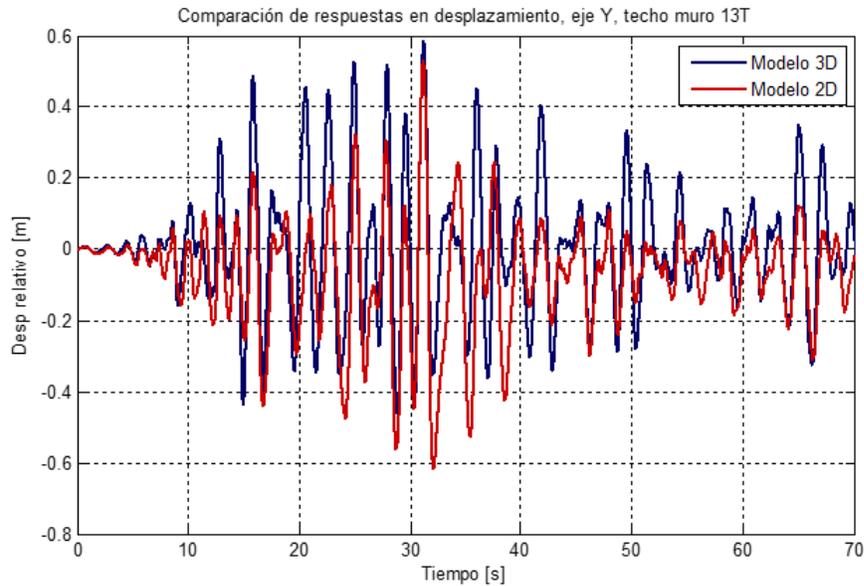


Figura 5.2: Comparación de respuesta en desplazamiento de techo en el eje Y, muro 13T. Modelos 2D y 3D. Registro de Concepción x1,5.

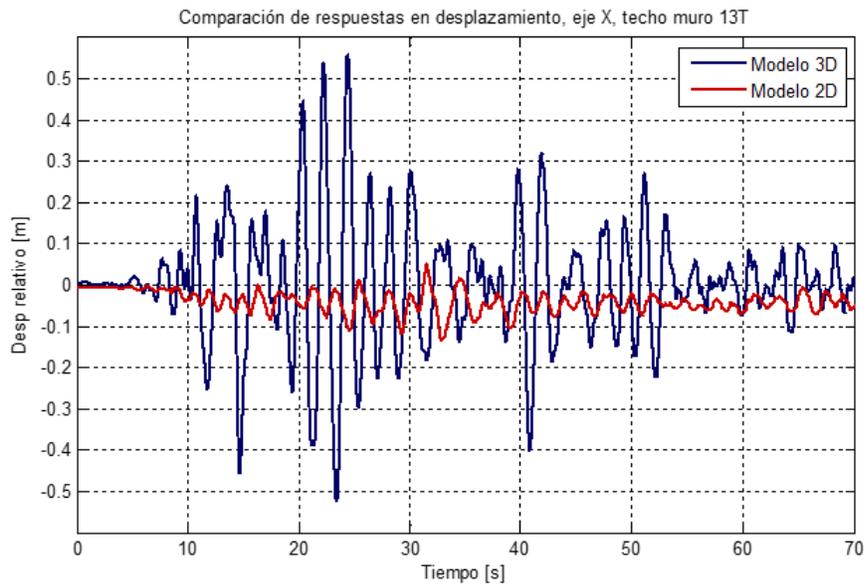


Figura 5.3: Comparación de respuesta en desplazamiento de techo en el eje X, muro 13T. Modelos 2D y 3D. Registro de Concepción x1,5.

5.3.2. Deformación axial en altura

Se estudia también la envolvente de deformación axial a tracción en altura, para cada nodo del muro 13T (el esquema con su identificación se muestra en la Figura 5.4). Estos valores se comparan con los que arroja el modelo 3D para el mismo muro, en la Figura 5.5. Como se puede ver, la estructura en el caso 2D es considerablemente más resistente al registro utilizado, con deformaciones que no superan el $7 \cdot 10^{-4}$, encontrándose muy lejos de la fluencia

del acero al 0,21 % (línea punteada azul en los gráficos). En cambio, el muro 13T en el modelo tridimensional se encuentra mucho más exigido, sin llegar a fluir pero con deformaciones que superan el 0,15 %. Dado lo anterior, se puede suponer que con el registro utilizado, el modelo 2D se mantiene en el rango lineal.

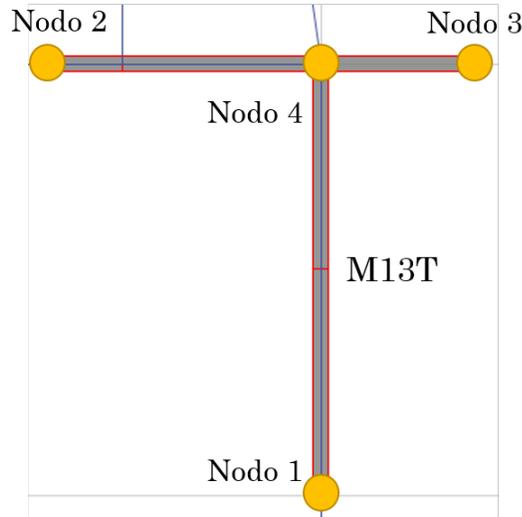


Figura 5.4: Identificación de los diferentes nodos donde se calcula deformación, para el muro 13T.

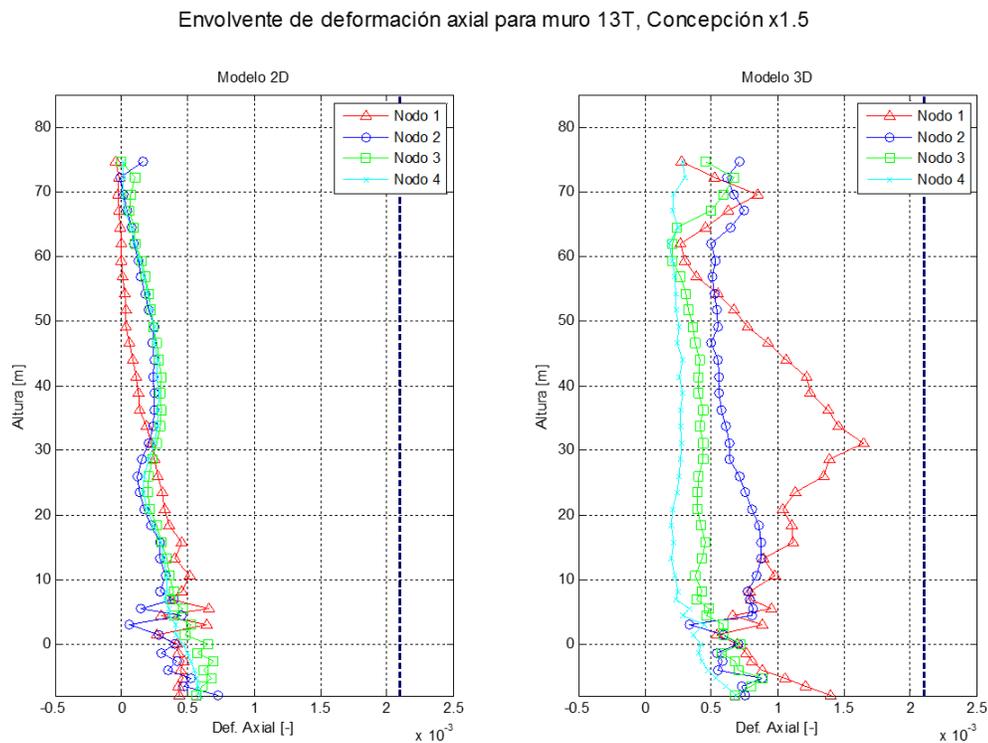


Figura 5.5: Envolvente de deformación axial en tracción, para cada nodo del muro 13T, en modelos 2D y 3D. Registro de Concepción x1,5.

Se puede observar también, al comparar solamente los nodos del ala (Nodos 2, 3 y 4), que hay una diferencia considerable de comportamiento en ambos modelos. Por un lado, en el modelo bidimensional, los tres nodos del ala tienen las mismas deformaciones máximas en prácticamente todos los pisos a excepción de los cercanos a la base, por lo que las líneas azul, verde y celeste en el gráfico de la izquierda de la Figura 5.5 están superpuestas o son muy cercanos. En el modelo tridimensional en cambio, se puede ver que los tres nodos del ala tienen deformaciones máximas claramente diferentes. Llama la atención también lo que sucede con el primer nodo, correspondiente al borde del alma (línea roja en los gráficos). En el modelo 2D alma y ala tienen valores máximos de deformación unitaria similares, mientras que en la estructura completa el ala alcanza tracciones superiores, tanto en el subterráneo como a media altura.

Con el objetivo de estudiar con mayor profundidad por qué se observan estas diferencias, se grafica la sección del muro 13T en el piso 21, y se observa su comportamiento para ambos modelos durante el registro sísmico. En la Figura 5.6 se observa el estado de la sección para un determinado instante del registro. Como se puede ver, en el modelo 2D el ala de la sección T se encuentra horizontal, y el alma comprimida. En el modelo 3D, en cambio, el sismo en la dirección X deforma el ala, que ya no se encuentra horizontal, y al mismo tiempo el alma está claramente en tracción. Esto coincide con lo comentado sobre los gráficos de envolvente de deformación unitaria.

De lo anterior se puede deducir que el comportamiento tridimensional del muro difiere de lo que se observa en el modelo 2D.

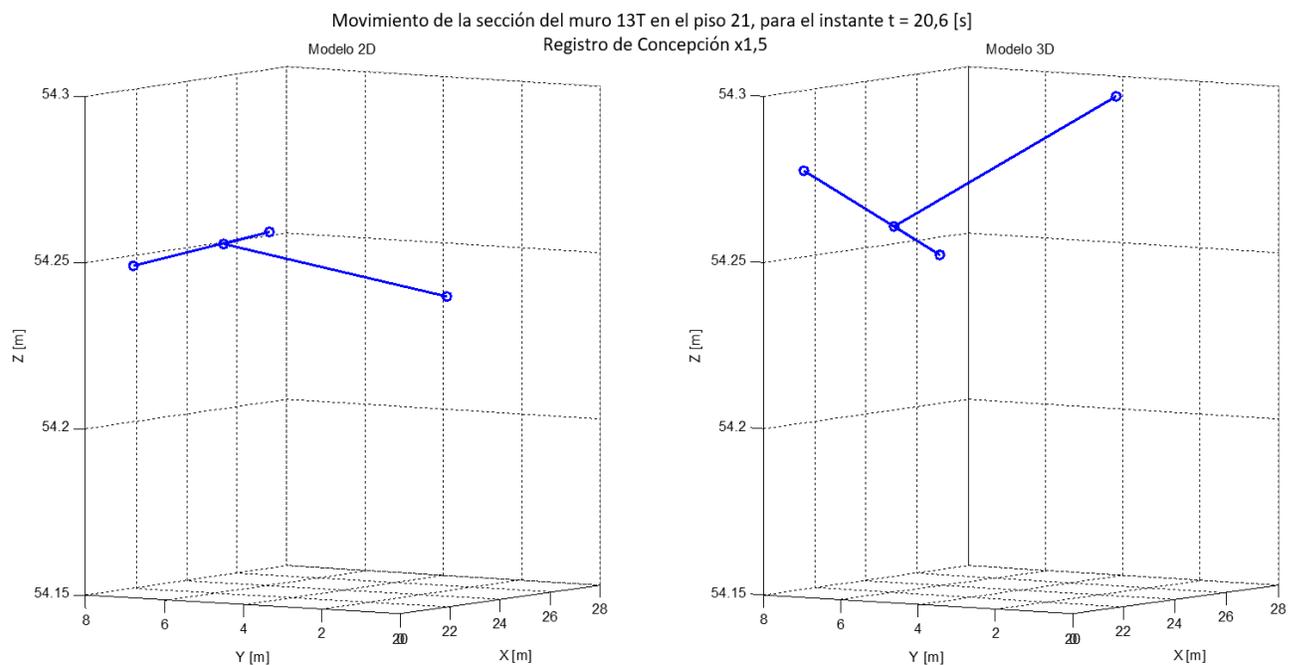


Figura 5.6: Movimiento de la sección del muro 13T en el piso 21, para un mismo instante de tiempo. Registro de Concepción x1,5.

5.3.3. Relación Momento/Corte y efecto de las vigas de acople

Siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo anterior, se recogen las cargas en las vigas de acople para el muro M13T. Dado que el modelo no incluye el muro 8T, conectado al 13T mediante el elemento de acople RL1, para este caso no se tienen cargas de corte a través de ese elemento, sino que solamente cargas axiales y de momento en RL2 y RL3 (ver Figuras 4.20 y 4.21). Para el registro de Concepción amplificado por 1,5, los valores máximos de la fuerza axial en estos elementos llega a alrededor de las 6 [ton], observándose una gran diferencia con el modelo 3D, donde estas cargas superan las 50 [ton] en algunos casos.

Luego, al igual que en el modelo tridimensional, se calcula la razón M/V que se obtiene directamente del modelo, y aquella que resulta de restar el aporte de las vigas de acople. Y, como en el caso 3D, el aporte del momento en las rótulas plásticas que se generan en los extremos de las vigas es muy bajo, por lo que se desprecia y el estudio se concentra en las cargas axiales. Como se puede observar en la Figura 5.7, esta vez la altura de la resultante de carga lateral (círculo azul) se acerca en promedio al valor de $2h_w/3$, como si el muro se moviera como un cantiléver en el primer modo. Esta situación se repite para ambos niveles de referencia. Más aún, la diferencia es baja (alrededor de un 10 %) cuando se compara con los valores de M/V descontando el aporte de las cargas axiales en los elementos de acople (círculo verde). Esta situación es claramente diferente de lo observado en el modelo tridimensional, donde en las Figuras 4.23 y 4.24 se aprecia que el promedio M/V (círculo azul) baja para ambos pisos de referencia (y en particular para el piso 1), indicando un comportamiento diferente al del cantiléver.

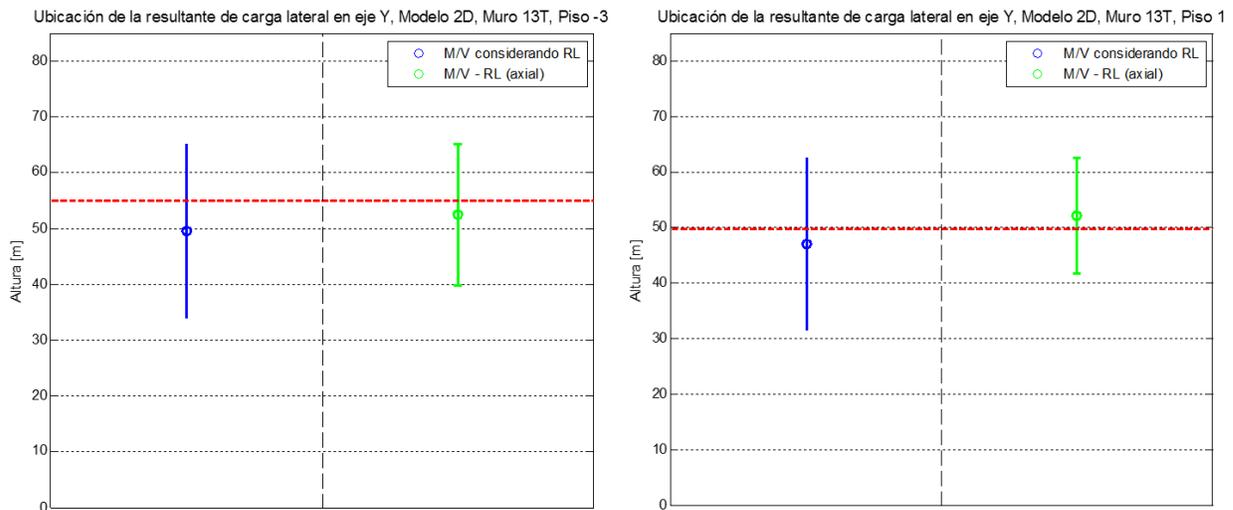


Figura 5.7: Resultante de la carga lateral para el muro 13T en modelo 2D, con respecto al subterráneo -3 y al piso 1. Registro de Concepción x1,5.

De lo anterior se podría deducir que el muro 13T en el modelo 2D y para el registro utilizado, no actúa como parte de un sistema de muros acoplados. De la misma manera, las vigas de acople tienen poca incidencia en la posición de la resultante de carga lateral. Esto se condice con la magnitud de las cargas axiales que transmiten estos elementos. Dado que son muy bajas, los aportes al corte y al momento basal también serán bajos, al calcularlos

con las ecuaciones 4.1 y 4.2.

En el Capítulo 2 se mencionó que en estudios como el de Massone y Alfaro (2016), uno de los parámetros para medir el nivel de acoplamiento de un sistema de muros es la altura a la que el diagrama de momento cambia de signo, h_0 (ver Figura 2.6). Como lo mencionan los autores, en sistemas más acoplados el punto de inflexión del diagrama de momento estará más abajo y la razón h_0/h_w será menor. Con el objetivo de estudiar el nivel de acoplamiento del muro 13T, se grafica **para algunos de los máximos de momento seleccionados para el análisis**, la correspondiente distribución de momento en la altura.

En la Figura 5.8 se observa a la izquierda la distribución de momento para ciertos instantes utilizados en el análisis, mientras que a la derecha se tiene el valor de M/V asociado al diagrama de momento del color respectivo, con respecto al subterráneo -3. Para algunos de los diagramas en la figura, el corte asociado es cercano a cero y por lo tanto la razón M/V se incrementa, superando con creces la altura del edificio. Como se explicó en el Capítulo 4, dichos puntos fueron excluidos del análisis. Como se puede observar, los diagramas de momento para este caso no cambian de signo en la altura, o lo hacen solo en los últimos niveles, **lo que muestra un bajo nivel de acoplamiento**.

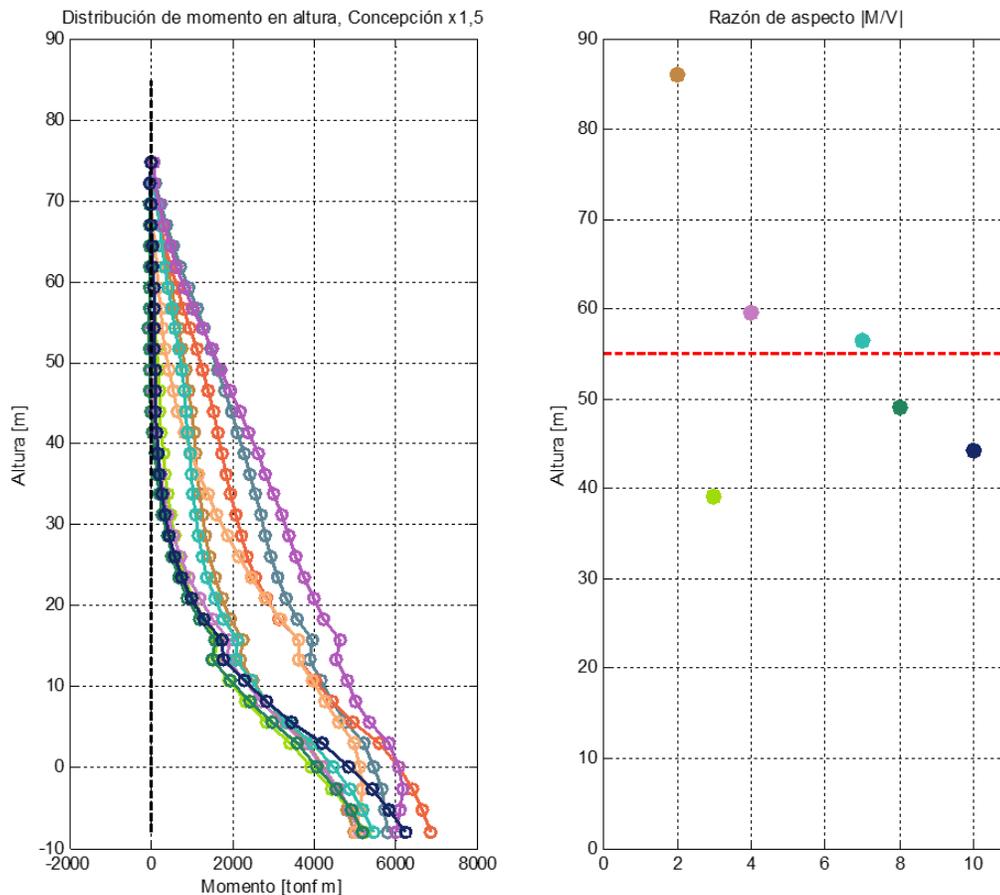


Figura 5.8: Distribución de momento en la altura, para algunos de los instantes utilizados en el análisis. Modelo 2D, registro de Concepción x1,5.

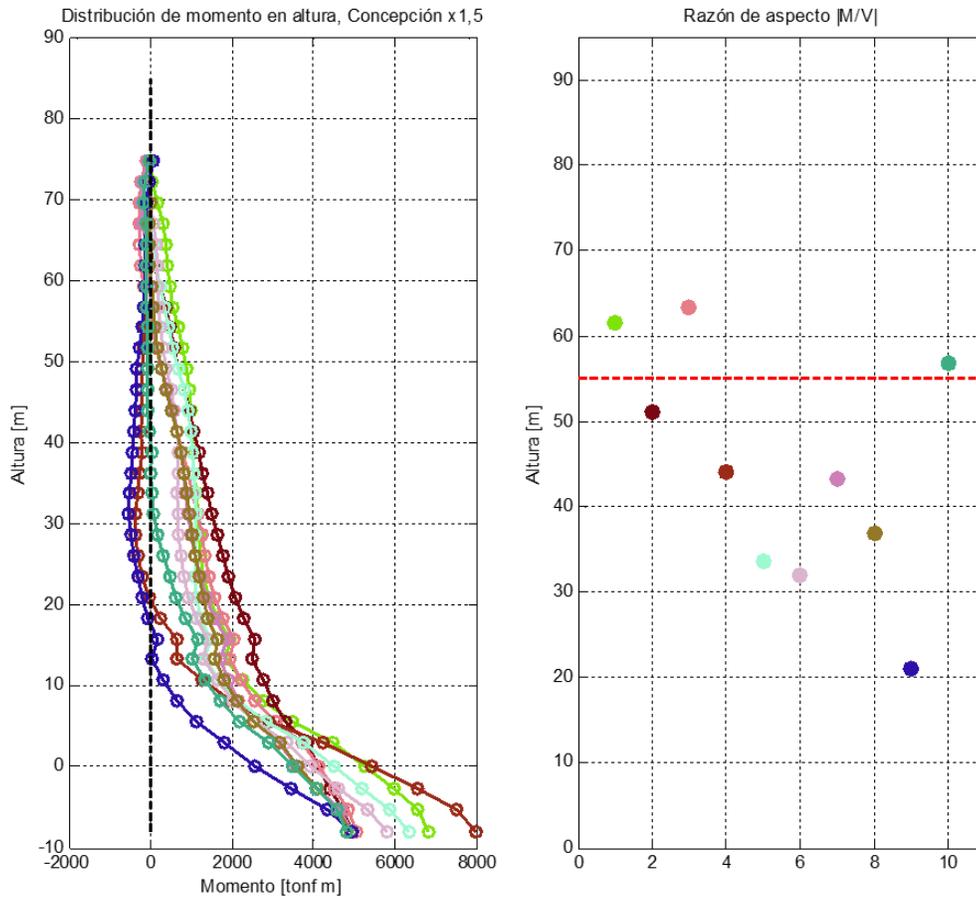


Figura 5.9: Distribución de momento en la altura, para algunos de los instantes utilizados en el análisis. Modelo 3D, registro de Concepción x1,5.

A modo de comparación, en la Figura 5.9 se muestra el gráfico análogo para el muro 13T en el modelo tridimensional. En este caso se observa que en varias ocasiones el diagrama de momento cruza la línea punteada y cambia de signo en los pisos superiores, **lo que implicaría un mayor nivel de acoplamiento**. Lo anterior se condice con los resultados observados para la posición de la resultante de carga lateral, que baja de los dos tercios de la altura del muro para el modelo 3D, pero no así en el bidimensional.

Llama la atención que el muro se comporte como si fuera un elemento aislado, pues a menos que los muros que forman el sistema acoplado tengan la misma rigidez, su comportamiento como muro en cantiléver debería verse afectado. Se presume que una de las causas de esta situación es el hecho de que el muro se encuentra en el rango lineal, sometido a bajos niveles de deformación. En los estudios revisados sobre sistemas de muros acoplados, como son los de Rutenberg (2004) y de Beyer *et al.* (2014), se menciona que las diferencias entre muros acoplados y aislados se comienzan a ver de forma pronunciada una vez que uno de los muros entra en fluencia. Dado lo anterior, se procede a amplificar el registro utilizado, de modo de que la estructura se encuentre más exigida y poder observar su comportamiento bajo esa condición.

5.4. Análisis del muro 13T bajo registro amplificado

Se decide utilizar el registro de Concepción amplificado en dos niveles, por 2,5 y por 3,5, de modo de estudiar el impacto de incrementar la demanda sísmica en el comportamiento del edificio.

Al igual que con el registro anterior, se comienza por analizar la deformación axial de los nodos del muro 13T. Los gráficos de la Figura 5.10 muestran la envolvente de deformación a tracción para los 4 nodos del muro, así como a la fluencia del acero (línea punteada azul). Para el sismo aumentado por 2,5 nuevamente se puede observar que el acero no alcanza a fluir, sin embargo, el nivel de deformación es mayor, con varios pisos superando el 0,12%, asimilándose más al nivel observado en el modelo 3D para el mismo muro. Por su parte, con el registro amplificado por 3,5 el muro se encuentra ya en la fluencia de algunos nodos a nivel del tercer subterráneo y a media altura.

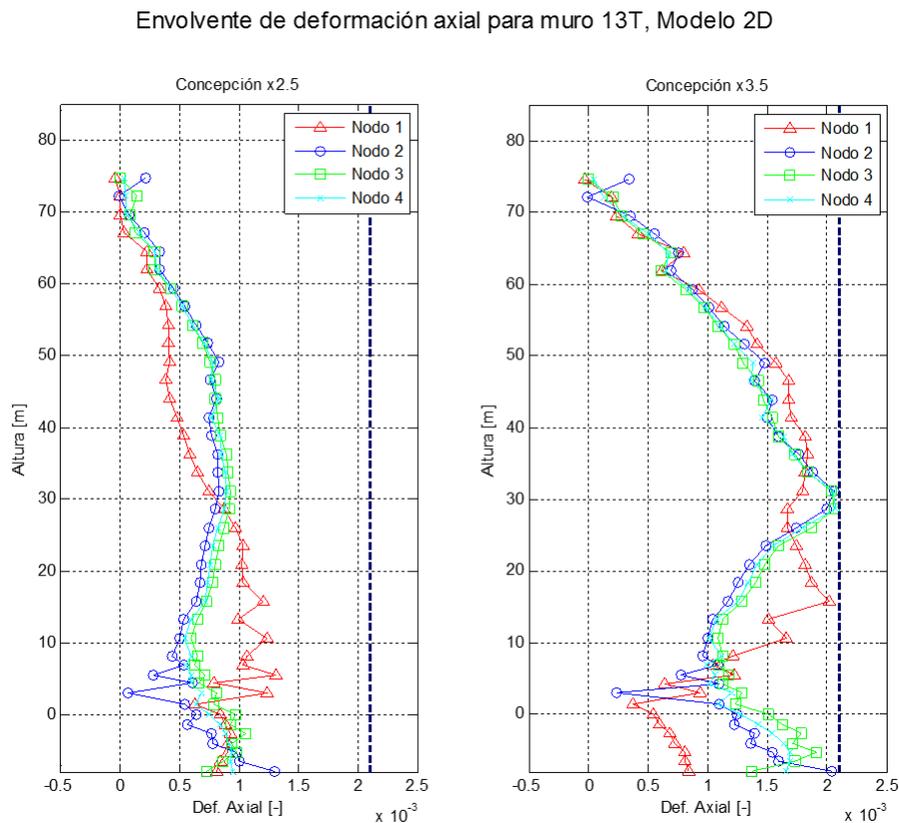


Figura 5.10: Envolvente de deformación axial en tracción, para cada nodo del muro 13T, en modelo 2D. Registro de Concepción x2,5 y x3,5.

Al comparar la información de esta figura con lo que se observa en la Figura 5.5, se puede ver que a nivel del tercer subterráneo, en el modelo 3D el nodo más traccionado es el ubicado en el extremo del alma del muro T. En el modelo 2D, sin embargo, los que presentan más deformación son los del ala, en particular el del extremo derecho (Nodo 2).

Posteriormente se procede a analizar el efecto de las cargas a través de las vigas de acople.

Se observa que para el registro amplificado por 2,5 las fuerzas axiales en estos elementos aumentan, llegando a las 12 [ton] en los últimos pisos. El incremento es significativo, pero aún bastante por debajo de lo que se observa en el modelo 3D (con el registro de Concepción x1,5).

En los gráficos de la Figura 5.11 se observa que **el promedio de las razones M/V (círculo azul) baja al amplificar el registro sísmico por 2,5**. Para ambos pisos de estudio, la posición de la resultante de carga lateral se reduce entre un 13% y un 21% con respecto a los gráficos obtenidos con el registro amplificado por 1,5. Además, el aporte de las cargas axiales a través de los refuerzos de losa comienza a ser más incidente. Al descontarlos, la posición de la resultante (círculo verde) sube más de un 30% con respecto al subterráneo -3, y cerca de un 20% con respecto al piso 1. El valor promedio además se encuentra en ambos casos ligeramente sobre la línea punteada roja que indica los dos tercios de la altura del muro.

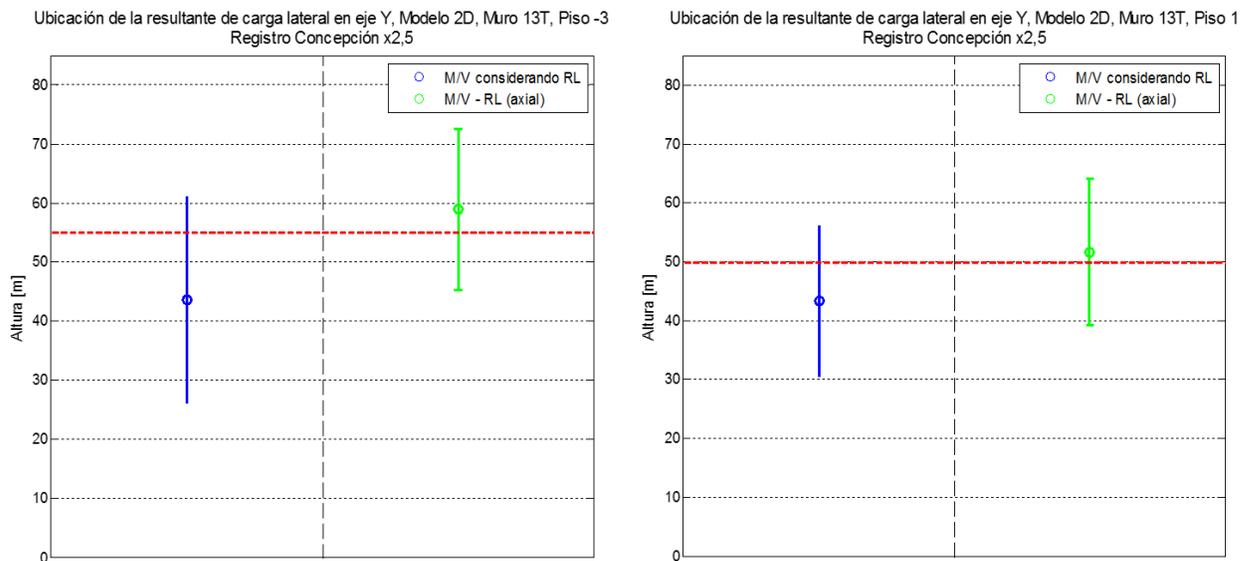


Figura 5.11: Resultante de la carga lateral para el muro 13T en modelo 2D, con respecto al subterráneo -3 y al piso 1. Registro de Concepción x2,5.

Al comparar con los resultados del registro amplificado por 3,5 que se muestran en la Figura 5.12, se observa nuevamente que al aumentar la sollicitación, baja el promedio de las razones M/V . El incremento no es tan sustancial para el caso del subterráneo -3, donde la media pasa de 43,6 [m] a 42,5 [m]. En el piso 1, en cambio, la altura de la resultante se reduce en un 13% al amplificar el registro por 2,5, y en un 35% al amplificar por 3,5, con respecto al valor esperado de dos tercios de la altura. Cabe mencionar que en este caso, **la resultante de carga lateral vuelve a ubicarse sobre o alrededor de los $2h_w/3$ al descontar el aporte de las cargas axiales** en los refuerzos de losa.

Por otra parte, al comparar los resultados obtenidos en la Figura 5.11 con los del modelo 3D, se puede ver que el gráfico con respecto al subterráneo -3 muestra valores muy similares a los que se tienen para el modelo tridimensional (círculo azul, en la Figura 4.23). El caso del análisis con respecto al piso 1, sin embargo, es diferente. El modelo tridimensional muestra una baja significativa de la posición de la resultante para el sismo amplificado por 1,5, ubicándose

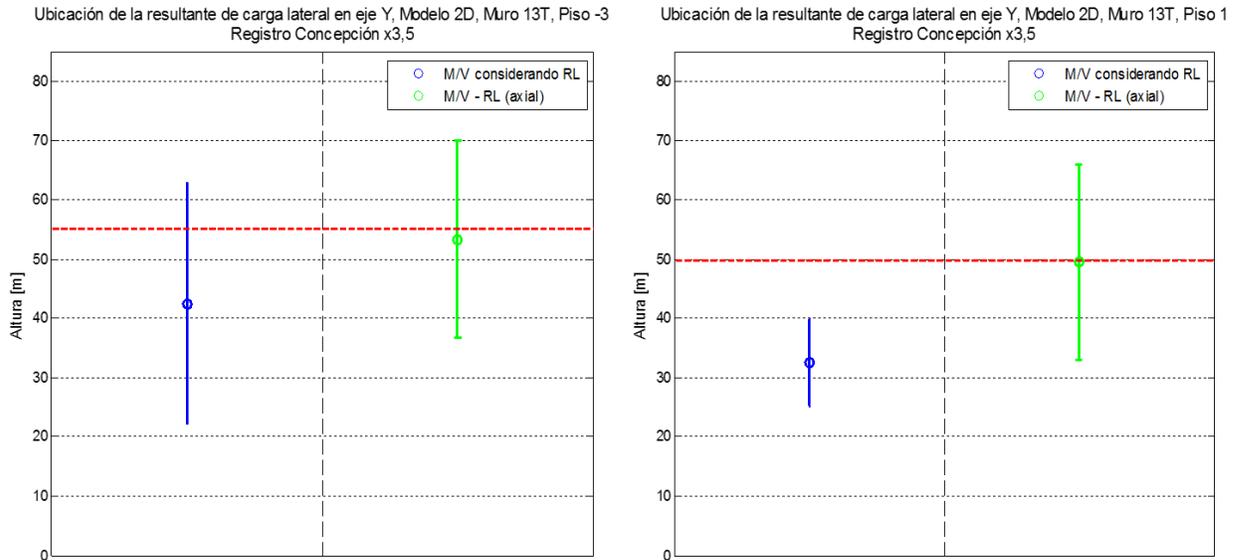


Figura 5.12: Resultante de la carga lateral para el muro 13T en modelo 2D, con respecto al subterráneo -3 y al piso 1. Registro de Concepción x3,5.

alrededor de los 30 metros de altura. Por otra parte y aún con un sismo mayor, en el modelo 2D la resultante aparece sobre los 40 metros. Dicha diferencia puede deberse en parte al hecho de que en el modelo 2D no se tienen las cargas por corte, específicamente las del refuerzo de losa RL1. En el modelo 3D, la posición de la resultante sube en un 12% con respecto a ese piso al descontar el efecto del corte, lo que podría explicar parcialmente el hecho de que en el caso bidimensional la resultante se ubique más arriba.

Para estudiar si ha aumentado el nivel de acoplamiento se recurre nuevamente a un análisis cualitativo de la razón h_0/h_w , por lo que se grafica para algunos de los instantes utilizados en el análisis, el diagrama de momento en la altura y el valor de M/V correspondiente. En las Figuras 5.13 y 5.14 se puede observar cómo al amplificar el registro de aceleraciones los diagramas de momento comienzan a cruzar la línea punteada negra que marca el cambio de signo, lo que indica un acoplamiento mayor. Consistentemente, la posición de la resultante de carga lateral también se ubica más abajo en la altura del muro.

Ahora bien, es posible que este efecto de baja en la resultante se deba no solo al aumento del nivel de acoplamiento, sino que también a la mayor relevancia de los modos superiores al aumentar la demanda sísmica. Para estudiar este efecto, se compara para los diferentes niveles de amplificación, el promedio de los valores M/V en la base del muro 13T con los que se obtienen en la base de la estructura completa (y que deberían indicar donde se ubica la resultante para el edificio completo). Las Figuras 5.15 y 5.16 muestran estos valores para el tercer subterráneo y para el primer piso respectivamente.

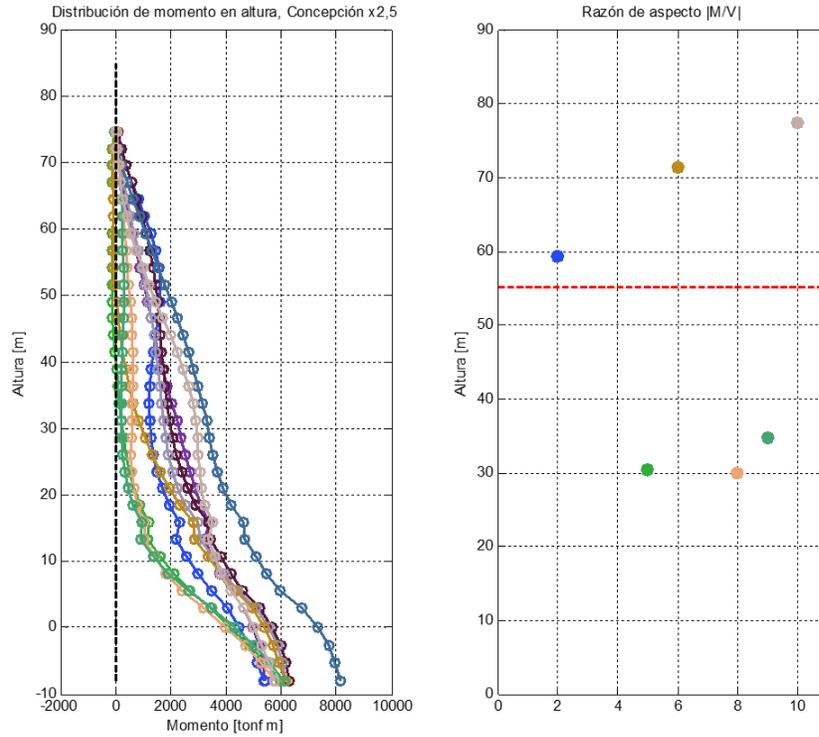


Figura 5.13: Distribución de momento en la altura, para algunos de los instantes utilizados en el análisis. Modelo 2D, registro de Concepción x2,5.

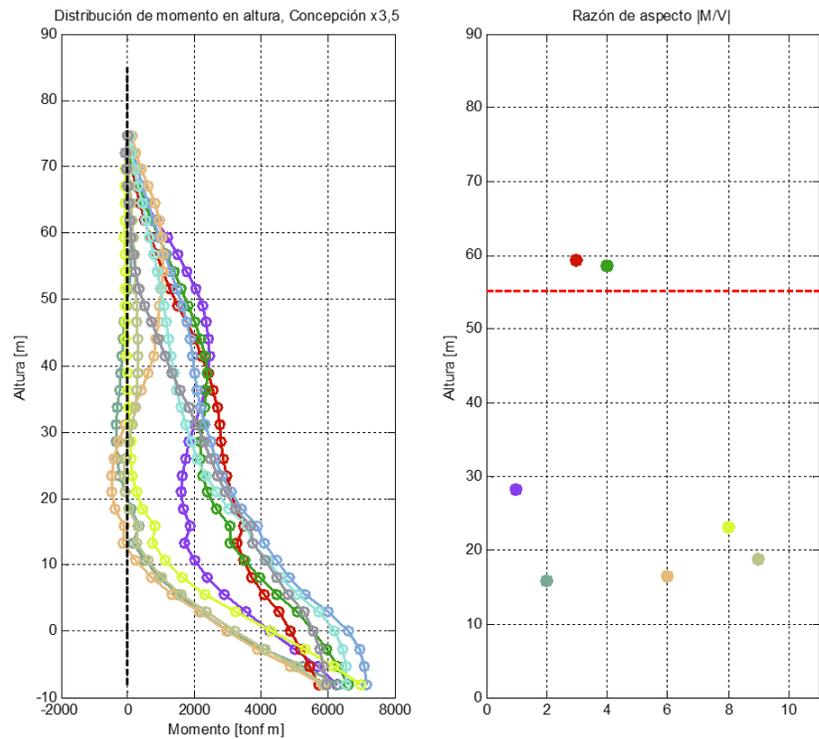


Figura 5.14: Distribución de momento en la altura, para algunos de los instantes utilizados en el análisis. Modelo 2D, registro de Concepción x3,5.

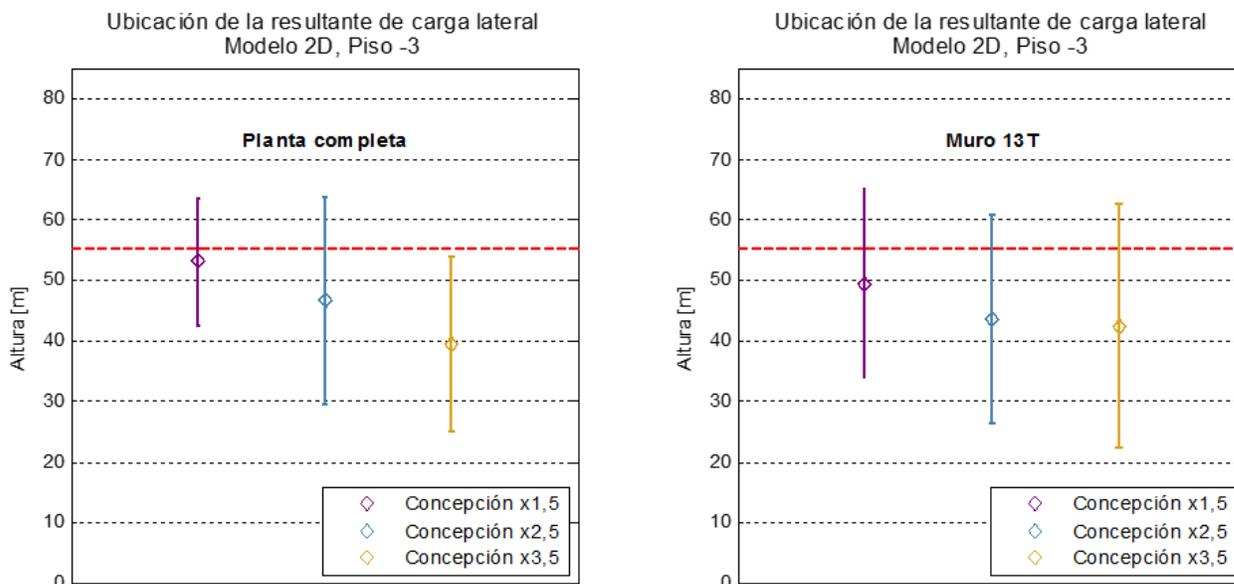


Figura 5.15: Resultante de la carga lateral para la planta completa y el muro 13T en modelo 2D, con respecto al subterráneo -3.

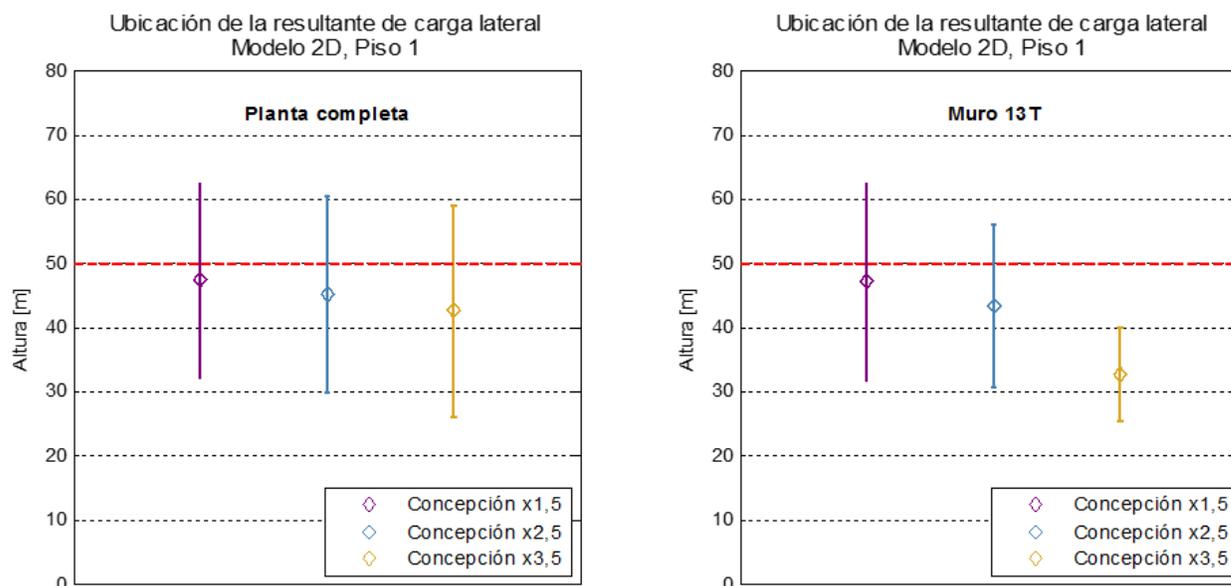


Figura 5.16: Resultante de la carga lateral para la planta completa y el muro 13T en modelo 2D, con respecto al piso 1.

Como se puede observar, los valores de M/V de la planta completa también disminuyen al aumentar el nivel de amplificación, indicando que el edificio también se tiende a alejar del comportamiento como cantiléver. El análisis difiere levemente dependiendo del piso de referencia: con respecto al subterráneo -3, se puede observar que el muro 13T y la estructura completa tienen un comportamiento similar. Con respecto al piso 1, en cambio, la posición de la resultante no varía demasiado para la estructura completa, mientras que sí se ve una reducción importante para el muro 13T, en particular al amplificar el registro por 3,5. Al

complementar esto con lo mostrado con los gráficos anteriores sobre los diagramas de momento del muro, se puede presumir que la baja de la posición de la resultante viene de un efecto combinado de modos superiores con el aumento del nivel de acople del sistema.

A modo de continuar con el análisis de los efectos de amplificar el registro de aceleraciones, en la Figura 5.17 se muestran los resultados obtenidos para el muro 13T en el modelo tridimensional, bajo el registro de Concepción amplificado por 1,5 y por 2,5 (el modelo 3D presentó problemas de convergencia con el registro amplificado por 3,5, por lo que dichos resultados no se encuentran disponibles).

Se puede observar que en el caso del modelo 3D, el principal efecto de amplificar el registro sísmico vuelve a ser la baja de la posición de la resultante de carga lateral que se obtiene directamente del modelo. Con el subterráneo -3 como referencia, el promedio de M/V se reduce con respecto al valor de $2h_w/3$ en un 15 % al amplificar por 1,5 y en un 28 % al hacerlo por 2,5. De la misma manera, con respecto al piso 1 la reducción es de un 39 % y de un 47 %, respectivamente.

En cuanto al aporte de las cargas axiales y de corte a los esfuerzos en la base del muro, en los cuatro casos presentados se repite la misma tendencia: **el aporte de las fuerzas axiales parece ser más incidente que el de las cargas por corte**. Al descontar estas últimas, se reporta un aumento entre un 3 % y un 12 % de la altura de la resultante de carga lateral, mientras que al descontar el efecto de las fuerzas axiales, este aumento va entre un 20 % y un 43 %.

Al descontar ambos efectos (círculo rojo en los gráficos), la posición de la resultante de carga lateral sube significativamente, ubicándose cerca de los dos tercios de la altura del muro. Se puede ver además que esta posición es ligeramente más baja para el sismo amplificado por 2,5 que para el caso por 1,5 (particularmente con respecto al subterráneo -3). Esta disminución puede deberse a la mayor participación de modos superiores para el registro amplificado, que bajan la resultante en la estructura completa.

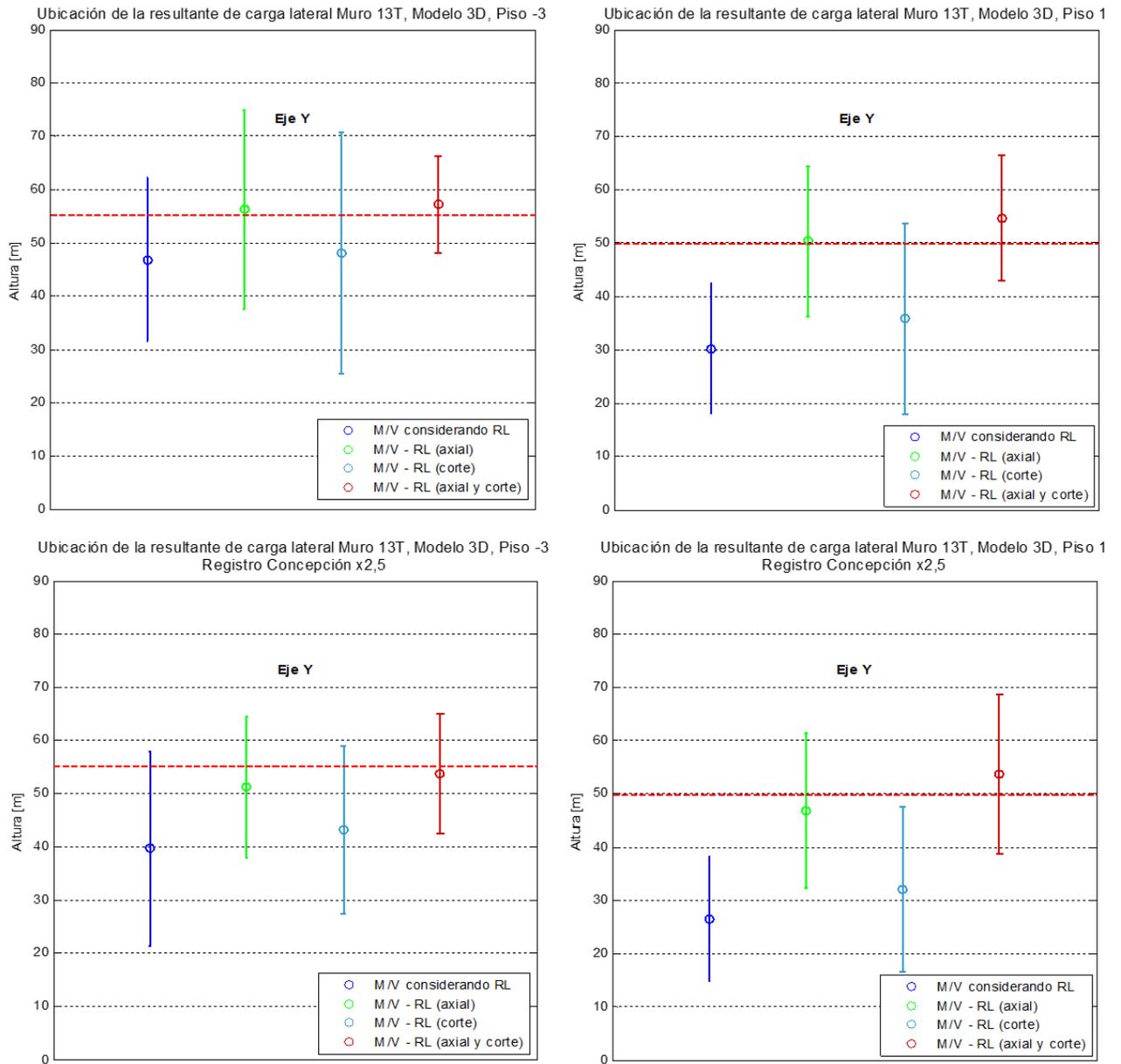


Figura 5.17: Resultante de la carga lateral para el muro 13T en modelo 3D, con respecto al subterráneo -3 y al piso 1. Registro de Concepción x1,5 y x2,5.

5.5. Estudio de comportamiento post-fluencia

5.5.1. Cálculo de límites elásticos

Dado que el modelo bidimensional permite analizar el comportamiento de un sistema de muros para registros amplificadas con una velocidad de cómputo razonable, se decide realizar un estudio del comportamiento del muro una vez se produce la fluencia de éste. Para asegurar deformaciones unitarias importantes, se utiliza **el registro de aceleraciones de concepción amplificado por 5**.

Se calcula, en primer lugar, los límites elásticos en curvatura ϕ_y y desplazamiento δ_y utilizando las expresiones 2.5 y 2.6 propuestas por Massone y Alfaro (2016), para compararlos con los que se observan del análisis.

Se considera que el sistema estructural está conformado por dos muros, el 13T en la parte inferior y una serie de muros que conforman el “muro cajón” de la parte superior de la planta, como se ve en la Figura 5.18. Como se mencionó en el Capítulo 2, las expresiones presentadas para los límites elásticos dependen de dos coeficientes, α y K , los cuales deben ser calculados (o estimados). **Para α , su valor se consideró 0,22**, que según el trabajo de los autores, es un valor conservativo para diferentes configuraciones.

En el caso del coeficiente K , se utilizó para el muro 13T la expresión 2.7, una vez que se comprobó que la primera fluencia se da con el ala en compresión. Con una cuantía de borde ρ_b de 4,5% y un nivel de carga axial del 20% (obtenido del modelo), se obtuvo **$K = 1,7$** .

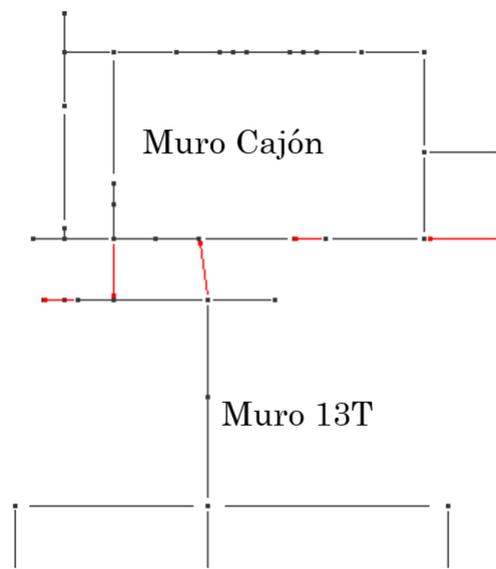


Figura 5.18: Planta del modelo bidimensional con los dos muros que forman el sistema estructural.

Para el muro cajón, dada su geometría más compleja, se utilizó **$K = 1,4$** . Este valor se obtuvo estimando la posición del eje neutro c en el centro del cajón con los datos de

deformación unitaria del modelo en el instante de la fluencia, usando la relación:

$$K = \frac{l_w}{c}$$

De esta manera, se cuenta con las siguientes propiedades geométricas¹ y coeficientes para el cálculo de los límites elásticos de ambos muros:

Tabla 5.2: Parámetros para el cálculo de los límites elásticos

Parámetro	Muro 13T	Muro Cajón
Altura h_w [mm]	85690	85690
Largo l_w [mm]	5140	5650
Def. de fluencia ε_y	0,0021	0,0021
Coefficiente α	0,22	0,22
Coefficiente K	1,7	1,4

Luego, se identifican de los resultados del análisis los límites elásticos. Para esto, se sigue el siguiente procedimiento para cada muro: se grafica la deformación unitaria en el tiempo para cada uno de los primeros 12 niveles, y se observa que el primer nivel en superar la deformación de fluencia es el subterráneo -3 en ambos casos. Habiendo identificado el instante del registro en que se produce la fluencia, se busca para ese tiempo el desplazamiento de techo del muro respectivo y se obtiene el valor de δ_y . Para el mismo instante, se recogen las deformaciones unitarias en la base de cada muro y se calcula mediante geometría la curvatura ϕ_y . Este último paso se hace para el cajón estimando la curvatura que tiene el muro en una línea paralela al alma del muro 13T (a partir de las deformaciones de las cuatro esquinas del cajón), de modo que los valores sean comparables a las curvaturas de un sistema acoplado.

Así, se obtienen los siguientes valores:

Tabla 5.3: Valores de los límites elásticos calculados y obtenidos del modelo en Perform-3D.

Muro	Muro 13T		Muro Cajón	
	Calculado	Obtenido de P3D	Calculado	Obtenido de P3D
δ_y [mm]	1021	1289	924	860
ϕ_y [rad/m]	0,000632	0,000629	0,000572	0,000583

Como se puede observar de la Tabla 5.3, las expresiones de Massone y Alfaro (2016) para el cálculo de los límites elásticos dan resultados razonables. En el caso de la curvatura los valores son prácticamente idénticos a los obtenidos del análisis en Perform-3D (las diferencias no superan el 2%). En el caso del desplazamiento se observa una mayor diferencia, en particular para el muro 13T, donde el valor calculado analíticamente es un 20% menor al que se observa en el modelo computacional.

¹El análisis se hace tomando como base de los muros el piso -3, por lo que la altura de los muros considera los subterráneos. Esto se decide tras verificar que la primera fluencia ocurre en este piso para ambos muros.

Este valor en particular llama la atención: si el sistema estuviera fuertemente acoplado y el muro cajón fluye antes, es de esperar que arrastre al muro 13T para que fluya con un desplazamiento de techo **menor al esperado**. Se observa, sin embargo, que fluye **para un valor mayor**. Esto apunta a un bajo nivel de acoplamiento del sistema, que puede deberse a que el largo de ambos muros es comparable (difieren en menos de un 10 %).

5.5.2. Análisis de esfuerzos y deformaciones post-fluencia

En los instantes posteriores a la fluencia del muro 13T (vale decir, en el mismo ciclo), el techo del muro alcanza un desplazamiento máximo de $\delta_u = 1,74$ [m]. De este modo, en este ciclo se pueden identificar 3 instantes de interés: la fluencia del muro cajón, la fluencia del muro 13T, y el desplazamiento de techo máximo. Estos tres puntos se pueden observar alrededor de los 24 segundos del registro en el segundo gráfico de la Figura 5.19, que muestra un acercamiento en la zona de interés de la respuesta en desplazamiento del techo del muro 13T. Los demás puntos destacados en este gráfico se discuten con posterioridad.

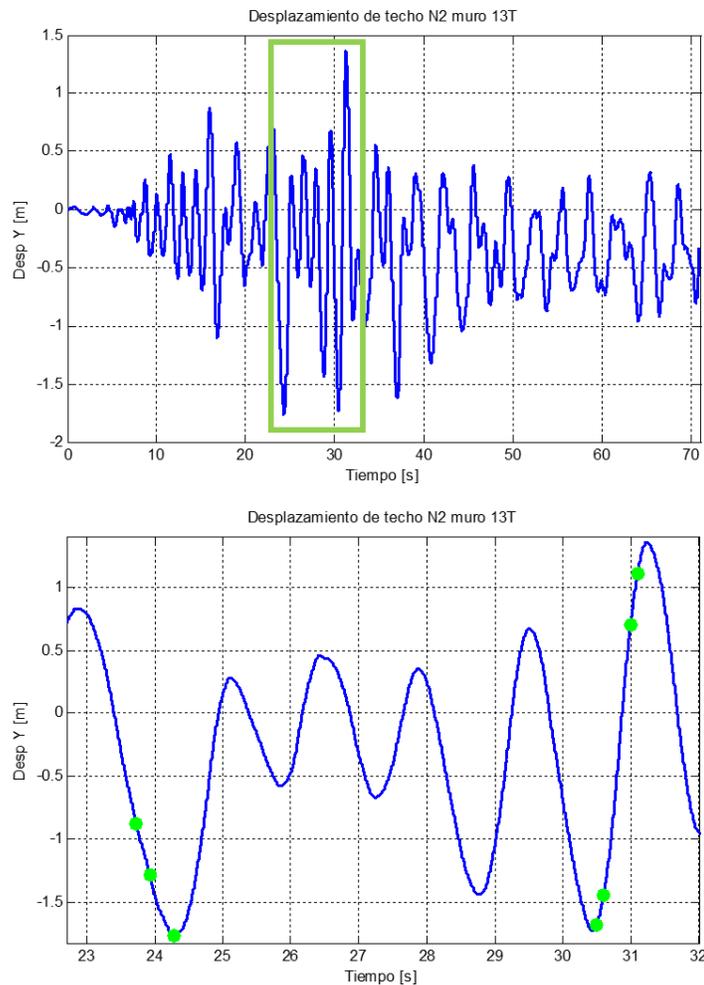


Figura 5.19: Desplazamiento de techo para el nodo 2 del muro 13T (arriba), instantes de tiempo relevantes para el análisis en verde (abajo). Registro de Concepción x5.

Para estos tres instantes mencionados, se obtienen los diagramas de momento y corte así como el valor de M/V asociado a cada uno, con respecto al piso -3. Esto se puede ver en la Figura 5.20, donde además en el gráfico de la izquierda se incluye la capacidad estimada a flexión (línea punteada azul). Esta fue calculada considerando los datos disponibles en el Anexo, sobre las dimensiones y la enfierradura del muro 13T en la altura.

En primer lugar, se puede observar que para estos instantes no se tiene un cambio de signo en los diagramas de momento, lo que se condice con un nivel de acoplamiento bajo, tal como se mencionó anteriormente. En esa misma línea, en el instante que fluye el cajón (color rojo oscuro), la razón M/V se ubica cerca de los dos tercios de la altura del muro (línea roja punteada), y el corte, si bien cambia de signo, se asemeja a una distribución triangular.

Sin embargo, un instante después de fluir el muro cajón en la base, el corte cambia de signo bruscamente, y aumenta conforme sigue aumentando el desplazamiento de techo (diagramas verde y celeste). Al ver este comportamiento, cabe mencionar que el valor de M/V para el instante de tiempo en que fluye el muro T puede resultar engañoso: si bien se ubica por encima de $2h_w/3$, el cambio de signo en el diagrama de corte puede indicar que la resultante de carga lateral se ubica más abajo. Posterior a la fluencia, el corte sigue aumentando, fenómeno que se conoce como amplificación dinámica de corte. Esto tiene como consecuencia una baja en la razón M/V , lo que se observa en el gráfico de la derecha.

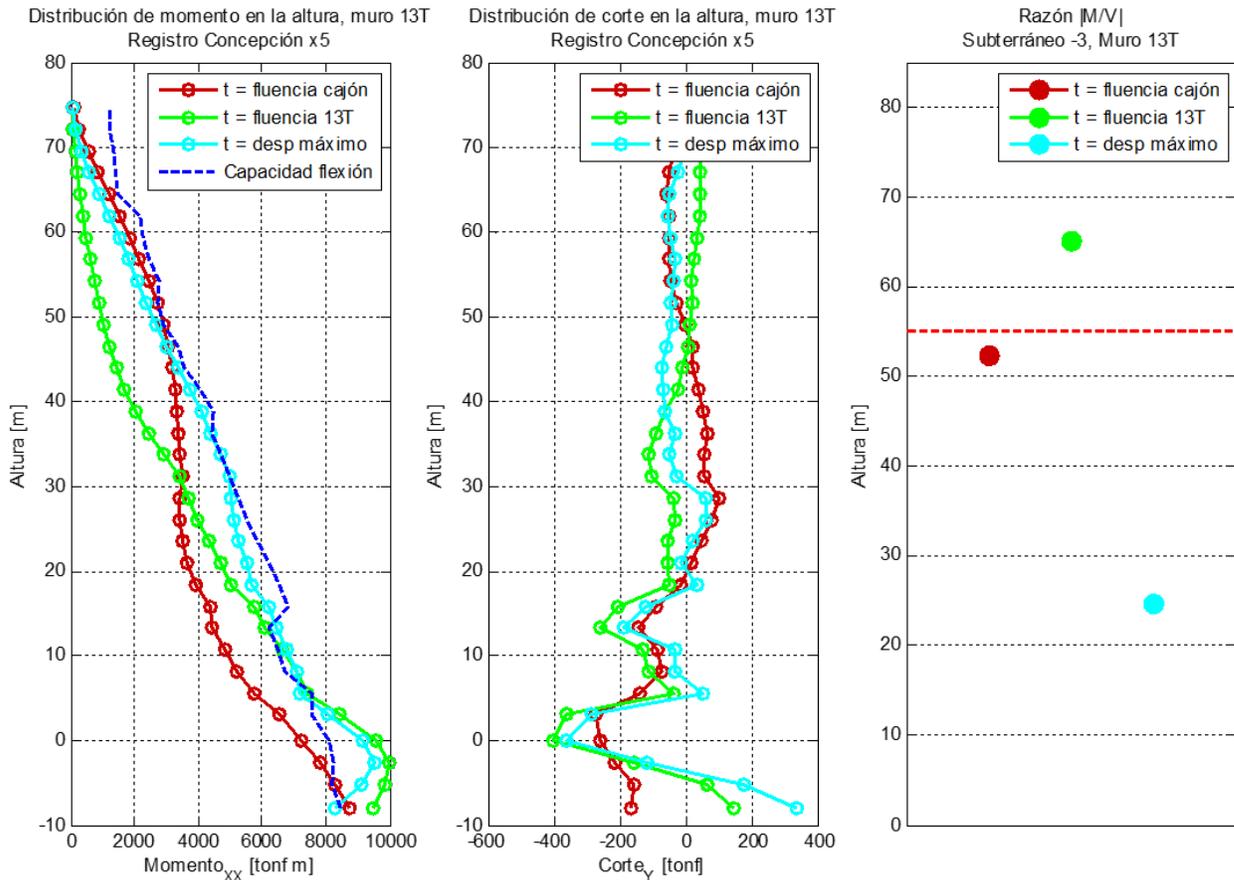


Figura 5.20: Distribución de momento y corte en la altura del muro 13T para los instantes de interés, así como las razones M/V respectivas. Registro de Concepción x5.

En resumen, hasta antes de la fluencia del muro 13T la posición de la resultante se ubica cerca de los dos tercios de la altura del muro, indicando un nivel bajo de acoplamiento y un comportamiento semejante al cantiléver. Una vez que comienza a fluir el muro, sin embargo, la posición de la resultante baja, debido al cambio de signo y aumento del corte.

En la Figura 5.21 se observa, para los tres instantes de interés estudiados, la distribución de deformaciones unitarias en altura. En los gráficos, los nodos 2, 3 y 4 pertenecen al ala del muro 13T, mientras que el nodo 1 se ubica en la esquina del alma (como se muestra en la Figura 5.4). Se puede ver con claridad como cambia la distribución de deformaciones en los pisos superiores luego de la fluencia del cajón, y cómo éstas se comienzan a concentrar en los pisos del subterráneo, que son los primeros en fluir. Las deformaciones inelásticas que se observan para el instante del desplazamiento máximo se concentran también en esos pisos, formando una rótula plástica en la base.

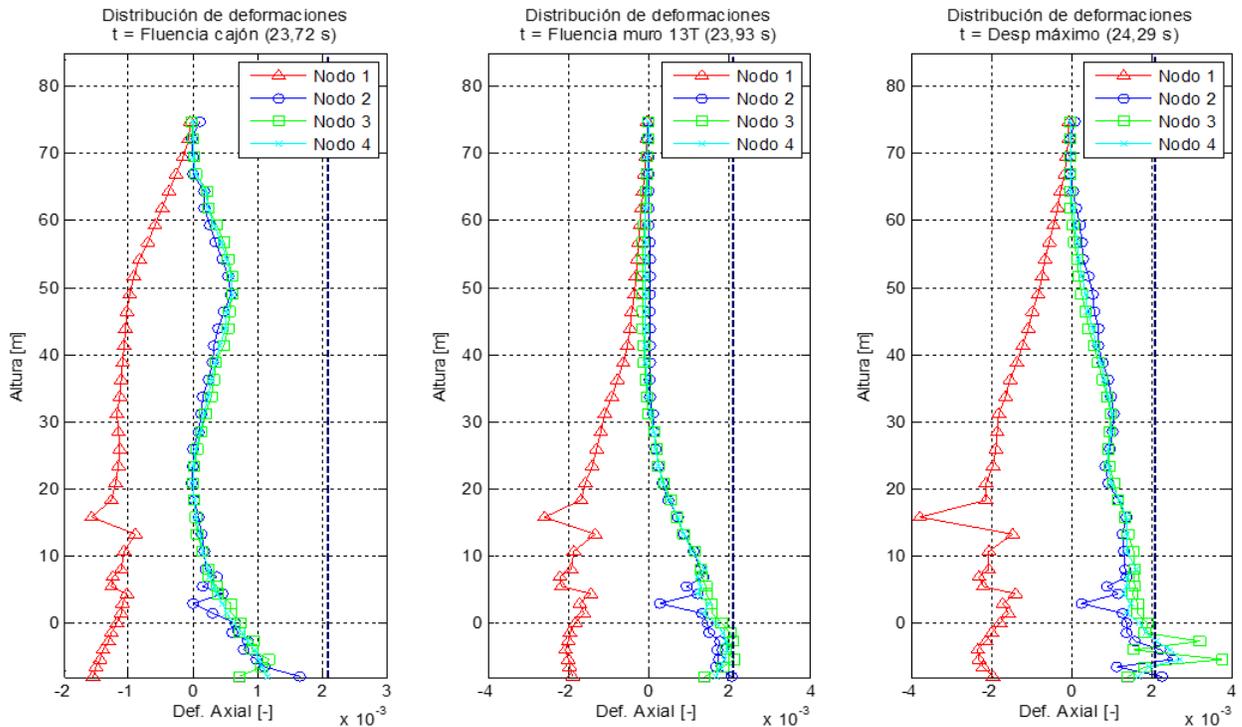


Figura 5.21: Distribución de deformaciones en altura del muro 13T para los instantes de interés. Registro de Concepción x5.

Para estudiar cómo se deforma el edificio una vez fluyó la armadura en los pisos inferiores, es que se analizan puntos de interés posteriores en el registro. Estos se muestran en la Figura 5.19 con círculos verdes: dos instantes cerca de los 30,5 [s], en el siguiente *peak* de desplazamiento en el sentido negativo del eje Y (nuevamente ala del muro 13T en tracción), y dos instantes alrededor de los 31 [s], cuando se produce el *peak* de desplazamiento de techo en el sentido contrario (por lo tanto, con el alma del muro traccionada). La deformación en estos instantes se observa en las Figuras 5.22 y 5.23 respectivamente.

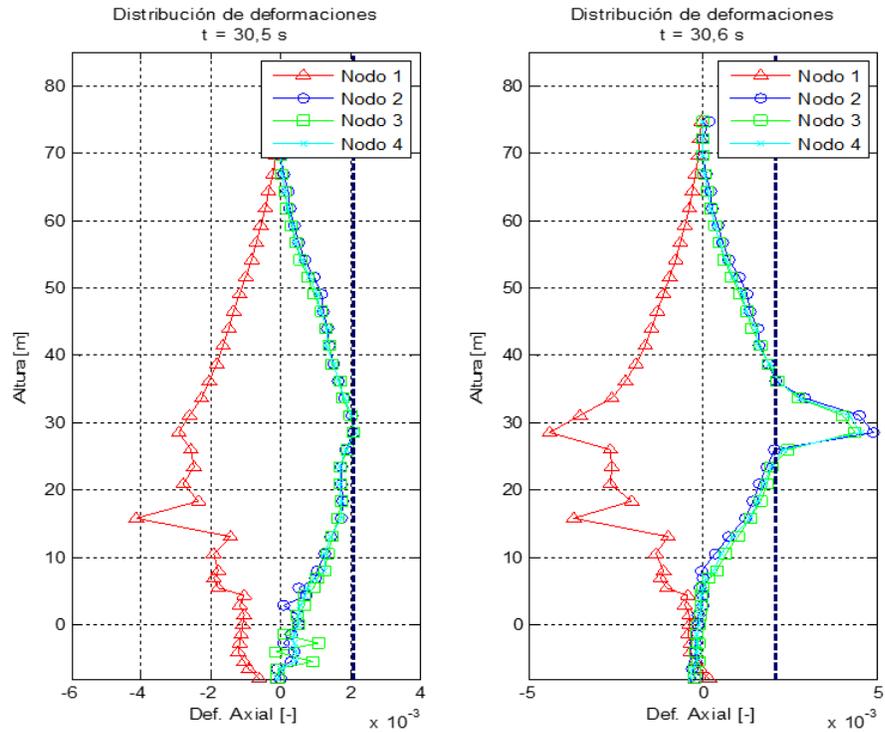


Figura 5.22: Distribución de deformaciones en altura del muro 13T para instantes posteriores ($t = 30,5$ [s]). Registro de Concepción x5.

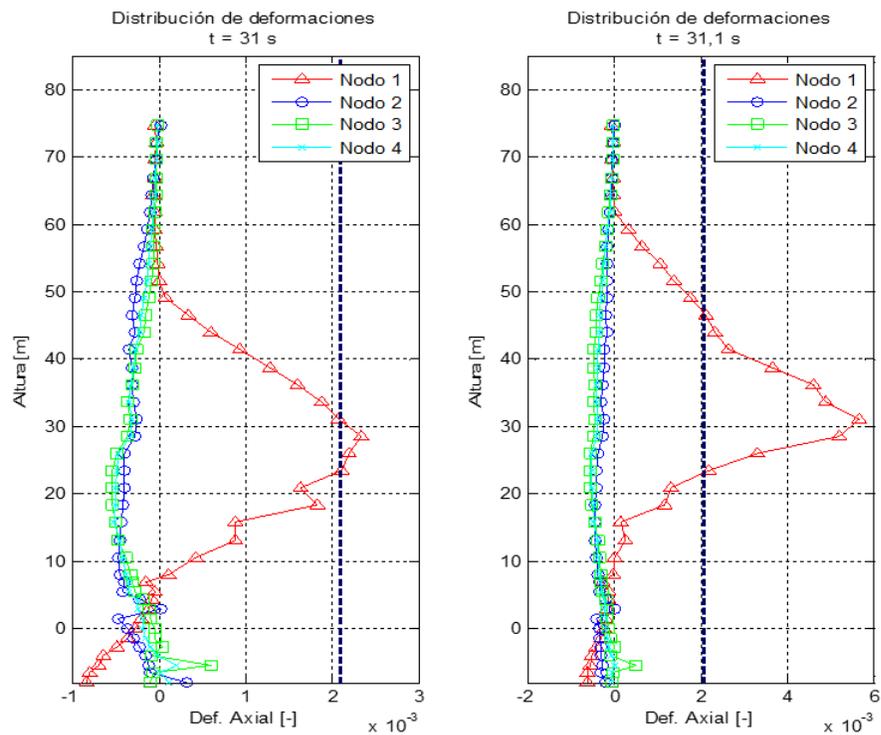


Figura 5.23: Distribución de deformaciones en altura del muro 13T para instantes posteriores ($t = 31$ [s]). Registro de Concepción x5.

Como se puede observar, posterior a la fluencia de la base del muro y para un desplazamiento de techo comparable al que hizo fluir el muro en primera instancia, se comienzan a concentrar deformaciones inelásticas en la parte central de la estructura. A los 30,5 segundos del registro, los niveles 13, 14 y 15 del edificio fluyen, formando lo que podría ser una rótula plástica a media altura. En esa misma zona, el alma del muro alcanza deformaciones en compresión que llegan al 0,005, por lo que se observaría desprendimiento del recubrimiento del hormigón (que ocurre sobre el 0,003 de deformación a compresión).

Instantes después, a los 31 segundos del registro, los papeles se invierten. El ala se encuentra en compresión (pero lógicamente al tener una gran área en compresión, no sufre deformaciones significativas), mientras que el alma del muro T se tracciona en pisos superiores. Llama la atención la gran porción del edificio que estaría en fluencia, cerca de 20 metros, lo que no se condice con los largos de rótula plástica que se acostumbran a ver (del orden de l_w), pero que puede corresponder a un caso particular de este muro para el registro amplificado que se utilizó.

Casos como este no han sido ampliamente observados, pero los resultados indican que son un escenario posible, y que se debería tener en consideración. De todas formas esto se observa para sismos considerablemente mayores al de diseño, lo que igualmente debe sopesarse al tomar una decisión de diseño.

Esta concentración de deformaciones a media altura del muro puede tener varias causas asociadas, tanto de modelación como de diseño. Una posibilidad es que la capacidad a flexión de los pisos superiores esté “justa” para sismos de diseño y por lo tanto, para aceleraciones extremadamente grandes esa capacidad se vea superada, formando rótulas donde no deberían aparecer.

Una forma de estudiar en mayor profundidad este fenómeno sería mediante un estudio paramétrico del modelo bidimensional, donde se altere, por ejemplo, la cantidad de armadura a flexión, de modo de ver cómo se ven afectados los gráficos anteriores. Otro parámetro a modificar (relacionado con lo comentado en la subsección precedente) puede ser el largo del muro 13T, de modo que no sea comparable al del muro cajón, y ver si de esta manera se observa un mayor nivel de acoplamiento.

Capítulo 6

Comentarios y conclusiones

El presente trabajo tiene como principal objetivo el desarrollo de un modelo tridimensional de un edificio de muros de hormigón armado, que permita representar su comportamiento no lineal cuando es sometido a registros sísmicos de alta magnitud. El edificio de estudio, ubicado en la ciudad de Iquique al norte de Chile, cuenta con 83 metros de altura sobre la cota de terreno. Fue instrumentado con acelerómetros, lo que permite calibrar los modelos en base a propiedades instrumentales obtenidas de la estructura real.

A lo largo del trabajo se utilizan cuatro modelos, todos desarrollados en el software Perform-3D de la compañía CSI. En general, tienen una buena correlación con las propiedades obtenidas a través de la instrumentación (el error de periodo para el modo fundamental no supera el 4%), por lo que se estima que su comportamiento dinámico global es un buen reflejo del edificio de estudio.

A continuación, se resumen las conclusiones más importantes que se pueden extraer de los análisis realizados. Sobre el caso tridimensional:

- El modelo original consideraba secciones de fibras hasta el piso 3. Al refinar el modelo y utilizar fibras en toda la altura, desaparecen los valores anómalos que se observaban en la interfaz, reafirmando la presencia de condiciones de borde ficticias cuando solo una porción considera no linealidad.
- Parámetros como la deformación axial se ven fuertemente afectados al aumentar la no linealidad a toda la altura, con diferencias de más de un 50%. En las secciones que ya tenían fibras, la deformación se reduce, mientras que en las que antes no tenían, se observa un aumento de deformación.
- Se observa una baja de la relación M/V en la base del muro con respecto al valor esperado de $2h_w/3$, llegando a reducciones de más del 50% de ese valor para algunos muros.
- Al analizar en profundidad uno de los muros en el modelo tridimensional, cerca del 50% de los diagramas de momento en los instantes de interés muestran cambio de signo a una altura h_0 . Esto indica un nivel importante de acoplamiento en el modelo 3D.
- Al estudiar el efecto de las diferentes cargas en las vigas de acople, se observa que las cargas axiales a través de ellas son las más incidentes, mientras que el corte tiene un

efecto medio-bajo y el momento en las rótulas plásticas es prácticamente despreciable. Para los casos estudiados, al descontar el efecto de las cargas axiales se reporta un aumento de un 20 % y 43 % en la posición de la resultante, acercándose al valor esperado de $2h_w/3$.

Sobre el modelo bidimensional y en comparación con el caso 3D:

- El modelo bidimensional presenta diferencias importantes con el 3D en cuanto al comportamiento sísmico de la estructura. La envolvente de deformación axial presenta diferencias de hasta un 50 % con respecto al caso 3D, siendo el nivel de daño mucho menor en el caso bidimensional. Al analizar el movimiento de la sección, se observa una componente tridimensional importante que aumenta las tracciones en el muro (particularmente en el alma), que no se reproduce en el modelo 2D.
- Para el sismo de Concepción x1,5, en el modelo bidimensional la resultante de carga lateral se mantiene cercana a los $2h_w/3$. Se observa además que en general los diagramas de momento no cambian de signo en la altura, consistente con un bajo nivel de acoplamiento.
- Se utilizan posteriormente diferentes niveles de amplificación para el registro de aceleraciones. Se observa que al hacer esto, la razón M/V en la base del muro baja, comportamiento que se da constantemente en todos los casos de estudio. Esta reducción con respecto a los dos tercios de la altura del muro va entre un 20 % y un 50 % para niveles de amplificación altos.
- Al estudiar las posibles causas de lo anterior, se observan dos factores: por un lado, M/V para la estructura completa también baja, indicando mayor incidencia de modos superiores; por otro, los diagramas de momento comienzan a cambiar de signo en la altura, lo que indica mayor nivel de acoplamiento.
- Con el registro amplificado por 5, se utilizan las fórmulas de Massone y Alfaro (2016) para el cálculo de los límites elásticos de los muros en el sistema 2D. Los valores obtenidos coinciden de manera razonable con lo observado del análisis tiempo-historia (las diferencias no superan el 20 %).
- No se observa el efecto de acoplamiento esperado, en que el muro que fluye primero fuerza al otro a fluir para una demanda de desplazamiento de techo menor a la esperada. Se presume que una de las causas es la longitud comparable de ambos muros (los valores de l_w son similares).
- Se estudian casos donde la estructura, ya habiendo fluido en la base, se ve exigida nuevamente con grandes desplazamientos de techo. Se observa que se generan deformaciones inelásticas importantes (del orden de 2 a 2,5 veces la deformación de fluencia) a media altura del edificio, donde tradicionalmente no hay detallamiento de bordes.
- Se presume que una de las causas de lo anterior es la distribución de armadura a flexión en la altura del edificio, donde la capacidad puede estar muy “justa” para ciertos niveles y se ve superada una vez que el edificio ha fluido en la base.

Cabe mencionar que, a pesar de las diferencias que se observan en el comportamiento del muro 13T en los modelos 2D y 3D, el caso bidimensional resulta útil para estudiar el comportamiento de un sistema de muros acotado frente a situaciones hipotéticas (como por ejemplo, el registro de Concepción x5), ya que la menor cantidad de grados de libertad permiten

mayor velocidad de cálculo y sin problemas de convergencia. En esta misma línea, se propone como trabajo futuro un estudio paramétrico del sistema bidimensional, alterando ciertas características del muro de estudio para entender mejor cómo afectan su comportamiento.

Para finalizar, se destaca la gran utilidad de herramientas como la instrumentación de edificios y el análisis no lineal de estructuras, que permiten obtener modelos calibrados y que representen fielmente el comportamiento de una estructura frente a sismos de gran magnitud. Permiten también estudiar ciertos fenómenos complejos como el acoplamiento de muros, lo que no sería posible realizar correctamente bajo análisis lineal.

Bibliografía

- American Concrete Institute (2008). Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318S-08) y comentario. Versión en español y en sistema métrico.
- Beyer, K., Simonini, S., Constantin, R., y Rutenberg, A. (2014). Seismic shear distribution among interconnected cantilever walls of different lengths. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, (43):1423–1441.
- Bohl, A. y Adebar, P. (2011). Plastic hinge lengths in high-rise concrete shear walls. *ACI Structural Journal*, 108(2):148–157.
- Bustos, J. (2016). Modelación tridimensional y estudio numérico del comportamiento sísmico de muros de hormigón armado, en un edificio habitacional en Chile. Memoria para optar al título de ingeniero civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Computers and Structures Inc. (2006). *PERFORM: COMPONENTS AND ELEMENTS. For Perform-3D and Perform-Collapse*. Berkeley, CA, 4ta edición.
- Instituto Nacional de Normalización (1996). Nch433.Of1996 Diseño sísmico de edificios. Modificada en 2009.
- Instituto Nacional de Normalización (2008). Nch430.Of2008 Hormigón armado - Requisitos de diseño y cálculo.
- Jünemann, R., de la Llera, J. C. Hube, M., Vázquez, J., y Chacón, M. (2016). Inelastic finite element models to assess earthquake damage of RC Wall buildings. En *New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference*.
- Kozmidis, A., Melek, M., Massone, L., y Orakcal, K. (2014). Comparison of Industry-Standard Nonlinear Dynamic Analysis Methods With Observed Damage on a Rc Building. *Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, pp. 1–11.
- Lemnitzer, A., Massone, L. M., Skolnik, D. A., de la Llera Martin, J. C., y Wallace, J. W. (2014). Aftershock response of RC buildings in Santiago, Chile, succeeding the magnitude 8.8 Maule earthquake. *Engineering Structures*, 76:324–338.
- Massone, L. M. y Alfaro, J. I. (2016). Displacement and curvature estimation for the design of reinforced concrete slender walls. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 25(16):823–841.

- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2011). Decreto 60. Aprueba reglamento que fija diseño sísmico de edificios y deroga decreto N° 117, de 2010. Santiago, 2 de noviembre de 2011.
- Powell, G. (2007). *Detailed Explanation of a Tall Shear Wall Building Using CSI's PERFORM 3D Nonlinear Dynamic Analysis (Additional Notes: Modeling of coupling beams for shear walls)*. Berkeley, CA, 1ra edición.
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., y Kowalsky, M. J. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structures*. IUSS Press, Pavia, Italia, 1ra edición.
- Rutenberg, A. (2004). The seismic shear of ductile cantilever wall systems in multistorey structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33(7):881–896.
- Wallace, J. W., Massone, L. M., Bonelli, P., Dragovich, J., Lagos, R., Lüders, C., y Moehle, J. (2012). Damage and implications for seismic design of RC structural wall buildings. *Earthquake Spectra*, 28(SUPPL.1):281–299.
- Yoshimoto, R., Akira, M., y Keiichi, O. (2005). Damage detection of base-isolated buildings using multi-inputs multi-outputs subspace identification. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34:307–324.

Anexo A

Características del muro de estudio

A continuación se entrega información sobre la geometría y la enfierradura del muro 13T, que se estudia en profundidad en el presente trabajo. Los datos de la tabla A.1 fueron utilizados en la estimación de la capacidad a flexión del muro.

Los largos de las secciones son las siguientes:

- Largo alma l_w
 - S3 a P1: 5670 [mm]
 - P2 a P30: 6370 [mm]
- Largo alma l_f
 - S3 a P1: 4520 [mm]
 - P2 a P30: 5330 [mm]

Tabla A.1: Características geométricas y de enfierradura por piso, para muro 13T

Piso	Espesor ala t_f [mm]	Espesor alma t_w [mm]	Armadura ala A_{s_f} [mm ²]	Cuatía flexión alma ρ_l	Armadura punta alma A_s [mm ²]
S3	250	400	20185	0,0038	15078
S2	250	400	20185	0,0038	15078
S1	250	400	20185	0,0038	15300
P1	250	400	20185	0,0038	15188
P2	250	400	13462	0,0038	6400
P3	200	300	11058	0,005	3801
P4	200	300	8602	0,005	3801
P5	200	300	8602	0,005	2545
P6	200	300	8602	0,005	2545
P7	200	200	8078	0,0075	855
P8	200	200	8078	0,0039	855
P9	200	200	8078	0,0039	855
P10	200	200	8078	0,0025	680
P11	200	200	8078	0,0025	680
P12	200	200	8078	0,0025	680
P13	200	200	8078	0,0025	680
P14	200	200	8078	0,0025	680
P15	200	200	8078	0,0025	680
P16	200	200	8078	0,0025	680
P17	200	200	8078	0,0025	680
P18	200	200	6786	0,0025	680
P19	200	200	6786	0,0025	680
P20	200	200	5860	0,0025	680
P21	200	200	5860	0,0025	680
P22	200	200	5860	0,0025	680
P23	200	200	5860	0,0025	680
P24	200	200	5860	0,0025	680
P25	200	200	5860	0,0025	680
P26	200	200	3385	0,0025	163
P27	200	200	3385	0,0025	163
P28	200	200	3385	0,0025	163
P29	200	200	3385	0,0025	163
P30	200	200	3385	0,0025	163