



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

**ANÁLISIS NO LINEAL DEL SISTEMA DE MUROS RECTANGULARES  
ACOPLADOS FRENTE A CARGAS CÍCLICAS Y DISEÑO DE SU MONTAJE  
EXPERIMENTAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**MATÍAS IGNACIO VALDIVIA AGUAYO**

PROFESOR GUÍA:  
FABIÁN ROJAS BARRALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ  
RICARDO HERRERA MARDONES

Este trabajo ha sido financiado por:  
FONDECYT REGULAR PROYECTO N° 1200709.

SANTIAGO DE CHILE  
2023



RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: MATÍAS IGNACIO VALDIVIA AGUAYO  
FECHA: 2023  
PROF. GUÍA: FABIÁN ROJAS BARRALES

## **ANÁLISIS NO LINEAL DEL SISTEMA DE MUROS RECTANGULARES ACOPLADOS FRENTE A CARGAS CÍCLICAS Y DISEÑO DE SU MONTAJE EXPERIMENTAL**

Chile es un país con una alta sismicidad que ha demostrado gran adaptabilidad y una sólida normativa de diseño que ha permitido a edificaciones típicas resistir grandes terremotos. En particular, una de las estructuraciones utilizadas en edificios de gran altura es la de sistemas de muros de hormigón armado acoplados por losas, la que ha mostrando un comportamiento eficiente ante diversos tipos de carga, las que al recibirlas producen esfuerzos de corte y momento en las losas, siendo resistidos y transmitidos por estas a los demás muros.

Actualmente, existen estudios de análisis lineales que permiten modelar el comportamiento de sistemas estructurales de muros acoplados a losas, pero se ha prestado poca atención al análisis post fluencia de las losas y muros, y los esfuerzos de flexión y corte que se generan y son capaces de resistir, así como en la influencia de la cantidad y ubicación de la armadura necesaria para resistir estas cargas. Debido a esto, en esta memoria se diseña un montaje experimental para el ensayo de muros rectangulares acoplados en Chile, en donde se define un modelo a escala para estudiar el comportamiento de este tipo de estructuras frente a cargas cíclicas mediante un análisis numérico. Para esto se estudian las cuantías típicas de losas y muros rectangulares normalmente utilizados en edificios en Chile, con el fin de escalarlo a una probeta para luego modelarla y sea ensayada a futuro.

Para el análisis numérico de la respuesta esperada, se trabaja con el programa SAFE-Toolbox, el cual corresponde a una plataforma de elementos finitos que permite estimar la respuesta no lineal de un elemento estructural, en este caso muros rectangulares acoplados, ante la aplicación de determinadas cargas. Esto con el fin de validar el montaje experimental y dimensiones de las probetas, armadura, cuantías de borde, entre otras.

Se estudia el comportamiento global y local de los muros en diferentes zonas de interés y el efecto de las losas en la transmisión de cargas con el fin de caracterizar la distribución y concentración de tensiones y deformaciones, concluyendo que el sistema acoplado entrega un mejor comportamiento global mejorando la capacidad de disipación y distribuyendo los esfuerzos internos de tal manera de llegar a niveles de demandas menores para ambos muros en comparación a sus símiles aislados.

Este trabajo se enmarca en el Proyecto FONDECYT REGULAR N° 1200709.



*A mi madre y abuela,  
Esto es gracias a ustedes.*



# Agradecimientos

En este trabajo que da fin a mi etapa universitaria quisiera agradecer a todas las personas que durante todos estos años han estado a mi lado y de quienes he tenido la suerte de recibir su sincera amistad, compañía, ayuda y consejos.

Quisiera comenzar por agradecer a mi mamá y abuela, María y Mami Irma, quienes han sido pilares fundamentales de mi vida en todo momento. Les agradezco infinitamente por la crianza que me brindaron, por todos estos años de apoyo, por el esfuerzo del día a día, la dedicación, regalones y el amor incondicional que me han entregado. Junto a ellas, a mi tata José, por siempre preocuparse de que no nos faltara nada y por las enseñanzas que me dejó antes de partir. Siempre estarás presente en nuestros corazones.

A mi familia, mis tíos, tías, primos y primas, quienes siempre han estado muy presente, apoyándome en cada momento y estando ahí para cuando lo necesitara. Ustedes saben todo el cariño que les tengo. A mis amigos del colegio y de universidad, quienes todos estos años fueron un apoyo constante a lo largo de mi carrera y estadia en Santiago y con quienes he compartido tantas experiencias y buenos momentos, gracias por tanto apañe!

A los Paulinos, en especial a los buenos amigos que hice en mi estadia. Gracias por todo su apoyo y los gratos momentos vividos que, sin duda, siempre recordaré con mucho cariño. Agradecer también a Kira, el cual, desde que llegó, dió alegría y locura nuestros días, y que me acompañó durante tantas noches de trabajo.

A mi profesor guía Fabián Rojas, por brindarme su apoyo, compartir sus conocimientos y por su comprensión en esta última etapa. Su gran ejemplo académico y calidad humana han aportado significativamente en mi persona. Agradezco además a los profesores Leonardo Massone y Ricardo Herrera por aceptar ser parte de la comisión y por la buena disposición frente a cualquier consulta, y a Emilio, por su ayuda, consejos y guía durante el desarrollo de mi memoria.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, independiente del tiempo que compartimos, pasaron por mi vida dejando buenos momentos, risas, enseñanzas y más, y que, de una u otra manera, dejaron su marca para convertirme en la persona que soy hoy. Terminó esta etapa feliz de cuánto he aprendido y avanzado, y listo para enfrentar los nuevos desafíos que vienen por delante.

¡Muchas gracias a todos!



# Tabla de Contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo General . . . . .	2
1.2.2. Objetivos Secundarios . . . . .	2
1.3. Organización . . . . .	2
<b>2. Tipología de Estructuración Típica Chilena y Montajes Experimentales Internacionales</b>	<b>4</b>
2.1. Geometrías y Cuantías Típicas en Chile . . . . .	4
2.1.1. Muros de Sección Rectangular . . . . .	4
2.1.2. Muros de sección T . . . . .	5
2.1.3. Losas . . . . .	5
2.2. Escalamiento a Probetas . . . . .	7
2.2.1. Probetas de Muros Rectangulares . . . . .	7
2.2.2. Probetas de Muros T . . . . .	9
2.3. Revisión de Ensayos Experimentales Internacionales de Muros Acoplados . .	12
2.3.1. Lequesne, R. (2009) - Test of a Coupled Wall with High Performance Fiber Reinforced Concrete Coupling Beams . . . . .	12
2.3.2. Lee, S. (2010) - Static Experiment for the Seismic Performance of a 2 Story RC Shear Wall System . . . . .	16
2.3.3. Turgeon, J. (2011) - The Seismic Performance of Coupled Reinforced Concrete Walls . . . . .	19
2.3.4. McGinnis, M (2013) - Experimental Evaluation of a Multi-Story Post- Tensioned Coupled Shear Wall Structure . . . . .	23
2.3.5. Cheng, M. (2014) - Experimental study of reinforced concrete and hy- brid coupled shear wall systems . . . . .	27
2.3.6. Choi, H. (2016) - Experimental Study on Shear Wall with Slab and Openings . . . . .	30
2.4. Propuesta de Montaje Experimental a Partir del Análisis de Estudios Previos	33
<b>3. Modelación Numérica</b>	<b>35</b>
3.1. Introducción . . . . .	35
3.2. Plataforma SAFE-Toolbox . . . . .	35
3.3. Leyes Constitutivas de los Materiales . . . . .	37
3.3.1. Modelo Constitutivo del Hormigón . . . . .	37
3.3.2. Modelo Constitutivo del Acero . . . . .	42



<b>4. Selección, Escalamiento y Diseño de Muros de Ensayo</b>	<b>45</b>
4.1. Descripción de la Probeta de Ensayo . . . . .	45
4.1.1. Geometría . . . . .	46
4.1.2. Diseño y Detallamiento . . . . .	47
<b>5. Estudios Analíticos</b>	<b>52</b>
5.1. Introducción . . . . .	52
5.2. Geometría y Cuantías . . . . .	52
5.3. Modelamiento . . . . .	55
5.4. Algoritmo de solución y método de convergencia . . . . .	61
5.5. Parámetros de Estudio . . . . .	62
5.5.1. Esfuerzos Transmitidos por las Losas . . . . .	62
5.5.2. Respuesta del Sistema de Muros Acoplados frente a cargas cíclicas . .	63
5.5.3. Grado de Acoplamiento . . . . .	64
5.6. Análisis y Resultados . . . . .	65
5.6.1. Muro Rectangular MR1 Aislado - Caso Base . . . . .	67
5.6.2. Muro Rectangular MR2 Aislado . . . . .	70
5.6.3. Muros Rectangulares Acoplados . . . . .	72
5.6.4. Sistema de Losas . . . . .	84
5.6.5. Perfil de Deformaciones Unitarias Máximas . . . . .	93
5.6.6. Perfil de Curvatura en Altura . . . . .	98
5.6.7. Perfil de Desplazamiento en Altura . . . . .	100
<b>6. Montaje Experimental</b>	<b>103</b>
6.1. Laboratorio de Ensayo . . . . .	103
6.2. Montaje Experimental . . . . .	104
6.2.1. Actuador Hidráulico - Carga Lateral . . . . .	105
6.2.2. Gatos Hidráulicos - Carga Axial . . . . .	106
6.2.3. Marco de Acero - Restricción Lateral . . . . .	107
6.2.4. Celdas de Carga - Cuantificación de Cargas . . . . .	108
6.2.5. Bombas Hidráulicas - Sistema de Control . . . . .	109
<b>7. Conclusiones</b>	<b>111</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>113</b>
<b>Anexos</b>	<b>115</b>
<b>Anexo A. Planos</b>	<b>115</b>
A.1. Planos de Fundación y Vigas de Carga . . . . .	115
<b>Anexo B. Memoria de Cálculo</b>	<b>118</b>
B.1. Verificación de Diseño de la Viga de Transferencia . . . . .	118
B.2. Verificación de Diseño del Pedestal . . . . .	120



# Índice de Tablas

2.1.	Geometría y Cuantía de Muros para Primeros Pisos . . . . .	6
2.2.	Geometría y Cuantía de Muros para Piso Tipo . . . . .	6
2.3.	Geometría y Cuantía de Losas . . . . .	6
2.4.	Resumen de cuantías de refuerzo en la probeta base . . . . .	8
4.1.	Resumen armaduras y cuantías de refuerzo en la probeta . . . . .	49
5.1.	Resumen de cuantías y elementos finitos por sección . . . . .	58
5.2.	Propiedades utilizadas para la modelación del espécimen . . . . .	59



# Índice de Ilustraciones

2.1.	Geometría y Armaduras del Muro Base Sección Rectangular (Díaz, 2016)	9
2.2.	Geometría y Cuantías del Muro Base de Sección T (Silva, 2016)	11
2.3.	Probeta de Ensayo de la Investigación (Lequesne et al., 2009)	13
2.4.	Montaje Experimental de la Investigación (Lequesne et al., 2009)	15
2.5.	Probeta de Ensayo de la Investigación (Lee et al., 2010)	17
2.6.	Montaje Experimental de la Investigación (Lee et al., 2010)	18
2.7.	Probeta de Ensayo de la Investigación (Turgeon, 2011)	20
2.8.	Montaje Experimental de la Investigación (Turgeon, 2011)	21
2.9.	Probeta de Ensayo de la Investigación (McGinnis et al., 2013)	23
2.10.	Montaje Experimental de la Investigación - Prototipo (McGinnis et al., 2013)	25
2.11.	Montaje Experimental de la Investigación In Situ (McGinnis et al., 2013)	26
2.12.	Probeta de Ensayo de la Investigación (Cheng et al., 2015)	28
2.13.	Montaje Experimental de la Investigación (Cheng et al., 2015)	29
2.14.	Probeta de Ensayo de la Investigación (Choi, 2017)	31
2.15.	Montaje Experimental de la Investigación (Choi, 2017)	32
2.16.	Esquema montaje experimental	34
3.1.	Sección membrana por capas (Rojas, 2016)	36
3.2.	Esquema del Elemento Shell	36
3.3.	Distribución de tensiones en la sección de hormigón armado (Peña, 2016)	37
3.4.	Modelo constitutivo para el hormigón a compresión (Rojas, 2016)	38
3.5.	Modelo constitutivo hormigón a tracción (Rojas, 2016)	39
3.6.	Modelo histórico del hormigón (Rojas, 2016)	40
3.7.	Modelo de reducción de la capacidad (Rojas, 2016)	41
3.8.	Modelo constitutivo del acero propuesto por Manegotto-Pinto (Rojas, 2016)	43
4.1.	Geometría general de la probeta de ensayo	47
4.2.	Plano de armaduras de refuerzo de la probeta de ensayo	50
4.3.	Corte de muros y Plano de losas	51
5.1.	Distribución de armaduras en zonas de interés	53
5.2.	Mesh Probeta	56
5.3.	Vista 3D Mesh Probeta	57
5.4.	Nodos de aplicación para cargas axial y lateral	60
5.5.	Drift de carga establecido para el ensayo	61
5.6.	Corte Transferido (Henríquez, 2019)	62
5.7.	Momento Transferido (Henríquez, 2019)	63
5.8.	Esfuerzos en Muros Aislados y Acoplados	64
5.9.	Definición de Franjas a analizar	66
5.10.	Definición de franjas a analizar en losas	67
5.11.	Carga Axial Basal MR1 Aislado vs Desplazamiento	68



5.12.	Corte Basal MR1 Aislado vs Desplazamiento . . . . .	69
5.13.	Comparación de Curvas de Histéresis de muros M0 y MR1 . . . . .	69
5.14.	Momento Basal MR1 Aislado vs Desplazamiento . . . . .	70
5.15.	Corte Basal MR2 Aislado vs Desplazamiento . . . . .	71
5.16.	Momento Basal MR2 Aislado vs Desplazamiento . . . . .	72
5.17.	Carga Axial Basal vs Desplazamiento . . . . .	73
5.18.	Corte Basal vs Desplazamiento . . . . .	74
5.19.	Corte Basal vs Desplazamiento . . . . .	74
5.20.	Momento Basal vs Desplazamiento . . . . .	75
5.21.	Momento Basal vs Desplazamiento . . . . .	76
5.22.	Carga Axial vs Desplazamiento - Franjas 1 y 2 . . . . .	77
5.23.	Corte vs Desplazamiento - Franjas 1 y 2 . . . . .	77
5.24.	Momento vs Desplazamiento - Franja 1 y 2 . . . . .	78
5.25.	Carga Axial vs Desplazamiento - Franjas 3 y 4 . . . . .	79
5.26.	Corte vs Desplazamiento - Franjas 3 y 4 . . . . .	80
5.27.	Momento vs Desplazamiento - Franja 3 y 4 . . . . .	81
5.28.	Carga Axial vs Desplazamiento - Franjas 5 y 6 . . . . .	82
5.29.	Corte vs Desplazamiento - Franjas 5 y 6 . . . . .	83
5.30.	Momento vs Desplazamiento - Franja 5 y 6 . . . . .	84
5.31.	Carga Axial vs Desplazamiento - Franjas 1 y 2 Losa Superior . . . . .	85
5.32.	Carga Axial vs Desplazamiento - Franjas 3 y 4 Losa Superior . . . . .	85
5.33.	Carga Axial vs Desplazamiento - Franjas 1 y 2 Losa Inferior . . . . .	86
5.34.	Carga Axial vs Desplazamiento - Franjas 3 y 4 Losa Inferior . . . . .	86
5.35.	Esfuerzos axiales y deformada del modelo de muros acoplados para drift de 0.3[%] - Factor de Escala Gráfico 70 . . . . .	87
5.36.	Esfuerzos de axiales y deformada del modelo de muros acoplados para drift de 3[%] - Factor de Escala Gráfico 7 . . . . .	87
5.37.	Corte vs Desplazamiento - Franjas 1 y 2 Losa Superior . . . . .	88
5.38.	Corte vs Desplazamiento - Franjas 3 y 4 Losa Superior . . . . .	88
5.39.	Corte vs Desplazamiento - Franjas 1 y 2 Losa Inferior . . . . .	89
5.40.	Corte vs Desplazamiento - Franjas 3 y 4 Losa Inferior . . . . .	90
5.41.	Momento vs Desplazamiento - Franjas 1 y 2 Losa Superior . . . . .	91
5.42.	Momento vs Desplazamiento - Franjas 3 y 4 Losa Superior . . . . .	91
5.43.	Momento vs Desplazamiento - Franjas 1 y 2 Losa Inferior . . . . .	92
5.44.	Momento vs Desplazamiento - Franjas 3 y 4 Losa Inferior . . . . .	92
5.45.	Comparación de deformaciones máximas a tracción entre muro base M0 y MR1 aislado . . . . .	93
5.46.	Comparación de deformaciones unitarias para muro MR1 aislado y acoplado - Borde Izquierdo . . . . .	94
5.47.	Comparación de deformaciones unitarias para muro MR1 aislado y acoplado - Borde Derecho . . . . .	95
5.48.	Comparación de deformaciones unitarias para muro MR2 aislado y acoplado - Borde Izquierdo . . . . .	96
5.49.	Comparación de deformaciones unitarias para muro MR2 aislado y acoplado - Borde Derecho . . . . .	96
5.50.	Comparación de deformaciones unitarias máximas a tracción para muro MR1 aislado y acoplado . . . . .	97



5.51.	Comparación de deformaciones unitarias máximas a tracción para muro MR2 aislado y acoplado . . . . .	97
5.52.	Comparación de perfiles de curvatura en altura M0 y MR1 . . . . .	98
5.53.	Comparación de perfiles de curvatura en altura MR1 . . . . .	99
5.54.	Comparación de perfiles de curvatura en altura MR2 . . . . .	99
5.55.	Comparación de perfiles de desplazamiento en altura MR1 . . . . .	100
5.56.	Perfil de desplazamiento en altura MR2 Acoplado . . . . .	101
5.57.	Modelo Post drift del 3[%] - Factor de Escala Gráfico 20 . . . . .	102
6.1.	Planta general del Laboratorio de Estructuras . . . . .	104
6.2.	Esquema montaje experimental . . . . .	105
6.3.	Actuador hidráulico . . . . .	106
6.4.	Gatos hidráulicos . . . . .	107
6.5.	Sistema de restricción lateral . . . . .	108
6.6.	Celda de Carga . . . . .	109
6.7.	Bombas de Control . . . . .	110
A.1.	Plano Vista en Planta Fundación . . . . .	115
A.2.	Plano Cortes en Fundación . . . . .	116
A.3.	Plano Viga de Transferencia MR1 . . . . .	117
A.4.	Plano Viga de Transferencia MR2 . . . . .	117



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

Chile, al ser un país que se caracteriza por sus grandes terremotos, ha desarrollado un buen desempeño sísmico de estructuras a partir del diseño y construcción de estas en base a sistemas estructurales de muros de hormigón armado. En particular, para los edificios en altura, una de las estructuraciones típicas corresponden a muros rectangulares acoplados por losas o vigas a nivel de piso, las cuales cumplen un rol fundamental en la mayoría de edificios habitacionales del país.

Sin embargo, a pesar de la gran importancia del comportamiento de este tipo de estructuraciones en las edificaciones típicas actuales, la mayoría de las investigaciones existentes sobre muros acoplados con losas se basan en un comportamiento lineal de la estructura, sin considerar lo que sucede luego de la fluencia del acero y el fisuramiento del hormigón. Además de lo anterior, se han desarrollado pocos ensayos de laboratorio de este tipo en el país, considerando el diseño acorde a las demandas sísmicas y características constructivas chilenas.

Surge así la necesidad de realizar un estudio de muros rectangulares acoplados por losas considerando las características típicas de edificación chilena como dimensiones generales de muros y losas, cuantías y distribución de refuerzo y cargas de demanda solicitante con el objetivo de analizar la respuesta de este sistema estructural.

En particular, la presente investigación es parte de una serie de trabajos que dan el primer paso para el estudio del comportamiento de muros acoplados a losas en el rango no lineal en el país. Cabe destacar que este estudio resulta ser muy útil ya que el análisis de este permite dar recomendaciones normativas de este tipo de estructuración una vez hayan sido validados los modelos de elementos finitos con el estudio experimental en el Laboratorio de Estructuras ubicado en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.



## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

Diseño y validación numérica de un montaje experimental de muros rectangulares de hormigón armado acoplados a losas que representen la práctica constructiva chilena actual. Para esto se busca evaluar la respuesta no-lineal y la transmisión de carga de un sistema de muros acoplados mediante losas (considerando como parámetros dimensiones, cuantías de acero y distribución de las barras) para posteriormente diseñar el montaje experimental con el que se validará el modelo a futuro.

### 1.2.2. Objetivos Secundarios

- Estudiar y caracterizar los parámetros representativos (dimensiones, cuantías de refuerzo) de muros rectangulares acoplados típicos en la práctica constructiva chilena actual.
- Definición del escalamiento de las propiedades (dimensiones, armadura, cuantías de borde, entre otras) de muros rectangulares acoplados y losas típicas para el diseño de probetas de hormigón, desarrollando los planos para el montaje experimental.
- Estudiar montajes experimentales internacionales afines con el fin de determinar el montaje idóneo para los objetivos de la presente investigación.
- Modelación de la probeta mediante elementos finitos, utilizando la plataforma SAFE-Toolbox con el fin de estudiar los efectos del acoplamiento de muros rectangulares a losas y validar la probeta definida.
- Definición del montaje experimental definitivo y los elementos necesarios a construir para la implementación del ensayo a futuro en el laboratorio del departamento de ingeniería civil.

## 1.3. Organización

La distribución del presente trabajo se organiza por capítulos, los cuales se presentan a continuación:

### Capítulo I: Introducción

Presentación general de la investigación de este trabajo, la motivación y los objetivos por cumplir. Se explica la metodología a utilizar y los resultados esperados de la presente memoria.



## **Capítulo II: Tipología de Estructuración Típica Chilena**

Revisión bibliográfica de estudios teóricos y experimentales afines al comportamiento de muros acoplados rectangulares de hormigón armado sometidos a cargas cíclicas y pushover. Estudio de las características (dimensiones, cuantías, detallamiento) y comportamiento de muros acoplados en Chile y de montajes experimentales afines a la presente investigación.

## **Capítulo III: Plataforma SAFE-Toolbox**

Estudio de la plataforma SAFE-Toolbox y sus características, y de las propiedades que modelan el comportamiento del acero y hormigón. Se define el tipo y propiedades de los elementos finitos utilizados para el modelo y su posterior el análisis.

## **Capítulo IV: Selección, Escalamiento y Diseño de Muros de Ensayo**

Elección de muros de sección rectangular y losas que sean representativos de la realidad constructiva chilena actual a partir de la revisión de literatura. A partir de esto, se realiza el diseño y definición de las probetas a ensayar (dimensiones de la probeta, armaduras de refuerzo longitudinal y transversal, armaduras de confinamiento y de borde, dimensiones del montaje, etc.) para su ensayo a futuro.

## **Capítulo V: Estudio Analítico de Probetas**

Desarrollo de modelos numéricos de la probeta a través de la plataforma SAFE-Toolbox. Se define la cantidad y distribución de los elementos finitos a utilizar en el modelo y las consideraciones de carga para este. Evaluación de resultados obtenidos en muros y losas a partir de análisis bajo control de desplazamientos.

## **Capítulo VI: Montaje Experimental**

Se define una propuesta del montaje e instrumentación de la probeta y los elementos necesarios a construir para la implementación de ensayos a futuro, según las limitaciones impuestas por el laboratorio.

## **Capítulo VII: Conclusiones**

Se presentan las conclusiones a partir de la discusión de análisis y resultados. Además, se dan recomendaciones para la modelación y diseño de probetas para ensayos a futuro.



## Capítulo 2

# Tipología de Estructuración Típica Chilena y Montajes Experimentales Internacionales

Debido a la alta sismicidad que afecta a las estructuras de nuestro país, es de vital importancia realizar el presente estudio de tal manera de representar verazmente la realidad constructiva actual en edificaciones chilenas. Debido a esto, y con el fin de obtener las características de estructuración típica chilena (dimensiones, cuantías de refuerzo) de muros y losas, se analizan los datos obtenidos por Silva (2016), Chaperon (2018) y Henríquez (2019), los cuales analizaron una serie de planos de edificios de hormigón armado diseñados entre los años 2010 y 2014 con el objetivo de determinar los valores más comunes de las características de muros rectangulares y muros T presentes en este tipo de estructuras.

En particular, si bien este trabajo se enmarca en el análisis de muros rectangulares acoplados, en los muros de sección T las alas de estos son las que típicamente se acoplan a vigas o losas. Es por esto que se investigan las características para ambos tipos de muro y luego se focaliza la información de acuerdo a los objetivos de esta memoria.

## 2.1. Geometrías y Cuantías Típicas en Chile

### 2.1.1. Muros de Sección Rectangular

Las principales características para definir la geometría de los muros son su espesor y largo. A partir del estudio de Henríquez (2019) se determina que los espesores típicos corresponden a valores entre 15[cm] y 30[cm], donde el espesor más usual para este tipo de muros corresponde a 20[cm]. Por otra parte, los largos típicos de este tipo de muros van desde los 150[cm] a los 600[cm], en donde la moda se encuentra en el rango entre 200[cm] y 300[cm].

La armadura distribuida consiste en una doble malla, típicamente de igual valor tanto para la dirección longitudinal como para la transversal, la cual varía de acuerdo a la altura del edificio. Para los primeros pisos corresponde a una cuantía de entre el 0.25[%] y 0.35[%]



mientras que para los pisos tipo es de entre el 0.24[%] y 0.26[%].

La armadura de borde varía de acuerdo a la altura del edificio, disminuyendo a medida que esta última aumenta. Para los primeros pisos esta cuantía corresponde a entre el 2.5[%] y 2.75[%], mientras que para los pisos tipo y superiores el rango en el que típicamente se encuentra esta cuantía es entre el 1[%] y 1.8[%].

### 2.1.2. Muros de sección T

En el estudio realizado por Silva (2016) se observó que una gran parte de los muros de hormigón armado analizados presentaban una geometría intrincada, con singularidades, cambio de dimensiones en sus secciones, entre otras. Debido a esto, el número de muros de sección transversal T apropiados para el análisis se limitó a 20 especímenes, los cuales subdividió en 3 grupos de acuerdo a su geometría. Dentro de estos, con el objetivo de estudiar el efecto del confinamiento, analizó los datos del primer grupo, el cual corresponde al caso en donde el alma dimidia al ala y la longitud de ambas secciones se mantiene constante en toda la altura del muro.

Analizando los datos obtenidos se determinaron los valores más representativos para distintos parámetros de muros de hormigón armado con sección transversal T.

Con respecto al espesor, el valor predominante en este tipo de muros es de 20[cm], tanto para los primeros pisos como para el piso tipo. En menor cantidad se encuentran los muros de espesor 30[cm], los cuales típicamente se encuentran confinados al encontrarse en la zona crítica donde se genera la rótula plástica, y los de espesor 25[cm], los que corresponden a muros de edificios más altos donde existe una mayor demanda de esfuerzos.

A partir de los datos obtenidos por Chaperon (2018) los largos típicos de este tipo de muros están dentro del rango de 500[cm] y 800[cm] para las almas y entre los 350[cm] y 650[cm] para las alas, con una relación de largo promedio de 1.37[cm/cm].

La armadura distribuida consiste a una doble malla, la cual, para el tipo piso, corresponde a 0.25[%]. Además, típicamente la cuantía longitudinal de borde de las almas es la misma que para las alas, la cual corresponde a entre el 1.5[%] y 2[%], y la cuantía correspondiente a la zona de contacto entre ambas secciones está entre el 1[%] y 1.5[%].

### 2.1.3. Losas

Las características principales a definir de las losas corresponden a su espesor, ancho y largo del vano de puerta o pasillo. De acuerdo con los datos obtenidos por Henríquez (2019) y Chaperon (2018), en general para los distintos edificios analizados las dimensiones antes mencionadas se mantienen constantes con la altura de la estructura.



En particular, se determinó que el espesor de losa típicamente corresponde a valores de 15[cm] y 16[cm], donde el primer valor es el más usual. Con relación al ancho de estas, se determinó una moda de entre 150[cm] y 170[cm], mientras que para el largo del vano de puerta o pasillo los valores predominantes se encuentran dentro del rango de los 80[cm] y 100[cm].

Con respecto a la armadura de las losas, se observó que típicamente esta era la misma para todos los pisos, con algunas excepciones de los primeros, en donde existe una mayor concentración de esfuerzos.

La cuantía de armadura distribuida corresponde, para la mayoría de las losas, a entre el 0.18[%] y el 0.2[%] tanto para la dirección longitudinal como para la transversal. Por otro lado, la armadura de refuerzo de losa corresponde, típicamente, a una cuantía de entre el 1.3[%] y el 1.4[%].

A continuación, en las tablas 2.1 2.2 y 2.3 se presenta un resumen con la geometría y cuantías típicas de los diferentes elementos presentes en edificaciones chilenas a partir de la información recopilada previamente.

Tabla 2.1: Geometría y Cuantía de Muros para Primeros Pisos

Primeros Pisos							
Ala				Alma			
Geometría		Cuantías		Geometría		Cuantías	
Espesor [cm]	Largo [cm]	Distribuida [%]	De Borde [%]	Espesor [cm]	Largo [cm]	Distribuida [%]	De Borde [%]
25-30	350-650	0.25-0.35	1.25-4.0	25-30	550-650	0.25-0.35	1.25-4.0

Tabla 2.2: Geometría y Cuantía de Muros para Piso Tipo

Piso Tipo							
Ala				Alma			
Geometría		Cuantías		Geometría		Cuantías	
Espesor [cm]	Largo [cm]	Distribuida [%]	De Borde [%]	Espesor [cm]	Largo [cm]	Distribuida [%]	De Borde [%]
20-25	350-650	0.24-0.28	1.0-1.8	20-25	550-650	0.24-0.28	1.0-1.8

Tabla 2.3: Geometría y Cuantía de Losas

Losas				
Geometría			Cuantías	
Espesor	Ancho	Largo Vano	Armadura Distribuida	Armadura de Refuerzo
15-16 [cm]	140-170 [cm]	80-100 [cm]	0.18-0.2[%]	1.3-1.4[%]



## 2.2. Escalamiento a Probetas

Con el objetivo estudiar el comportamiento real de edificaciones típicas en Chile bajo efectos sísmicos, se realiza una revisión bibliográfica de estudios previos en donde se escalaron las características principales de muros de hormigón armado. Esto con el fin de tener una referencia para el diseño de las probetas a utilizar en este trabajo y posteriormente hacer un análisis numérico y un montaje experimental de estas ante cargas cíclicas.

### 2.2.1. Probetas de Muros Rectangulares

Como referencia principal a las probetas generadas a partir de muros rectangulares de hormigón armado se encuentran los estudios realizados por Manríquez (2016) y Díaz (2016).

Con el objetivo se estudiar las discontinuidades de tipo bandera en este sistema estructural se diseñaron cuatro probetas de hormigón armado. La primera corresponde a un muro rectangular sin discontinuidades, la cual corresponde al caso base, y las otras tres probetas se diseñaron con distinto grado de discontinuidad, con el fin de estudiar el comportamiento de los muros a partir de estas (Díaz, 2016). Por otra parte, G. Muñoz (2017) realizó un estudio de este mismo sistema estructural pero con presencia de discontinuidades de tipo abertura en la base, en donde al igual que para el otro estudio, se diseñaron 4 probetas, donde una de ellas correspondía al caso base sin aberturas.

La principal semejanza de estos estudios, es que como forman parte de un proyecto que abarca diferentes tipos de discontinuidades (Díaz, 2016; Manríquez, 2016; Manríquez, Díaz, Massone, Rojas, y Herrera, 2017; Rivas, 2016; G. Muñoz, Rivas, Massone, Rojas, y Herrera, 2017) se consideró un muro referencial para todos, el cuál fue diseñado a partir de los estándares nacionales y que fue escalado a una probeta, la que sirve de base para todos los estudios similares al no poseer ningún tipo de discontinuidad. Esta probeta de ensayo es la que se detalla a continuación para seguir en la línea de estudios análogos y tener una comparación fidedigna de resultados.

El laboratorio impone un límite de altura máxima de 265 [cm] para el muro base, simulando un muro de 9 pisos. Posee un espesor de 15[cm] y un largo total de 90[cm]. Este se sostiene sobre un pedestal de 140[cm] de largo, 70[cm] de ancho y 40[cm] de alto, el cual se fija a la losa de reacción con barras de anclaje para impedir un deslizamiento frente a las cargas laterales. A parte de ser sometido bajo esta fuerza cíclica, debe resistir el postensado de las barras de anclaje. En sus lados existe una perforación de 20 cm de alto y 20x20cm de superficie. Se encuentran específicamente en la zona donde se aplica la carga axial. La funcionalidad de estas irregularidades es que en ese sector se anclan las barras que transmiten las fuerzas de compresión en el muro (Manríquez, 2016).

En el extremo superior de la probeta se incluye una viga de hormigón necesaria para poder hacer el traspaso de fuerzas de manera distribuida. Las dimensiones de esta son 30[cm] de alto, 40[cm] de ancho y un largo igual al largo del muro, que para el caso base corresponde a



90[cm]. En su interior cuenta con 4 perforaciones por donde se conecta una de las rótulas del actuador. En el sentido perpendicular a la probeta esta posee dos perforaciones adicionales, las que sirven para conectar la viga al sistema de carga axial.

Para el muro base se dispuso una cuantía nominal de refuerzo longitudinal de borde del 5[%] considerando el cabezal del muro igual al 10[%] de su largo. A partir de esto se optó por una armadura  $4\phi 16$ , equivalente a una cuantía del 4[%], la cual se prefirió frente a otras configuraciones con más barras de menor diámetro debido al mayor espaciamiento que proporciona y con el fin de facilitar la construcción. Para el confinamiento de borde se utilizaron estribos  $\phi 6@70[mm]$  en un largo total de un metro, lo cual corresponde a una cuantía del 0.54[%].

Para la armadura distribuida se optó por una doble malla con una cuantía mínima del 0.25[%] tanto en dirección vertical como horizontal, la cual corresponde a una armadura  $\phi 8@200[mm]$  en ambas direcciones. Además, como criterio de diseño se dispuso el doble armadura de corte en la parte superior del muro con el objetivo de evitar daños en la viga de transferencia, que los daños en el muro se centren en la base y poder modelar un techo elástico (Díaz, 2016). El resumen de las armaduras y cuantías utilizadas se presenta en la tabla 2.4 y el diseño de la probeta base mencionada se presenta a continuación en la Figura 2.1.

Tabla 2.4: Resumen de cuantías de refuerzo en la probeta base

Refuerzo	Armadura utilizada	Cuantía $\rho$	Ld (Sin gancho - Con gancho)
Borde	$4\phi 16$	3,57 [%]	640[mm]-325[mm]
Central Vertical	$\phi 8@200[mm]$	0,34 [%]	320[mm]-160[mm]
Central Horizontal	$\phi 8@200[mm]$	0,34 [%]	No aplica
Confinamiento	$\phi 6@70[mm]$	0,54 [%]	No aplica





primer muro ET1 ('Experimental T-Wall') consistía en un muro base sin confinamiento, el segundo ET2 consistía en un muro con la misma geometría que el ET1 con la salvedad de que en esta sí se usó confinamiento de borde. Finalmente el Muro ET3 presentaba una reducción en el largo del alma y tenía una discontinuidad tipo bandera en la base.

Para el propósito de este estudio bastará con analizar la geometría y cuantías de refuerzo del Muro ET2, el cual se tomará como referencial para representar las características de muros de sección transversal T. Este muro posee un largo de ala y alma de 90[cm] y 120 [cm] respectivamente, y un espesor de 12 [cm]. Posee cuantía de borde  $\rho_w = 2.5[\%]$  para el alma utilizando una armadura de  $4\phi 12$ , mientras que para el ala y la intersección de ambas secciones se tiene una cuantía de  $\rho_f = 1.8[\%]$  usando una armadura de  $4\phi 12$ . La armadura de confinamiento corresponde a estribos  $\phi 6$  entre las mallas horizontales a lo largo de toda la altura del muro. Con respecto a la malla vertical y horizontal se utiliza una armadura de  $\phi 6@150[mm]$ , la cual corresponde a una cuantía del  $0.32[\%]$ , a excepción de la zona cerca del coronamiento, donde el espaciamiento disminuye con el fin de transmitir adecuadamente la carga lateral mediante la rigidización de la zona (F. Muñoz, 2018).

Finalmente, se resumen las características geométricas y cuantías de refuerzo para el muro ET2 a continuación en la Figura 2.2.

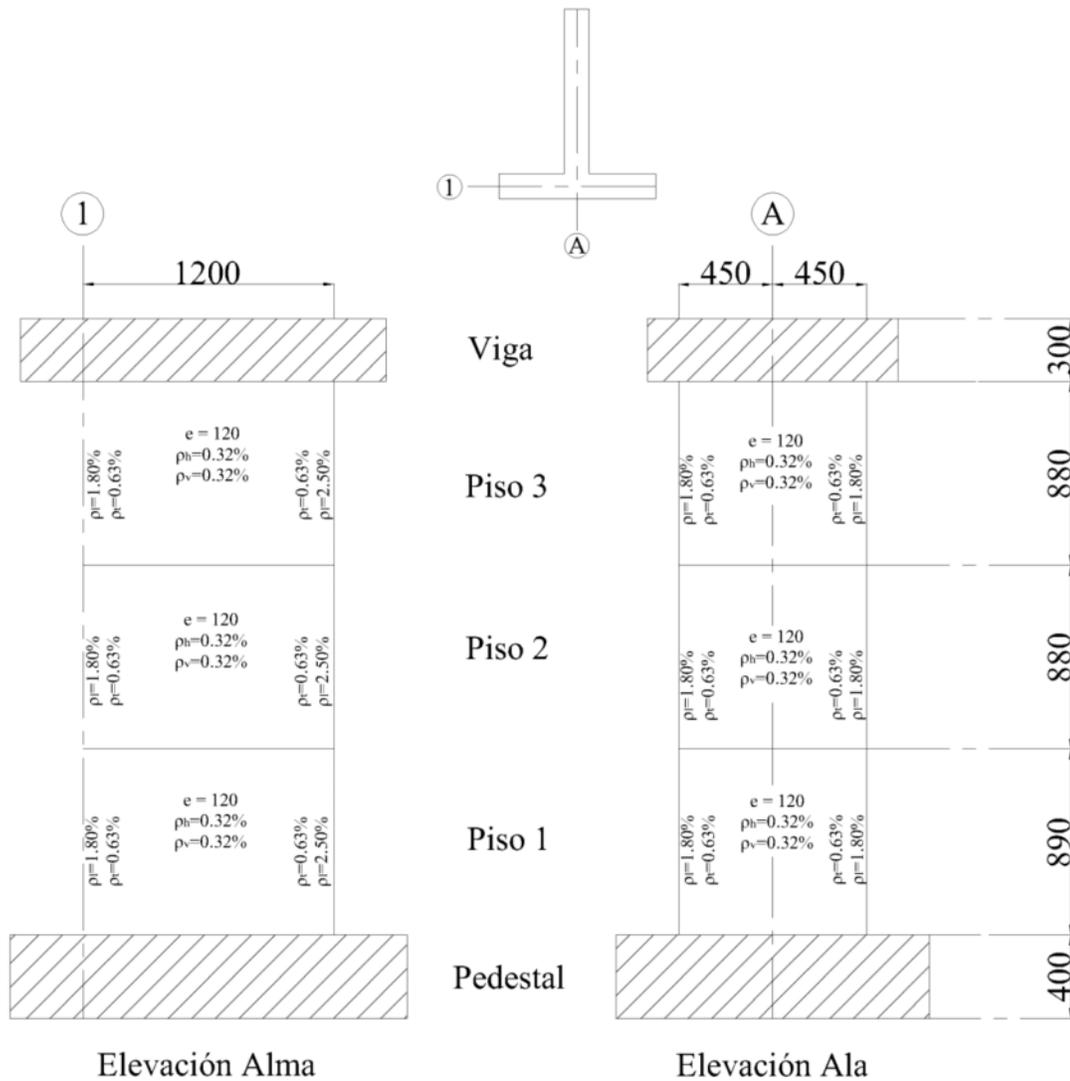


Figura 2.2: Geometría y Cuantías del Muro Base de Sección T (Silva, 2016)

Al igual que para las probetas de muros rectangulares, es importante destacar que para garantizar el empotramiento del muro y la transferencia adecuada de la carga lateral de ensayo, son necesarios una viga de transferencia y un pedestal de base, los cuales son diseñados para mantenerse en el rango lineal y elástico frente a las cargas del ensayo de tal manera que sea el muro el que concentre el daño en el hormigón y la armadura de refuerzo.



## 2.3. Revisión de Ensayos Experimentales Internacionales de Muros Acoplados

Existe una cantidad significativa de investigaciones que estudian el acoplamiento individual de muros a vigas o losas, lo cual ha permitido mejorar el diseño y con sigo el rendimiento sísmico de estas. Sin embargo, se han realizado pocos estudios sobre sistemas de muros acoplados, en especial en los de edificios de altura media y alta.

En el presente trabajo se examinan 6 estudios a nivel internacional sobre muros acoplados a vigas y/o losas, prestando especial énfasis al montaje experimental que se realizó para llevar a cabo los ensayos. Estas investigaciones contribuyen a entender de mejor manera el comportamiento de los sistemas de muros acoplados con el objetivo de diseñar el montaje experimental más apropiado de acuerdo a los requerimientos y limitaciones de esta investigación.

### 2.3.1. Lequesne, R. (2009) - Test of a Coupled Wall with High Performance Fiber Reinforced Concrete Coupling Beams

#### *Objetivos de la investigación*

Este estudio corresponde a una investigación experimental en donde el pincipal objetivo es estudiar el comportamiento de sistemas estructurales de muros de hormigón armado acoplados a vigas prefabricadas HPFRC (High performance fibre reinforced concrete) frente a cargas cíclicas. Los objetivos específicos de esta investigación son:

- Estudiar la factibilidad con la que las vigas de acoplamiento prefabricadas se pueden empotrar en sistemas de paredes estructurales fundidas in situ.
- Comparar los diversos detallamientos de las vigas de acoplamiento frente a demandas de deformación similares.
- Estudiar la interacción entre las vigas de acoplamiento HPFRC, las losas y los muros estructurales.

#### *Configuración del Montaje Experimental*

Se ensayaron dos muros acoplados de 4 pisos a escala 1/3, bajo una carga lateral pseudo-estática y una carga axial constante. Cada viga de acoplamiento tenía una disposición de refuerzo ligeramente diferente, lo cual permitió la comparación entre estas (Lequesne, Parra-Montesinos, y Wight, 2009). En la figura 2.3 se presenta el detallamiento del espécimen a ensayar junto a la ubicación de cada viga prefabricada.

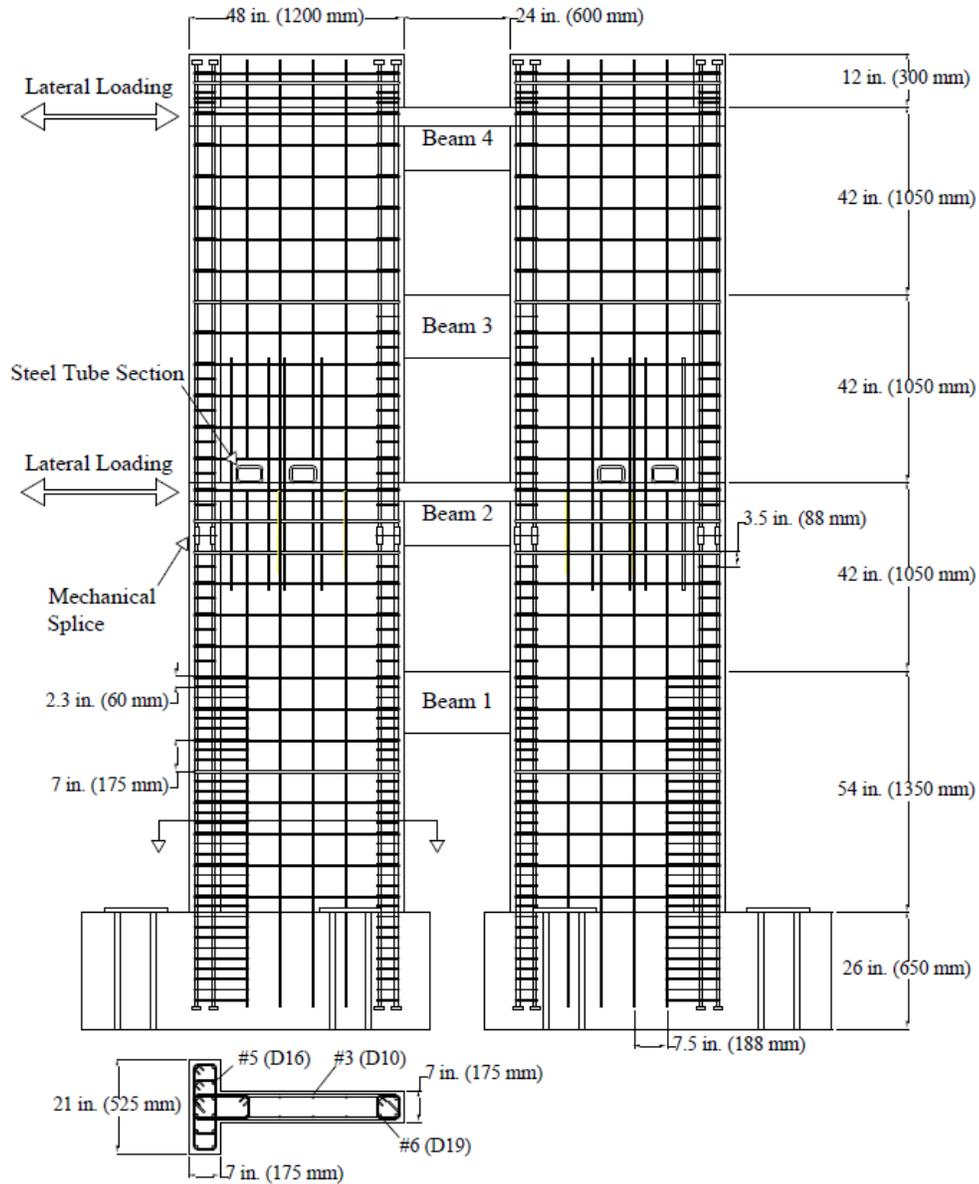


Figura 2.3: Probeta de Ensayo de la Investigación (Lequesne et al., 2009)

Las losas se construyeron en el segundo y cuarto nivel con el objetivo de facilitar la aplicación de la carga lateral. Estas permitían observar la interacción entre las vigas de acoplamiento prefabricadas y la losa adyacente y evaluar el diseño, modificándolo para reducir al mínimo los daños en esta conexión.

Se dispuso de un pedestal de hormigón armado para cada muro, el cual se fijó al suelo resistente del laboratorio para evitar el deslizamiento. Además, se aplicó una fuerza vertical, correspondiente al esfuerzo axial del 7 [%] del  $f'_c$  de diseño (basada en el área bruta de los muros) que se aplicó en el segundo piso a través de tendones de pretensado externos anclados



a la base de los elementos de cimentación. Antes de aplicar la carga lateral, se utilizaron jacks hidráulicos para aplicar esta fuerza vertical, la cual se mantuvo constante durante toda la duración de la prueba.

Se aplicó una secuencia predeterminada de desplazamientos laterales inversos a través del actuador hidráulico posicionado en el cuarto nivel. Por otro lado, el actuador del segundo nivel aplicó una fuerza equivalente al 60[%] de la fuerza aplicada por el actuador superior. Estas fuerzas laterales se transferían a las paredes acopladas a través de cuatro secciones de canal que se fijaban en la parte superior e inferior de los bordes exteriores de las losas con el fin de permitir una distribución de la fuerza lateral a cada una de las paredes estructurales que es similar al mecanismo de transferencia de carga que se desarrolla en un sistema de construcción normal.

La construcción de este espécimen buscaba ser lo más realista posible en cuanto a los métodos constructivos y la secuenciación. Este enfoque era fundamental para calibrar las posibles ventajas de programación de la construcción que se obtendrían al incorporar vigas de acoplamiento prefabricadas. El proceso de construcción consistía en prefabricar primero las vigas de acoplamiento y almacenarlas, listas para su colocación. La construcción de cada piso del muro comenzó con la colocación de las armaduras del muro y luego la colocación de suficiente encofrado para soportar la viga prefabricada. A continuación, la viga se deslizó hasta su posición con una grúa y se colocó sobre el encofrado que la sostenía completamente hasta que se colocó el hormigón del muro.

A continuación, en la figura 2.4 se presenta el montaje experimental realizado en este estudio.



Figura 2.4: Montaje Experimental de la Investigación (Lequesne et al., 2009)

### *Conclusiones de la investigación*

Se construyó y ensayó un espécimen a 1/3 de escala de muros acoplados para investigar el impacto que tienen las vigas de acoplamiento prefabricadas HPFRC en el diseño, construcción y comportamiento de los sistemas de paredes acopladas. A partir de este trabajo se pueden extraer las conclusiones presentadas a continuación.

- El montaje de vigas de acoplamiento prefabricadas es sencillo y se presenta como un método alternativo.
- Las rotaciones observadas de la viga de acoplamiento, en relación con la deriva de la pared estructural, fueron ligeramente inferiores a las previstas por los métodos de diseño existentes. El esquema de conexión prefabricada propuesto no parece afectar significativamente a la pertinencia de los modelos de predicción tradicionalmente utilizados para



los sistemas de montaje in situ.

- Para los sistemas acoplados por vigas de acoplamiento HPFRC dúctiles, se recomienda que se utilicen las capacidades últimas previstas para las vigas y muros individuales a fin de definir la relación de acoplamiento de diseño para el sistema. Se demostró que la relación de acoplamiento de diseño, definida de esta manera, se logra a niveles de deriva relativamente moderados y se mantiene en gran medida hasta el fallo del sistema.
- Las mediciones realizadas a lo largo del ensayo indican que la tendencia de las vigas de acoplamiento a alargarse cuando se someten a desplazamientos en sentido inverso se ve frenada por los muros estructurales adyacentes y las losas de piso. Las deformaciones axiales permitidas por los muros implican el desarrollo de importantes fuerzas axiales que afectarán tanto a la resistencia como a la ductilidad de las vigas.
- La losa adyacente a la viga prefabricada no desarrolló desplazamientos apreciables en relación con la viga hasta que la deriva del sistema superó el 1,5[%]. Incluso a estos grandes niveles de deriva, la interfaz entre la losa y la viga no sufrió grandes daños.
- Los requisitos del Código de Construcción de la ACI para el diseño de los muros estructurales proporcionaron una adecuada resistencia al corte y confinamiento del refuerzo longitudinal para permitir el desarrollo de un mecanismo de flexión estable en la base de ambos muros.

### 2.3.2. Lee, S. (2010) - Static Experiment for the Seismic Performance of a 2 Story RC Shear Wall System

#### *Objetivos de la investigación*

El objetivo de la investigación de Lee era estudiar el comportamiento sísmico de un sistema de muros de hormigón armado de sección T acoplados mediante el ensayo de carga estática lateral para dos configuraciones diferentes, una con viga de acople y otra sin esta. El muro estudiado se basó en uno que forma parte del primer y segundo piso de un edificio habitacional típico de 15 pisos en Corea y fue escalado a 3/5 del tamaño real. De esta manera, se buscaba obtener datos sobre el efecto de la viga de acople sobre el comportamiento sísmico en la estructura del muro de cortante y el comportamiento de esta solo con las losas.

#### *Configuración del Montaje Experimental*

Las probetas a ensayar se componen de un muro RC donde en una muestra no existe viga de revestimiento en la parte superior de la abertura (probeta RCSW), contrario al segundo caso en donde se colocó la viga de revestimiento (probeta RCSW-B) como variable experimental.

El diseño y configuración de la probeta a ensayar se muestra en la figura 2.5

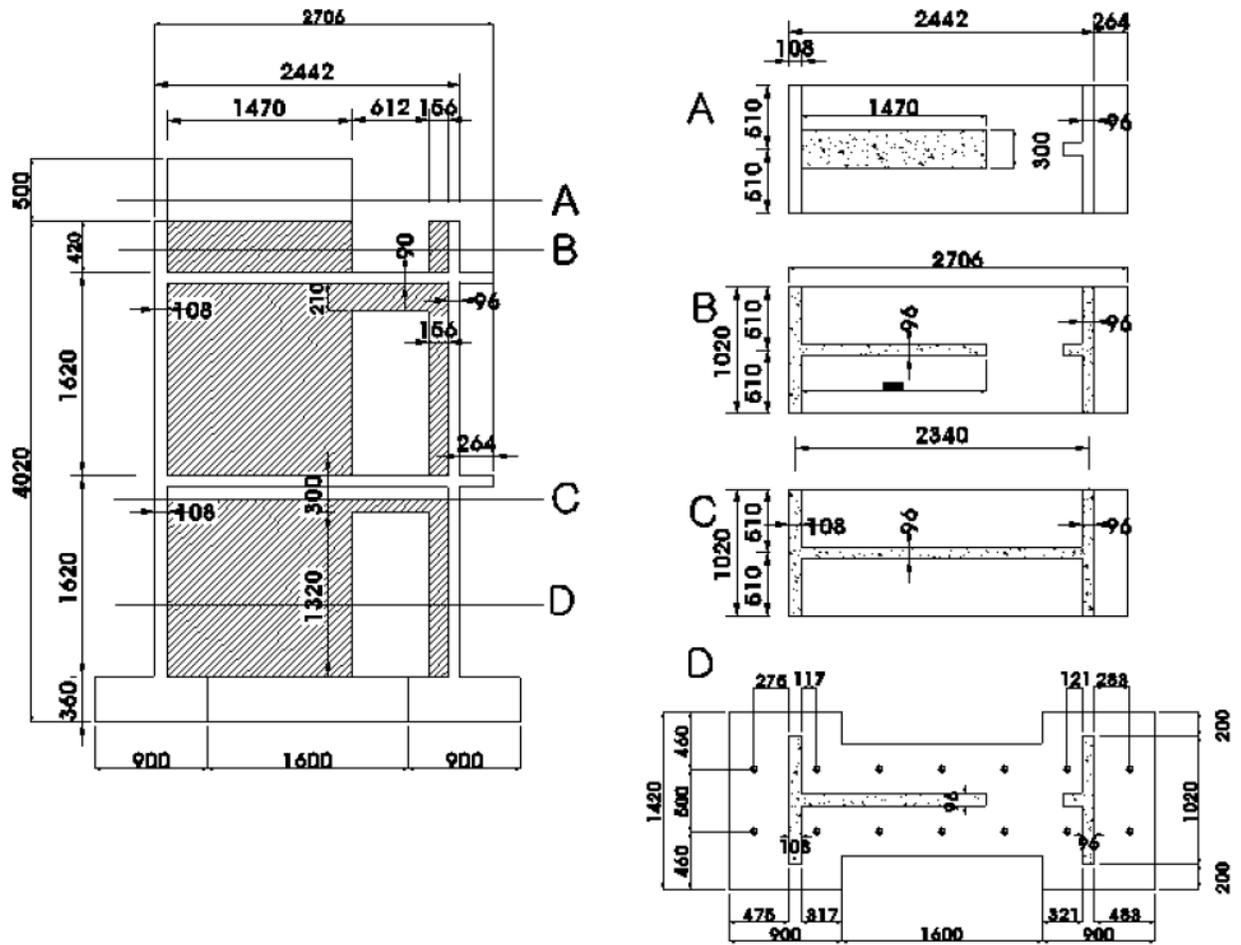


Figura 2.5: Probeta de Ensayo de la Investigación (Lee et al., 2010)

El montaje experimental de la probeta, junto con su aplicación de carga se muestra en la figura 2.6. Se instaló una viga de carga de hormigón armado en la parte superior de la muestra y se conectó al actuador a través de una junta de perno con el marco de acero, el cual impedía el desplazamiento fuera del plano.

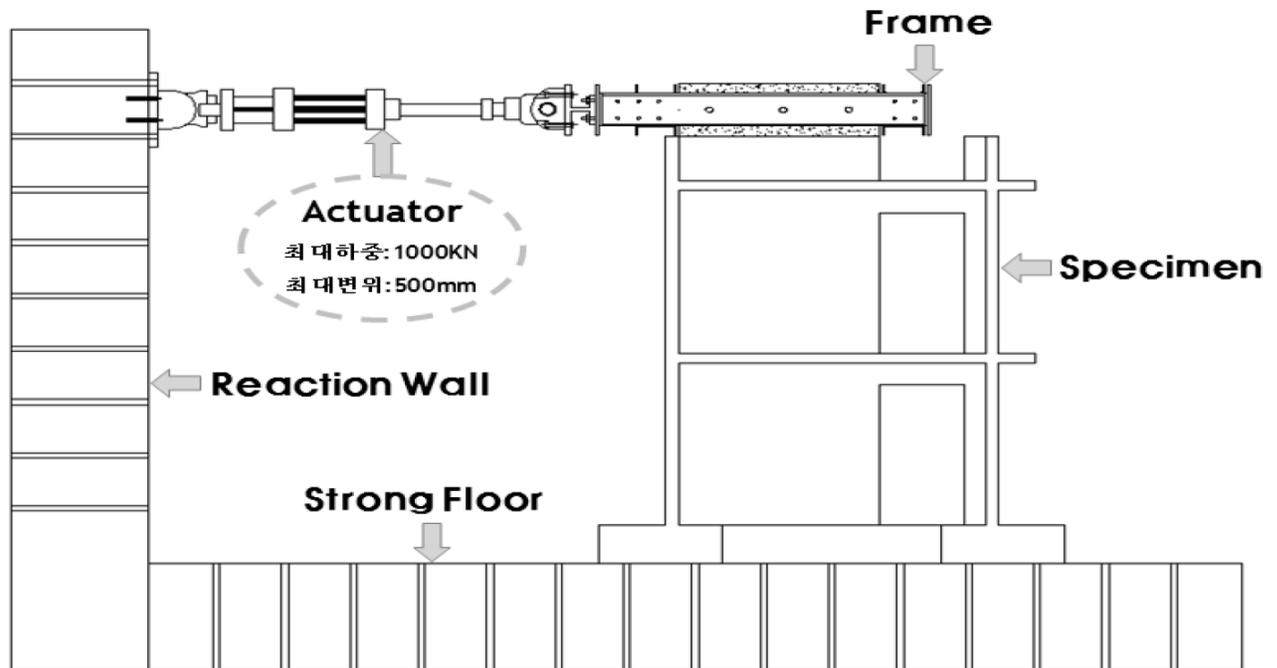


Figura 2.6: Montaje Experimental de la Investigación (Lee et al., 2010)

La carga horizontal se aplicó usando un actuador con una capacidad total de 1000[kN] instalado en el muro de reacción a la misma altura que la viga de carga, aplicando una carga cíclica mediante el método de control de desplazamiento. El ciclo se controló para que se repitiera dos veces para cada espécimen, y el ciclo de carga llegó hasta un drift de aproximadamente el 3.5[%].

#### *Conclusiones de la investigación*

Tras someter la estructura a una prueba de carga estática lateral, se comparó y analizó el comportamiento estructural de la probeta de acuerdo con la presencia o ausencia de una viga de acoplamiento, llegando a las siguientes conclusiones:

- La muestra RCSW-B inicialmente poseía una rigidez aproximadamente un 29[%] más grande que la muestra RCSW. En términos de capacidad de ductilidad, el índice de ductilidad en las direcciones positiva y negativa a la carga máxima de la muestra RCSW-B fue un 26-22[%] mayor que el de la muestra RCSW, y el índice de ductilidad en las direcciones positiva y negativa para el 80[%] de la carga máxima (después de aplicada esta) era un 19-44[%] más grande.
- El límite elástico máximo fue 538,22[kN] para la muestra RCSW-B y 450,38[kN] para la muestra RCSW, que resultó tener aproximadamente un 19,6[%] mayor resistencia que el muro sin la viga de acoplamiento, es decir, solo con losas.



- Aplicada la carga máxima, la relación de desplazamiento entre el segundo piso y el primer piso de la muestra RCSW es de aproximadamente 1,44 y 1,32 en las direcciones positiva y negativa, y en la muestra RCSW-B están son aproximadamente 1.09 y 1.19 en las mismas direcciones. Se observó una deformación mayor en el segundo piso que en el primero.
- En cuanto a la deformación por cortante del muro, la muestra RCSW-B tuvo una deformación total mayor que la de la muestra RCSW, y en el caso de deformación axial, la muestra RCSW-B tuvo generalmente menores deformaciones que la muestra RCSW.
- En cuanto a la deformación del hormigón debajo del muro del primer piso, la deformación total de RCSW de la muestra fue mayor que la del RCSW-B.
- Los resultados de este estudio mostraron que la muestra que poseía la viga de acople tuvo un mejor desempeño sísmico, con una resistencia máxima y capacidad de ductilidad mayores que la muestra sin viga de acople.

### 2.3.3. Turgeon, J. (2011) - The Seismic Performance of Coupled Reinforced Concrete Walls

#### *Objetivos de la investigación*

Con el fin de suplir las pocas investigaciones experimentales anteriores que proporcionan datos que caracterizan la respuesta sísmica de los muros con configuraciones representativas, disposiciones de refuerzo, condiciones de base y patrones de carga, se propuso que dentro de los objetivos de esta investigación se encuentre el desarrollar herramientas modernas que permitan el diseño de muros estructurales basado en el rendimiento. Particularmente se busca:

- Desarrollar ensayos experimentales de muros de secciones planas, acopladas y de tipo "C", además de un ensayo en conjunto de un sistema de muros para generar datos de respuesta y daños de alta resolución.
- Desarrollo de un modelo y recomendaciones para este con el fin de permitir la predicción de las demandas y la simulación de la respuesta de muros estructurales frente a terremoto en edificios de mediana-alta altura
- Desarrollo de la predicción de daños en modelos para PBEE (performance-based earthquake engineering).

#### *Configuración del Montaje Experimental*

Con el objetivo de asegurar que la respuesta de los muros sea representativa, se buscó que los sistemas de muros probados en el laboratorio fueran a una escala considerable y que las disposiciones de refuerzo en los bordes y a lo largo de los muros fueran representativas de las que se desarrollan en los pisos inferiores de un edificio de altura media.



Se utilizaron dos LBCB en esta prueba, uno adjunto a la parte superior de cada muro, para controlar cada uno por separado. Estos fueron montados y postesados en la pared fuerte con 36 varillas roscadas de alta resistencia de 1,5 pulgadas de diámetro, con el fin de impedir el deslizamiento. Se utilizó una viga de carga W14x132 para conectar la parte superior de cada muro al LBCB, la cual fue diseñada para permanecer elástica y uniforme.

Finalmente las cargas anteriormente mencionadas se aplicaron para generar un desplazamiento lateral cíclico cuasi-estático en la parte superior del espécimen y mantener una carga axial constante igual al 10[%] de la resistencia a compresión de la sección de hormigón.

A continuación, en la figura 2.8 se presenta el montaje experimental realizado en este estudio.

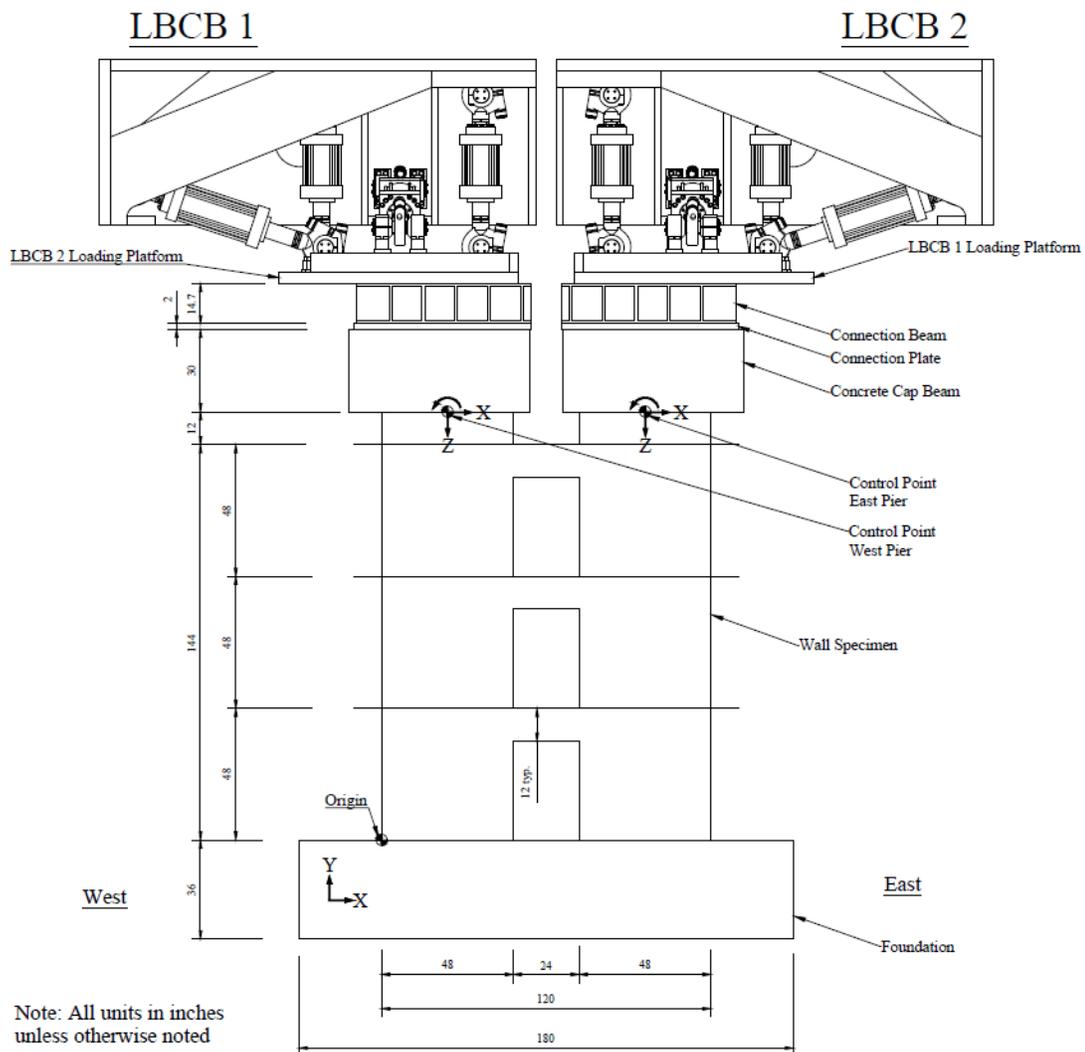


Figura 2.8: Montaje Experimental de la Investigación (Turgeon, 2011)



Una vez realizado el ensayo correspondiente y su correspondiente análisis se presentan las siguientes conclusiones de la investigación de acuerdo al comportamiento de los muros acoplados, los análisis elásticos y no lineales y los procedimientos de diselo y evaluación de los sistemas de muros acoplados.

- El grado de acoplamiento (DOC) tiene un papel significativo en el comportamiento del sistema de muros acoplados, en donde un DOC elevado se asocia a fuerzas axiales elevadas de tracción y compresión en los muros. A medida que las demandas netas de tensión axial en el muro traccionado superan la fuerza de gravedad, la resistencia axial y de flexión del muro a tracción se reduce significativamente. Debido a esta pérdida de resistencia y al traspaso de carga, se imponen grandes exigencias de corte y momento al muro en compresión, lo cual limita la capacidad de deformación de este muro, terminando por limitar la ductilidad del sistema de muros acoplados.
- Los resultados de los especímenes que presentaron fallos de tipo compresivo sugieren para un determinado paso de desplazamiento, el aumento de la demanda axial, corte y momento en compresión puede conducir a un fallo indeseable en ese muro debido a que las guías de diseño actuales no tienen en cuenta la interacción axial-momento en el estado límite último (es decir, el análisis plástico).
- En los análisis no lineales realizados en el estudio, se observa que el muro en compresión soporta entre el 80[%] y el 90[%] del esfuerzo cortante total. Por el contrario del diseño en esos años, donde se suponía que la demanda de corte se distribuía por igual entre ambos muros.
- El análisis elástico no puede simular la redistribución de corte y momento desde el muro de tracción al de compresión. Este infravalora significativamente la carga axial de tracción y compresión del muro en comparación con los resultados experimentales.
- Los resultados del análisis no lineal del espécimen CW1 indican que la simulación de las vigas de acoplamiento reforzadas diagonalmente utilizando elementos viga-columna basados en la fuerza con secciones de fibra, generan una respuesta que es demasiado rígida y fuerte. Para el espécimen CW1, esto resulta en una predicción excesiva de la robustez del sistema y de la demanda de compresión del muro, dando así una predicción insuficiente de la capacidad de deriva del CWP.
- Como recomendación, para garantizar que la fuerza axial en el muro a compresión nunca exceda la fuerza axial equilibrada, estos deben diseñarse de manera que la tensión de compresión axial calculada a partir del análisis plástico sea inferior a  $0.3 f'_c$ . Además, para asegurar una adecuada resistencia al corte, cada muro debe ser diseñado para resistir toda la demanda de corte de la base resultante de un análisis plástico.
- Finalmente los muros acoplados deben diseñarse para conseguir un DOC inferior al 50[%] y superior al 20[%]. El espécimen CW1 fue diseñado para tener un DOC de 53[%] pero exhibió una falla a flexión lo que indica que las fuerzas de compresión debidas al elevado DOC eran demasiado grandes.

### 2.3.4. McGinnis, M (2013) - Experimental Evaluation of a Multi-Story Post-Tensioned Coupled Shear Wall Structure

#### *Objetivos de la investigación*

En esta investigación se busca estudiar y evaluar experimentalmente un sistema de muros acoplados de hormigón armado para varios pisos. En este sistema, el método de construcción de losas de piso no adheridas y postensadas se adapta al acoplar dos muros de hormigón armado, lo cual sugiere entregar importantes beneficios de rendimiento y construcción en comparación con las vigas de acoplamiento convencionales. Este trabajo abarca estructuras de varios pisos presentando el diseño de un prototipo de prueba de 8 pisos, el cual corresponde a un espécimen que consiste en dos muros en forma de C y que se genera en el laboratorio a una escala del 15[%]. Finalmente, uno de los principales objetivos es comparar la respuesta de desplazamiento de la estructura del laboratorio con las respuestas predichas en el modelo de diseño.

#### *Configuración del Montaje Experimental*

Para la construcción del modelo a escala del 15[%] fue necesario tomar una serie de consideraciones dentro de las capacidades del laboratorio. En primer lugar, escalar muros de sección C resultaría espesores de solo 7 [cm] aproximadamente. Es por esto que se escaló el módulo de sección a un muro rectangular, obteniendo un espesor de 30.5[cm]. El diseño de esta probeta a ensayar se presenta en la figura 2.9.

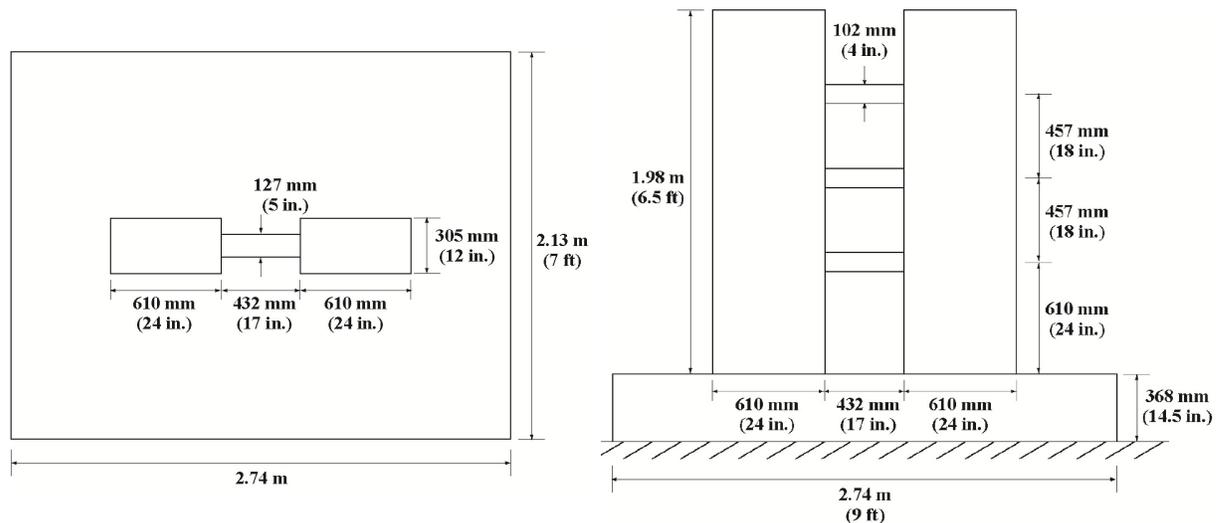


Figura 2.9: Probeta de Ensayo de la Investigación (McGinnis et al., 2013)

La carga se aplicó usando un gato lateral que proporcionó el corte para los tres pisos construidos más el corte resultante para los cinco pisos superiores. En una estructura real,



la carga lateral se aplicaría a ambos muros de forma independiente. En cambio, en este caso la carga fue concentrada y aplicada a través de un solo gato. La carga gravitacional de los pisos superiores se aplicó usando cables tensados dentro de unos conductos en los muros, y la fuerza axial adicional en los muros (tanto de tracción como de compresión) causada por el acoplamiento fue proporcionado por gatos unidos a cables en la parte superior de los muros. Estos cables se conectaron a vigas de acero fijadas a la parte superior de los muros, y al fijar estos cables a una distancia de la línea central de estos, los gatos asociados también se utilizaron para proporcionar el momento de vuelco en la parte superior de cada muro causado por los pisos superiores. Las fuerzas en los tres gatos hidráulicos utilizados se midieron usando células de carga calibradas y los desplazamientos se midieron con un potenciómetro de cuerda acoplado al muro izquierdo en la altura de la aplicación de la carga lateral.

La fundación, los muros y las vigas de acoplamiento fueron construidas por separado. El refuerzo de flexión en los muros tenía una extensión de 17,8 [cm] que sobresalía de la base, y la conexión para cada muro se creó mediante la aplicación de lechada de estas barras en anclajes incrustados en la fundación.

A continuación en las figuras 2.10 y 2.11 se presenta el montaje experimental de la probeta a ensayar.

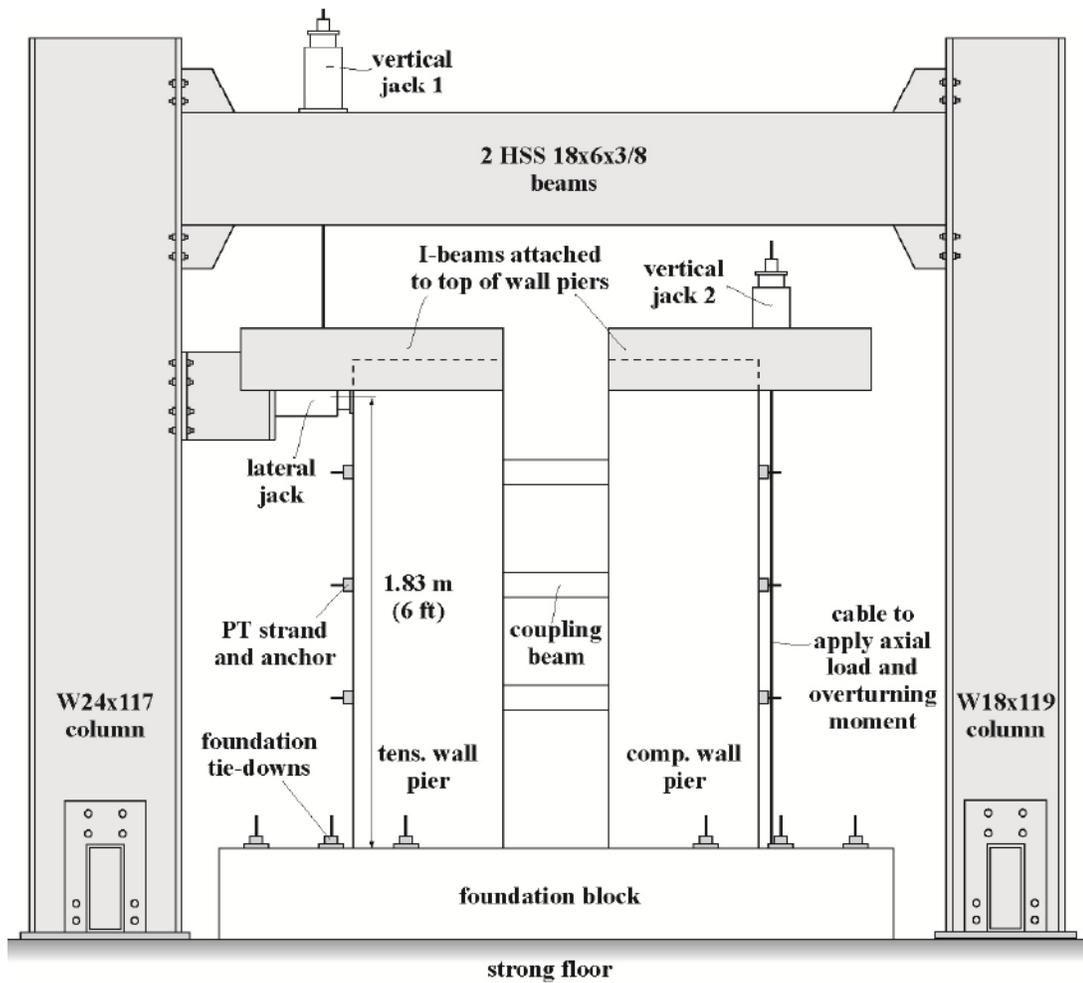


Figura 2.10: Montaje Experimental de la Investigación - Prototipo (McGinnis et al., 2013)

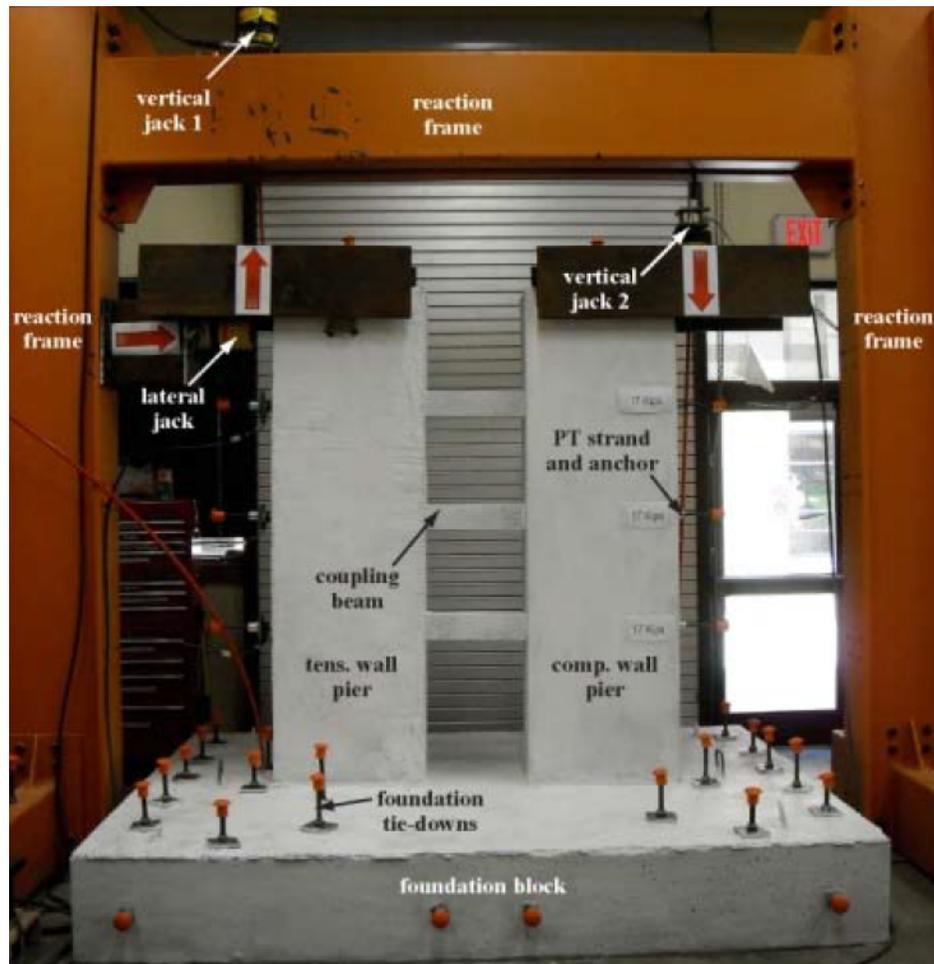


Figura 2.11: Montaje Experimental de la Investigación In Situ (McGinnis et al., 2013)

Finalmente cabe mencionar que las cargas aplicadas en el experimento (axial, corte y momento) se escalaron directamente a partir de las del edificio prototipo.

### *Conclusiones de la investigación*

Los objetivos principales de este trabajo eran desarrollar y probar los procedimientos de diseño para muros de corte acoplados postensados, y validar los enfoques de modelado para estas estructuras. Los resultados demostraron que el procedimiento de diseño para el sistema de muros acoplados permitió que la estructura funcionara como se esperaba y que los modelos analíticos dieran predicciones que coincidían con el comportamiento medido.

Hay varias limitaciones del actual experimento, en donde las principales son que la escala del espécimen significó que las paredes en forma de C se volvieron rectangulares y que las fuerzas en los cables de postensado de las vigas eran menores en el experimento que en el diseñado. Sin embargo, la coincidencia entre las predicciones de DRAIN-2DX (Modelamiento analítico) sobre el comportamiento estructural a través de varios parámetros clave como la



carga lateral frente a la deriva y las fuerzas de postesado de la viga fue buena. La predicción basada en un modelo ABAQUS más simple también coincidió razonablemente bien con los datos experimentales medidos.

La estructura exhibió un comportamiento consistente con algunos de los beneficios potenciales de un sistema de paredes acopladas postensadas, con cierta capacidad de autocentrado, y daño limitado en las vigas de acoplamiento.

### **2.3.5. Cheng, M. (2014) - Experimental study of reinforced concrete and hybrid coupled shear wall systems**

#### *Objetivos de la investigación*

Este estudio tiene como objetivo principal investigar el comportamiento cíclico de los sistemas de de muros acoplados de hormigón armado e híbridos (con viga de acoplamiento de acero). Esto, ensayando dos sistemas de muros acoplados a gran escala, en donde el primer espécimen, etiquetado como muestra CW-RC, representa el espécimen con muros RC y vigas de acoplamiento RC en diagonal, y el segundo espécimen, etiquetado como CW-S, presenta el propuesto sistema híbrido de muros acoplados con vigas de acero LYP.

Además de lo anterior, se busca evaluar las especificaciones de diseño del Código de Construcción ACI 318-11 principalmente para el sistema de muros acoplados RC y las vigas de acoplamiento de acero. A continuación, en la figura 2.12 se presenta la probeta a ensayar.

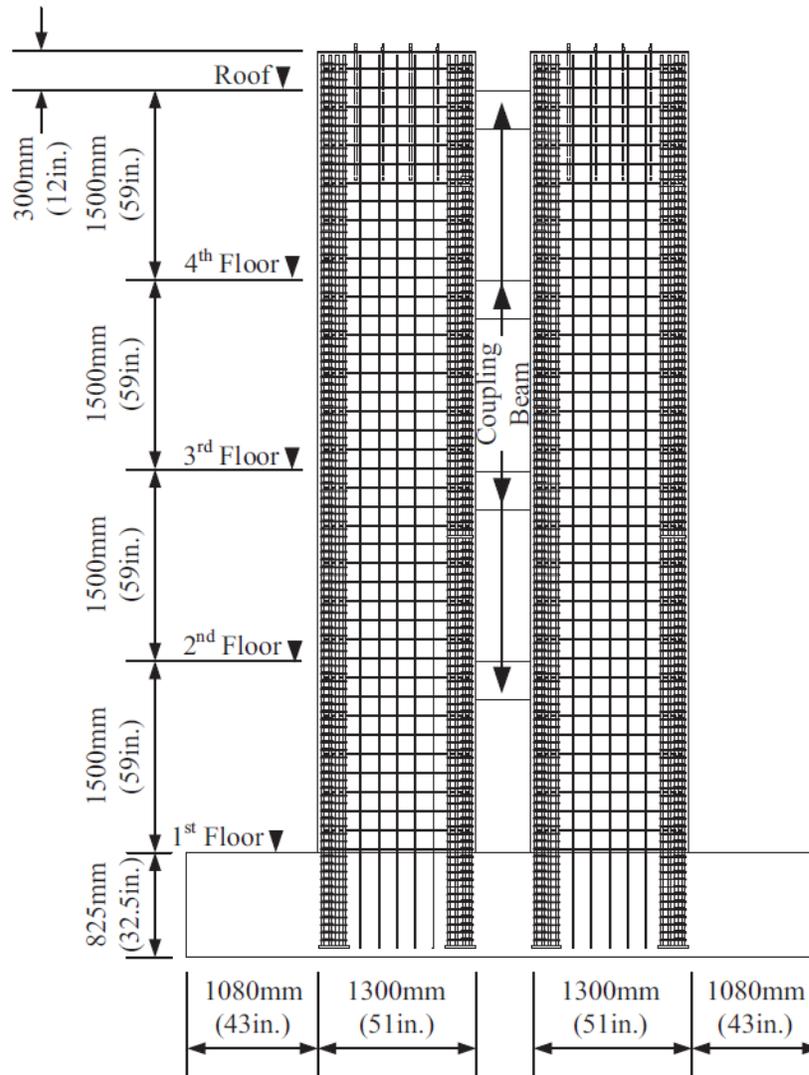


Figura 2.12: Probeta de Ensayo de la Investigación (Cheng et al., 2015)

### *Configuración del Montaje Experimental*

Los especímenes fueron cargados lateralmente con dos actuadores hidráulicos, los cuales fueron instalados en el techo y el tercer piso de la estructura. Una ilustración detallada de la configuración del montaje experimental, tanto en vista frontal como lateral, se presenta a continuación en la figura 2.13.

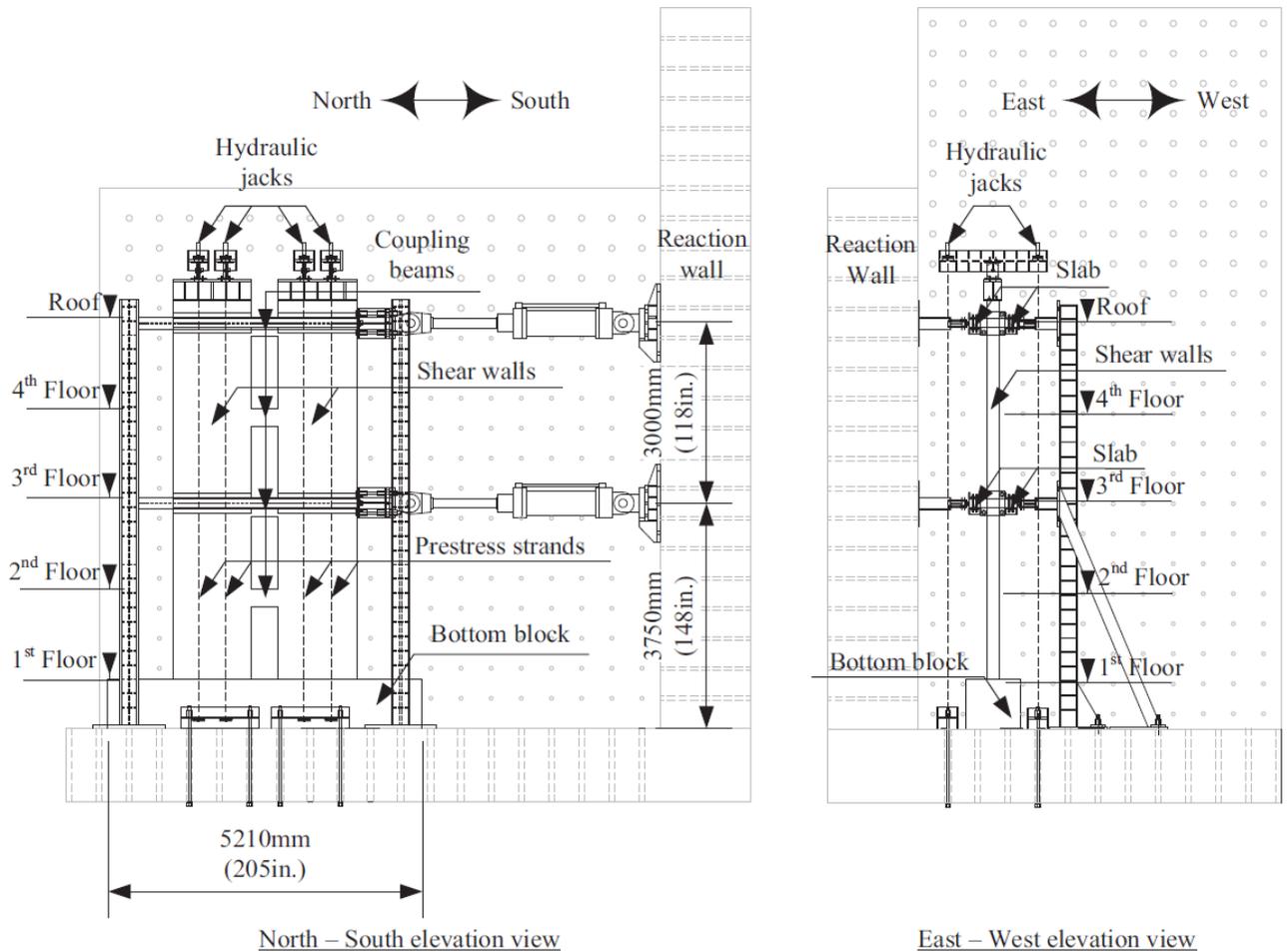


Figura 2.13: Montaje Experimental de la Investigación (Cheng et al., 2015)

Los actuadores hidráulicos actuaban según control de desplazamiento a partir de una carga cíclica definida, donde en particular, al actuador del 3er piso se le aplica una fuerza con una magnitud que corresponde a la mitad de la del actuador del piso del techo. Esta configuración proporciona una perfil de carga dominante de primer modo para el espécimen de prueba.

Las losas RC en el techo y el 3er piso están diseñados para transferir la carga lateral de los actuadores al espécimen. A lo largo de los bordes de la losa, dos canales C están adheridas desde las superficies de las losas tanto superiores como inferiores a través de una serie de pernos de alta resistencia. La condición de límite fijo en la parte inferior de los especímenes se proporcionó a través de una fuerte bloque de hormigón armado que fue anclado en el suelo fuerte a través de dieciséis barras pretensadas de 50 mm de diámetro. Lateralmente se proveen soportes usando dos marcos de acero y una pared de reacción para prevenir el movimiento fuera de plano de los muros.

La carga gravitacional adicional de 245[kN] se aplica a la en la parte superior de cada



muro usando cuatro gatos hidráulicos que tiraron cuatro filamentos de 15[mm] de 7 hilos de pretensado al mismo tiempo antes de aplicar el desplazamiento lateral. Para ambos especímenes, esta la carga gravitacional adicional se aplicó primero en el muro sur. Una vez que la carga gravitacional deseada fue alcanzada, la presión hidráulica en los gatos hidráulicos se bloquearon y luego los cuatro gatos fueron trasladados al muro norte siguiendo el mismo procedimiento.

### *Conclusiones de la investigación*

A partir de los resultados experimentales de esta investigación se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El modelo CW-RC, con muros de corte de hormigón armado (RC) y viga de de acoplamiento RC, presentó una respuesta histórica dúctil sostenida hasta 3.0[%] de deriva, donde falló sin completar el primer ciclo. El modelo CW-S, con muros RC y viga de acoplamiento de acero con red de acero de bajo punto de elasticidad (LYP), fracasó después de la finalización de 2.0[%] de ciclos de deriva. Esto debido al acoplamiento de acero LYP sobrediseñado que induce un corte excesivo y causa fallos combinados axiales y de corte de los muros RC.
- Al mismo nivel de deriva, el espécimen CW-S sostuvo un mejor momento de vuelco en el ciclo repetido, un mejor deterioro de la rigidez y una mejor capacidad de disipación de energía.
- El detalle de conexión propuesto que separa el mecanismo de transferencia de cortante y momento entre el muro RC y la viga de acoplamiento de acero es eficaz.
- Los resultados de la investigación indican que un diseño de viga de acoplamiento dúctil no garantiza un comportamiento dúctil de un sistema de muros acoplados. Las vigas de acoplamiento sobredimensionadas inducen mayores demandas de corte y axiales en el sistema de muro de corte acoplado. Por esta razón, los muros RC deben ser proporcionados para el corte y la carga axial en base a las capacidades de las vigas de acoplamiento.

### **2.3.6. Choi, H. (2016) - Experimental Study on Shear Wall with Slab and Openings**

#### *Objetivos de la investigación*

Este estudio investigó los comportamientos estructurales de los muros de hormigón armado que contienen aberturas y losas. Esto ya que tanto el UBC como el ACI (principales organismos que proporcionan especificaciones para el diseño de muros simétricos y asimétricos) no proporcionan directrices de diseño para muros con aberturas.

Fueron ensayados tres especímenes de muros a media escala: un muro sólido (WS-Solid), un muro con abertura y losa (WS-0.23), y un muro con apertura pero sin losa (WB-0.23).

Particularmente, el estudio de Choi evaluó la reducción de la capacidad de carga del muro debido a la pérdida de la sección transversal y su contribución a la capacidad de resistencia al momento del sistema total de elementos de acoplamiento.

Cabe mencionar que si bien esta investigación busca estudiar el comportamiento de muros con aberturas, el muro WS-0.23 se acerca a lo que se busca estudiar en la presente memoria, en donde las aberturas en el muro simulan una probeta con dos muros independientes acoplados por losa. Por esta razón, lo presentado en esta sección se focaliza en esa probeta en particular.

### *Configuración del Montaje Experimental*

En las tres probetas a ensayar, los muros se basaron en el primer y segundo piso de un edificio habitacional normal en Corea construido en la década de 1980, pero con las disposiciones y detalles típicos del refuerzo para los muros estructurales presentados en la norma ACI 318-11. En particular la probeta mayor interés para la presente investigación es la WS-0.23, la cual se presenta a continuación, con su geometría y armaduras, en la figura 2.14.

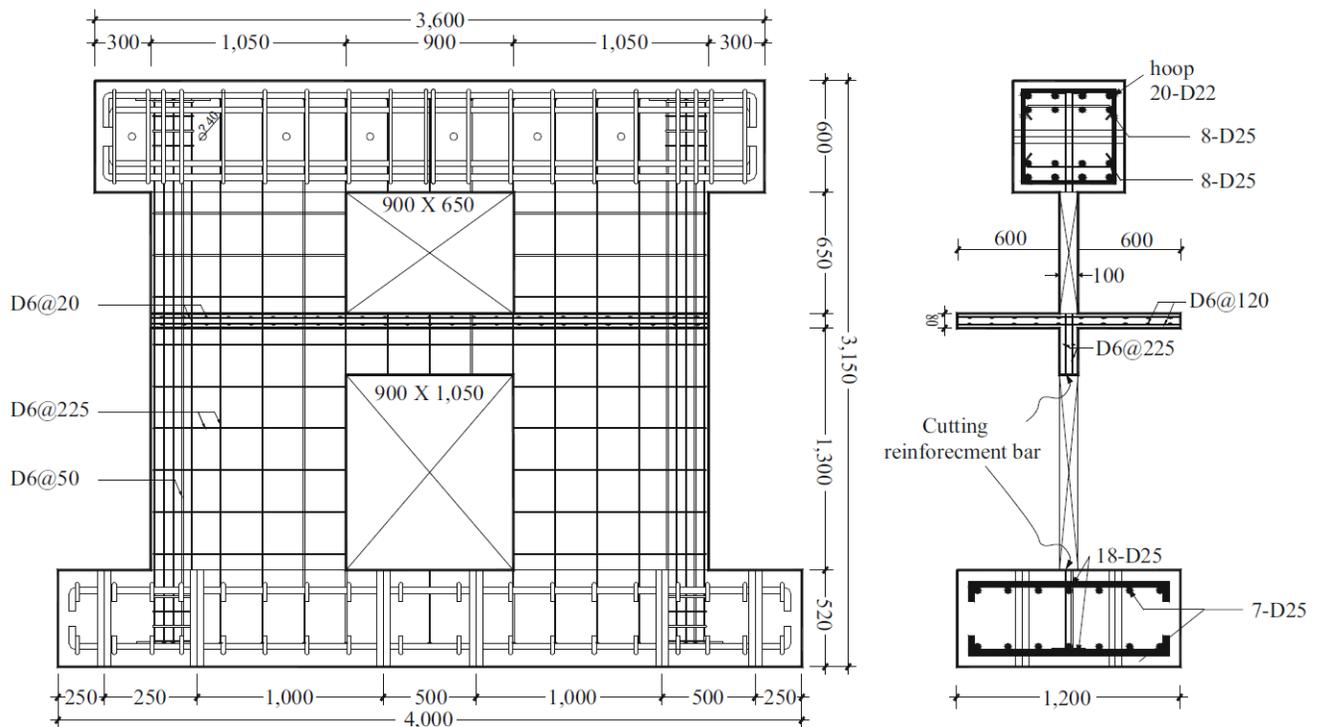


Figura 2.14: Probeta de Ensayo de la Investigación (Choi, 2017)

El montaje experimental se diseñó de tal manera que cada espécimen se fijó al suelo rígido mediante cuatro varillas de 68[mm] de diámetro en cada extremo. Estas probetas se cargaron como voladizos verticales con una fuerza lateral aplicada a través de una viga rígida.

Se montaron dos actuadores en vertical para aplicar 630[kN] de compresión axial constante durante el experimento. La carga lateral se aplicó en la parte superior del muro mediante un actuador hidráulico de 2000[kN] montado entre la probeta y un muro de reacción mediante control de desplazamiento. La losa se apoyó simplemente en sus cuatro esquinas y se utilizaron vigas guía para minimizar el movimiento fuera del plano y para simular el efecto de diafragma de una losa a la dirección transversal del eje fuerte de las probetas.

A continuación, en la figura 2.15 se presenta un esquema del montaje experimental utilizado.

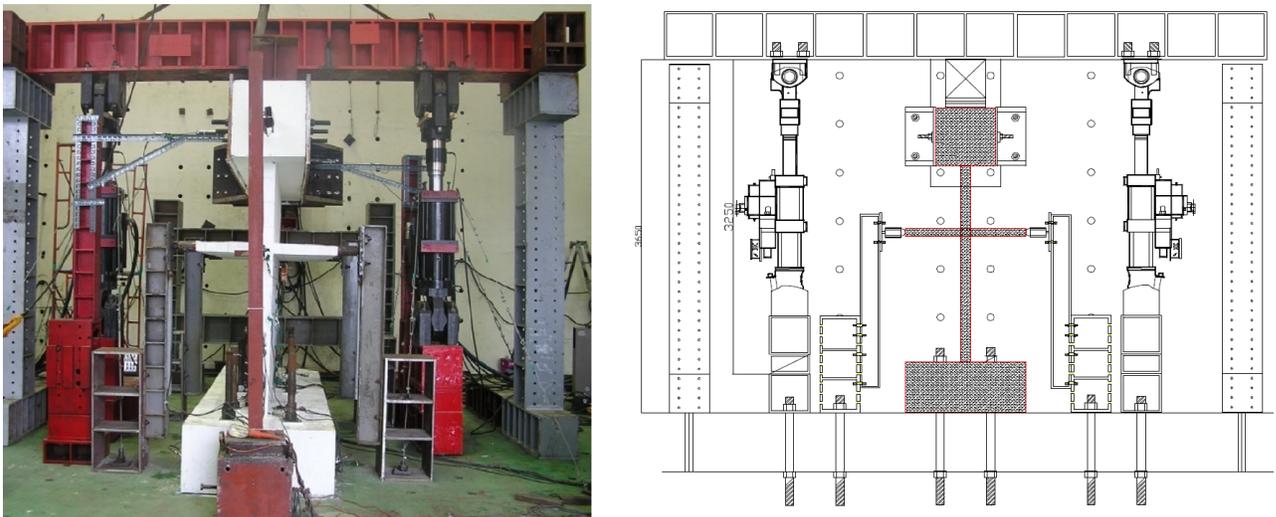


Figura 2.15: Montaje Experimental de la Investigación (Choi, 2017)

### *Conclusiones de la investigación*

Como conclusiones del estudio se pueden mencionar que en comparación con los resultados de otros estudios anteriores (en donde los ensayos se realizaron en muros sin losas) se comprobó que la reducción de la resistencia debida a la apertura en los muros era mínima. Esto ya que, aparentemente, la capacidad de flexión de las losas contribuyó al comportamiento de los muros como elemento de acoplamiento. WS-Solid y WS-0.23, los especímenes que tenían losas, mostraron una suave degradación de la rigidez en comparación con WB-0.23, que tenía un cuerpo rígido en lugar de una losa. Se observa que la degradación de la rigidez se ve más afectada por el cambio de rigidez debido a un miembro de acoplamiento que el cambio de rigidez debido a una abertura.

Las tensiones de la armadura horizontal en el muro con la misma relación de deriva,



aumentaban proporcionalmente con la distancia desde el centro de la abertura. Por otro lado, con respecto a los resultados del análisis, se analizó la distribución de las tensiones de los refuerzos y del hormigón, así como la capacidad de resistencia a las cargas laterales de la sección. Los resultados del análisis de elementos finitos indican que las losas y los muros residuales pueden formar parte del sistema de resistencia a las cargas laterales.

## 2.4. Propuesta de Montaje Experimental a Partir del Análisis de Estudios Previos

A partir del estudio de los ensayos presentados en la sección anterior, se procede a analizarlos con el fin de encontrar el montaje experimental ideal para este trabajo, el que tiene como objetivo principal estudiar el comportamiento de muros acoplados mediante losas. Teniendo esto último en consideración se observa que tanto para el montaje de Lequesne como el de Cheng, el aplicar la carga lateral directamente en las losas a través de las placas metálicas no responde a los objetivos de esta investigación, ya que se pierde la transferencia de carga que las losas transmiten desde un muro a otro y con esto la influencia que tienen estas en el sistema. Además, en el estudio de Lequesne la carga axial, instalada mediante tensores al nivel de la primera losa, no representa a modo general la carga total del sistema, dejando sin esta carga a la mitad superior de los muros.

De la investigación de Lee se puede observar que el sistema de aplicación de carga lateral cíclica es representativo y tiene como ventaja que al aplicar esta en una viga de carga y no directamente sobre los muros, estos quedan seguros frente a eventuales daños por el ensayo. Esto se repite en varios de los estudios observados. Sin embargo, no existe una carga axial asociada a los muros en el sistema, lo cual es algo deseable dentro de las características que debería representar el ensayo para acercarlo al comportamiento real de este tipo de estructuras. Por otro lado, con respecto al montaje utilizado en la investigación de Turgeon, se puede destacar la aplicación de las cajas de carga y condiciones de borde (LBCBs) las cuales pueden aplicar cargas axiales, de corte y de momento en los seis grados de libertad mediante actuadores en las vigas de carga del sistema, dando así una representatividad mayor con respecto a la realidad. Sin embargo, estos instrumentos son particulares de la Universidad de Illinois estando fuera del alcance del laboratorio de estructuras en el cual será realizado este futuro ensayo.

Al igual que para la mayoría de las investigaciones antes mencionadas, del estudio de McGinnis se puede apreciar el buen sistema de arriostramiento lateral, el cual restringe el desplazamiento fuera del plano. Por otro lado, la aplicación de cargas axiales en diferentes sentidos dependiendo del muro, quita representatividad al ensayo, ya que si bien entrega la alternativa de replicar el momento correspondiente al esperado en el sistema, el primer muro se encontrará más traccionado en comparación de lo que se esperaría en la realidad, el cual debiese tener una carga de compresión considerable acorde a estructuraciones de este tipo. Además, la probeta no fue implementada para aplicar la carga lateral en ambos sentidos, lo cual difiere de los objetivos de la presente investigación, en la que se busca realizar un ensayo cíclico. Por otro lado, en el estudio de Choi se puede observar que para la

aplicación de la carga axial en la probeta fueron necesarios 2 actuadores hidráulicos ubicados verticalmente, adicionales al actuador necesario para aplicar la carga lateral en el sistema, lo cual fue permitido debido a que la probeta tenía solo una gran viga de carga sobre ambos muros del sistema. Sin embargo, esta disposición genera que ambos muros se desplacen a la par, sin estudiar lo que realmente aporta la losa en cuando a transferencia de cargas de un muro a otro.

Finalmente, considerando los objetivos y alcances de este estudio, se propone un montaje experimental que rescate de manera simple y concisa las características típicas en una estructuración de este tipo junto con las cargas presentes en esta. En particular, la propuesta es una adaptada del montaje de Lee, considerando una viga de transferencia en cada uno de los muros, en donde se aplicará la carga axial en cada uno de estos a través de cables de acero tensados desde estas vigas hasta la fundación del sistema. La carga lateral será aplicada mediante un actuador hidráulico en el primer muro, donde la viga de transferencia tendrá cables que la traspasarán y que permitan el desarrollo de los desplazamientos en ambos sentidos generando así la carga cíclica. A continuación, en la Figura se presenta un esquema del montaje experimental propuesto.

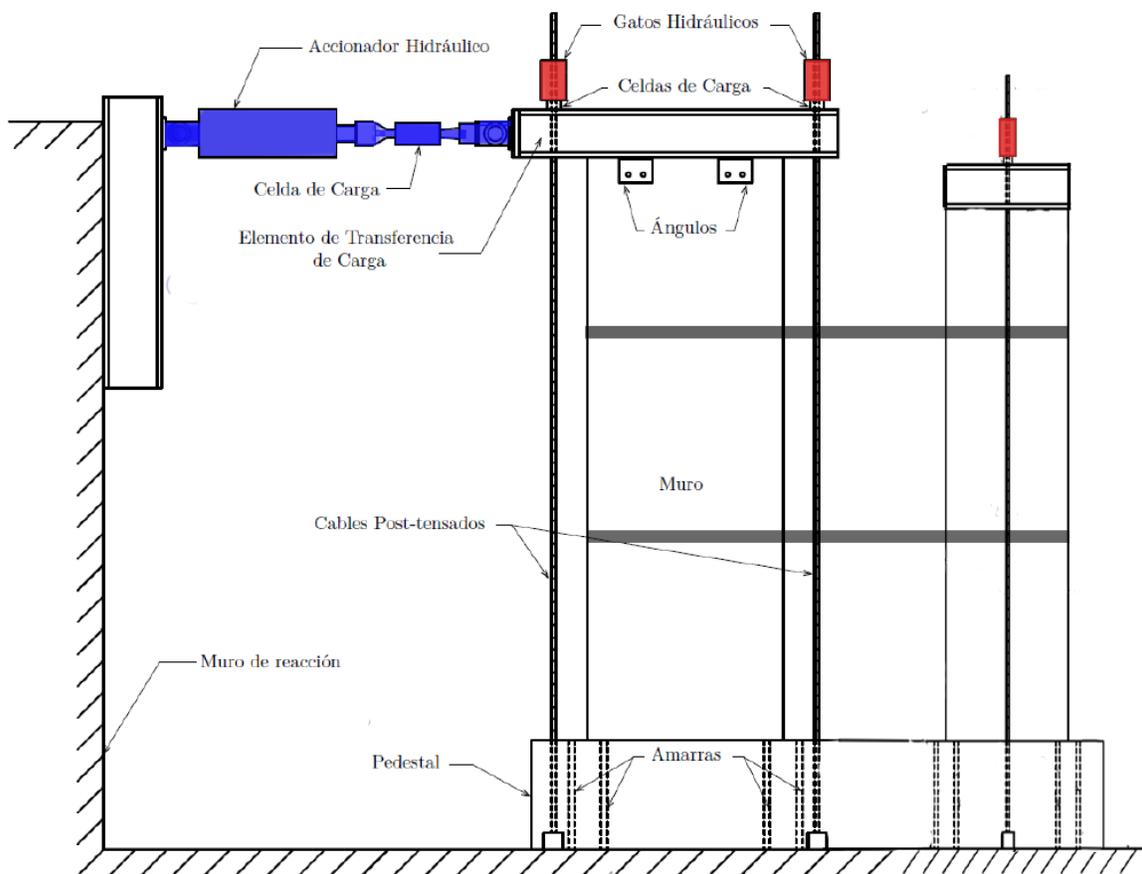


Figura 2.16: Esquema montaje experimental



# Capítulo 3

## Modelación Numérica

### 3.1. Introducción

La Modelación numérica se llevará a cabo a través de SAFE-TB, Structural Analysis by Finite Elements ToolBox, un framework de elementos finitos desarrollado en MATLAB por Rojas (Rojas, 2012), el cual permite reproducir el comportamiento real de una estructura, bajo cargas estáticas y cíclicas, al modelar objetos de hormigón armado considerando materiales no lineales.

### 3.2. Plataforma SAFE-Toolbox

La modelación realizada en el presente trabajo, desarrollada a a partir de la plataforma SAFE-Toolbox, se basa en el método de los elementos finitos para la modelación y análisis no lineal de muros de hormigón armado. Dispone de elementos tipo *shell* rectangulares de cuatro nodos y con seis grados de libertad por cada uno de éstos: tres desplazamientos y tres giros, generando un total de 24 grados de libertad por elemento. Estos elementos se componen por capas, las cuales poseen una adherencia completa entre ellas, con el fin de modelar la interacción del hormigón y el acero de refuerzo, representando un comportamiento promedio en cuanto a tensiones y deformaciones.

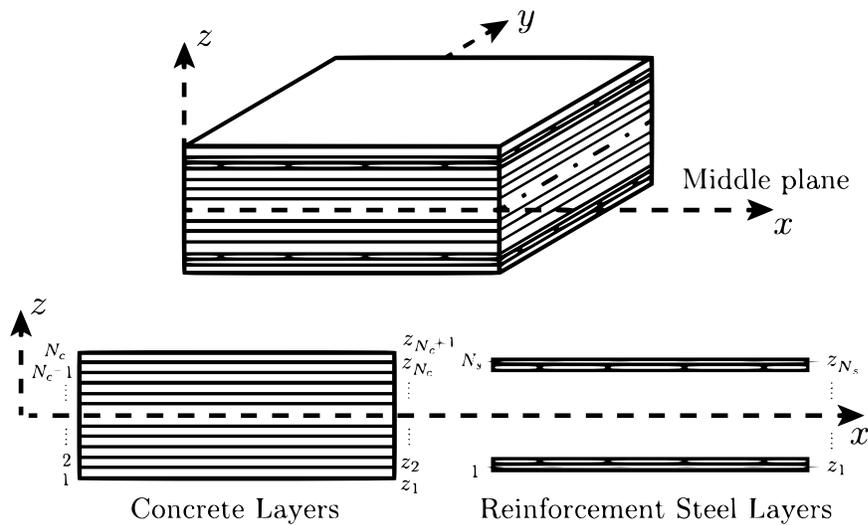


Figura 3.1: Sección membrana por capas (Rojas, 2016)

Dentro de cada uno de estos elementos existen nueve puntos de cuadratura (puntos de integración donde el material es evaluado y que se utilizan para ensamblar la matriz de rigidez y el tensor de tensiones) los cuales contienen la información de tensiones y deformaciones en el elemento organizada según su orientación. A continuación, en la figura 3.2 se presenta el esquema del elemento shell junto a cada uno de sus componentes.

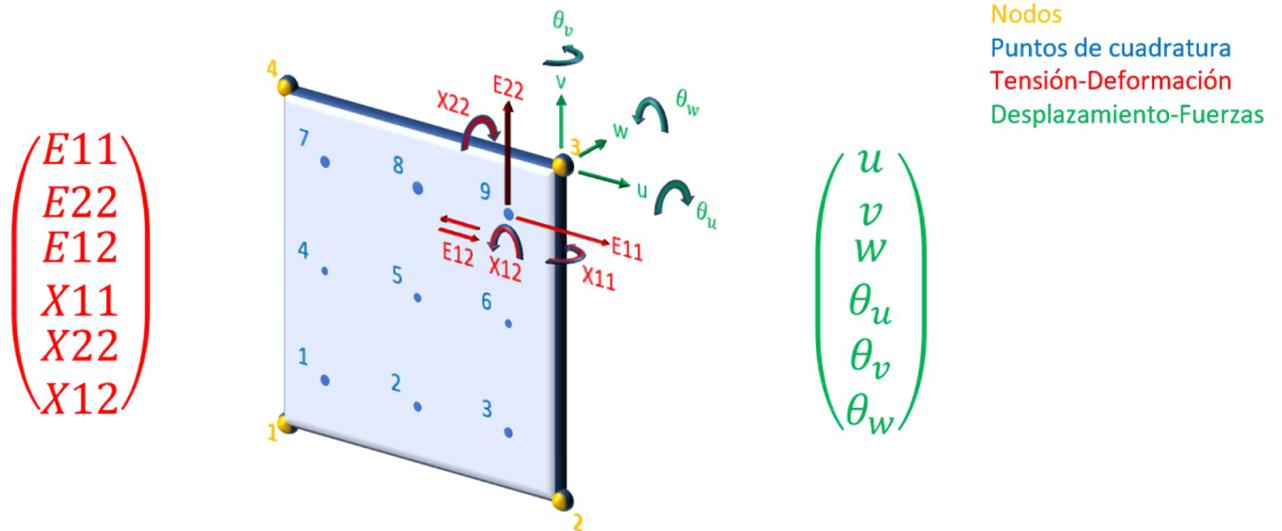


Figura 3.2: Esquema del Elemento Shell

Cada uno de los elementos es capaz de representar el efecto del agrietamiento del hormigón armado, basando su comportamiento en las leyes propuestas por Belarbi y Hsu (Belarbi y Hsu, 1994). Esto se puede ver en la figura 3.3, donde se aprecia que cuando el hormigón no está agrietado trabajan en conjunto el hormigón y el acero. Por el contrario, en zonas agrietadas sucede que el acero toma toda la tensión asociada.

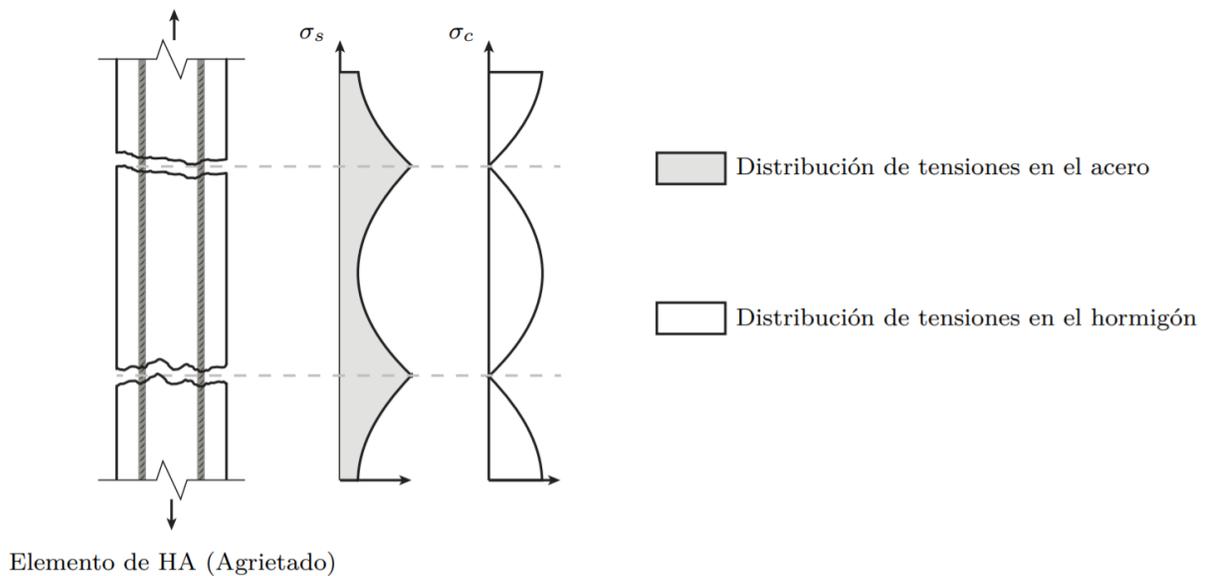


Figura 3.3: Distribución de tensiones en la sección de hormigón armado (Peña, 2016)

SAFE-TB dispone de diferentes algoritmos para la resolución de problemas altamente no lineales, los cuales se diferencian principalmente en controlar la fuerza o el desplazamiento aplicado. En particular, en este trabajo el algoritmo de solución utilizado es el de carga bajo control de desplazamientos, con cargas puntuales a nivel de techo.

El método de iteración es una modificación del método Newton-Rhapson en el cual se utiliza la pendiente de la tangente inicial para todo el proceso. Además, Peña desarrolló e incorporó el "Factor de Convergencia de Carga" (Peña, 2016), el cual reduce los problemas de convergencia que se presentan en el análisis no lineal, disminuyendo así los tiempos de ejecución de las rutinas.

### 3.3. Leyes Constitutivas de los Materiales

A continuación se presentan las leyes constitutivas para el hormigón y acero, las cuales son la base de la modelación y de los resultados analíticos obtenidos en los próximos capítulos.

#### 3.3.1. Modelo Constitutivo del Hormigón

El hormigón empleado en esta investigación se modela como un material uniaxial según el modelo propuesto por Massone (Massone, Orakcal, y Wallace, 2009), a partir de la rutina *Concrete06* desarrollada para OpenSees (McKenna, Fenves, Scott, et al., 2000).

El modelo constitutivo del hormigón a compresión se modela con la curva de Thorenfeldt

(Thorenfeldt, 1987), tal como se puede apreciar en la figura 3.4.

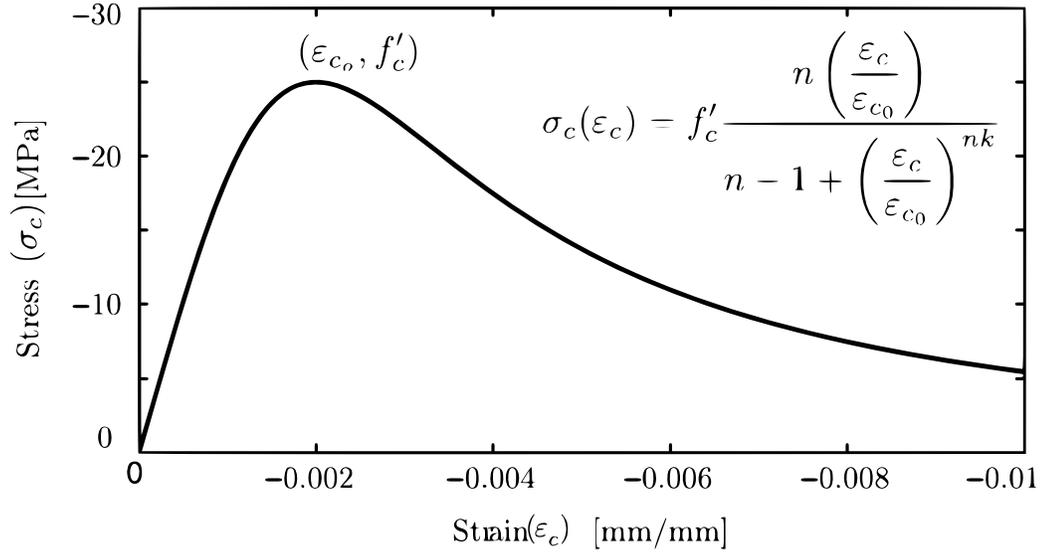


Figura 3.4: Modelo constitutivo para el hormigón a compresión (Rojas, 2016)

$$\sigma_c(\epsilon) = f'_c \cdot \frac{n \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right)}{n - 1 + \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right)^{nk}} \quad (3.1)$$

Donde  $\epsilon_{c0}$  y  $f'_c$  corresponden a la deformación unitaria y la máxima capacidad del hormigón a compresión respectivamente y los valores de  $n$  y  $k$  son parámetros de ajuste de la curva, los cuales fueron calibrados por Collins y Porasz (Collins y Porasz, 1989). Estos últimos se calculan a partir de las ecuaciones 3.2 y 3.3.

$$n = 0,8 + \frac{f'_c(MPa)}{17} \quad (3.2)$$

$$k = \begin{cases} 1 & \text{si } \epsilon_c < \epsilon_{c0} < 0 \\ 0,67 + \frac{f'_c(MPa)}{62} & \text{si } \epsilon_{c0} < \epsilon_c < 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Para representar el comportamiento de hormigón a tracción se modela con la curva propuesta por Belarvi y Hsu (Belarbi y Hsu, 1994), la cual se divide en 2 secciones, antes y después del agrietamiento. Esta se presenta en la figura 3.5

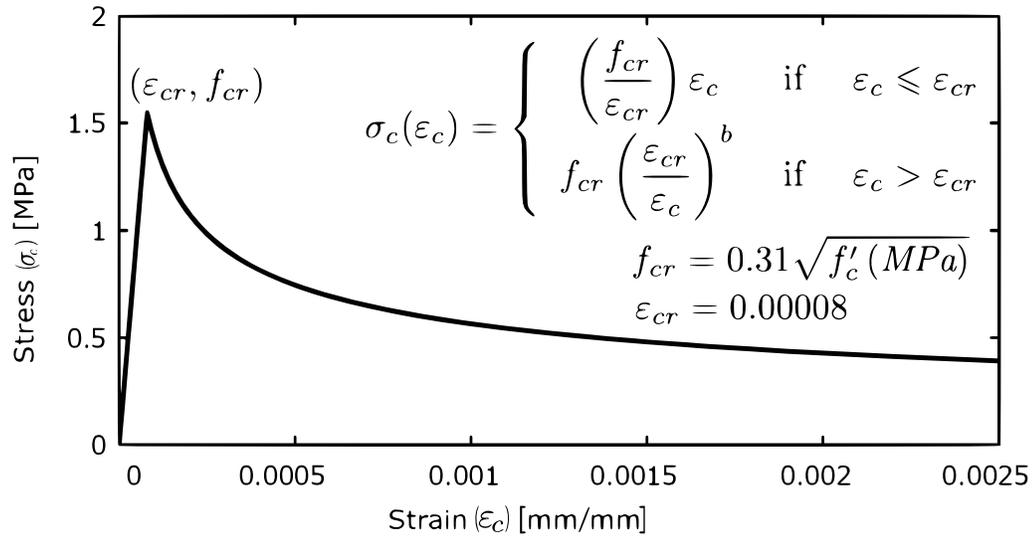


Figura 3.5: Modelo constitutivo hormigón a tracción (Rojas, 2016)

$$\sigma_c(\epsilon_c) = \begin{cases} \left(\frac{f_{cr}}{\epsilon_{cr}}\right) \cdot \epsilon_c & \text{si } 0 < \epsilon_c < \epsilon_{cr} \\ f_{cr} \cdot \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_c}\right)^b & \text{si } 0 < \epsilon_{cr} < \epsilon_c \end{cases} \quad (3.4)$$

$$f_{cr} = 0,31 + \sqrt{f'_c (MPa)} \quad (3.5)$$

$$\epsilon_{cr} = 0,00008 \quad (3.6)$$

Donde  $f_{cr}$  y  $\epsilon_{cr}$  son la resistencia máxima a tracción del hormigón y deformación unitaria al momento de la fisura respectivamente. El parámetro  $b$  varía de acuerdo al estado de confinamiento del hormigón, el cual corresponde a  $b=0.4$  para hormigón confinado y  $b=0.6$  para hormigón no confinado, en donde este último valor de  $b$  fue propuesto por Rojas (Rojas, 2012)

Una vez modelado el comportamiento del hormigón en compresión y tracción se da paso a definir el comportamiento cíclico de este, definiendo zonas de carga y descargas lineales las cuales corresponden a los Módulos de elasticidad del hormigón  $E_{c0}$  y  $0,071E_{c0}$  respectivamente según Palermo y Vecchio (Palermo y Vecchio, 2003). Además, estas zonas dependen de la deformación plástica remanente tanto a la compresión como tracción, las cuales están definidas por las ecuaciones 3.7 y 3.8 respectivamente.

$$\epsilon_p^c = \epsilon_m^c \left(1 - e^{-\left(\frac{\epsilon_m^c}{\epsilon_{c0}^c}\right)^{\alpha_c}}\right) \quad (3.7)$$

$$\epsilon_p^t = \epsilon_m^t \left(1 - e^{-\left(\frac{\epsilon_m^t}{\epsilon_{c0}^t}\right)^{\alpha_t}}\right) \quad (3.8)$$

Donde  $\epsilon_m^c$  y  $\epsilon_m^t$  son las deformaciones máximas en compresión y tracción alcanzadas en el ciclo anterior. Los valores de los coeficientes  $\alpha_c$  y  $\alpha_t$  determinan el nivel de deformación

plástica remanente y corresponden a  $\alpha_c = 0,32$  y  $\alpha_t = 0,08$  según lo propuesto por Rojas (Rojas, 2012).

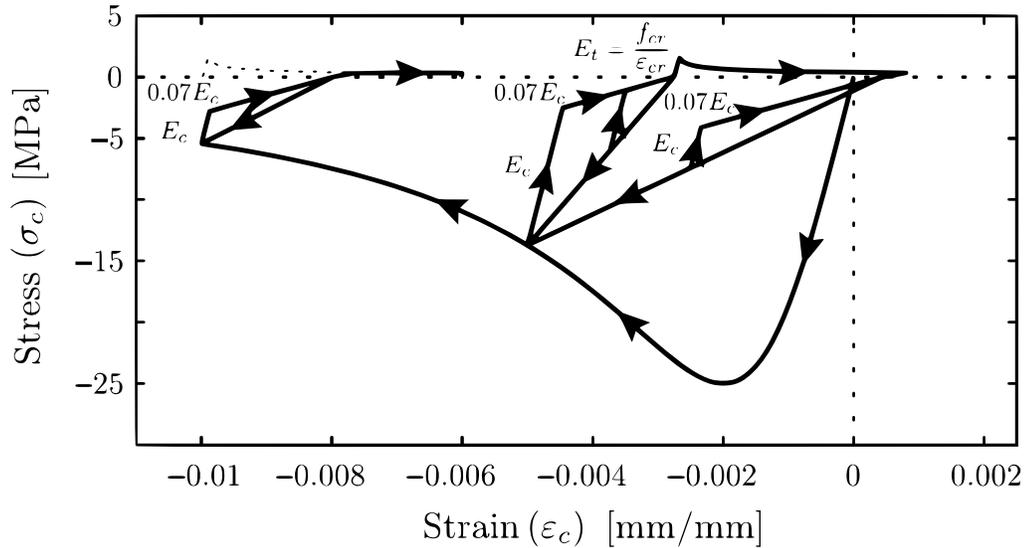


Figura 3.6: Modelo histórico del hormigón (Rojas, 2016)

Adicionalmente, el modelo constitutivo del hormigón incorpora consideraciones que modifican directamente la capacidad en máxima del hormigón a compresión, lo cual se puede apreciar en la figura 3.7. Dentro de estas consideraciones se encuentran el daño por carga cíclica, la degradación de la resistencia en la sección transversal y el efecto del confinamiento en el hormigón.

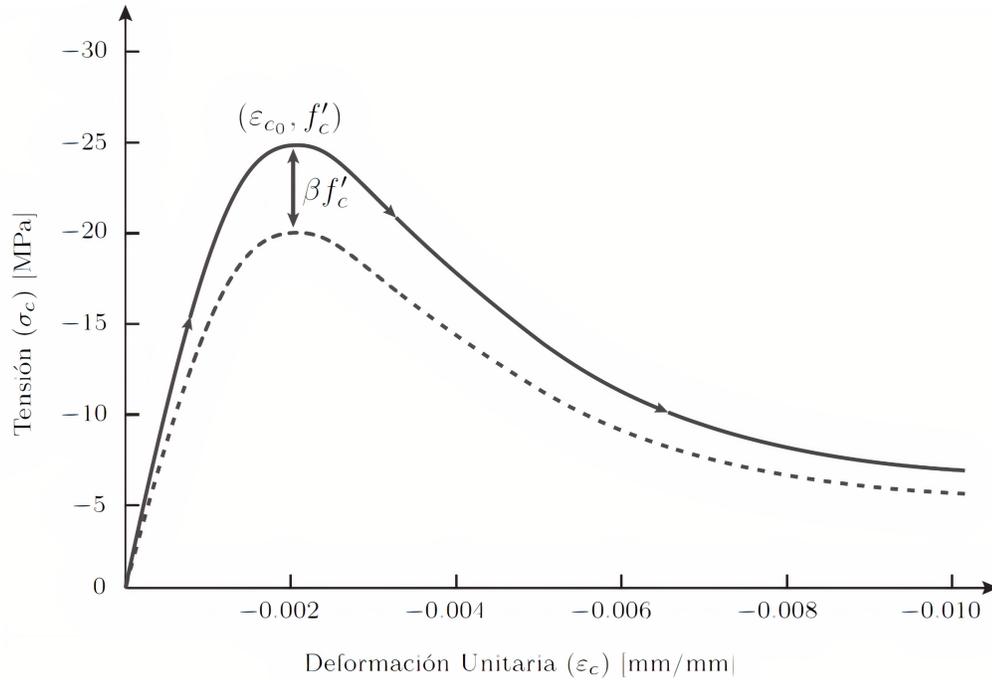


Figura 3.7: Modelo de reducción de la capacidad (Rojas, 2016)

■ **Coefficiente de degradación en la sección transversal  $\beta_s$**

Existe una pérdida de la resistencia del hormigón dado por la tracción producida en la dirección principal perpendicular, la cual es considerada a partir del coeficiente  $\beta_s$  propuesto por Belarbi y Hsu (Belarbi y Hsu, 1994).

$$\beta_s = \frac{k}{\sqrt{1 + k_\sigma \epsilon_t}} \quad (3.9)$$

Donde  $\epsilon_{tracción}$  es la deformación unitaria de tracción en la dirección perpendicular y los coeficientes  $k$  y  $k_\sigma$  corresponden a los definidos por las ecuaciones 3.10 y 3.11 respectivamente.

$$k = \begin{cases} 0,9 & (\text{Belarbi y Hsu, 1994}) \\ 1,0 & (\text{Rojas, 2012}) \end{cases} \quad (3.10)$$

$$k_\sigma = \begin{cases} 250 & \text{para carga secuencial} \\ 400 & \text{para carga proporcional} \end{cases} \quad (3.11)$$

■ **Coefficiente de daño por carga cíclica  $\beta_d$**



Después de ciclos de carga y descarga aplicados en el hormigón, se observa la presencia de daño en este, el cual es considerado en el coeficiente  $\beta_d$  propuesto por Palermo y Vecchio (Palermo y Vecchio, 2003).

$$\beta_d = \frac{1}{1 + \alpha_1 \left( \frac{\epsilon_{rec}}{\epsilon_{c0}} \right)^{\alpha_2}} \quad (3.12)$$

Donde  $\epsilon_{rec}$  es la diferencia entre la deformación unitaria máxima y mínima en un ciclo dado,  $\epsilon_{c0}$  la deformación cuando se alcanza la máxima resistencia a compresión en el hormigón, y los coeficientes  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son los que controlan la magnitud y forma en que se aplica el daño, respectivamente. El valor de estos últimos corresponden a  $\alpha_1 = 0,5$  y  $\alpha_2 = 0,1$  antes del agrietamiento y  $\alpha_1 = 0,6$  y  $\alpha_2 = 0,175$  después del agrietamiento, por compresión en ambos casos.

#### ■ Coeficiente por efecto del confinamiento $\beta_c$

El confinamiento otorgado por la armadura transversal (trabas y/o estribos) en los elementos de borde, genera un aumento de la resistencia a compresión del hormigón, como también una mayor capacidad de deformación (ductilidad). Este efecto se plasma en el coeficiente  $\beta_c$ , el cual fue propuesto por Saatcioglu y Razvi (Saatcioglu y Razvi, 1992).

$$\beta_c = 1 + K \quad (3.13)$$

$$K = \frac{k_1 \cdot f_{le}}{f'_c} \quad (3.14)$$

$$k_1 = 6,7 \cdot f_{le}^{-0,17} \quad (3.15)$$

Donde  $f_{le}$  corresponde a la tensión efectiva de confinamiento y depende de la geometría del elemento, del área del acero en la sección, del espaciamiento en altura de la armadura transversal y de la configuración de trabas y/o estribos.

### 3.3.2. Modelo Constitutivo del Acero

SAFE-TB modela el acero presente en el hormigón armado como una capa de material homogéneo dentro de este, considerando que solo actúa de forma uniaxial en dirección de su orientación. El comportamiento de este acero se configura de acuerdo al modelo propuesto por Menegotto-Pinto y modificado por Filippou, el cual considera el efecto Baushinger y el comportamiento de las barras de acero observado experimentalmente. Este modelo se presenta a continuación en la figura 3.8

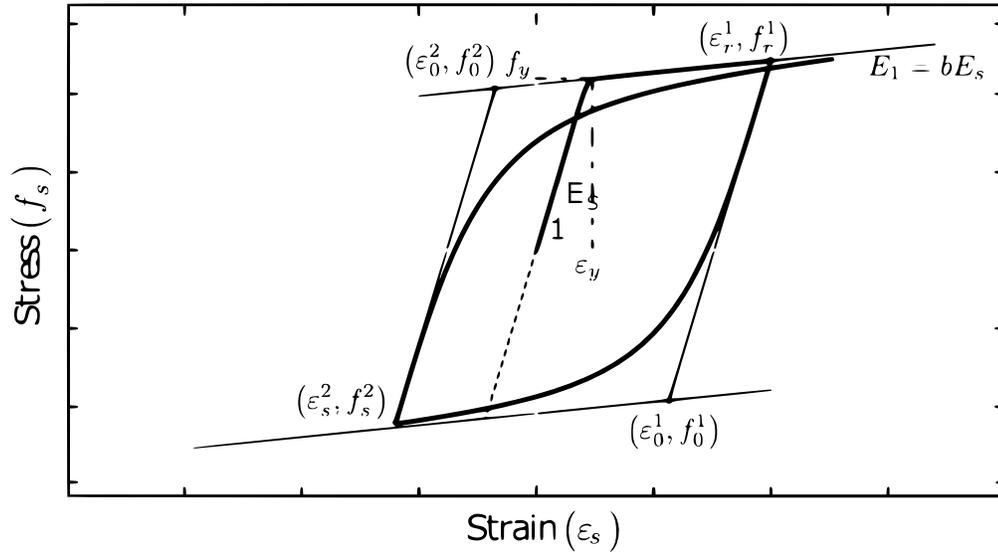


Figura 3.8: Modelo constitutivo del acero propuesto por Manegotto-Pinto (Rojas, 2016)

$$f_s^*(\epsilon_s^*) = b\epsilon_s^* + \frac{(1-b)\epsilon_s^*}{(1 + (\epsilon_s^*)^R)^{1/R}} \quad (3.16)$$

Donde:

$$\epsilon_s^* = \frac{\epsilon_s - \epsilon_r}{\epsilon_0 - \epsilon_r} \quad (3.17)$$

$$f_s^* = \frac{f_s - f_r}{f_0 - f_r} \quad (3.18)$$

Donde las variables  $\epsilon_r$  y  $f_r$  corresponden a la deformación y tensión unitaria en las zonas inversas de la curva,  $\epsilon_0$  y  $f_0$  corresponden a la intersección de las asíntotas y  $R$  es el parámetro que incluye el efecto Bausginger, el cual se define a continuación:

$$R = R_0 - \frac{a_1 \xi}{a_2 + \xi} \quad (3.19)$$

Los valores de las variables fueron calibrada experimentalmente para este modelo y son  $R_0 = 18$ ,  $\alpha_1 = 16.2$  y  $\alpha_2 = 0.15$ . El parámetro  $\xi$  se define como:

$$\xi = \left| \frac{\epsilon_m - \epsilon_0}{\epsilon_y} \right| \quad (3.20)$$

Donde  $\epsilon_m$  es el máximo (o mínimo) valor de la deformación del ciclo carga-descarga,  $\epsilon_0$  el valor actual de deformación y  $\epsilon_y$  la deformación de fluencia de la primera carga.

Además, Belarbi y Hsu proponen una reducción de la tensión de fluencia y un aumento del endurecimiento, por lo cual los valores de  $f_y^{average}$  y  $b_{average}$  se modifican y se presentan a



continuación:

$$f_y^{average} = (0,93 - 2B)f_y \quad (3.21)$$

$$b_{average} = 0,02 + 0,25B \quad (3.22)$$

Donde,

$$B = \frac{1}{\rho l} \left( \frac{f_{cr}}{f_y} \right)^{1,5} \quad (3.23)$$

Donde  $\rho$  es la cuantía de acero de la sección.



## Capítulo 4

# Selección, Escalamiento y Diseño de Muros de Ensayo

En el presente capítulo se describen las propiedades geométricas y mecánicas de la probeta a ensayar. El diseño de esta, es decidido a partir de diversas consideraciones que responden factores numéricos, constructivos y de espacio dentro del laboratorio de ensayo.

### 4.1. Descripción de la Probeta de Ensayo

Dado que este estudio planea continuar investigaciones similares anteriores y ser un punto de comparación para el análisis de muros rectangulares acoplados a losas, es que se decide elegir como muro principal el muro referencial "M0" diseñado y ensayado experimentalmente en estudios previos que abordaron discontinuidades de tipo bandera (Díaz, 2016), (Manríquez, 2016) y (Manríquez et al., 2017) y aberturas en la base (Rivas, 2016) y (G. Muñoz et al., 2017). Este muro rectangular base, el cual en esta memoria es nombrado como "MR1", no presenta ningún tipo de discontinuidad y fue diseñado de acuerdo a estándares nacionales con el fin de ser un espécimen representativo de la realidad constructiva chilena actual.

Adicionalmente al muro principal se diseña un segundo muro "MR2", el cual se acopla mediante 2 losas al muro MR1 con el objetivo de estudiar la capacidad de transferencia de carga entre ambos muros y la respuesta de este sistema mediante un análisis cíclico. El muro MR2 se diseña de acuerdo a las restricciones impuestas por el montaje experimental, el proceso constructivo y los análisis previos.

Ambos muros poseen una viga de carga en el extremo superior de cada uno. En estos elementos se aplican las cargas laterales de tal manera de no provocar daño directo sobre los muros y se usan de apoyo para el sistema de carga vertical. Además, con el objetivo de asegurar el correcto empotramiento de ambos muros y la transferencia adecuada de la carga de ensayo, ambos muros están empotrados en una fundación uniforme, la cual tiene como objetivo anclar las barras longitudinales del muro, anclar la probeta a la losa de reacción y ser la base donde se ubiquen los anclajes para la aplicación de la carga axial.



### 4.1.1. Geometría

El ensayo será realizado en el laboratorio del departamento de ingeniería civil de la Universidad de Chile, el cual impone como restricción principal la altura de la probeta a ensayar. Es así como se definen las dimensiones generales de la probeta, las cuales simulan ser a una escala de 1 a 3. Las medidas del muro MR1 son 2.65[m] de alto, 0.9[m] de largo y 0.15[m] de espesor y las del muro MR2 son 2.35[m] de alto, 0.45[m] de largo y 0.15[m] de espesor. La diferencia en altura entre ambos muros responde a factores constructivos, principalmente al hecho de que en el MR1 se deben instalar unos pasadores a través de la viga de carga con el fin de aplicar la carga lateral cíclica en este muro. Además, el menor ancho del muro MR2, y por consiguiente mayor esbeltez de este en comparación al MR1, se debe a que se busca disminuir la rigidez asociada al segundo muro y así lograr una respuesta más clara de los efectos del acople mediante losas de este sistema estructural.

Los muros MR1 y MR2 se acoplan mediante 2 losas ubicadas a los 0.88[m] y 1.76[m] respectivamente por sobre el pedestal. Ambas poseen las mismas dimensiones generales, 1.85[m] de largo, 0.7[m] de ancho y 0.1[m] de espesor. Adicionalmente, ambos muros se empotran a una fundación de 2.6[m] de largo, 0.7[m] de ancho y 0.4[m] de espesor, y cada uno presenta una viga de carga de 0.3[m] de alto, 0.4[m] de ancho y de largo 0.9[m] y 0.45[m] para los muros MR1 y MR2 respectivamente.

A continuación, en la figura 4.1 se presentan las dimensiones generales de la probeta a ensayar.

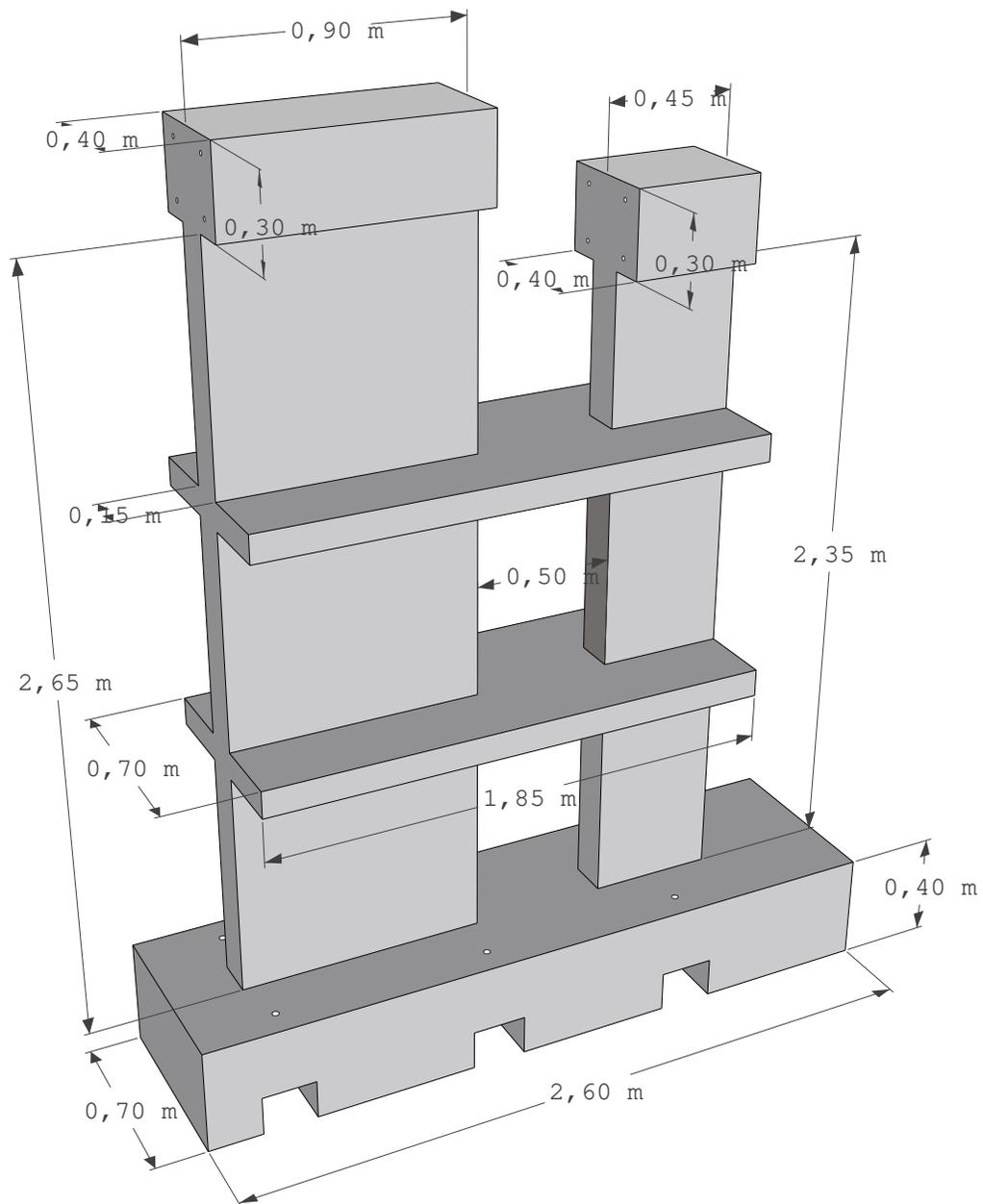


Figura 4.1: Geometría general de la probeta de ensayo

#### 4.1.2. Diseño y Detallamiento

El diseño y detallamiento de los muros fueron realizados de acuerdo a la normativa actual a partir de la norma ACI 318 (ACI Commmitte 318, 2008) junto al decreto 60 (D.S. N°60, 2011), donde este último incorpora modificaciones con respecto al detallamiento de muros



después de lo observado en el terremoto del 27 de febrero del 2010 en Chile.

La carga axial quedó determinada en un 10[%] de la capacidad máxima de la sección a compresión pura. Las propiedades de los materiales se modelan de acuerdo con las características actuales típicas de edificación en Chile (Estay, 2008). De esta manera, la capacidad máxima del hormigón a compresión es de 25 [MPa] y de 420 [MPa] para la fluencia del acero (a excepción de los estribos, en donde la capacidad es de 280 [MPa]).

La probeta MR1 fue diseñada en el estudio de Díaz (Díaz, 2016). En su diseño se consideró una cuantía de un 5[%] para el refuerzo de borde longitudinal, repartido en el 10[%] del largo del muro, siendo ese el elemento a confinar hasta 0.9[m] por sobre el inicio del muro. Estas cuantías y el largo de confinamiento fueron modificadas para este estudio con el fin de asegurar una mejor respuesta del muro frente al acople mediante las losas al muro MR2. El refuerzo longitudinal de borde para el MR1 corresponde a 4 barras  $\phi 16$  lo que se traduce en una cuantía de un 3.57[%] y el confinamiento es con estribos  $\phi 6$  espaciados a 70[mm] en un largo total de confinamiento de 1760[mm] sobre el inicio del muro, lo cual coincide con la altura a la que se encuentra la losa superior de la probeta.

Para este mismo muro, la armadura longitudinal distribuida corresponde a una doble malla con barras  $\phi 8$  espaciadas a 200[mm], mientras que la transversal corresponde también a barras  $\phi 8$  espaciadas a 200[mm], pero con la salvedad de que llegando a la zona de interacción con la viga de carga se disminuye el espaciamiento a 100[mm]. Además, se agregan 8 barras adicionales  $\phi 8$  para la armadura longitudinal en esta zona con el fin de aumentar la capacidad resistente de la unión muro-viga para evitar posibles daños.

El muro MR2, a diferencia del MR1, presenta como refuerzo longitudinal de borde 4 barras  $\phi 12$  lo que se traduce en una cuantía de un 2.01[%] y el confinamiento es el mismo en cuantía y largo que para el MR1. La armadura transversal corresponde a barras  $\phi 8$  espaciadas a 100[mm] a lo largo de todo el muro y la armadura distribuida longitudinal corresponde a 4 barras  $\phi 8$  a excepción de la zona de interacción con la viga, donde se agregan 2 barras  $\phi 8$  adicionales.

En ambos muros MR1 y MR2, la armadura de borde se ubica de tal manera de presentar un recubrimiento de 15[mm] y se empotra en la fundación, junto con la armadura longitudinal central, a una profundidad de 375[mm]. Luego, estas barra se doblan en 90 grados y le continúa un largo de 256[mm]. De igual manera sucede esto en las vigas de carga para ambos muros, con largos de 275[mm] y 256[mm] después del doblez para la armadura longitudinal de borde, y 275[mm] y 128[mm] luego del doblez para la armadura longitudinal distribuida.

Con respecto a las losas, ambas presentan la misma distribución de armaduras, en donde la armadura de refuerzo transversal es una doble malla de barras  $\phi 8$  espaciadas a 100[mm], mientras que la armadura transversal corresponde a una doble malla de barras  $\phi 8$  espaciadas a 120[mm].

A continuación, en la tabla 4.1 se presenta un resumen de las armaduras de refuerzo utilizadas y las cuantías correspondientes en la probeta.



Tabla 4.1: Resumen armaduras y cuantías de refuerzo en la probeta

Sección	Refuerzo	Armadura utilizada	Cuantía $\rho$ [%]
MR1	Borde	4 $\phi$ 16	3,57
	Central Vertical	$\phi$ 8@200[mm]	0,34
	Central Horizontal	$\phi$ 8@200[mm]	0,34
	Confinamiento	$\phi$ 6@70[mm]	0,54
MR2	Borde	4 $\phi$ 12	2,01
	Central Vertical	4 $\phi$ 8	0,89
	Central Horizontal	$\phi$ 8@100[mm]	0,67
	Confinamiento	$\phi$ 6@70[mm]	0,54
LOSAS	Longitudinal	$\phi$ 8@120[mm]	0,86
	Transversal	$\phi$ 8@100[mm]	1,03

A continuación se presenta el detalle en elevación y corte por muro de la probeta a ensayar.



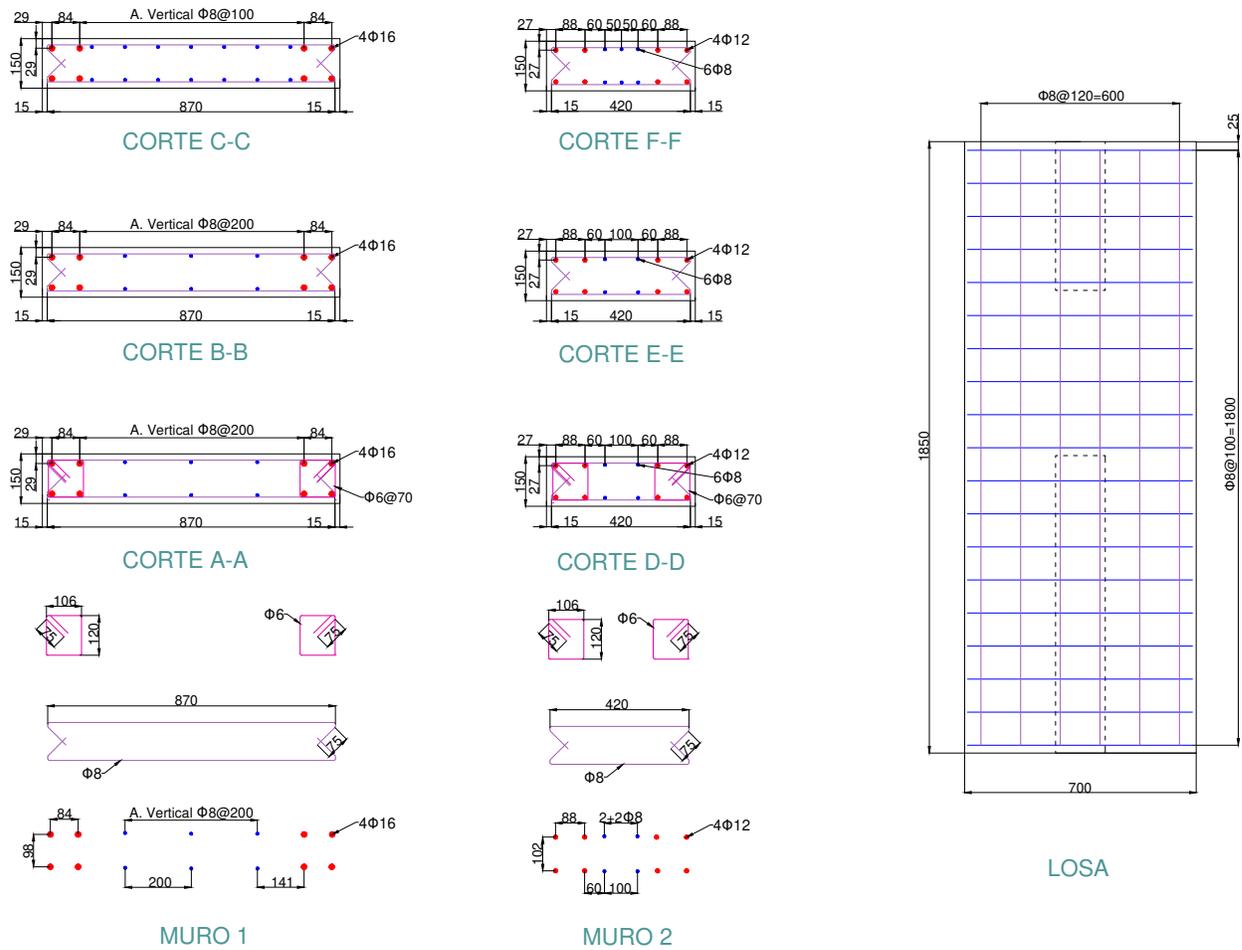


Figura 4.3: Corte de muros y Plano de losas

Adicionalmente, la fundación y las vigas de carga fueron diseñadas de tal forma de que trabajaran de manera elástica durante los ensayos. La detallamiento y disposición de armaduras de estas se presenta en el Anexo 1.



# Capítulo 5

## Estudios Analíticos

### 5.1. Introducción

El presente capítulo abarca el desarrollo de modelos numéricos de la probeta a través de la plataforma de elementos finitos SAFE-Toolbox. Aquí se expone como esta fue representada al describir su geometría, los materiales presentes (junto con sus leyes constitutivas), la aplicación de cargas en esta para su posterior análisis y describir así, finalmente, su comportamiento frente una carga cíclica lateral a nivel de techo (aplicada en las vigas de carga). Todo lo anterior para comprender a cabalidad la forma en que se realizó el modelado y así tener claro sus alcances y limitaciones.

### 5.2. Geometría y Cuantías

Se utilizó el programa ETABS® con el objetivo de generar el mallado o *Mesh* del modelo a analizar. Esta fue elegida iterando una serie de configuraciones con el fin de representar de la mejor manera la geometría y la disposición de la instrumentación en los muros reales. De esta manera, la distribución de elementos, y consigo su mallado, están condicionados por la configuración de los diferentes refuerzos en los muros, losas y vigas de la probeta. De esta manera, se presentan 12 zonas de interés las cuales son definidas en la Figura 5.1, las cuales se explican a continuación.

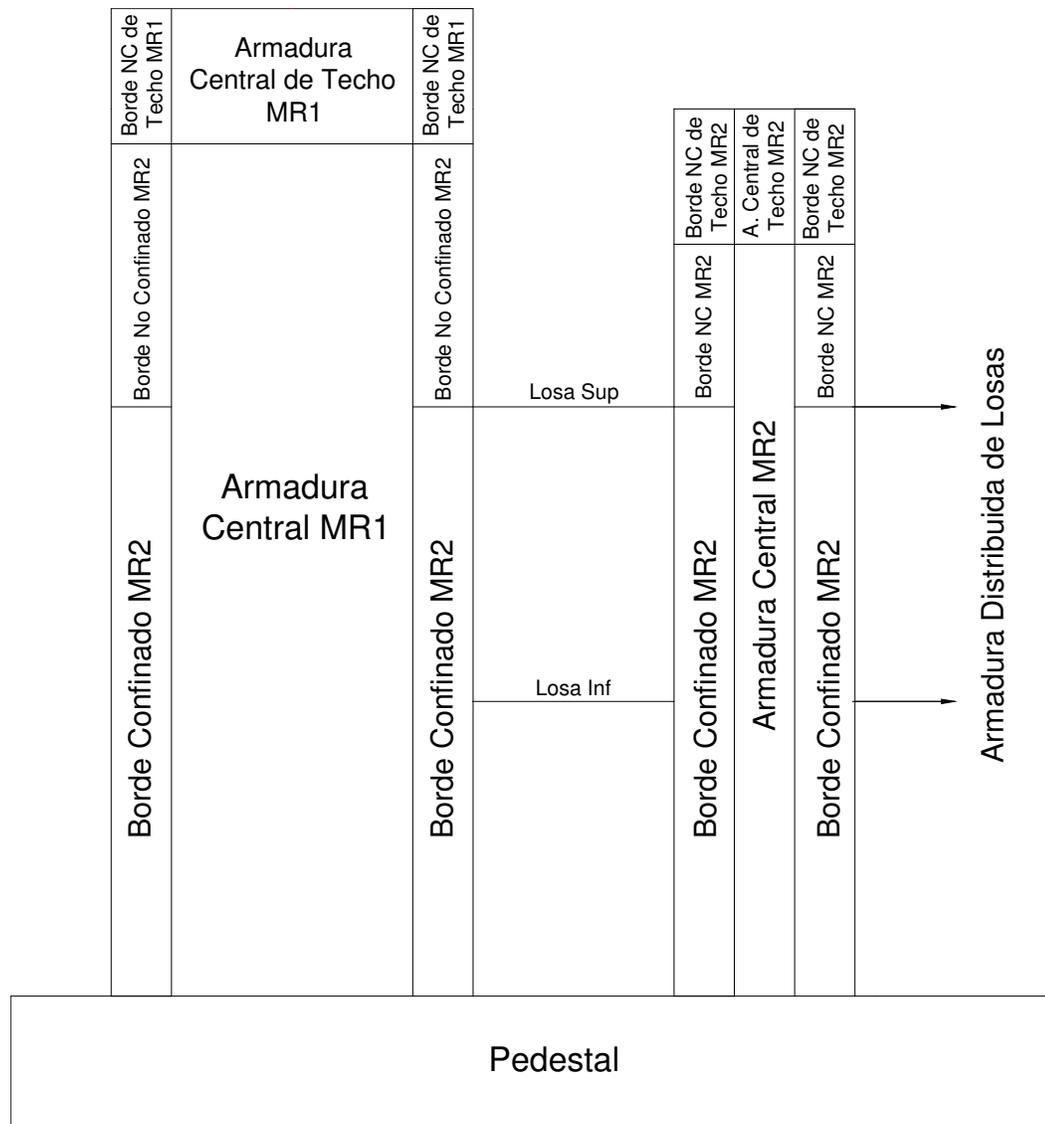


Figura 5.1: Distribución de armaduras en zonas de interés

- **Armadura Central MR1:** Esta zona está constituida por hormigón no confinado y presenta la armadura tanto transversal como longitudinal del muro MR1, distribuida en doble malla.
- **Borde Confinado MR1:** Esta zona, a diferencia de la mayoría, está constituida por hormigón confinado, lo cual se debe al confinamiento que entregan los estribos a la armadura de borde, con una extensión tal que llegue desde la base del muro MR1 hasta la losa superior de la probeta. Estos estribos  $\phi 6$  generan una cuantía adicional en la dirección horizontal la cual se suma a la cuantía trasversal proveniente de la doble malla de la armadura central MR1.
- **Borde No Confinado MR1:** Ubicándose sobre la losa superior y llegando hasta la viga de carga, esta zona está constituida por hormigón no confinado. Al momento de



llegar al nivel de techo esta zona cambia debido a que la armadura central también se ve modificada.

- **Armadura Central de Techo MR1:** Esta zona, al igual que la armadura central MR1, está constituida por hormigón no confinado. Sin embargo, la principal diferencia con esta es que la armadura, tanto transversal como longitudinal, disminuye su espaciamiento y con esto aumenta su cuantía. Cabe mencionar que este aumento se produce con el objetivo de generar una correcta transmisión de la carga entre la viga el muro MR1.
- **Borde No Confinado de Techo MR1:** Similar al borde no confinado MR1, se diferencia en que al variar la armadura horizontal en la zona central, se produce también una variación de la armadura transversal de borde. Se debe considerar también el cambio de sección desde el muro MR1 a la viga de transferencia.
- **Armadura Central MR2:** Al igual que la armadura central MR1, esta zona está constituida por hormigón no confinado y presenta la armadura tanto transversal como longitudinal del muro MR2, distribuida en doble malla. Las cuantías varían de acuerdo a la sección y al menor espaciamiento entre barras con el fin de asegurar un buen comportamiento frente al análisis cíclico.
- **Borde Confinado MR2:** Similar al borde confinado MR1, esta zona lleva estribos  $\phi 6$  y tiene una extensión tal que llegue desde la base del muro MR2 hasta la losa superior de la probeta.
- **Borde No Confinado MR2:** Al igual que para el borde no confinado MR1, esta zona se ubica sobre la losa superior y llega hasta la viga de carga.
- **Armadura Central de Techo MR2:** Constituida por hormigón no confinado, esta zona presenta la misma armadura transversal que en el resto del muro MR2 pero se agregan dos barras adicionales  $\phi 8$  a la armadura longitudinal.
- **Borde No Confinado de Techo MR2:** De igual manera que el borde no confinado MR2, esta zona está constituida por hormigón no confinado y se diferencia principalmente en el cambio de sección desde el muro MR2 a su viga de transferencia.
- **Armadura Distribuida Losas:** Esta zona, constituida por hormigón no confinado, presenta la armadura transversal y longitudinal de ambas losas (superior e inferior) distribuida en una doble malla.
- **Pedestal:** La fundación o pedestal se modela con hormigón elástico por simplicidad. Esto, considerando que estudiar esta zona no es el foco principal de la presente investigación y no presentará mayores variaciones en el análisis.

Cabe mencionar que si bien las vigas de carga para análisis de este tipo se podrían modelar con hormigón elástico al igual que la fundación, se busca tener una respuesta más real en esta zona, por lo cual estas se diseñan tal como fue mencionado previamente con la armadura correspondiente, con el fin asegurar una adecuada transferencia de carga entre viga-muro.



### 5.3. Modelamiento

La generación del *Mesh* a través de la plataforma SAFE Toolbox está condicionado a las zonas previamente presentadas, donde los elementos finitos deben ser lo suficientemente pequeños para representar de manera correcta el real comportamiento de la estructura a ensayar. No obstante, si los elementos finitos son demasiado pequeños esto conllevará a problemas con la degradación del material, además de que se requerirá una excesiva capacidad computacional de análisis. Es por esto, que se decide que las dimensiones generales de los elementos se definen entre los 75[mm] y 150[mm] tanto en alto como ancho, donde la menor dimensión corresponde al ancho de los elementos en el muro MR2 (debido a las menores dimensiones de este muro), y a los elementos de borde del MR1, esto último con el objetivo que existan a lo menos dos elementos en esa zona con el fin de asegurar un buen comportamiento y convergencia del modelo. Considerando todo lo anterior, la distribución horizontal de los elementos corresponden a elementos de ancho 75[mm] para los elementos de borde de ambos muros y los de centro del muro MR2. y ancho 150[mm] para los elementos de centro del muro MR1 y los elementos de losa entre ambos muros. Por otro lado, la distribución vertical corresponde en su mayoría a elementos de 150[mm] de largo, buscando cumplir la relación ancho-alto cercano a uno para los elementos de la zona central del muro MR1. Esto último, si bien no es necesario, es decidido con el fin de reducir problemas de convergencia y compatibilidad de elementos al momento de realizar el análisis. Finalmente el mallado de las losas se organiza de acuerdo al mallado de las secciones de muro, buscando cumplir la misma relación mencionada anteriormente.

En las Figuras 5.2 y 5.3 se presenta el mallado generado para el posterior análisis de la probeta.

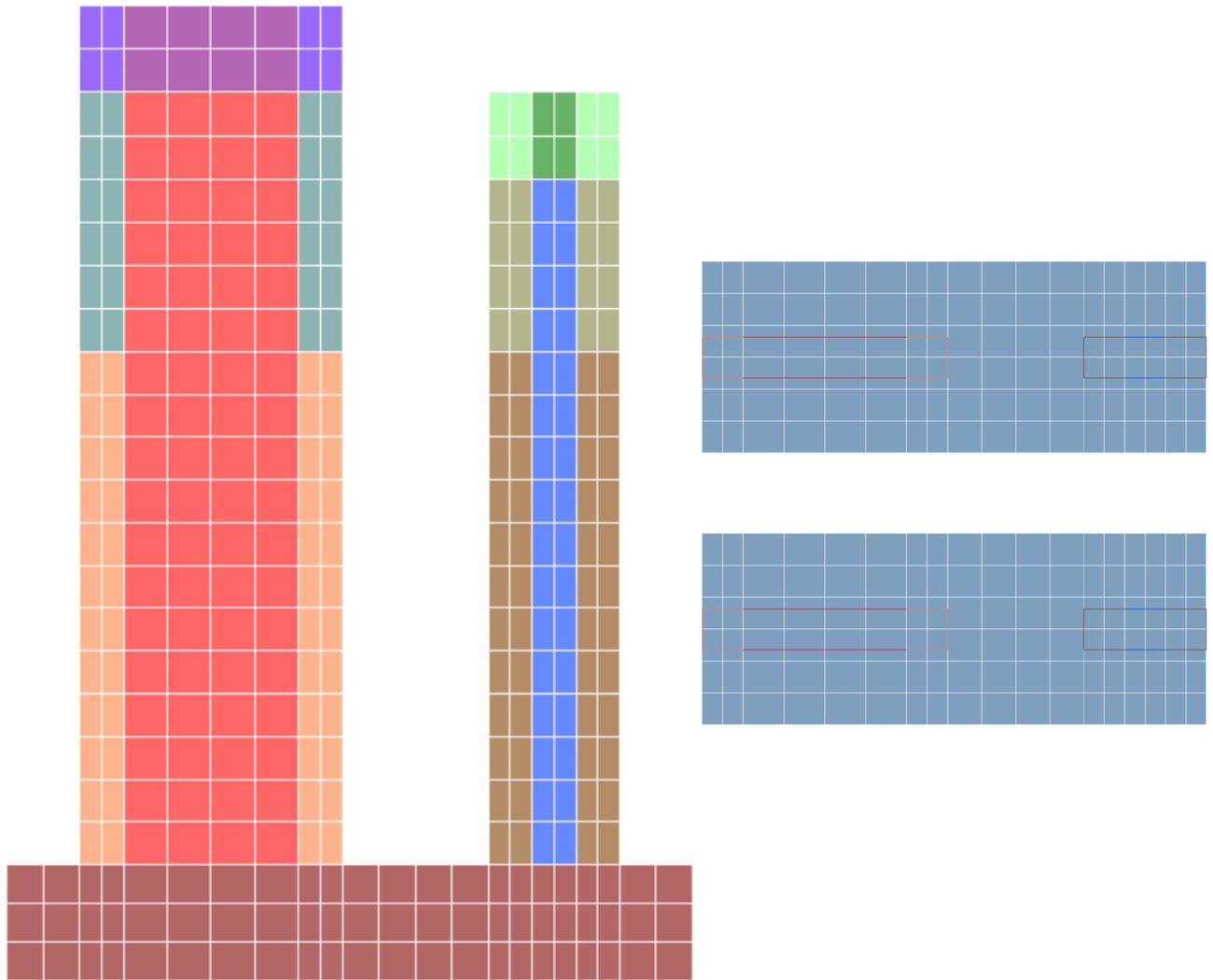


Figura 5.2: Mesh Probeta

Donde:

- |  |   |
|--|---|
| <b>1</b> : Pedestal                        | <b>7</b> : Armadura distribuida de Losas    |
| <b>2</b> : Borde Confinado MR1             | <b>8</b> : Borde Confinado MR2              |
| <b>3</b> : Armadura Central MR1            | <b>9</b> : Borde No Confinado MR2           |
| <b>4</b> : Borde No Confinado MR1          | <b>10</b> : Armadura Central MR2            |
| <b>5</b> : Borde No Confinado de Techo MR1 | <b>11</b> : Borde No Confinado de Techo MR2 |
| <b>6</b> : Armadura Central de Techo MR1   | <b>12</b> : Armadura Central de Techo MR2   |

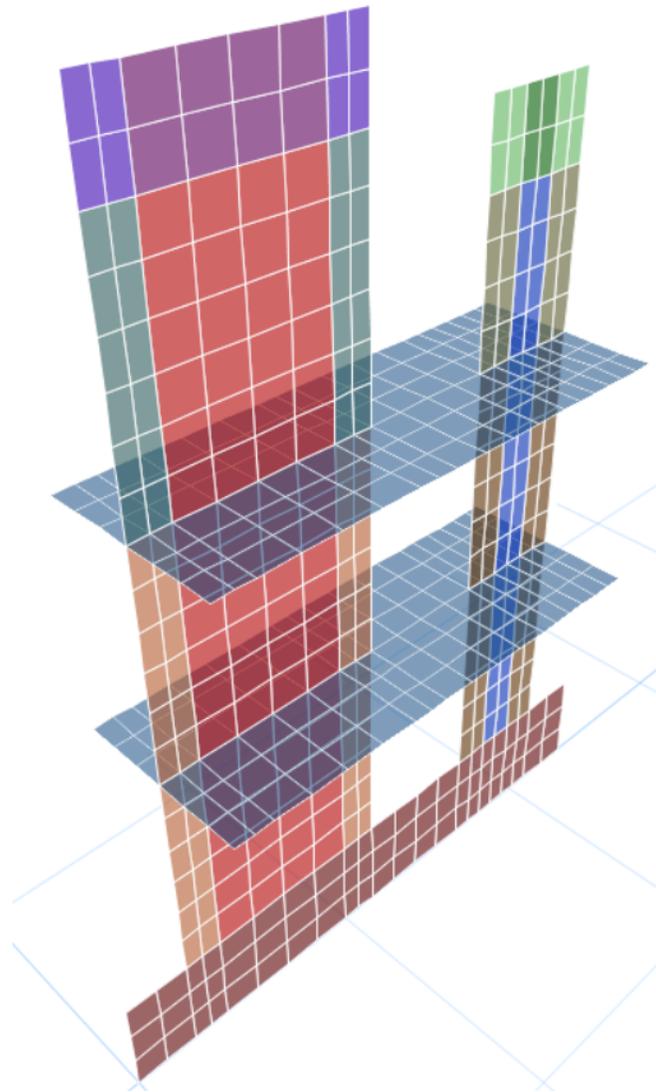


Figura 5.3: Vista 3D Mesh Probeta

A continuación, en la tabla 5.1, se presenta el resumen de las cuantías y elementos finitos en cada una de las secciones previamente mencionadas.



Tabla 5.1: Resumen de cuantías y elementos finitos por sección

Sección	$\rho_{longitudinal}$	$\rho_{transversal}$	N° Elementos
Armadura Central MR1	0.34 [%]	0.34 [%]	72
Borde Confinado MR1	3.57 [%]	0.87 [%]	48
Borde No Confinado MR1	3.57 [%]	0.34 [%]	24
Armadura Central de Techo MR1	0.71 [%]	0.59 [%]	8
Borde No Confinado de Techo MR1	2.01 [%]	0.59 [%]	8
Armadura Central MR2	0.89 [%]	0.67 [%]	32
Borde Confinado MR2	2.01 [%]	1.21 [%]	48
Borde No Confinado MR2	2.01 [%]	0.67 [%]	16
Armadura Central de Techo MR2	0.84 [%]	0.59 [%]	4
Borde No Confinado de Techo MR2	1.42 [%]	0.59 [%]	8
Armadura Distribuida Losas	0.86 [%]	1.03 [%]	108
Pedestal (Hormigón Elástico)	$f_c=45[\text{Mpa}]$ y $E_c=31529[\text{Mpa}]$		66

Luego de determinar la geometría, distribución y mallado por zonas de los elementos finitos, se continúa con la definición de los parámetros con el objetivo de caracterizar los materiales utilizados para modelar la probeta de ensayo.

En la tabla 5.2 se presentan las principales variables definidas para el acero y hormigón en el capítulo de modelación numérica, con las cuales se llevará a cabo el análisis.



Tabla 5.2: Propiedades utilizadas para la modelación del espécimen

Parámetro	Valor
$\rho$	$2.5 \cdot 10^{-9} [N/mm^3]$
$\nu$	0.2
$f_y$	495.9 [Mpa]
$E_s$	198800 [Mpa]
$f'_c$	33 [MPa]
$\epsilon_{c0}$	0.004 [mm/mm]
$E_{c0}$	31529 [MPa]
$E_{c_{conf}}$	0.0073 [mm/mm]
$K_{conf}$	1.16
$f_{cr}$	1.78 [MPa]
$\epsilon_{cr}$	0.00008 [mm/mm]
$\alpha_1$	0.02
$\alpha_2$	0.1
$\alpha_{1_{conf}}$	0.02
$\alpha_{2_{conf}}$	0.1
$\alpha_c$	0.32
$\alpha_t$	0.08
Carga Axial	361.5 [kN]
Recubrimiento	15[mm]

Una vez generado el modelo de la probeta a ensayar, se aplican las cargas a considerar en el análisis con el objetivo de conocer el comportamiento dinámico de los muros. Estas cargas son de peso propio y sobrecarga, representadas por una carga axial en compresión generada por los gatos y una carga lateral aplicada por el actuador hidráulico para generar la carga cíclica. Tanto las cargas verticales como las laterales son aplicadas distribuidamente a los nodos de las dos capas superiores de la viga de carga del primer muro, sin considerar los nodos de los extremos para no tener problemas de convergencia. Esto da un total de 14 nodos a cargar, los cuales se presentan en la figura 5.4 a continuación.

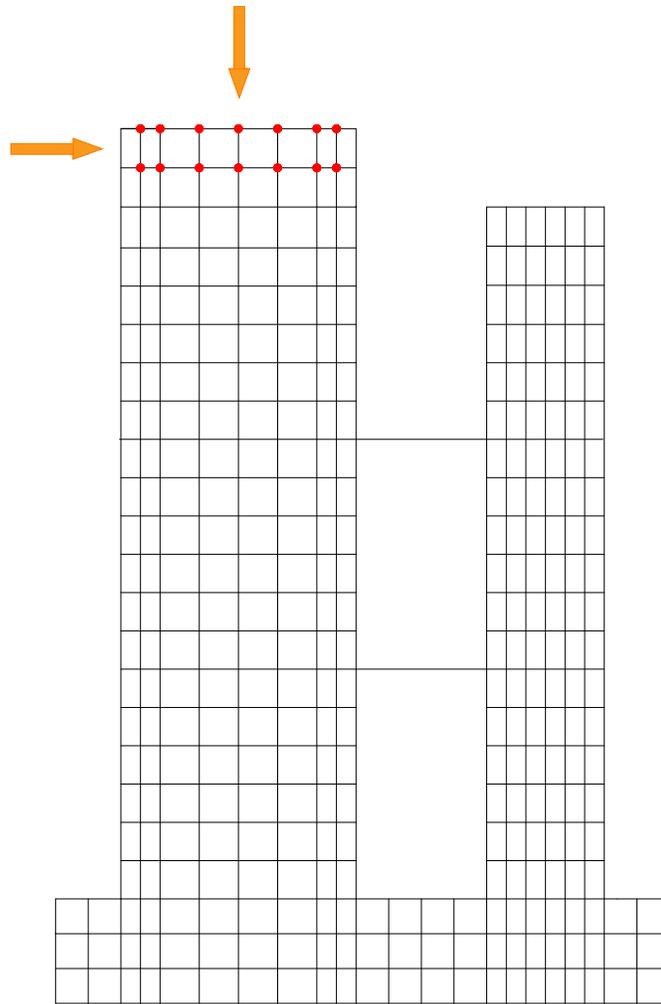


Figura 5.4: Nodos de aplicación para cargas axial y lateral

Para la carga vertical se ha considerado el peso propio, además de un porcentaje de la carga muerta y sobrecarga, teniendo en consideración la carga adicional que posee la estructura al ser parte de un edificio. El cálculo del peso propio de la estructura se ha realizado estimando un valor de  $2500 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  para la densidad del hormigón y de  $9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$  para la aceleración de gravedad aplicado a todos los elementos de modelo. La carga muerta y la sobrecarga se estima a partir de la Ecuación 5.1

$$P = 0.1A_g f'_c \quad (5.1)$$

Donde el factor 0.1 resulta de una estimación de todas las cargas verticales a la cual se somete la estructura,  $A_g$  corresponde al área de la sección transversal y  $f'_c$  a la resistencia máxima del hormigón a compresión. Esta carga axial agregada corresponde a  $36863 \text{ [Kgf]}$  distribuidos en los 14 nodos cargados.

Por otro lado, para la carga horizontal se realiza primero un análisis pushover y posteriormente uno cíclico. Estos análisis son mediante control de desplazamiento, en donde se le

aplica la fuerza necesaria a la estructura para que logre el desplazamiento solicitado (deriva), con lo cual se obtiene el comportamiento histórico del modelo. De esta manera, el actuador se programa para generar los desplazamientos cíclicos en la probeta, en donde cada ciclo se define con un peak de extensión y contracción en el movimiento del actuador, volviendo a su posición de origen. A continuación, en la Figura 5.5 se presenta el drift de carga para el ensayo.

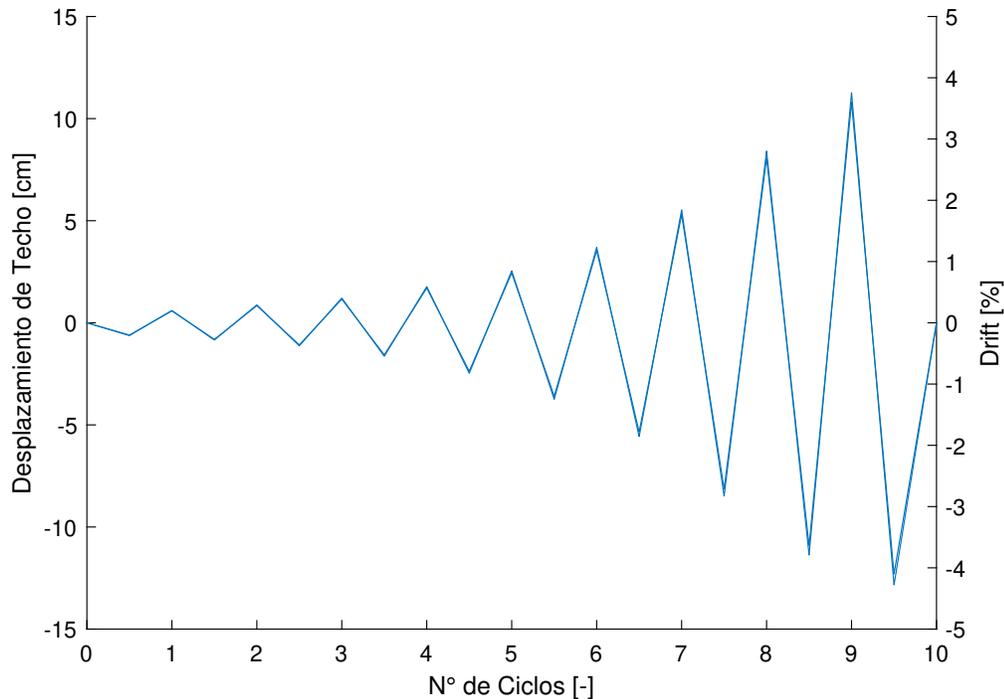


Figura 5.5: Drift de carga establecido para el ensayo

Finalmente se define al nodo central de la capa superior como el de control para desplazamiento, con el cual se verificará si el desplazamiento de ese nodo cumple con los niveles de deriva configurados para el análisis.

## 5.4. Algoritmo de solución y método de convergencia

Para la resolución del análisis cíclico se ha utilizado el método de Newton-Raphson, el que se basa en encontrar aproximaciones de las raíces de una función real realizando un método iterativo, para lo cual, se comienza con un valor inicial suficientemente cercano a la raíz buscada. Para la convergencia de este método se ocupa el test de máxima razón de desplazamiento incremental, el cual tiene como objetivo aproximar la no linealidad mediante funciones lineales definidas en intervalos precisos, comprobando así la convergencia del resultado en el

paso actual utilizando una tolerancia específica entre los componentes del desplazamiento anterior y actual. En caso de no cumplirse el equilibrio, es necesario modificar ciertos parámetros y con estos cambios procesar nuevamente el modelo, lo cual puede aumentar el tiempo de análisis, siendo también posible modificar las dimensiones de los elementos, lo que varía la cantidad de ecuaciones a resolver y con esto los tiempos de solución (Henríquez, 2019).

## 5.5. Parámetros de Estudio

### 5.5.1. Esfuerzos Transmitidos por las Losas

Tras la aplicación de la carga lateral el MR1 se generan esfuerzos de corte y flexión, los cuales se transmiten al muro MR2 mediante ambas losas.

El corte ejercido en los muros por las losas se obtiene calculando la suma de la carga axial de todo los elementos que se encuentran justo debajo de la losa de uno de los muros y luego realizando la diferencia de carga axial entre el piso inferior y el piso superior. Esto se puede apreciar a continuación en la Figura 5.6.

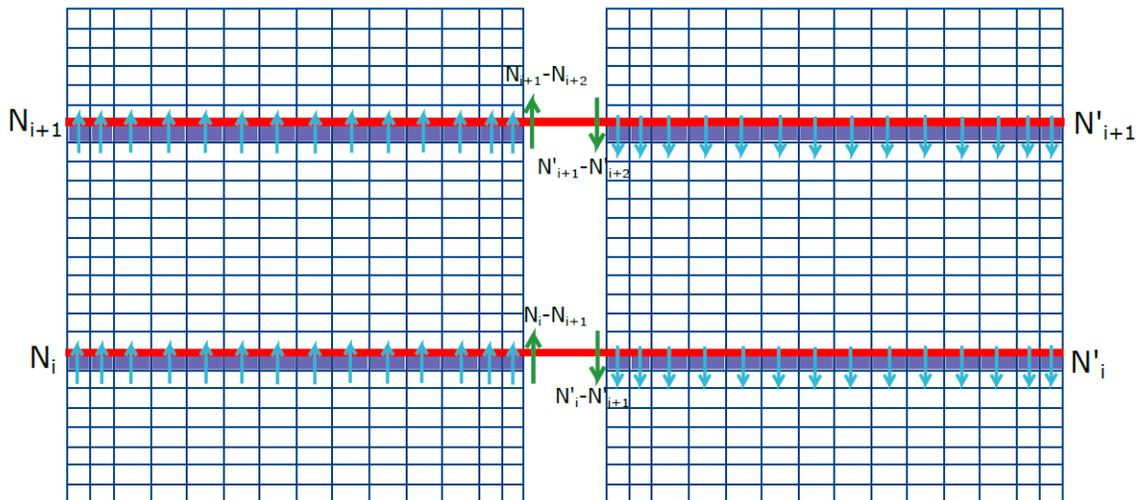


Figura 5.6: Corte Transferido (Henríquez, 2019)

Por otro lado, el cálculo de la concentración de momento se ha realizado seleccionando elementos ubicados en las cercanías de ambos muros. Para estos elementos se ha determinado el esfuerzo por unidad de ancho de cada uno de estos con lo cual el momento total transferido a la losa se obtiene calculando la integral de esta distribución. Esto se puede observar a continuación en la Figura 5.7

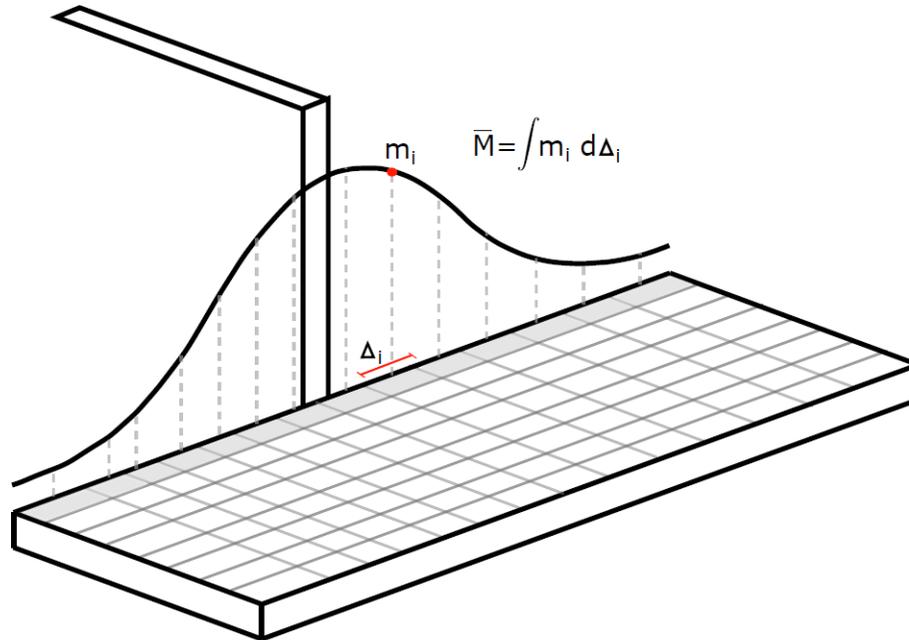


Figura 5.7: Momento Transferido (Henríquez, 2019)

### 5.5.2. Respuesta del Sistema de Muros Acoplados frente a cargas cíclicas

Es de vital importancia conocer las diferencias y similitudes del comportamiento de muros entre un sistema de muros acoplados y uno de muros aislados.

En particular, tras la aplicación de un solicitación lateral en un muro aislado, este transmite esfuerzos de flexión a la base del muro (en este análisis no se toma en cuenta el corte, solo la flexión ya que se espera una falla dúctil). De esta manera, la resistencia máxima en este tipo de muros solo dependerá de la capacidad a la flexión de su sección basal.

Por otro lado, en un sistema de muros acoplados, la solicitación es transmitida como esfuerzo de flexión en los muros al igual que para el caso anterior, pero con la diferencia de que el acople dado por las losas transmite esfuerzos de corte de un muro al otro como fuerza axial (compresión en un muro y tracción en otro), lo que genera un momento en la base tal como se aprecia en la Figura 5.8.

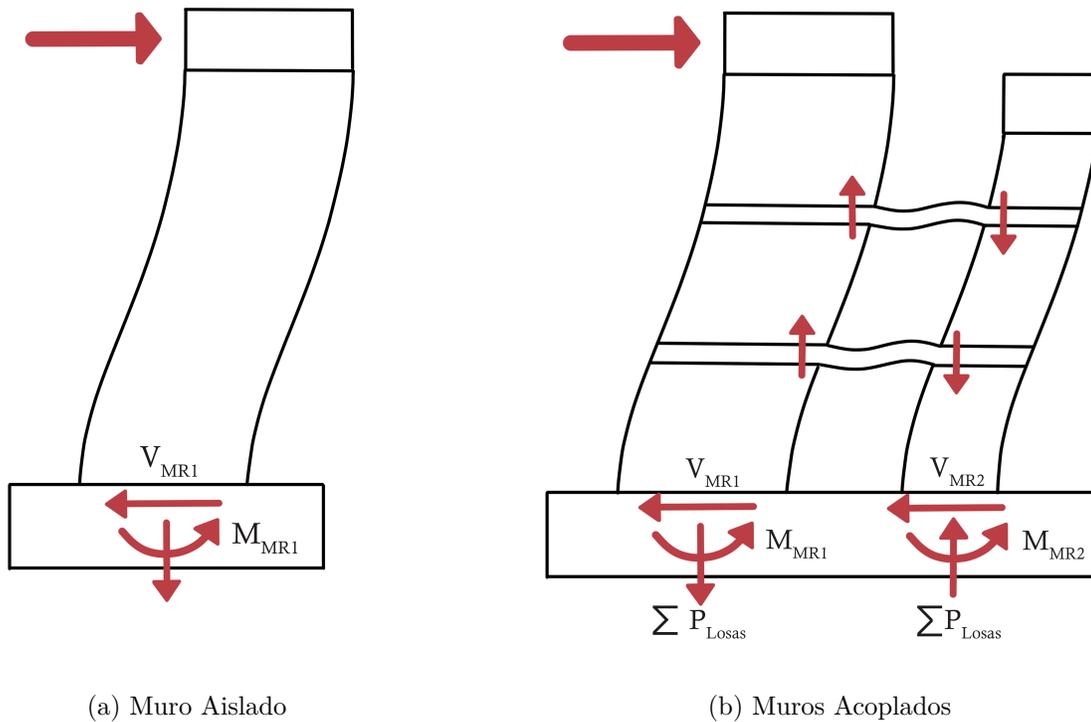


Figura 5.8: Esfuerzos en Muros Aislados y Acoplados

A partir de lo anterior, el momento se puede estimar según la expresión 5.2 a continuación.

$$M_t = M_{MR1} + M_{MR2} + N \cdot L \quad (5.2)$$

En donde  $M_{MR1}$  y  $M_{MR2}$  corresponden al momento soportado por los muros MR1 y MR2 respectivamente,  $N$  a la fuerza axial que se genera en la base de cada uno de los muros debido al acoplamiento (la cual posee la misma magnitud para cada muro, pero en diferente sentido) y  $L$  es el brazo que se forma entre los centros de gravedad de las fuerzas que actúan en cada muro.

Debido a lo anterior, el comportamiento del sistema mejora al acoplar dos muros ya que por el momento inverso generado por el acoplamiento la resistencia de cada muro aumenta (en relación a la que tendría cada muro aislado por sí mismo). De esta manera, el acoplamiento de dos muros permite en el sistema una gran ductilidad y capacidad de disipación, siempre y cuando no dejando de lado la gran rigidez que caracteriza a los muros aislados para así controlar las deformaciones.

### 5.5.3. Grado de Acoplamiento

El grado de acoplamiento en un sistema de muros acoplados permite evaluar el nivel de adhesión de los muros a la losa del pasillo en un edificio de gran altura. Este viene determinado según la carga que es capaz de resistir la losa y depende diversas variables que se mencionan



más adelante.

Este parámetro, el cual ha sido objeto de estudio de varios investigadores, corresponde al más importante en un sistema estructural de muros acoplados, donde la fórmula actualmente aceptada y utilizada se basa en en la proporción de resistencia al volcamiento producto del acoplamiento, la cual se define en la expresión utilizada por (Paulay, 2002) 5.3.

$$\beta = \frac{T \cdot L}{M_{MR1} + M_{MR2} + T \cdot L} \quad (5.3)$$

Donde T corresponde a la fuerza axial que aportan la losas, L a la distancia entre los centros geométricos de los muros y  $M_{MR1}$  junto con  $M_{MR2}$  a los momentos resistentes generados en las bases de cada uno de estos.

Un mayor acoplamiento provoca una mayor resistencia pero disminuye la capacidad de disipación del sistema, esto ya que este funciona menos como un marco y más como muro aislado. Por otro lado, tener un acoplamiento menor, genera que ambos muros funcionen de forma más similar a dos muros aislados, con una menor resistencia global en comparación al sistema acoplado.

## 5.6. Análisis y Resultados

Una vez determinada la geometría, materiales, mallado y la aplicación de cargas en el modelo, ya se está en condiciones de realizar el análisis cíclico. Este se realizará para 3 casos en particular: El caso para MR1 aislado, el caso para MR2 aislado y el caso de mayor relevancia, el del modelo principal, en el cual ambos muros se encuentran acoplados por losas. Lo anterior con el fin de comparar la respuestas de los diversos casos y así entender de mejor manera la influencia que tienen las losas en este sistema estructural.

Para el correcto estudio de la respuesta, tanto en ambos muros como en las losas, se definen franjas de elementos finitos correspondientes a diferentes niveles según altura en ambos muros. Cada uno de los elementos de estas franjas obtendrán respuestas de esfuerzos axiales, cortes y momentos en cada uno de sus puntos de cuadratura y, seleccionando tres puntos de cuadratura por elemento, los esfuerzos son sumados para estudiar la respuesta total de sección analizada. Estas franjas, a las que se asignan números como tags para identificarlas de mejor manera, se presentan en la Figura 5.9. Cabe mencionar que, sin pérdida de generalidad, se definirá como sentido positivo del análisis al cual el muro MR1 sea desplazado hacia el muro MR2 y como sentido negativo al cual la probeta vaya en sentido inverso, es decir, de derecha a izquierda dentro de los gráficos presentes en este trabajo.

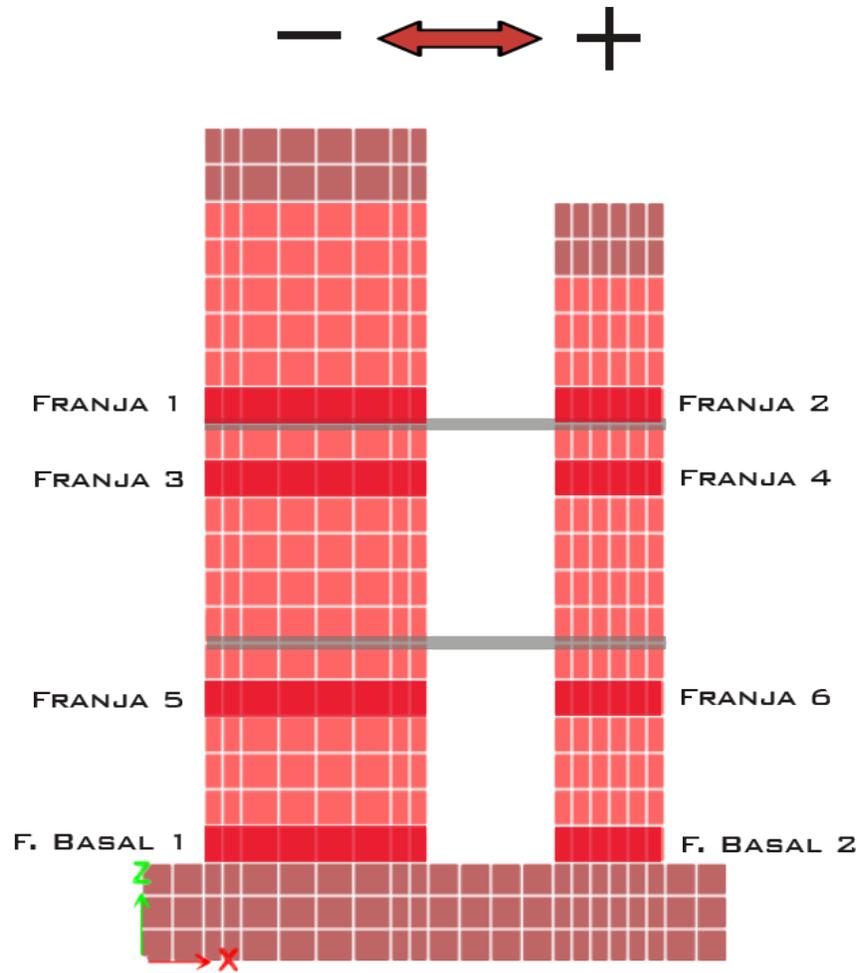


Figura 5.9: Definición de Franjas a analizar

Tal como se puede apreciar en la figura anterior, se definen 8 sets de franjas principales donde se focalizará el estudio del comportamiento de ambos muros. Estas son enumeradas de arriba a abajo y de izquierda a derecha, en donde las franjas 1 y 2 presentarán los esfuerzos en los muros antes de que sea transmitido el corte a través de la losa superior, las franjas 3 y 4 junto con las 5 y 6 presentarán como varían los esfuerzos principales una vez transmitidos mediante la losa superior e inferior respectivamente, tomando en consideración que no se toman las franjas presentes directamente bajo las losas con el objetivo de evitar problemas de errores asociados debido a la cercanía de estas. Finalmente, en las franjas basales 1 y 2 se cuantificarán los esfuerzos presentes en las bases de ambos muros justo sobre la fundación.

Cabe mencionar que con respecto a los puntos de cuadratura, los cuales son los presentados en el capítulo de modelación numérica, en cada franja se tomaron las respuestas de solo 3 de estos puntos por elemento finito, las cuales fueron variadas según la franja con el fin de obtener una respuesta más precisa del comportamiento de la probeta. De esta manera, para las franjas 1, 2, basal 1 y basal 2, se consideran los puntos de cuadratura 1, 2 y 3, correspondientes a la primera fila inferior para cada elemento, mientras que en las franjas 3, 4, 5 y 6, se consideran los puntos de cuadratura 7, 8 y 9 correspondientes a la fila superior

de cada elemento finito.

Adicionalmente, tanto en la losa superior como inferior se definen 4 sets de franjas a analizar, las cuales son perpendiculares a las franjas definidas en los muros. Las franjas 1 y 2 corresponden a las que están adyacentes a los elementos de borde de ambos muros, mientras que las franjas 3 y 4 corresponden a las que están en la zona central de la losa en el área entre estos. Se establece esta distinción con el fin de estudiar la variación de los esfuerzos dependiendo de la zona a analizar y así determinar en que medida la elección de esta influye en los resultados.

En la Figura 5.10 se presenta un esquema de esto.

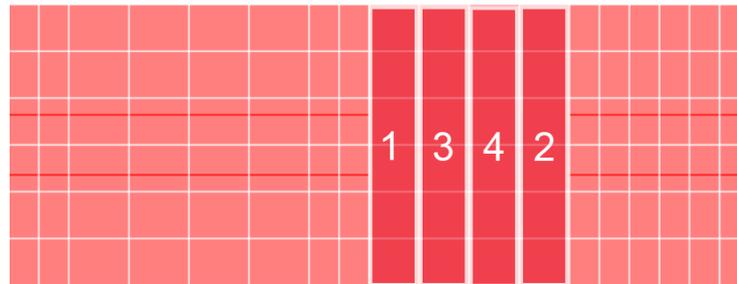


Figura 5.10: Definición de franjas a analizar en losas

### 5.6.1. Muro Rectangular MR1 Aislado - Caso Base

Al hacer el análisis cíclico para el muro MR1 Aislado, se pueden capturar los diversos tipos de esfuerzos presentes en este, donde en particular se presta especial atención a los generados en la base del muro, zona en donde los esfuerzos son máximos. A partir de los resultados obtenidos se puede observar en la Figura 5.11 que la carga axial basal se mantiene constante durante el transcurso del análisis cíclico. Esto cumple con lo esperado, considerando en todo momento la carga axial aplicada en la viga de transferencia y el peso propio de este muro.

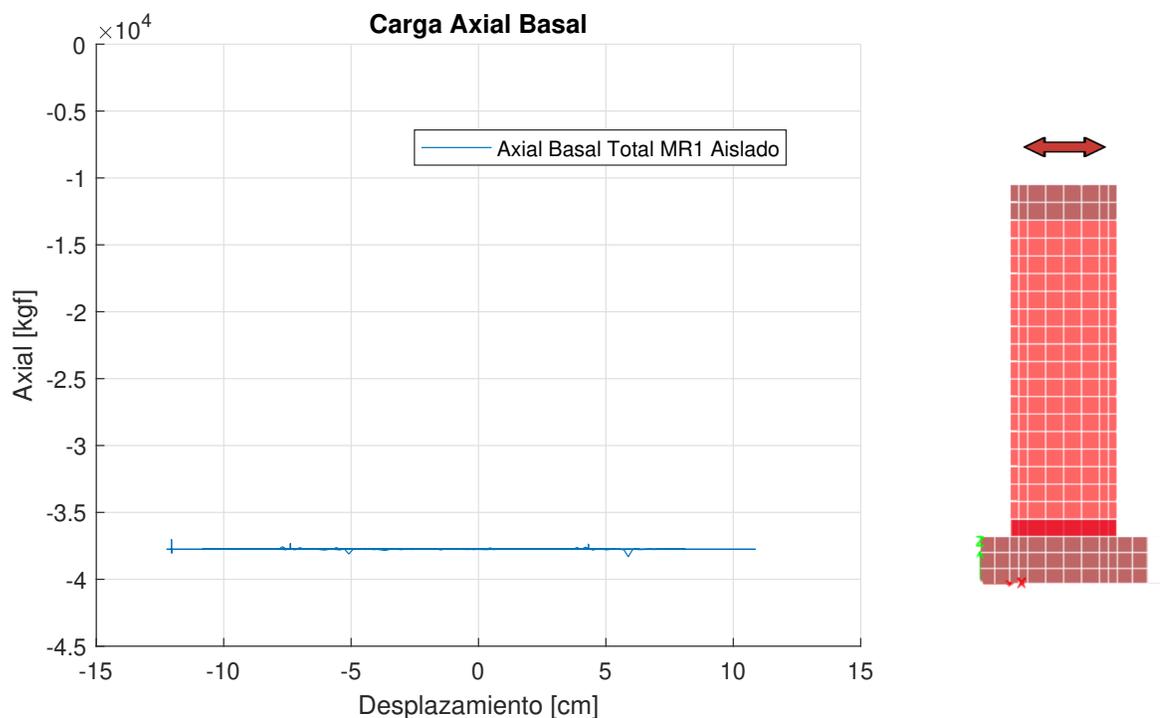


Figura 5.11: Carga Axial Basal MR1 Aislado vs Desplazamiento

Posteriormente, en la Figura 5.12 se presenta el esfuerzo de corte obtenido en la base del muro, en donde se aprecia que este coincide con la curva de aplicación de carga lateral externa en la viga de transferencia, lo cual es concordante con la teoría y demuestra que el modelo se comporta correctamente siguiendo con los resultados esperados, transfiriendo toda la carga de corte desde la zona superior del muro hasta su base, llegando a un peak de aproximadamente 21[tonf].

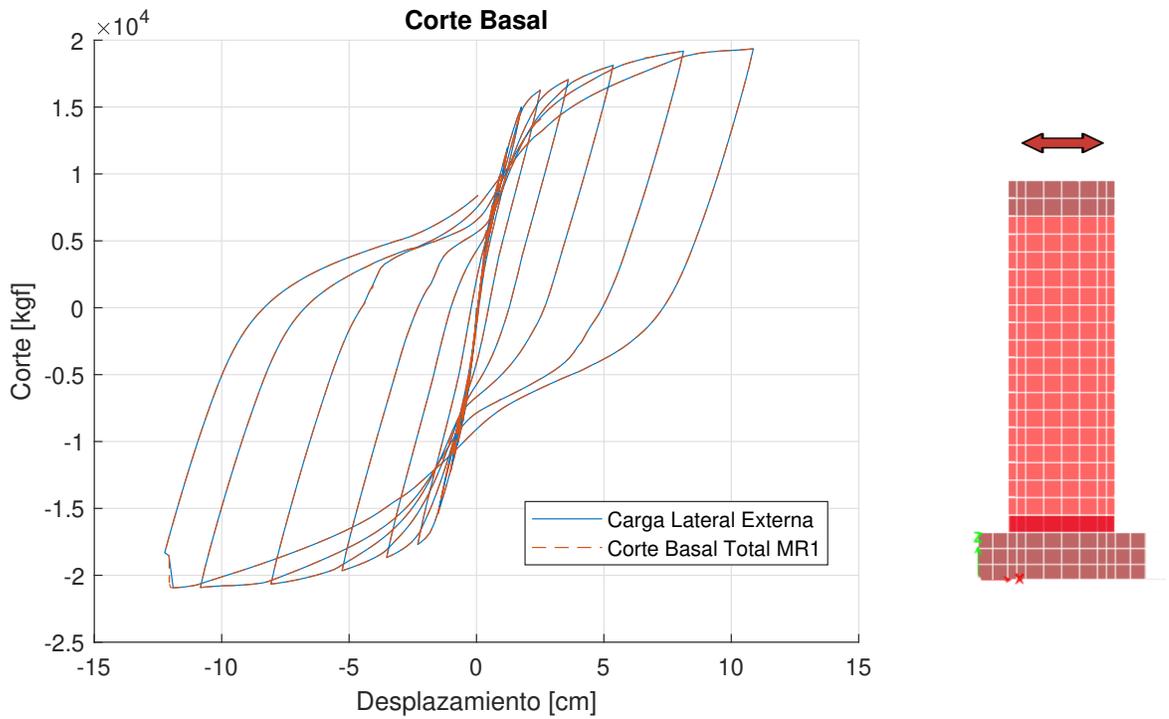
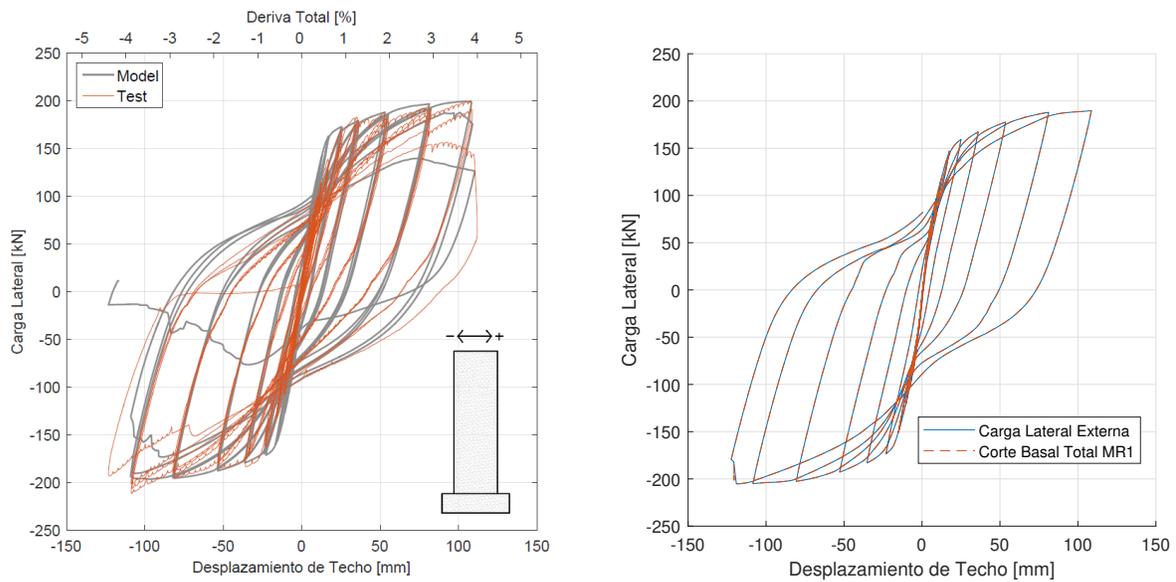


Figura 5.12: Corte Basal MR1 Aislado vs Desplazamiento

Una vez obtenidos los esfuerzos debido a la carga lateral aplicada en el modelo, este se compara con los resultados del muro M0 del estudio realizado por (Díaz, 2016). En la Figura 5.13 se presenta esta comparación en donde se puede apreciar que los esfuerzos obtenidos son idénticos, lo cual valida el modelo actual y garantiza un punto base de comparación entre el muro aislado y el sistema de muros acoplados.



(a) Carga lateral vs Desplazamiento (Díaz, 2016)

(b) Carga Lateral Vs Desplazamiento, Muro MR1

Figura 5.13: Comparación de Curvas de Histéresis de muros M0 y MR1

En tanto, en la Figura 5.14 se presenta el momento producido en la base del muro, el cual sigue una curva muy similar a la generada por la aplicación de carga lateral por el brazo de palanca generado, llegando a un peak de aproximadamente  $6 \cdot 10^6 [kgf \cdot cm]$  una vez alcanzado el desplazamiento máximo de techo.

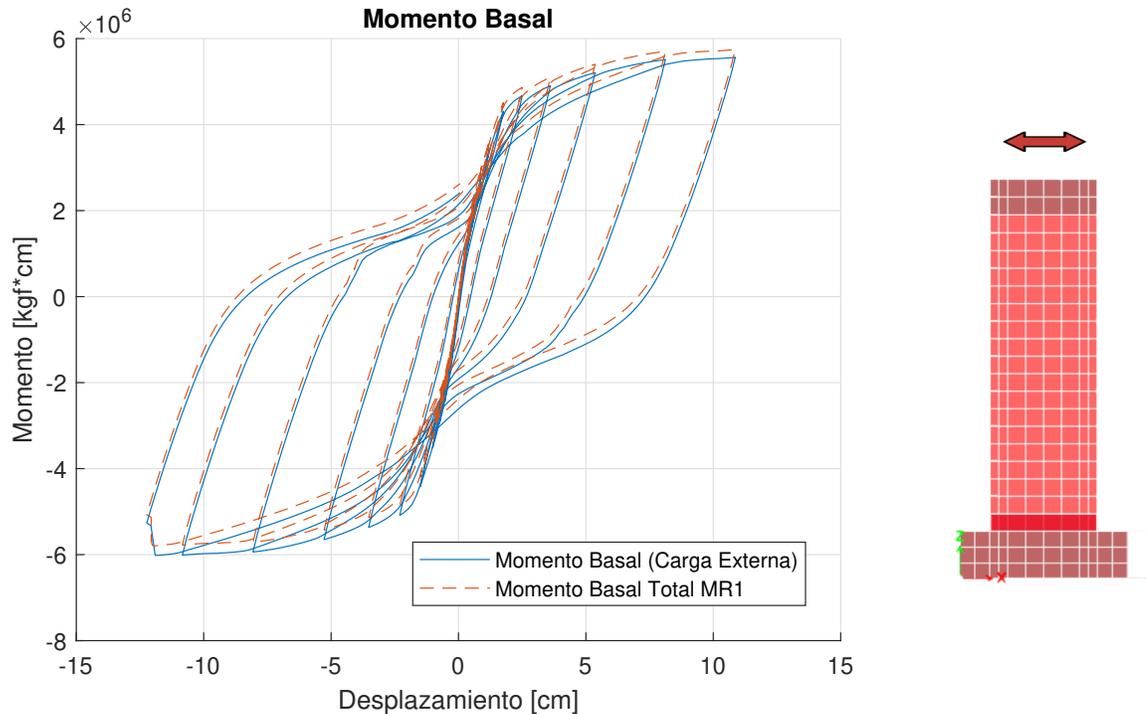


Figura 5.14: Momento Basal MR1 Aislado vs Desplazamiento

### 5.6.2. Muro Rectangular MR2 Aislado

De manera análoga al caso del muro MR1, se realiza un análisis cíclico donde luego se capturan los diversos tipos de esfuerzos presentes en el muro MR2 aislado. Particularmente se estudian los esfuerzos en la base, la cual es la zona en donde los esfuerzos y deformaciones son máximos.

La principal diferencia en el análisis para este muro, es que no se considera la carga axial externa (como la aplicada en la viga de transferencia del muro MR1) sino que solo la carga axial producida por el peso propio y la carga lateral aplicada.

En la Figura 5.15 se presenta el esfuerzo de corte obtenido en la base del muro, en donde se aprecia que este coincide con la curva de aplicación de carga lateral externa en la viga de transferencia, lo cual demuestra que el modelo se comporta correctamente siguiendo con los resultados esperados, transfiriendo toda la carga de corte desde la zona superior del muro hasta su base, llegando a un esfuerzo peak de aproximadamente 4.4[ton].

En tanto, en la Figura 5.16 se presenta el momento producido en la base del muro, el cual

sigue una curva muy similar a la generada por la aplicación de carga lateral por el brazo de palanca generado, llegando a un peak de aproximadamente  $1.1 \cdot 10^6 [kgf \cdot cm]$  una vez alcanzado el desplazamiento máximo de techo.

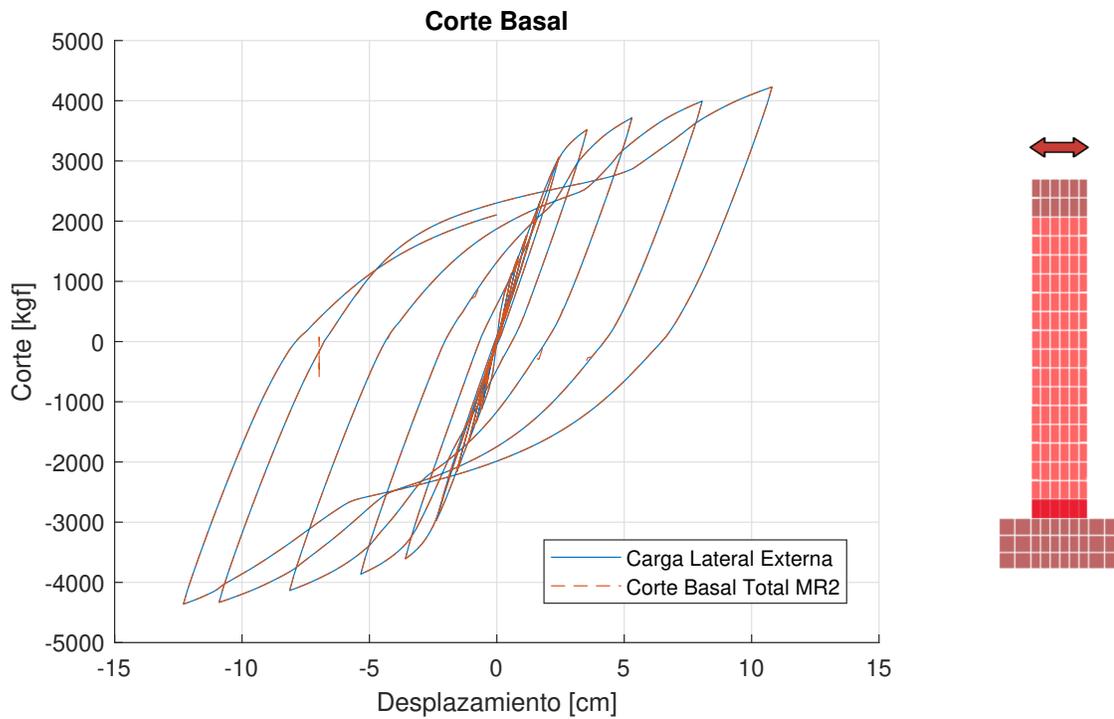


Figura 5.15: Corte Basal MR2 Aislado vs Desplazamiento

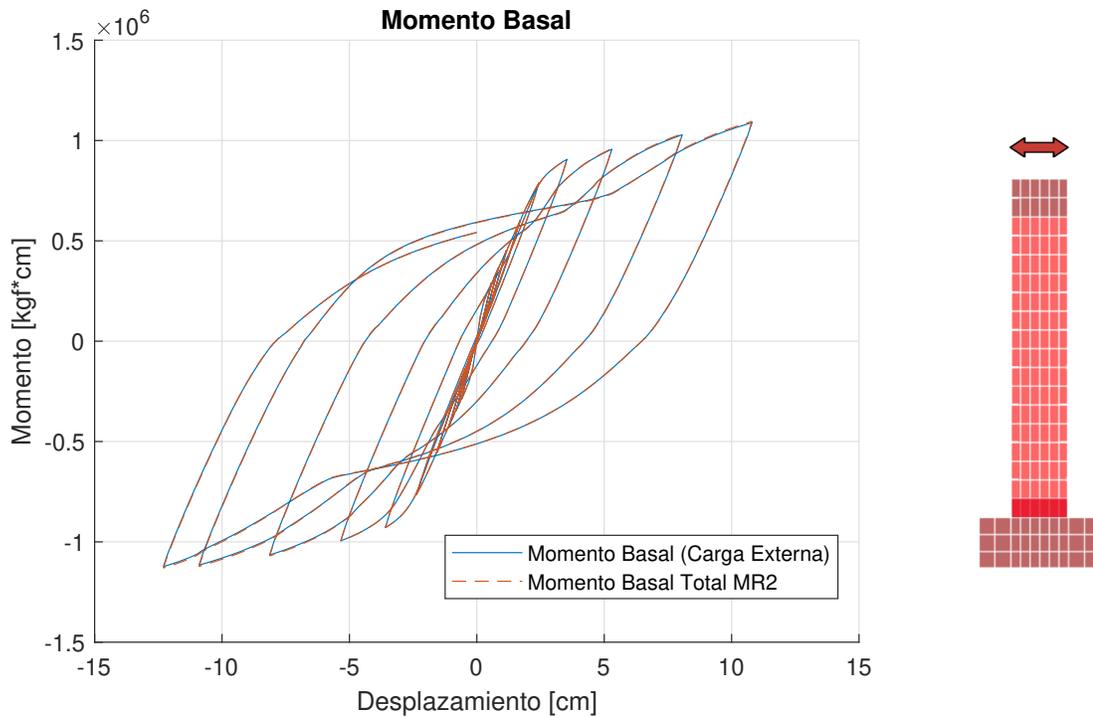


Figura 5.16: Momento Basal MR2 Aislado vs Desplazamiento

### 5.6.3. Muros Rectangulares Acoplados

Al hacer el análisis cíclico para el sistema acoplado, se capturan los diferentes tipos de esfuerzos en las diferentes franjas de elementos definidas. Partiendo con las franjas basales 1 y 2, se puede observar de acuerdo a la Figura 5.17 que el muro MR1 se encuentra durante todo el análisis en compresión, llegando a valores máximos y mínimos de aproximadamente 52[ton] y 22[ton] respectivamente. Por otro lado, la base del muro MR2 resiste esfuerzos de compresión de hasta aproximadamente 17[ton] cuando el análisis va en dirección positiva, mientras que cuando va en dirección negativa, esta presenta esfuerzos de tracción de hasta 12[ton].

La suma de las cargas de tracción y compresión en las franjas basales 1 y 2 del modelo acoplado en todo momento coinciden con la carga axial total del sistema, la cual permanece constante durante todo el análisis y respalda el buen comportamiento del modelo.

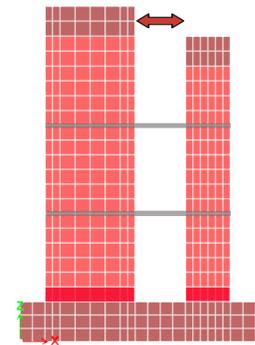
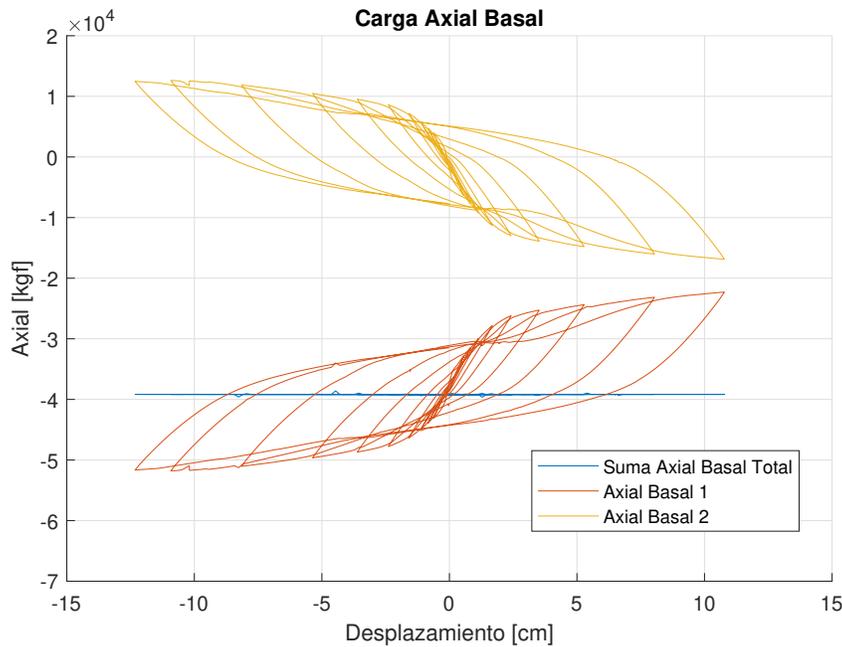


Figura 5.17: Carga Axial Basal vs Desplazamiento

Tras el desarrollo del análisis, el esfuerzo de corte basal total, correspondiente a la suma de los esfuerzos de corte obtenidos de los puntos de cuadratura presentes en las franjas basales, debe ser igual al corte superior generado por la carga lateral aplicada en la viga de transferencia, esto para comprobar una correcta transmisión de cargas mediante las losas y que no existan pérdidas. A continuación, en la Figura 5.18 se presenta la comparación entre la carga lateral externa aplicada en la viga de transferencia y la suma de los esfuerzos de corte en las franjas basales de los muros MR1 y MR2, en donde se aprecia que estos esfuerzos son iguales cumpliendo con lo esperado. Además, se observa que para el desplazamiento máximo, la suma de los esfuerzos de corte en la base corresponden aproximadamente a 30[ton].

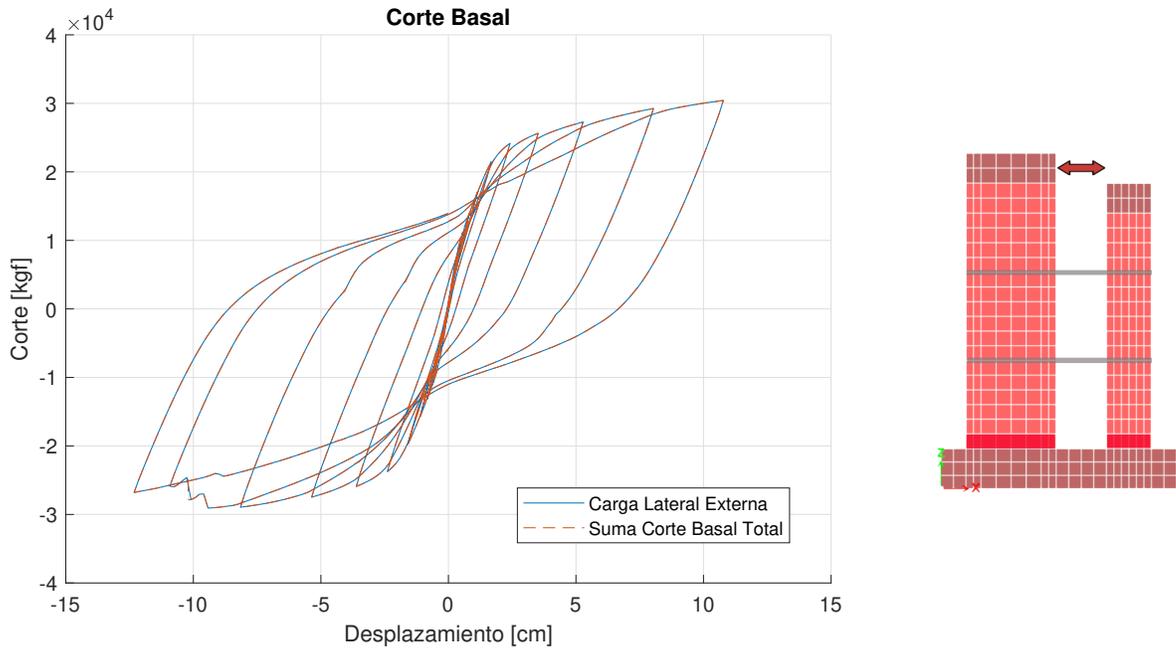


Figura 5.18: Corte Basal vs Desplazamiento

Luego, se grafican los esfuerzos de corte basal vs desplazamiento para ambos muros acoplados para estudiar su respuesta. Esto se presenta en la Figura 5.19 a continuación.

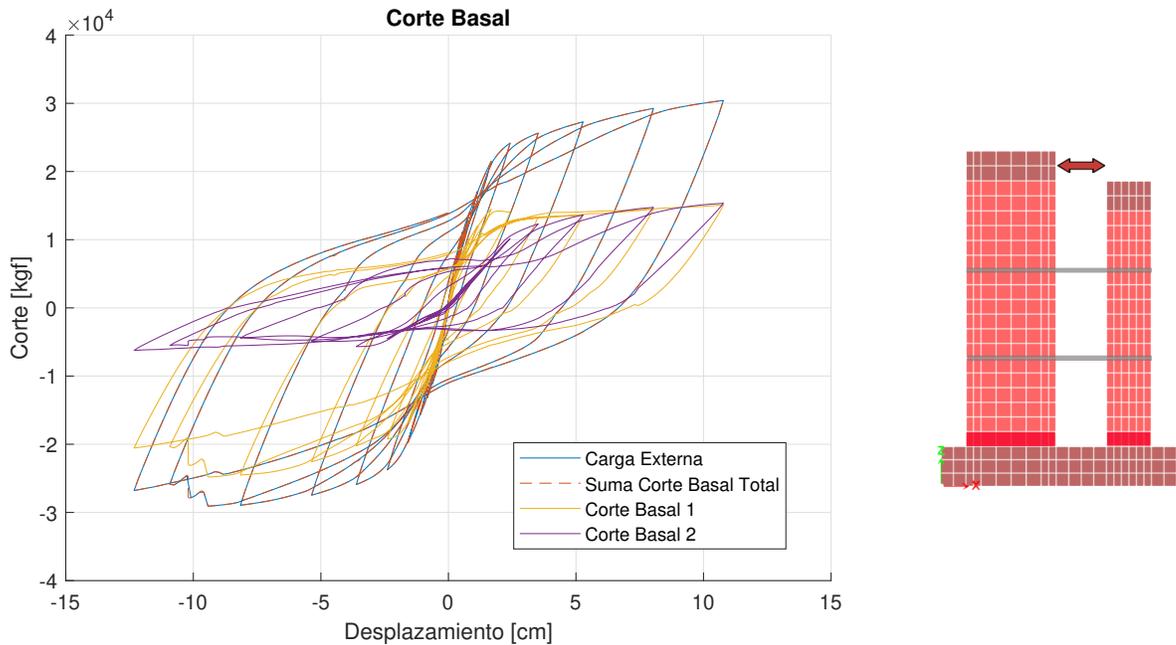


Figura 5.19: Corte Basal vs Desplazamiento

De la Figura anterior se puede observar que cuando el desplazamiento va en dirección positiva ambos muros, tanto MR1 como MR2, toman la misma carga de corte de 15[ton].

Por otro lado, cuando el desplazamiento va en dirección negativa, la gran parte de la carga es resistida por el muro MR1 tomando esta un máximo aproximado de 24[ton] mientras que el muro MR2, para el mismo drift toma un aproximado de 6[ton].

De esta manera, el momento total del sistema en la base, correspondiente al producto entre el corte generado por la carga lateral en la viga de transferencia y el brazo de palanca entre la aplicación de la carga y la base de los muros, debe coincidir con la suma del momentos basales individuales de ambos muros más los esfuerzos de tracción y compresión en la base de cada uno de estos, los cuales son consecuencia del traspaso de corte de un muro al otro a través de las losas. Esta comparación se presenta en la Figura 5.20 a continuación.

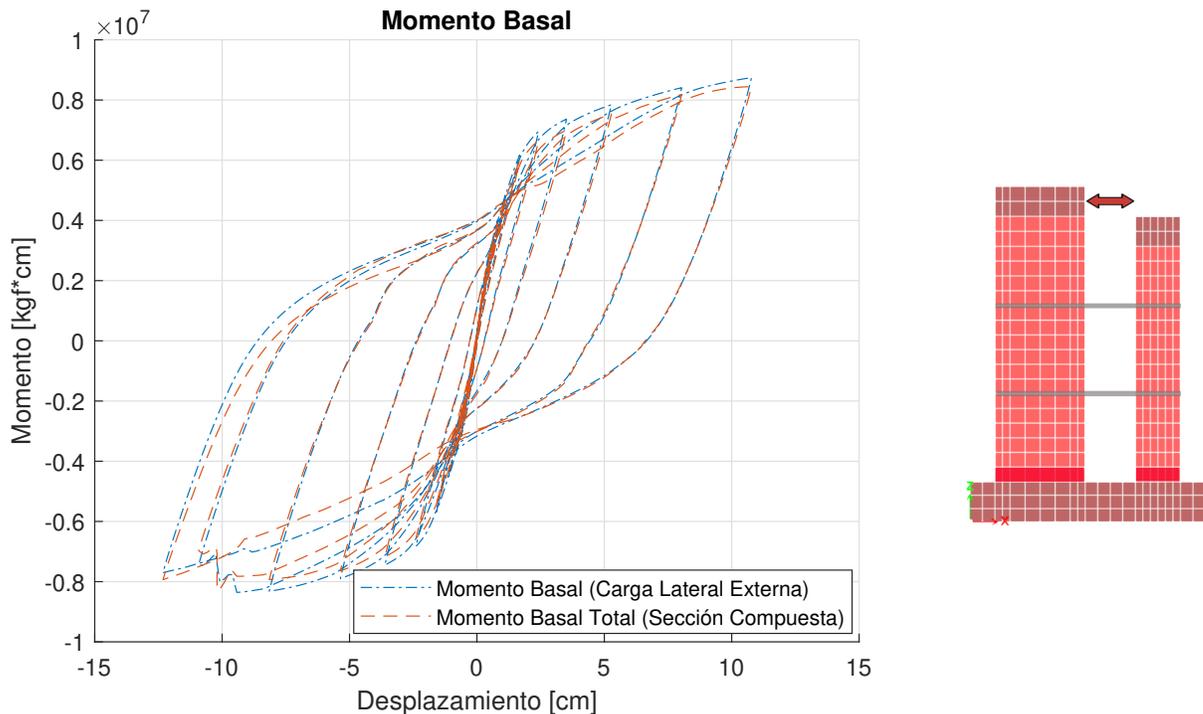


Figura 5.20: Momento Basal vs Desplazamiento

De donde se puede observar que para el análisis cíclico, ambas curvas de momento son muy similares, lo cual asegura un correcto desarrollo del modelo y concordancia con lo esperado. Una vez comprobado lo anterior, se procede a graficar las curvas de momento basal vs desplazamiento para ambos muros acoplados para estudiar su respuesta. Esto se presenta en la Figura 5.21 a continuación.

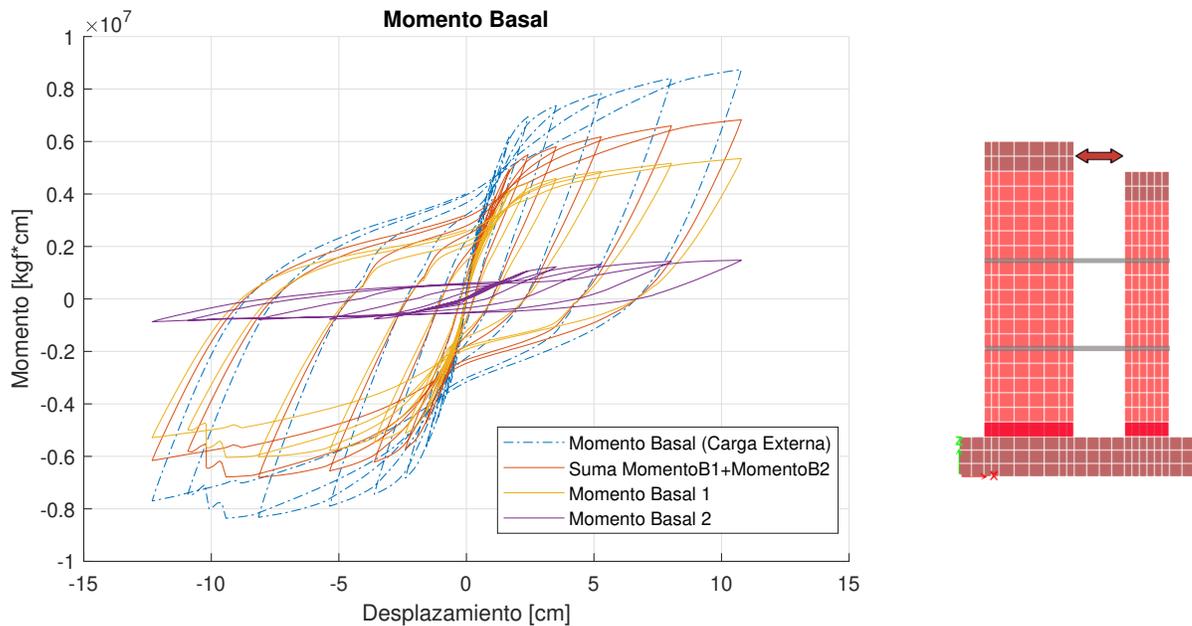


Figura 5.21: Momento Basal vs Desplazamiento

De donde se puede apreciar que el muro MR1 es el que resiste un mayor momento a nivel basal, tomando gran parte de la carga llegando hasta aproximadamente  $6 \cdot 10^6 [kgf]$  para niveles de desplazamiento máximos a nivel de techo. Por otra parte, para mismos niveles de deriva, el muro MR2 posee un momento basal de aproximadamente un sexta parte del momento en el MR1, es decir,  $1 \cdot 10^6 [kgf]$  con un ligero aumento de momento solicitante para cuando el desplazamiento va en dirección positiva llegando a aproximadamente  $1.5 \cdot 10^6 [kgf]$

Cabe mencionar que, tal como se puede observar, la suma los momentos individuales en las bases de ambos muro no coinciden con el momento generado por la carga lateral y su brazo de palanca. Esto sucede ya que como fue mencionado anteriormente, a la suma de los momentos individuales se le debe agregar los esfuerzos asociados al par de cargas de tracción y compresión en las bases de los muros asociadas a la transmisión de corte por las losas.

### Franjas 1 y 2

Se analizan los diferentes tipos de esfuerzos presentes en las franjas 1 y 2 con el objetivo principal de comprobar la consistencia del modelo. De la Figura 5.22 se observa que la carga axial en la franja analizada del muro 2 es prácticamente nula, mientras que la carga axial tomada por el muro MR1 coincide con la total aplicada sobre su correspondiente viga de transferencia.

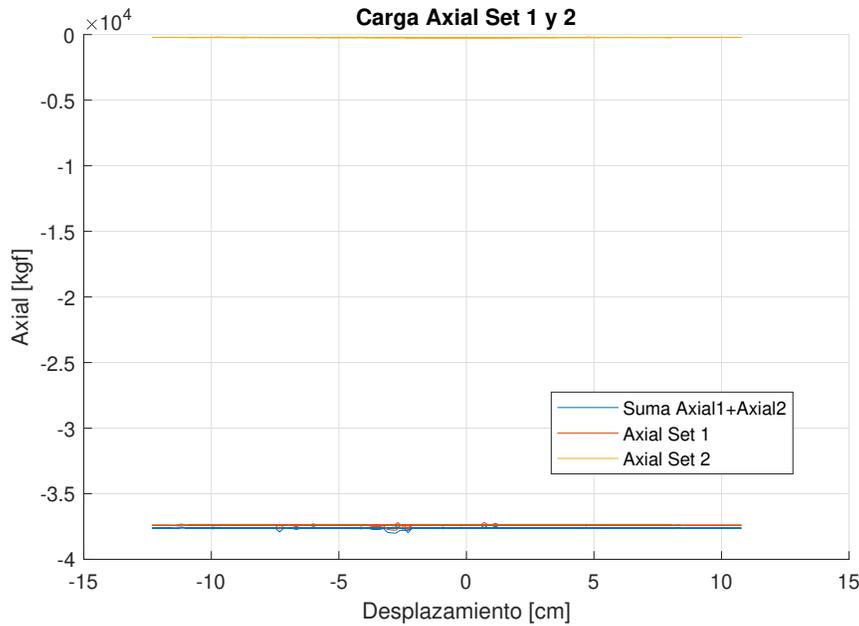


Figura 5.22: Carga Axial vs Desplazamiento - Franjas 1 y 2

A continuación, de la Figura 5.23 se observa que el corte en la franja analizada del muro 1 coincide perfectamente con la carga lateral total aplicada, mientras que el corte tomado por la franja 2, del muro MR2, no posee un corte nulo a lo largo del análisis. Esto último ya que a esta altura aún no hay transferencia de carga a través de las losas.

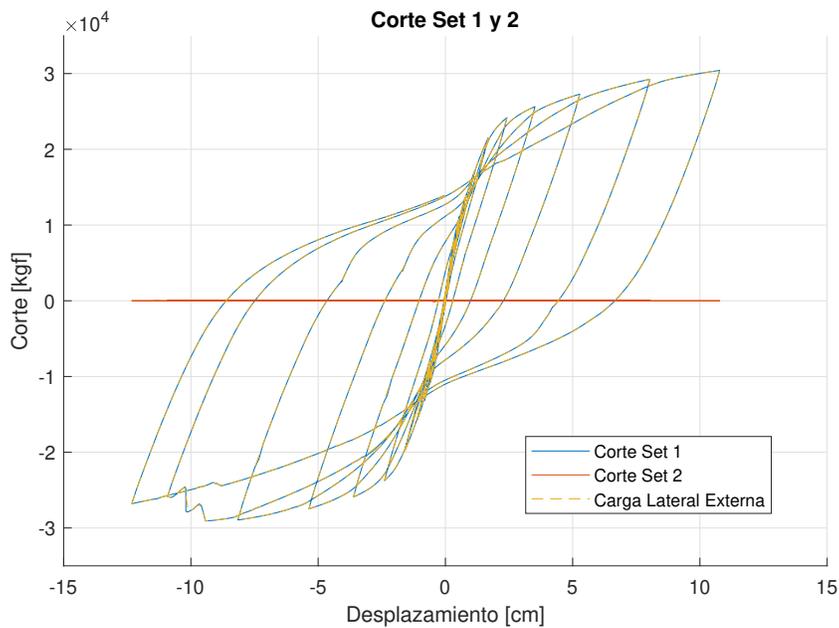


Figura 5.23: Corte vs Desplazamiento - Franjas 1 y 2

Asimismo, en la Figura 5.24 se presenta el momento generado en las franjas mencionadas donde, análogamente al corte, la franja 1 es la que resiste todo el esfuerzo mientras que la franja 2 se mantiene con momento nulo a lo largo del análisis.

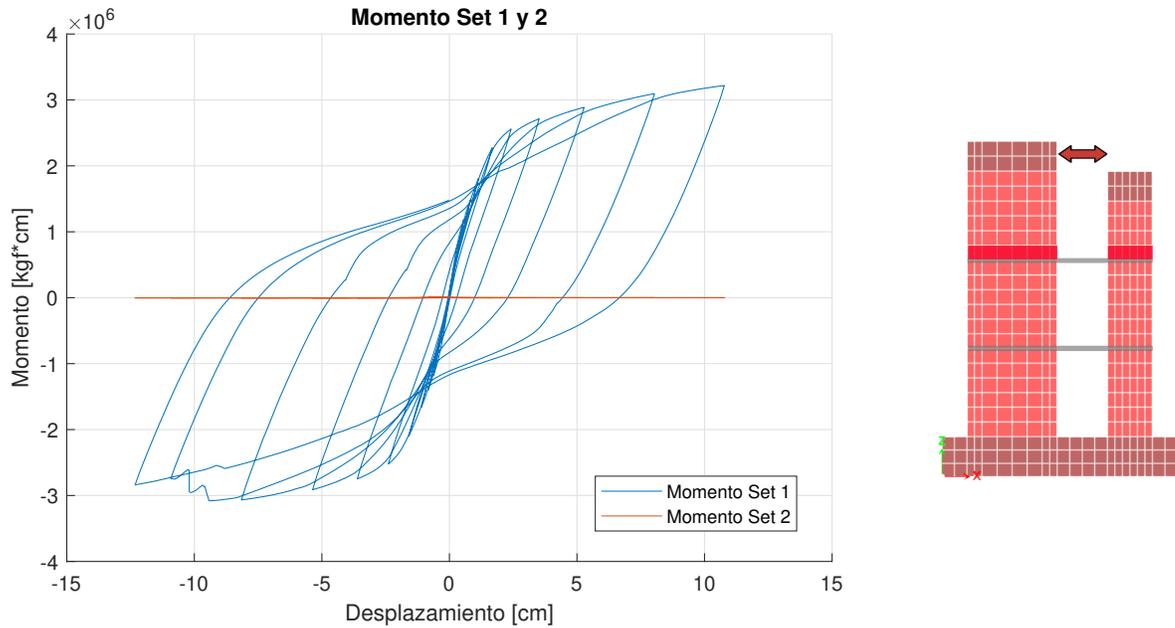


Figura 5.24: Momento vs Desplazamiento - Franja 1 y 2

### Franjas 3 y 4

Una vez determinados los esfuerzos en las franjas sobre la losa superior, se procede a analizar la respuesta en las franjas 3 y 4, justo debajo de la losa con el objetivo de determinar los esfuerzos transmitidos por esta al muro MR2. En particular se comienza analizando la carga axial en ambos muros, lo cual se presenta en la Figura 5.25.

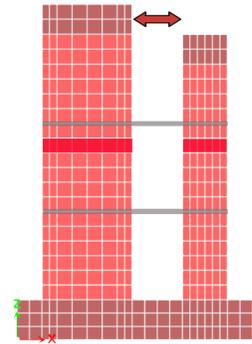
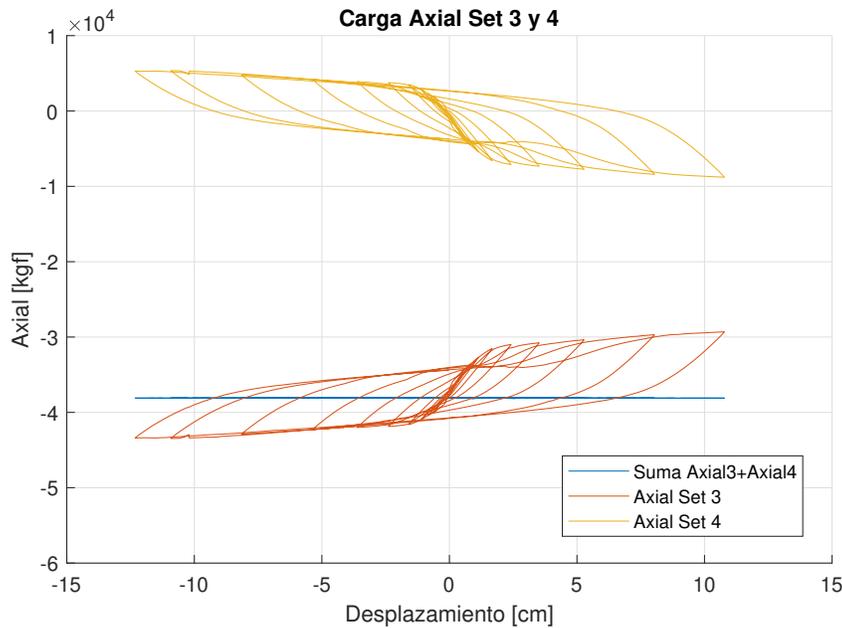


Figura 5.25: Carga Axial vs Desplazamiento - Franjas 3 y 4

Del gráfico anterior, se observa que la franja 3 del muro MR1 se encuentra en compresión durante todo el análisis, con cargas máximas y mínimas de aproximadamente 43[ton] y 30[ton] respectivamente, tomando la mayor de estas cargas en la dirección negativa de desplazamiento. Por otro lado, los esfuerzos en la franja 4 del muro MR2 alternan entre compresión y tracción dependiendo de la dirección de desplazamiento, en donde, cuando se aplica la carga en la dirección positiva se llega a cargas de compresión de hasta 8[ton] mientras que cuando se va en la dirección negativa se alcanzan esfuerzos de tracción de hasta 5[ton]. Además, cabe mencionar que la suma de las cargas de tracción y compresión en las franjas 3 y 4 coinciden en todo momento con la carga axial total del sistema a esa altura, permaneciendo constante durante el desarrollo del análisis cíclico.

Adicionalmente, se analiza el esfuerzo de corte presente en ambas franjas, observando así la transferencia de carga a través de la losa superior. Esto se presenta en la Figura 5.26 a continuación.

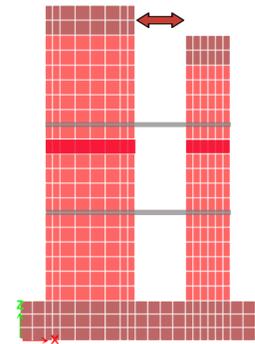
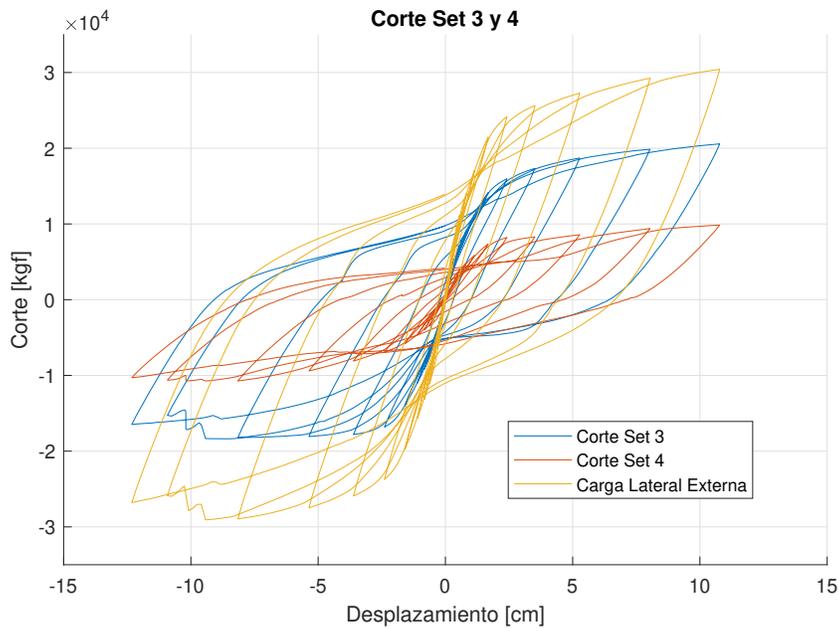


Figura 5.26: Corte vs Desplazamiento - Franjas 3 y 4

Del gráfico anterior se observa en las franjas analizadas que en el muro MR1 existe una pérdida máxima de 10[ton] en comparación con la carga total aplicada, llegando a un corte de 20[ton] para los desplazamientos máximos, mientras que el muro MR2 toma esas 10[ton], las que fueron transferidas a través de la losa. En esta zona, la suma de los cortes presentes en cada una de las franjas coincide con la carga lateral externa aplicada al modelo.

Adicionalmente, se presenta el momento generado en las franjas mencionadas en la Figura 5.27 a continuación.

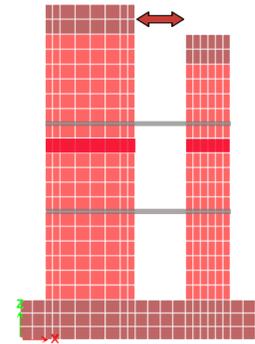
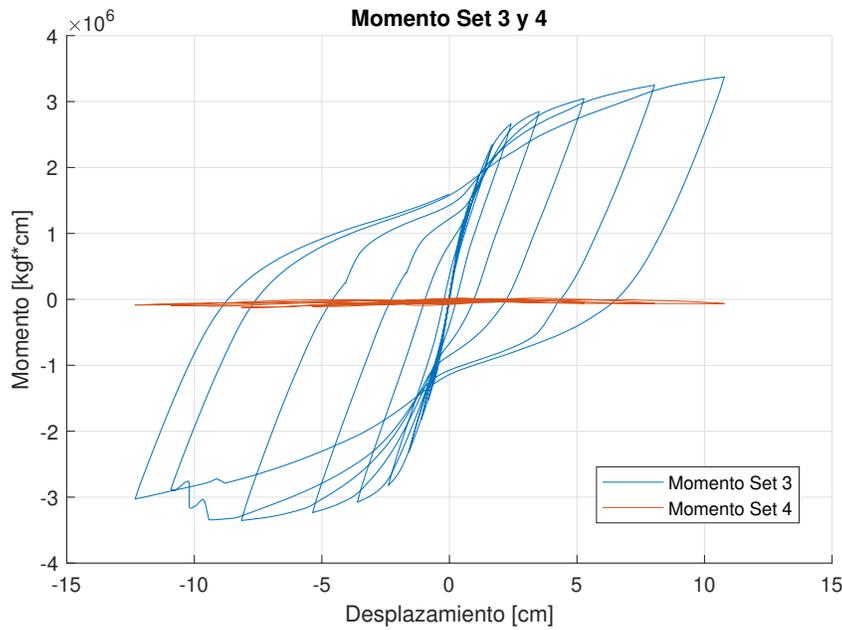


Figura 5.27: Momento vs Desplazamiento - Franja 3 y 4

Donde se puede observar que la franja 3 es la que resiste casi en su totalidad el esfuerzo, mientras que la franja 4 se mantiene con un momento menor a  $0.2 \cdot 10^6 [kgf]$  durante el análisis.

### Franjas 5 y 6

Una vez determinados los esfuerzos bajo la losa superior, se continúa con el análisis de la respuesta en las franjas 5 y 6, justo debajo de la losa inferior con el objetivo de determinar el comportamiento de muros y losas al transmitir las cargas por medio de estas últimas. Inicialmente, se comienza analizando la carga axial en ambos muros, lo cual se presenta en la Figura 5.28.

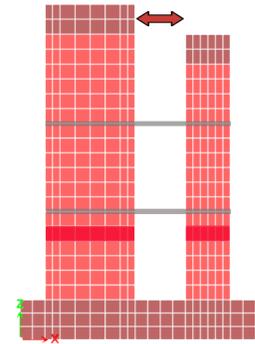
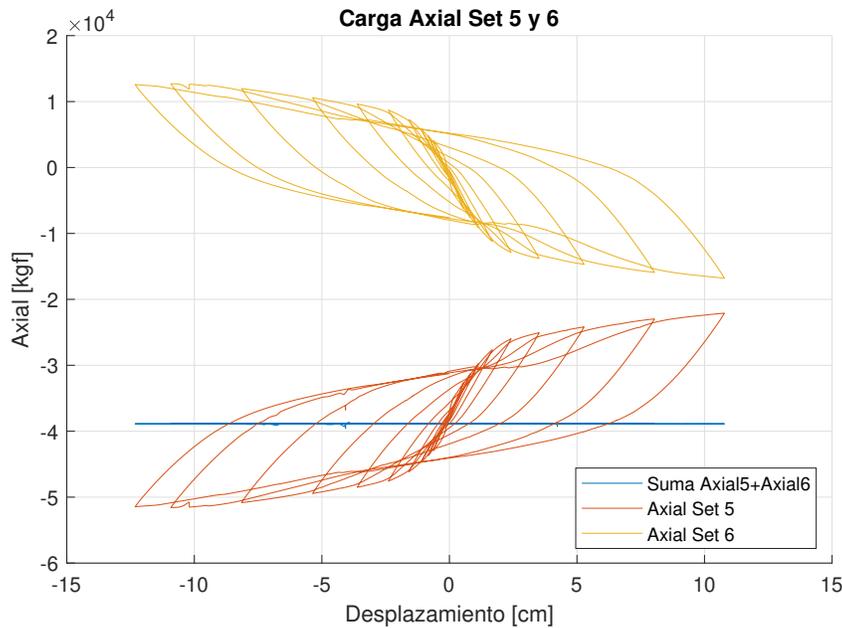


Figura 5.28: Carga Axial vs Desplazamiento - Franjas 5 y 6

Del gráfico anterior se observa que la franja 5, del muro MR1, se encuentra en compresión durante todo el análisis con una mayor variación entre las cargas máximas y mínimas en comparación con las cargas axiales en las franja 3, pasando de aproximadamente 43[ton] a 52[ton] en la dirección negativa de desplazamiento, mientras que en la dirección positiva estos esfuerzos pasan de aproximadamente 29[ton] a 22[ton]. Análogamente, los esfuerzos en la franja 4 presentan el mismo comportamiento, pasando de una compresión de 9[ton] a 17[ton] en la dirección negativa de desplazamiento, mientras que en la dirección positiva, donde se generan tracciones, los esfuerzos máximos pasan de aproximadamente 5[ton] a 12[ton]. Este aumento en la variación de cargas axiales se debe al traspaso de corte entre el muro MR1 y el MR2 a través de la losa superior, donde además se puede observar que la suma de las cargas de axiales en ambas franjas coinciden en todo momento con la carga axial total del sistema a esa altura, la cual es constante durante todo el análisis demostrando un buen comportamiento del modelo.

Adicionalmente, se analiza el esfuerzo de corte presente en ambas franjas, observando el comportamiento de estos luego de la transferencia de carga a través de la losa inferior. Esto se presenta en la Figura 5.29 a continuación.

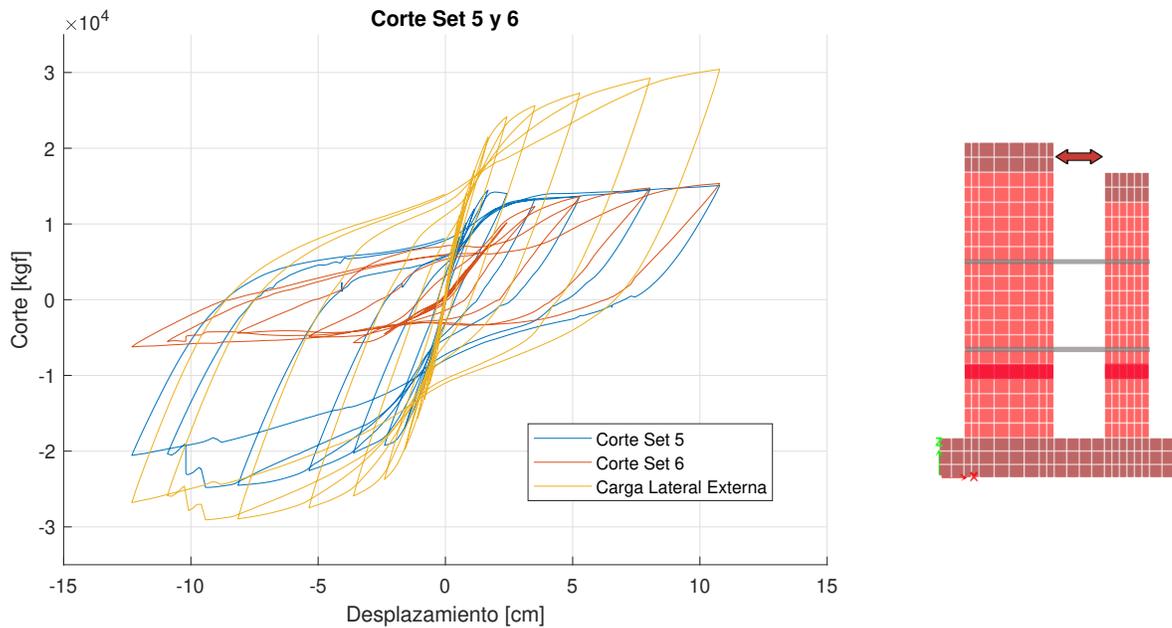


Figura 5.29: Corte vs Desplazamiento - Franjas 5 y 6

Del gráfico anterior se observa en las franjas analizadas que tanto el muro MR1 como el MR2 comparten proporcionalmente el esfuerzo de corte total de 30[ton] en la dirección de desplazamiento positiva, donde cada uno resiste 15[ton]. Por el contrario, cuando la dirección de desplazamiento es negativa el muro MR1 resiste gran parte del corte tomando aproximadamente 24[ton] mientras que el muro MR2 toma un máximo de 6[ton]. Cabe apreciar que en comparación a la Figura 5.26 donde se presenta el corte en las franjas 3 y 4, existe un aumento de 5[ton] en el aporte del muro MR2 cuando se va en dirección positiva y un mismo aumento del muro MR1 cuando el desplazamiento va en dirección negativa. Esto es compensado con una disminución del aporte de estos muros cuando se va en las direcciones contrarias a las mencionadas.

Adicionalmente, se presenta el momento generado en las franjas mencionadas en la Figura 5.30 a continuación.

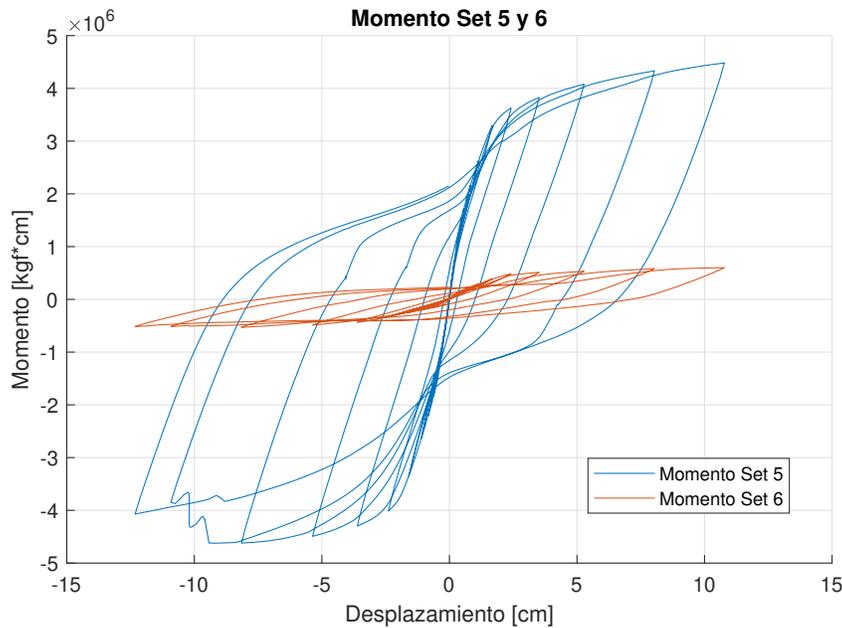


Figura 5.30: Momento vs Desplazamiento - Franja 5 y 6

Donde se puede observar que la franja 5 es la que resiste casi en su totalidad el esfuerzo, de aproximadamente  $4.5 \cdot 10^6 [kgf]$  mientras que la franja 6 se mantiene con un momento igual o menor a  $0.6 \cdot 10^6 [kgf]$  durante el análisis.

#### 5.6.4. Sistema de Losas

Se obtienen los gráficos de carga axial, corte y momento presente en las franjas definidas en ambas losas, los cuales entregan información sobre el nivel de carga transmitido desde un muro hacia el otro. Cabe recordar que, tal como fue mencionado al comienzo de esta sección, Las franjas 1 y 2 corresponden a las que están adyacentes a los elementos de borde de ambos muros, mientras que las franjas 3 y 4 corresponden a las que están en la zona central de la losa en el área entre estos.

##### Carga Axial en Losas

Para comenzar, se procede a analizar la carga axial presente en la losa superior. Tal como es de esperar, de las Figuras 5.31 y 5.32 se observa que no existe variación de los esfuerzos axiales dependiendo de las franjas a analizar. En esta losa se puede observar una transmisión de aproximadamente 10[ton], lo cual coincide con lo esperado al contrastarlo con los resultados obtenidos de las figuras 5.23 y 5.26, que presentan los cortes en las franjas sobre y bajo la losa superior, en donde el muro MR1 pasa de resistir un máximo de 30[ton] de corte sobre la losa superior a aproximadamente 20[ton] bajo esta, tomando el muro MR2 esas 10[ton] transmitidas por la losa como carga axial.

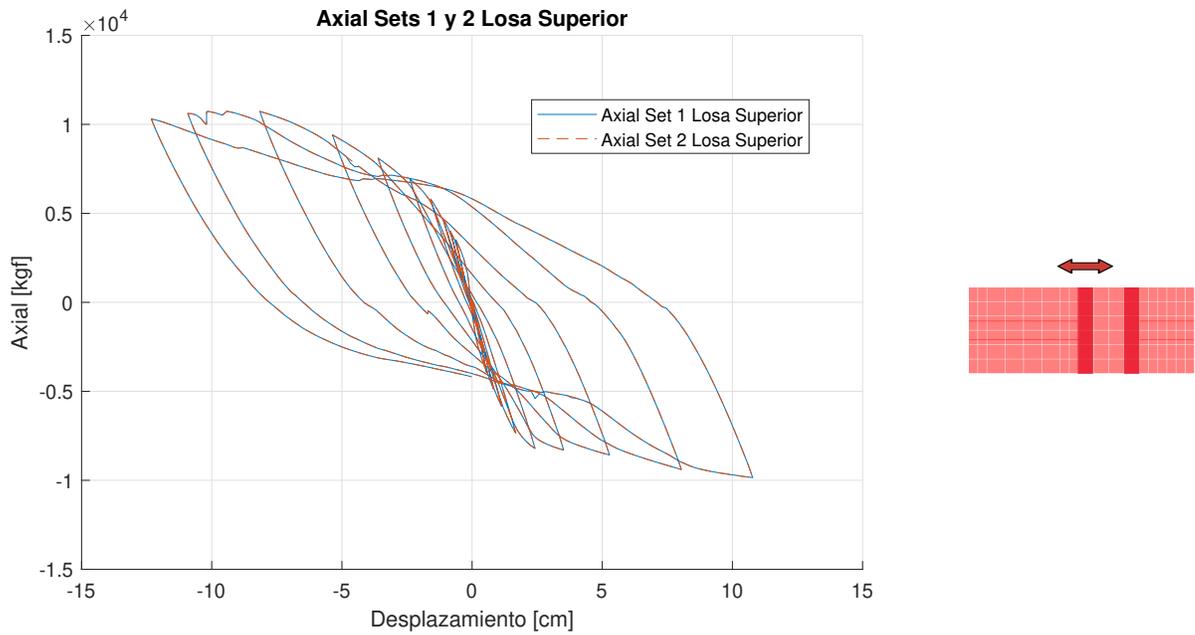


Figura 5.31: Carga Axial vs Desplazamiento - Franjas 1 y 2 Losa Superior

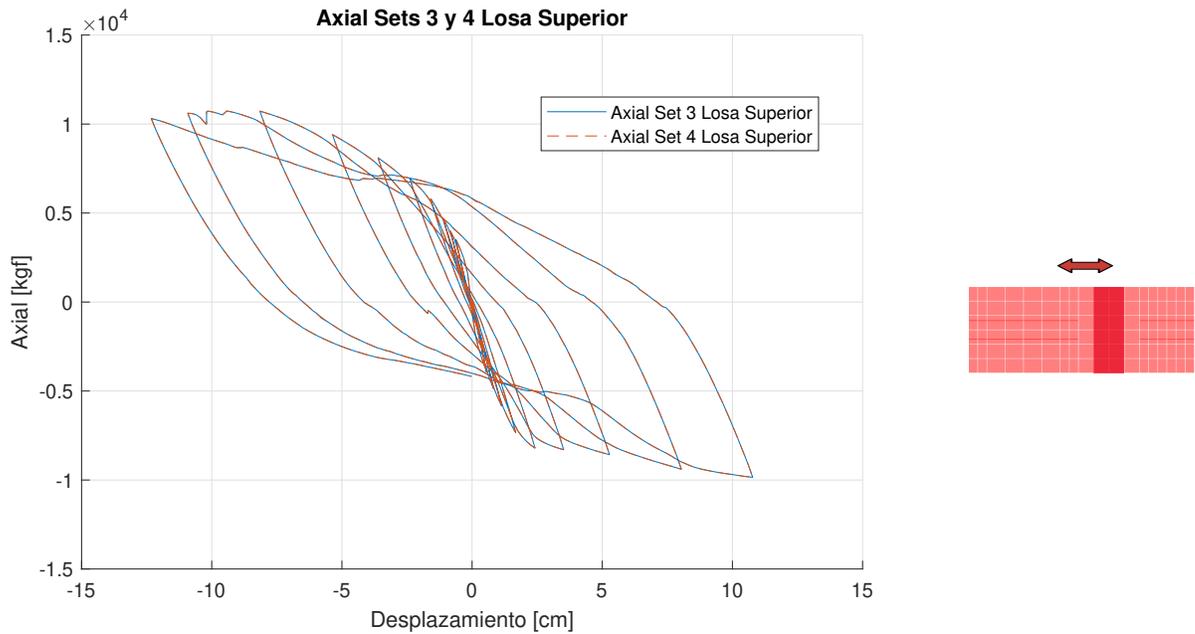


Figura 5.32: Carga Axial vs Desplazamiento - Franjas 3 y 4 Losa Superior

Análogamente, se analiza la carga axial presente en la losa inferior, en donde, de las Figuras 5.33 y 5.34 se observa que no existe variación de los esfuerzos axiales dependiendo de las franjas a analizar. Particularmente, se puede observar que en esta losa la transmisión de carga axial no sigue un comportamiento previsible como en la losa superior, presentando esfuerzos de compresión a lo largo de casi todo el análisis, en donde la carga axial máxima en compresión para esta losa, alcanzada llegando a los desplazamientos máximos de techo,

es de aproximadamente 5.5[ton] cuando el desplazamiento va en dirección positiva y 6.5[ton] cuando va en la negativa.

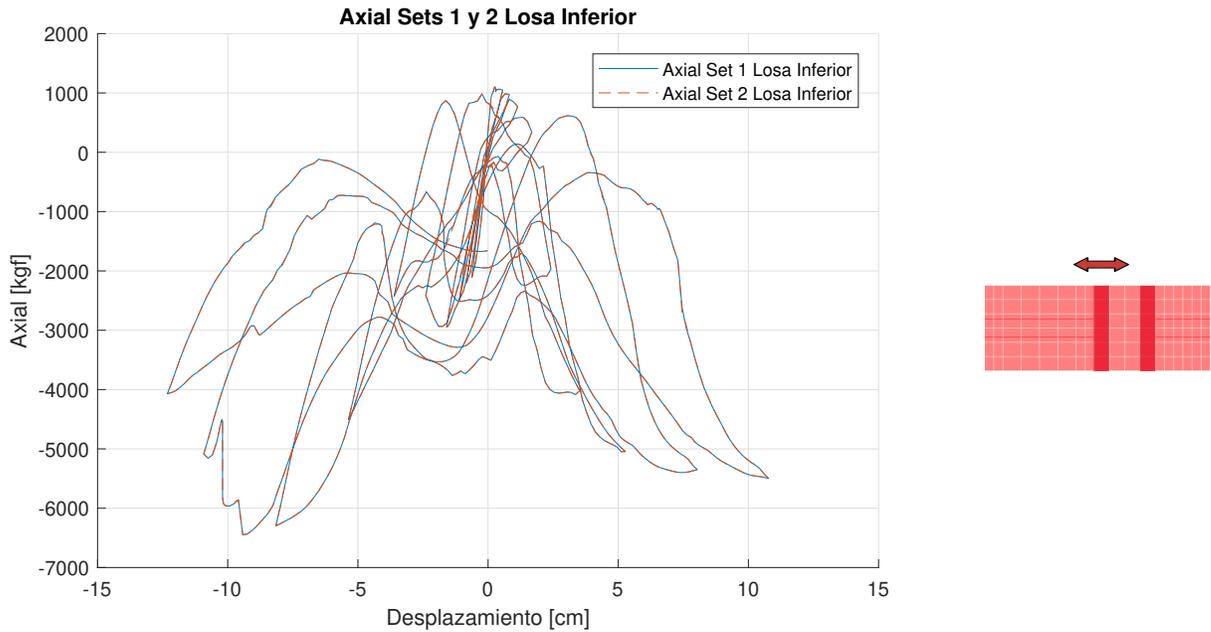


Figura 5.33: Carga Axial vs Desplazamiento - Franjas 1 y 2 Losa Inferior

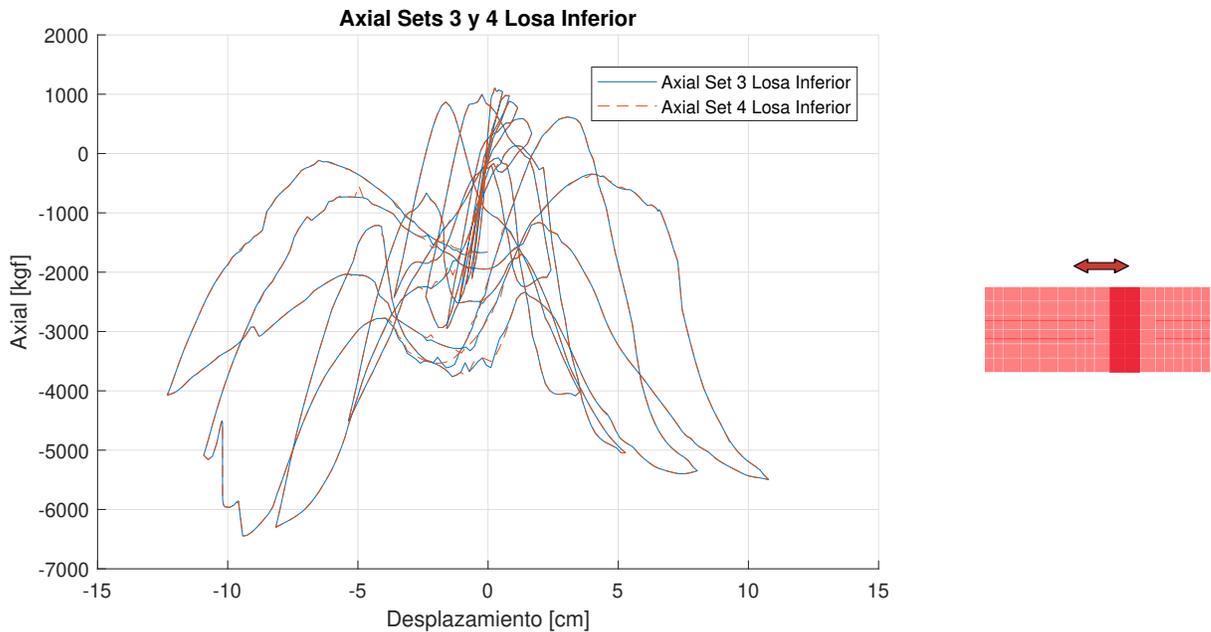


Figura 5.34: Carga Axial vs Desplazamiento - Franjas 3 y 4 Losa Inferior

Analizando los resultados obtenidos en las Figuras 5.26 y 5.29, donde se presenta el corte sobre y bajo la losa inferior, se puede concluir que el comportamiento de la losa es congruente. Esto debido a que cuando se va en la dirección de desplazamiento positiva la losa inferior

transmite, a través de la compresión en la losa, el corte del MR1 al MR2 de tal manera que ambos terminen aportando 15[ton]. De la misma manera, cuando la dirección de desplazamiento es negativa, el corte en el MR1 aumenta y en el MR2 disminuye, lo cual sugiere que esto podría deberse a una retransmisión del corte del muro MR2 al MR1 a través de cargas de compresión de la losa inferior, producidas por el efecto de palanca generado a nivel de esta losa en el muro MR2 y el tirón producido por la losa superior en este mismo muro. De esta manera, el MR1 pasa de resistir un máximo de 18[ton] de corte sobre la losa inferior a aproximadamente 24[ton] bajo esta, mientras que el muro MR2 pasa de un máximo de corte de 11[ton] sobre esta losa a un corte de 5[ton] bajo esta.

Lo anterior puede verse de manera más clara en los siguientes en las Figuras a continuación, donde se muestran los esfuerzos axiales presentes en todos los elementos del modelo para drifts de 0.3[%] y 3[%].

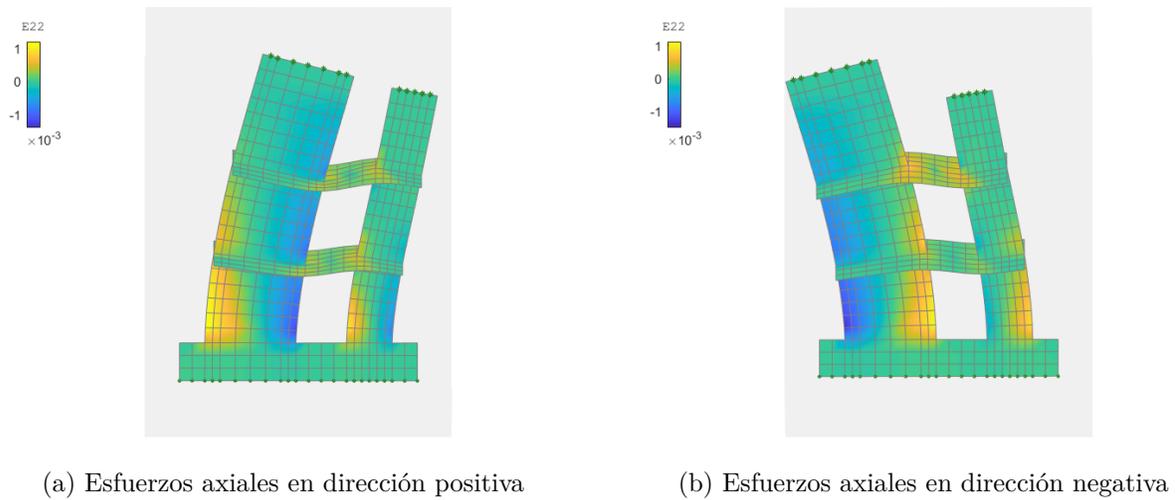


Figura 5.35: Esfuerzos axiales y deformada del modelo de muros acoplados para drift de 0.3[%] - Factor de Escala Gráfico 70

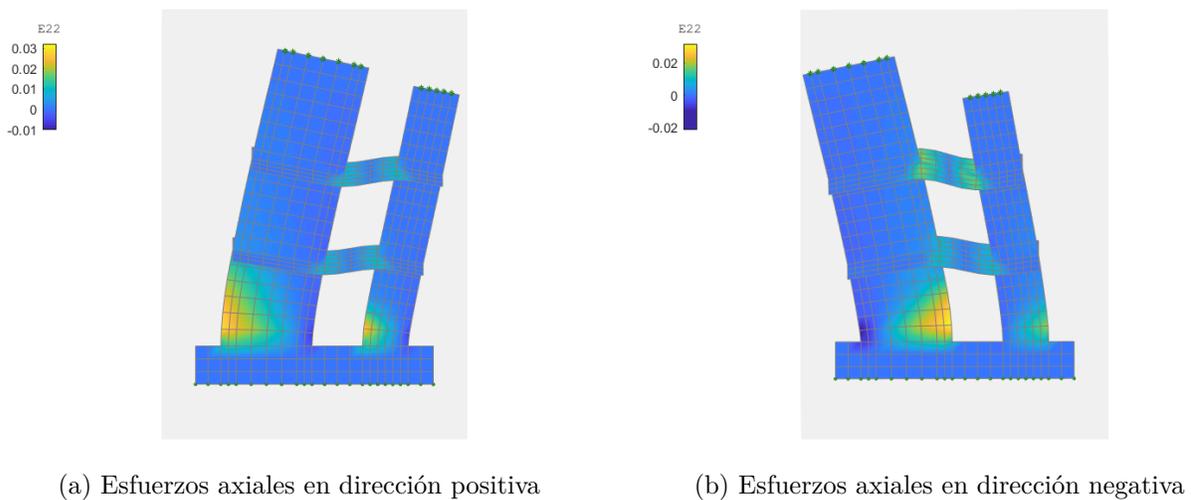


Figura 5.36: Esfuerzos de axiales y deformada del modelo de muros acoplados para drift de 3[%] - Factor de Escala Gráfico 7

## Corte en Losas

A continuación, se presenta el corte generado en las franjas ya mencionadas tanto para la losa superior como la inferior. Comenzando con la losa superior, en las Figuras 5.37 y 5.38 se observa que no existe variación en el corte dependiendo de las franjas a analizar tal como ocurre con las cargas axiales.

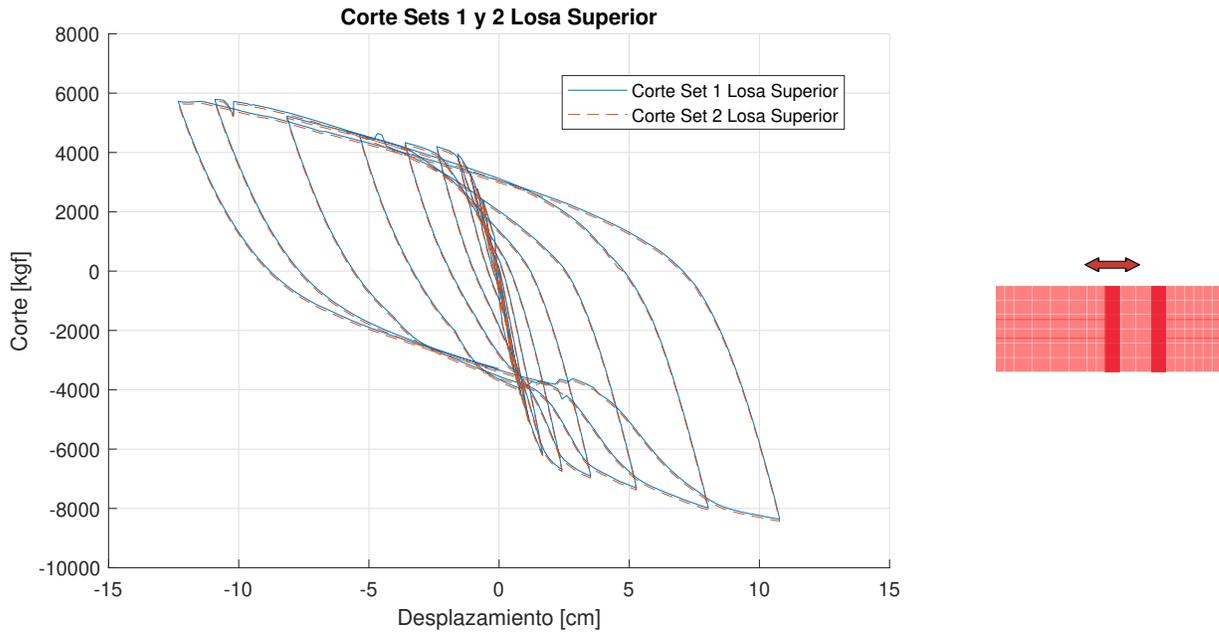


Figura 5.37: Corte vs Desplazamiento - Franjas 1 y 2 Losa Superior

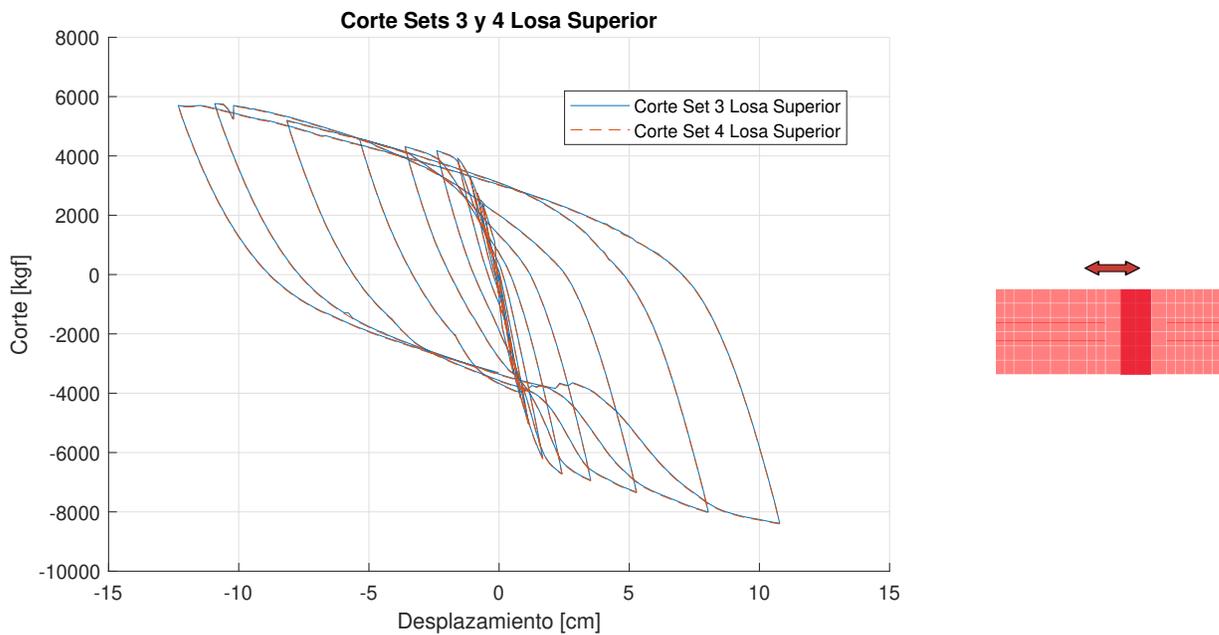


Figura 5.38: Corte vs Desplazamiento - Franjas 3 y 4 Losa Superior

De los gráficos anteriores se puede observar que en esta losa existe una transmisión de aproximadamente 8[ton] cuando la dirección del ciclo es positiva, mientras que cuando es negativa se alcanza un corte máximo de 6[ton]. Esto se compara con los resultados obtenidos de las figuras 5.22 y 5.25, los cuales presentan las cargas axiales sobre y bajo la losa superior, coincidiendo con lo esperado, transformándose estas cargas de corte transmitidas por la losa en pares de tracción y compresión en ambos muros.

Análogamente, se analiza el corte presente en la losa inferior, en donde, de las Figuras 5.39 y 5.40 se observa que no existe variación en el corte dependiendo de las franjas a analizar.

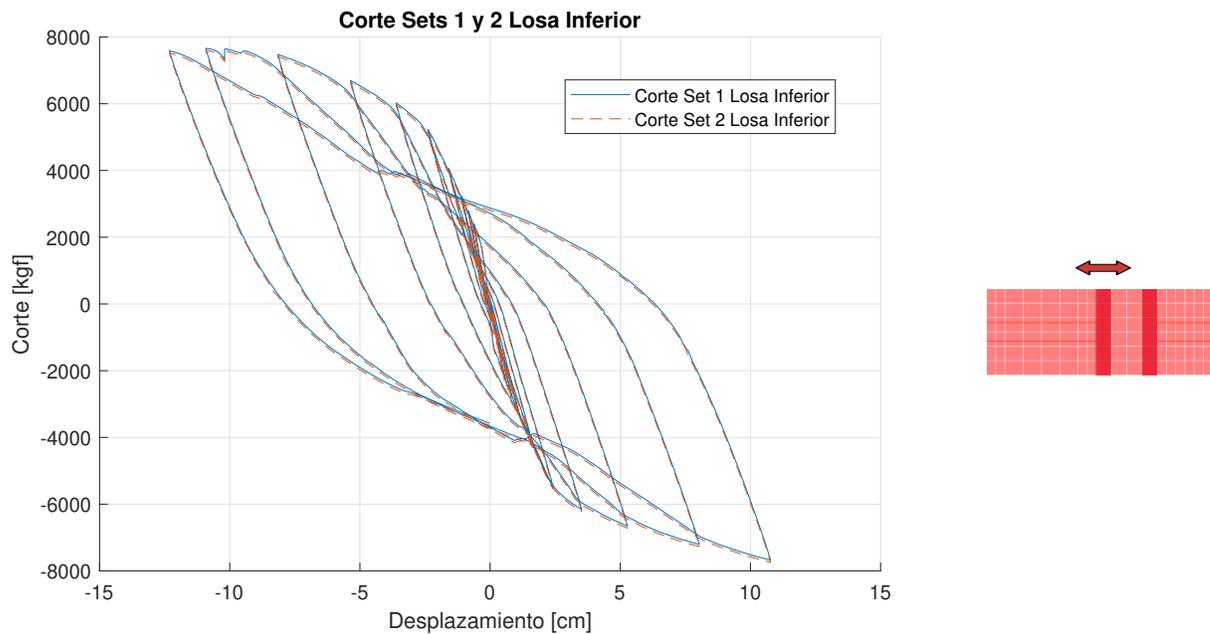


Figura 5.39: Corte vs Desplazamiento - Franjas 1 y 2 Losa Inferior

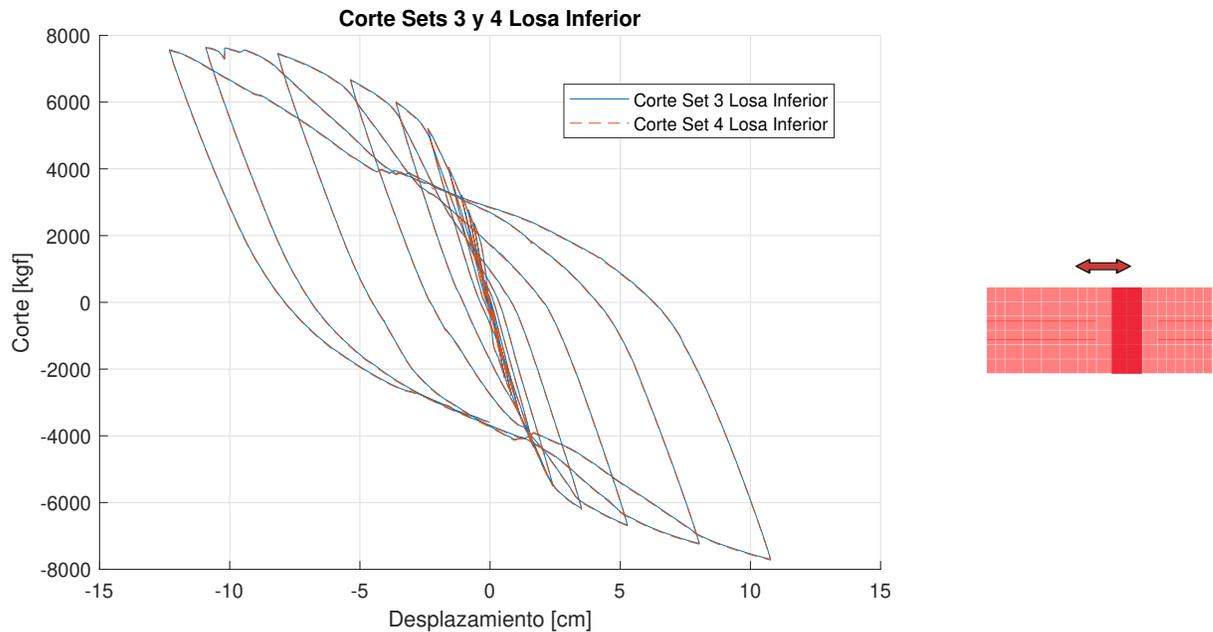


Figura 5.40: Corte vs Desplazamiento - Franjas 3 y 4 Losa Inferior

De los gráficos anteriores se puede observar que en esta losa existe una transmisión de aproximadamente 8[ton] independientemente de la dirección del desplazamiento. Al comparar esto con los resultados obtenidos de las figuras 5.25 y 5.28, los cuales presentan las cargas axiales sobre y bajo la losa inferior, se observa que cargas de corte transmitidas por la losa concuerdan con las variaciones de tracción y compresión en ambos muros.

### Momento en Losas

A continuación se presenta el momento generado tanto para la losa superior como la inferior. Comenzando con la losa superior, en las Figuras 5.41 y 5.42 se presenta el momento obtenido en las franjas analizadas, donde se aprecia que el producido en las franjas 1 y 2 alcanza un valor máximo de  $2.1 \cdot 10^5 [kgf \cdot cm]$  cuando el desplazamiento va en dirección positiva, mientras que cuando va en dirección negativa alcanza un valor de  $1.5 \cdot 10^6 [kgf \cdot cm]$ . Por otro lado, el momento obtenido en las franjas 3 y 4, franjas centrales entre muros de la losa, es aproximadamente un 50[%] del observado en las franjas 1 y 2, lo cual indica que la zona más solicitante en la losa se encuentra adyacentes a los bordes de muro.

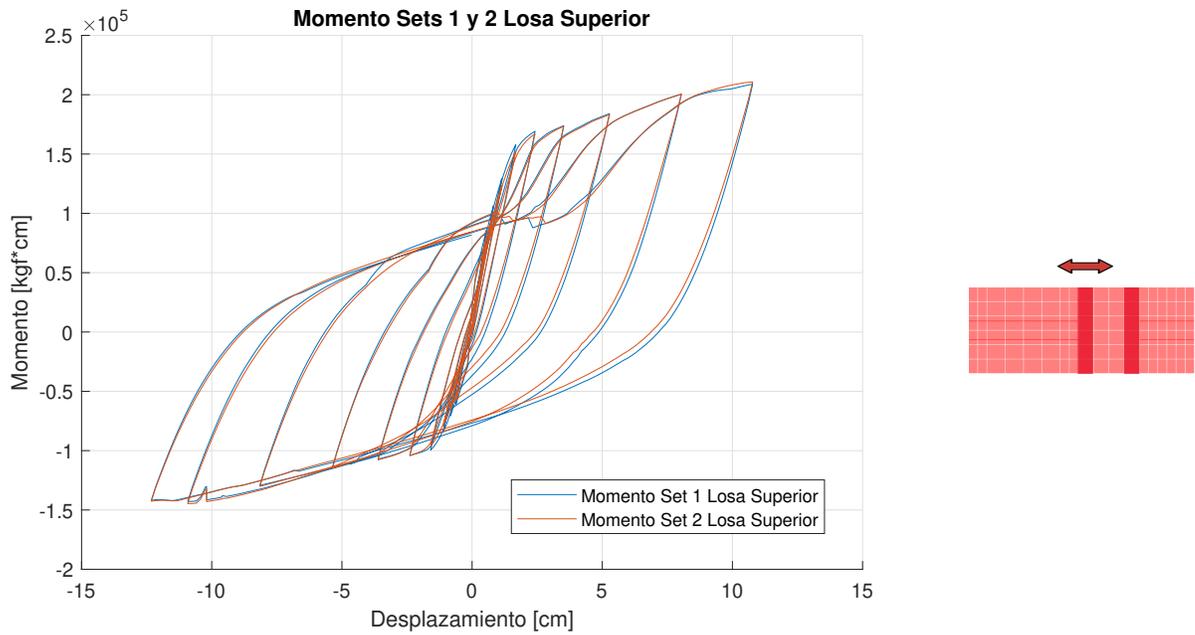


Figura 5.41: Momento vs Desplazamiento - Franjas 1 y 2 Losa Superior

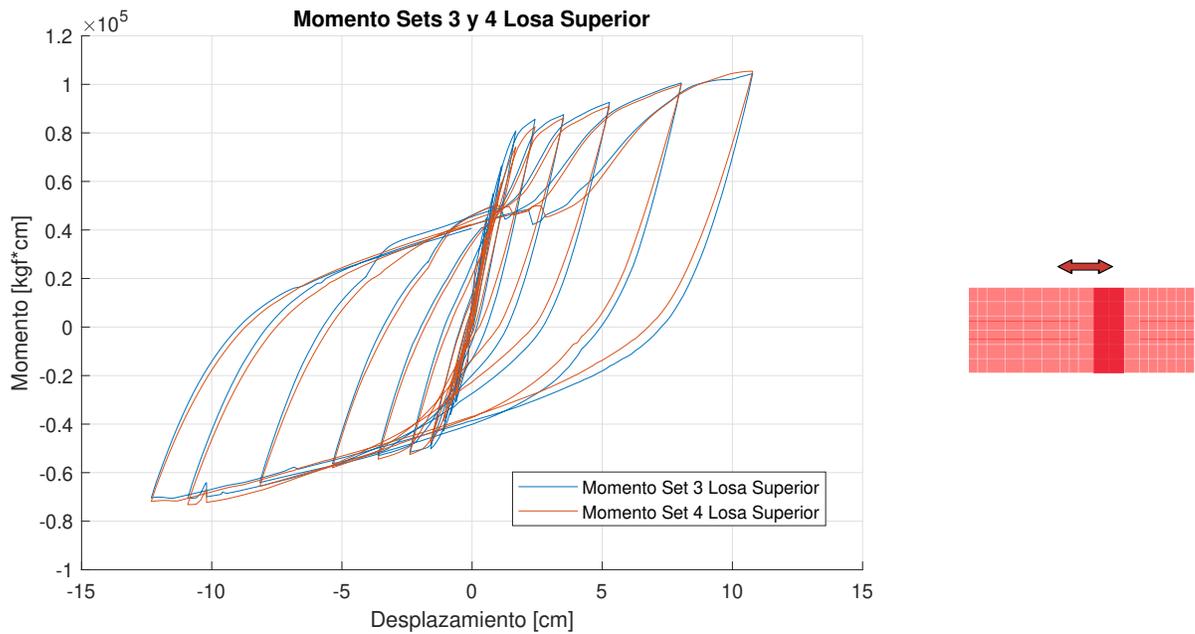


Figura 5.42: Momento vs Desplazamiento - Franjas 3 y 4 Losa Superior

Análogamente a la losa superior, en los siguientes gráficos se presenta el momento generado en losa inferior.

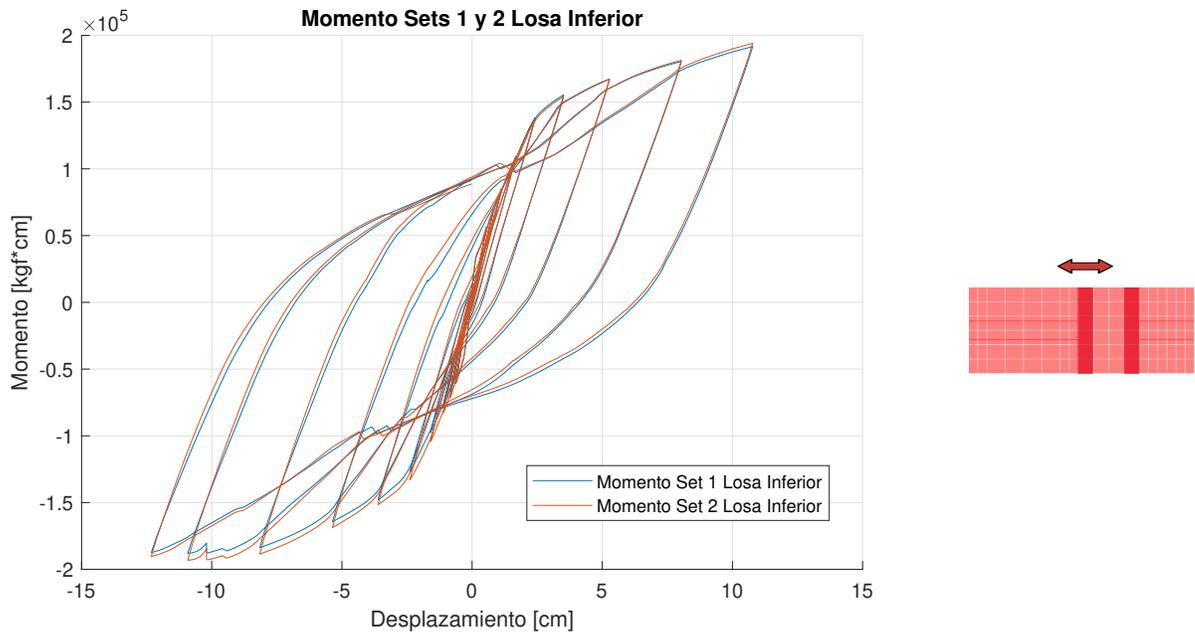


Figura 5.43: Momento vs Desplazamiento - Franjas 1 y 2 Losa Inferior

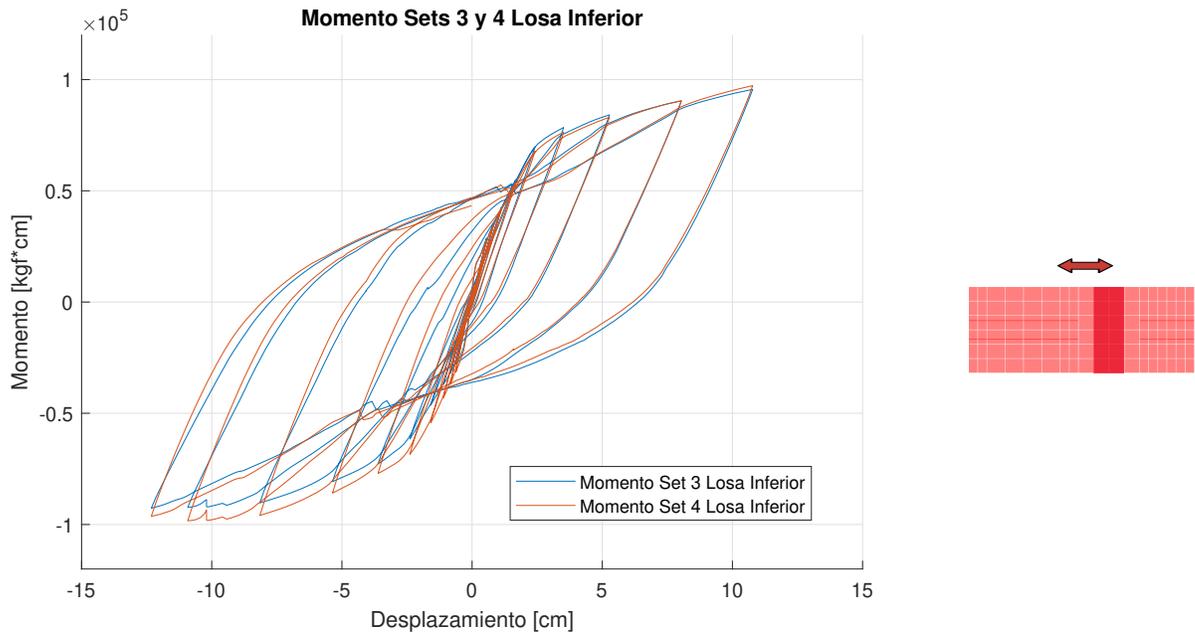


Figura 5.44: Momento vs Desplazamiento - Franjas 3 y 4 Losa Inferior

En las Figuras 5.43 y 5.44 se observa que el momento generado en la losa alcanza un valor máximo de aproximadamente  $2 \cdot 10^5 [kgf \cdot cm]$  independientemente de la dirección de desplazamiento. Por otro lado, el momento obtenido en las franjas 3 y 4, sigue el mismo comportamiento que en la losa superior, siendo un 50[%] del observado en las franjas 1 y 2.

Finalmente cabe destacar que la principal diferencia entre los momentos obtenidos en

ambas losas es que cuando el desplazamiento va en dirección positiva, ambas losas resisten el mismo momento, mientras que cuando el desplazamiento va en dirección negativa, la losa superior presenta un momento un 25[%] menor al de la losa inferior.

### 5.6.5. Perfil de Deformaciones Unitarias Máximas

Una vez obtenidos los principales esfuerzos en las zonas de mayor interés en el sistema aislado, se determinan las deformaciones unitarias máximas tanto de tracción como compresión en el muro MR1 en ambas direcciones de análisis, las cuales son comparadas con los resultados obtenidos en el muro aislado M0, el cual fue estudiado por (Díaz, 2016). Para la obtención de estas deformaciones en el modelo, se utilizan los puntos de cuadratura de cada elemento de borde del muro, los cuales almacenan estas deformaciones luego de generar el análisis, en donde, con el objetivo de tener una comparación fidedigna al estudio anteriormente mencionado, se escogen los puntos de cuadratura correspondientes a la primera columna (puntos 1, 4 y 7) del segundo elemento y la última columna (puntos 3, 6 y 9) del penúltimo elemento, para luego promediar las deformaciones verticales obtenidas en estos puntos y así obtener la deformación de tracción y compresión máximas para ambas posiciones. Este procedimiento se realiza para todos los elementos finitos en las posiciones mencionadas, a lo largo de toda la altura del muro MR1, tanto para el sistema acoplado como aislado.

#### Muro Rectangular MR1 Aislado

Se grafican las deformaciones máximas a tracción para el muro MR1 aislado en ambos bordes de muro para ambas direcciones de desplazamiento. A continuación, en la Figura 5.45 se presentan los resultados.

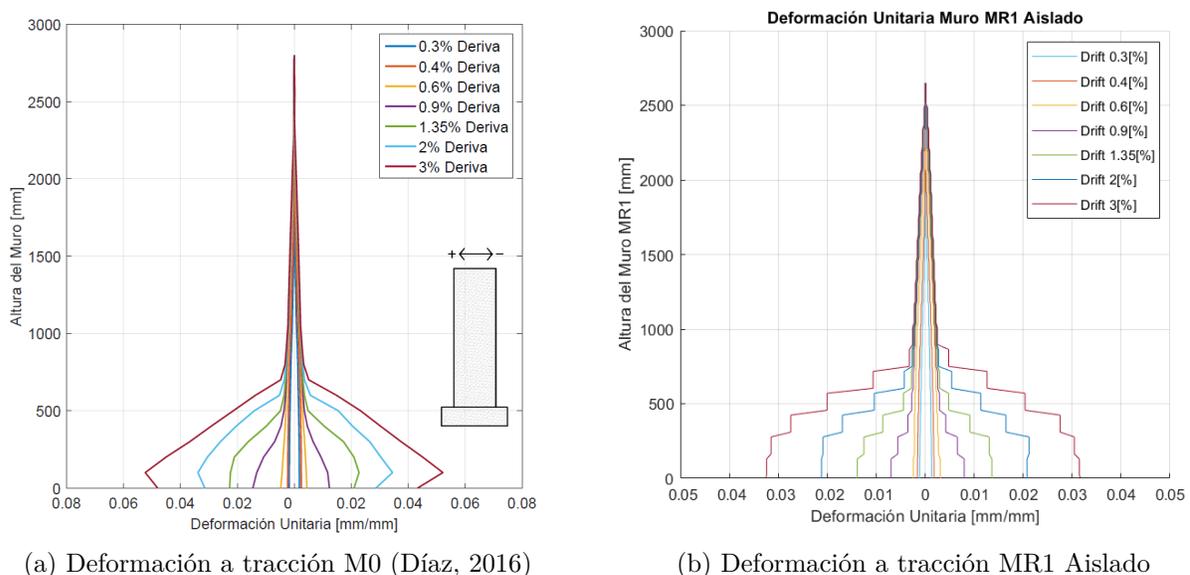
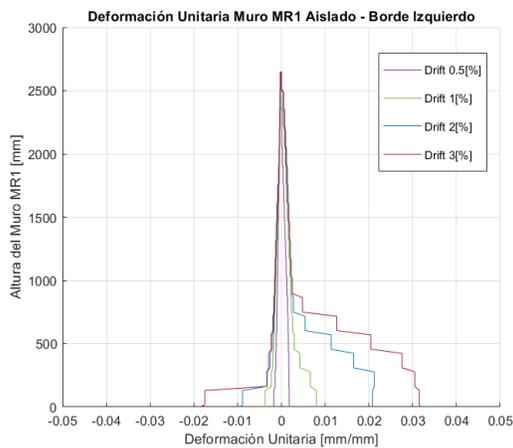


Figura 5.45: Comparación de deformaciones máximas a tracción entre muro base M0 y MR1 aislado

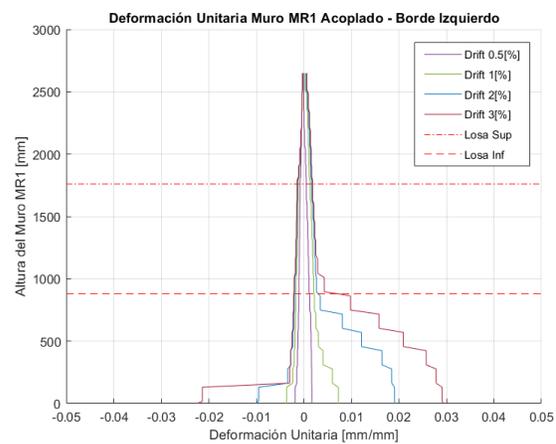
Los resultados obtenidos muestran una buena aproximación al perfil de deformaciones del caso base (muro M0) del estudio de (Díaz, 2016), en donde se obtienen resultados de deformaciones máximas a tracción levemente inferiores al primer análisis (lo cual se puede explicar por diferencias en el modelado de elementos y de las propiedades ajustadas al modelo) pero que presentan resultados dentro del rango esperado. Lo anterior respalda que el comportamiento del modelo es congruente y asegura un base sólida para la comparación del modelo aislado con el de muros acoplados. Particularmente, se observa una notoria simetría en los resultados y una clara forma cónica en la base, ratificando que el daño en muros esbeltos se centra en la zona basal.

## Muro Rectangular MR1 Acoplado

Una vez se validan los resultados del MR1 aislado, se procede a analizar las deformaciones unitarias de tracción y compresión para el sistema de muros acoplados. En particular, se estudia y compara el comportamiento del muro MR1 acoplado junto a su símil aislado. A continuación, en la Figuras 5.46 y 5.47 se presentan los resultados de esta comparativa para cuatro niveles de deriva, tanto para el borde izquierdo del muro como para el derecho.

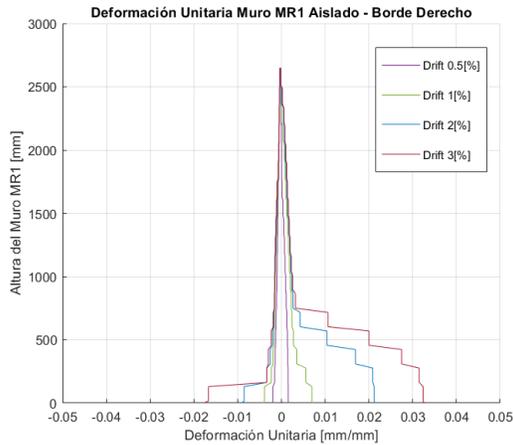


(a) Deformación unitaria MR1 Aislado - BI

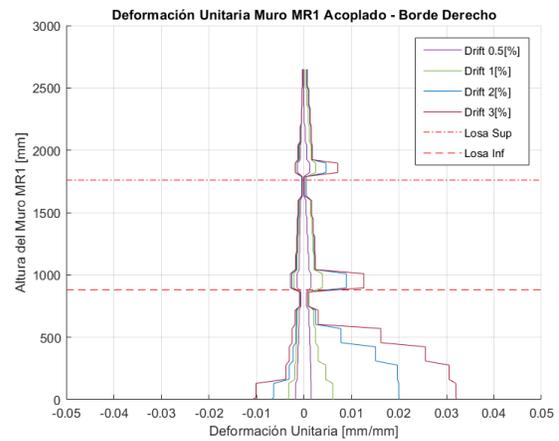


(b) Deformación unitaria MR1 Acoplado - BI

Figura 5.46: Comparación de deformaciones unitarias para muro MR1 aislado y acoplado - Borde Izquierdo



(a) Deformación unitaria MR1 Aislado - BD



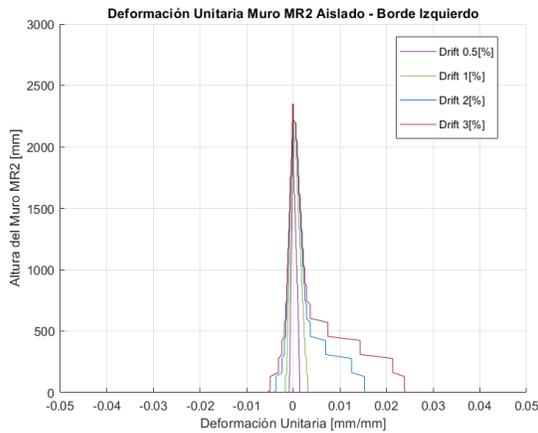
(b) Deformación unitaria MR1 Acoplado - BD

Figura 5.47: Comparación de deformaciones unitarias para muro MR1 aislado y acoplado - Borde Derecho

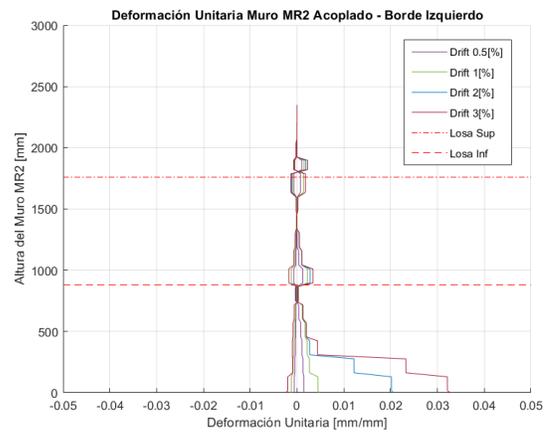
En la Figura 5.46 se puede observar que en el sistema acoplado, para el borde izquierdo del muro MR1, existen pequeñas variaciones en comparación al muro aislado. En particular, existe una ligera disminución en la deformación unitaria a tracción en la base y un pequeño aumento en la deformación unitaria a compresión, lo cual es más notorio para niveles de deriva mayores.

Por otro lado, en la Figura 5.47 se presentan los resultados del mismo análisis pero para el borde derecho del muro MR1, el cual presenta una diferencia más notoria en cuanto al comportamiento para el caso aislado y acoplado. Respecto a lo anterior, el muro en el sistema acoplado presenta una considerable disminución en la deformación unitaria a compresión en comparación al muro MR1 aislado, mientras que las deformaciones a tracción permanecen similares en la base del muro, pero con la diferencia de que en la zona bajo las losas es cercana a 0, mientras que en la zona más cercanas sobre estas, las deformaciones aumentan considerablemente. Esto último debido a la restricción impuesta por las losas y el aumento de rigidez que impide el desplazamiento en la zona.

Posteriormente, se comparan los resultados para el muro MR2 acoplado junto a su similar aislado. A continuación, en las Figuras 5.48 y 5.49 se presentan los resultados de esta comparativa para cuatro niveles de deriva, tanto para el borde izquierdo del muro como para el derecho.

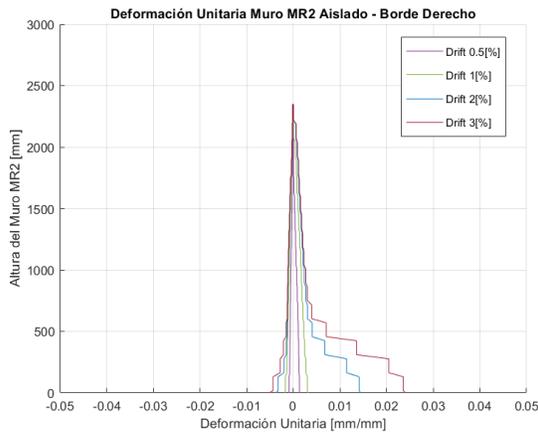


(a) Deformación unitaria MR2 Aislado - BI

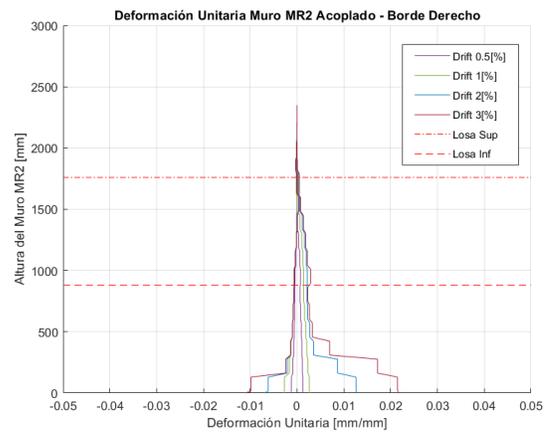


(b) Deformación unitaria MR2 Acoplado - BI

Figura 5.48: Comparación de deformaciones unitarias para muro MR2 aislado y acoplado - Borde Izquierdo



(a) Deformación unitaria MR2 Aislado - BD



(b) Deformación unitaria MR2 Acoplado - BD

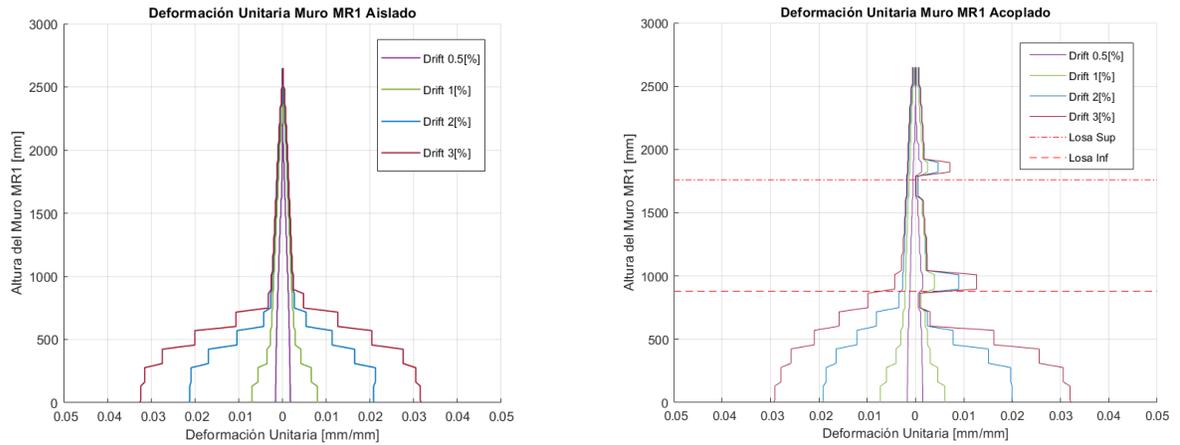
Figura 5.49: Comparación de deformaciones unitarias para muro MR2 aislado y acoplado - Borde Derecho

En la Figura 5.48 se puede observar que en el sistema acoplado, para el borde izquierdo del muro MR1, existen variaciones notables en las deformaciones en comparación a las del muro aislado. En particular, existe una disminución en la deformación unitaria a compresión en la base y un notorio aumento en la deformación unitaria a tracción en la base del muro MR2, al igual que en las zonas sobre el nivel de losas. Esto presenta un comportamiento idéntico al del borde derecho del muro MR1 debido a que esta zona está directamente conectada con las losas.

Adicionalmente, en la Figura 5.49 se puede observar que en el sistema acoplado, para el borde izquierdo del muro MR1, existen ligeras variaciones en comparación al muro aislado. En particular, existe una leve disminución en la deformación unitaria a tracción en la base y un considerable aumento de aproximadamente el doble de deformación en compresión, lo cual es concordante con el efecto esperado debido al acople mediante losas.

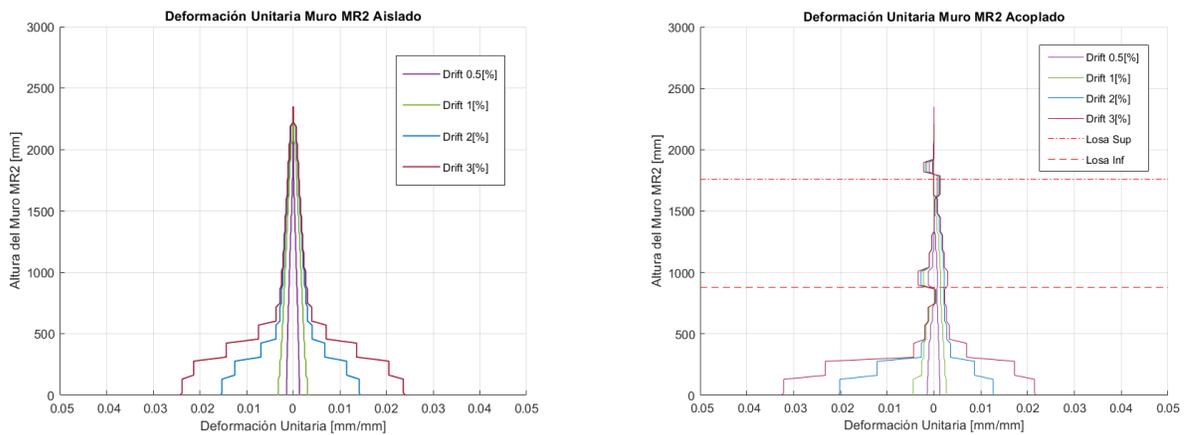
## Deformaciones Máximas a Tracción

Finalmente, se procede a graficar las deformaciones unitarias máximas de tracción en ambos sentidos de desplazamiento para el sistema de muros acoplados para así presentar las principales diferencias al modelo de muro MR1 aislado. A continuación, en la Figuras 5.50 y 5.51 se presentan los resultados de esta comparativa.



(a) Deformación máxima a tracción MR1 Aislado      (b) Deformación máxima a tracción MR1 Acoplado

Figura 5.50: Comparación de deformaciones unitarias máximas a tracción para muro MR1 aislado y acoplado



(a) Deformación máxima a tracción MR2 Aislado      (b) Deformación máxima a tracción MR2 Acoplado

Figura 5.51: Comparación de deformaciones unitarias máximas a tracción para muro MR2 aislado y acoplado

Analizando las Figuras presentadas previamente podemos notar que la principal diferencia se encuentra en los bordes internos de los muros MR1 y MR2, los cuales están directamente en contacto con las losas junto a su consecuente traspaso de carga de un muro al otro. Para ambos casos se concentra una mayor concentración de deformaciones en las zonas por sobre el nivel de las losas, lo cual se explica por la restricción impuesta por estas al desplazamiento.

Además, para el muro MR2 acoplado, las deformaciones en la base del modelo son mayores a medida que aumenta el nivel de deriva. Por otro lado, en los bordes externos no se observan notorias diferencias en cuanto a las deformaciones máximas entre los modelos de muros aislados y acoplados, por lo que se puede concluir que la presencia de losas no influye de manera considerable en estas zonas.

### 5.6.6. Perfil de Curvatura en Altura

La curvatura corresponde al ángulo de rotación que forma el perfil de deformaciones en relación al eje sobre el que se esté evaluando, en este caso el eje vertical. A partir de los resultados previamente obtenidos se grafica el perfil de curvatura en altura para ambos muros del sistema acoplado. Cabe señalar que, para los gráficos expuestos más adelante, en el eje positivo se presentan los resultados de curvatura cuando el sentido de desplazamiento es positivo (cuando el muro MR1 va en la dirección del muro MR2), mientras que en el eje negativo se presentan los resultados de curvatura cuando el desplazamiento es negativo.

A continuación en la Figura 5.52 se presenta la comparación del perfil de curvatura entre el muro base M0 (Díaz, 2016) y el muro MR1 aislado del modelo.

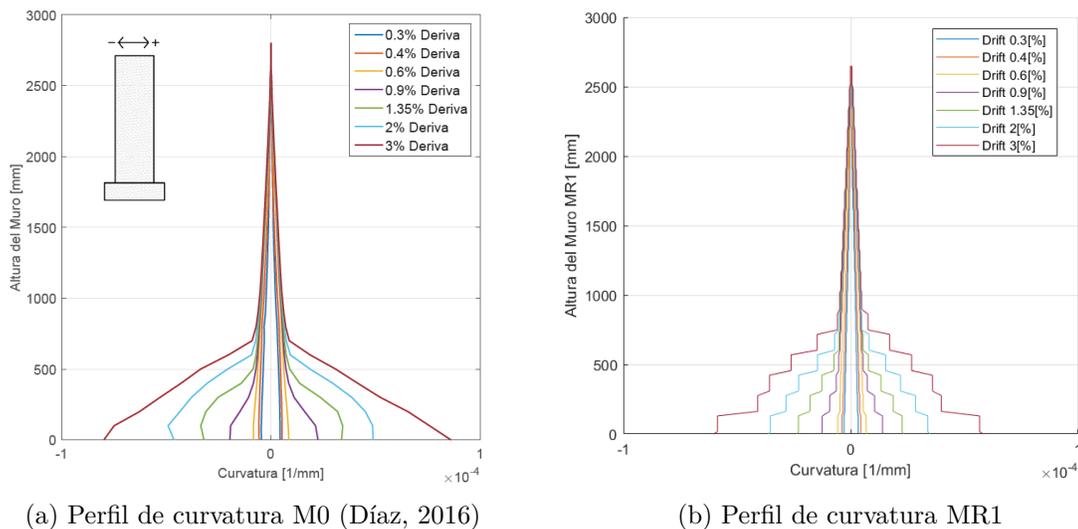


Figura 5.52: Comparación de perfiles de curvatura en altura M0 y MR1

Los resultados obtenidos muestran un perfil de curvatura cercano al del muro M0 del estudio de (Díaz, 2016), en donde, al igual que en el perfil de deformaciones, se obtienen resultados levemente inferiores al primer análisis pero que presentan resultados dentro del rango esperado, observando una notoria simetría en los resultados y una clara forma cónica en la base.

A continuación en las Figuras 5.53 y 5.54 se presentan la comparaciones del perfil de curvatura de ambos muros, MR1 y MR2, entre los casos acoplados y sus símiles aislados.

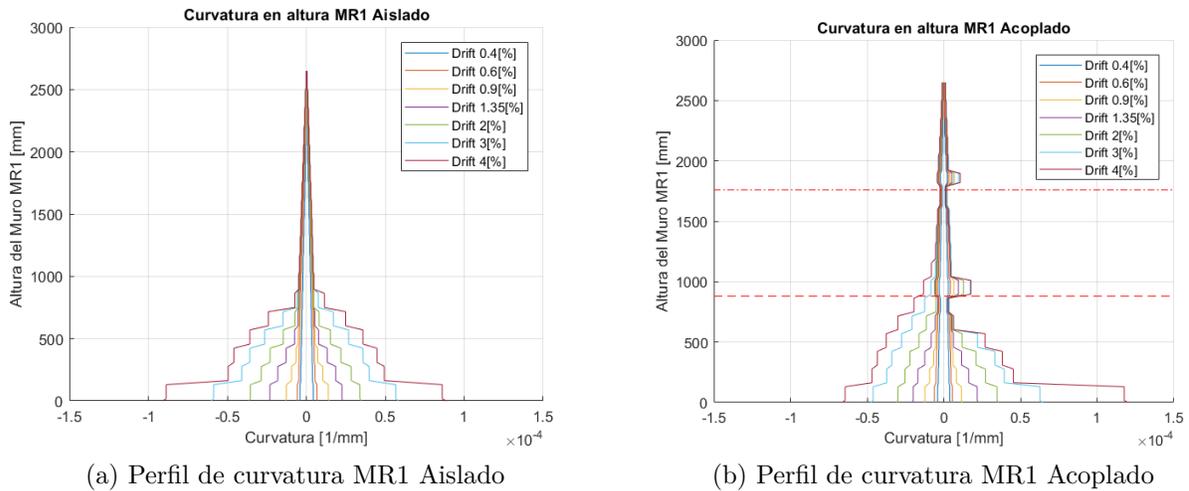


Figura 5.53: Comparación de perfiles de curvatura en altura MR1

Posteriormente, en la Figura 5.54 se presenta la comparación del perfil de curvatura entre el muro MR2 aislado y MR2 acoplado.

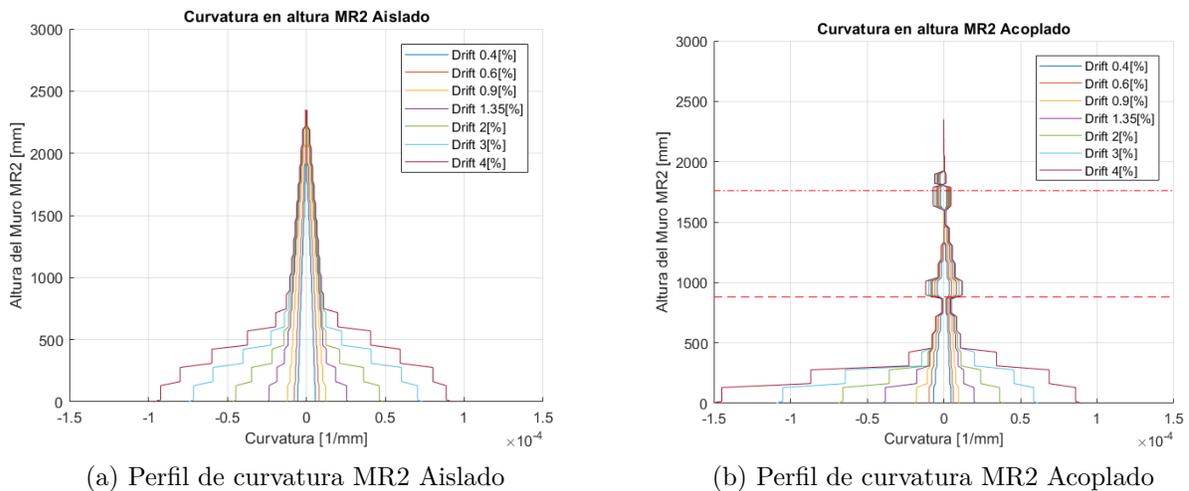


Figura 5.54: Comparación de perfiles de curvatura en altura MR2

De la Figura 5.53 se puede observar que el muro MR1 no se ve en gran medida afectado entre casos acoplado o aislado, donde en la mayoría de los drifts se presentan resultados relativamente similares con ligeras diferencias según el sentido de análisis. Esto último a excepción del último ciclo, en donde, para el sistema acoplado, se ve un aumento significativo de curvatura cuando el sentido de análisis es negativo y una disminución de esta cuando es en sentido positivo.

Con respecto al muro MR2, observando la Figura 5.54 se puede ver que este tiene diferencias notorias de curvatura particularmente cuando el sentido de análisis es positivo. Esto se debe principalmente al esfuerzo transmitido desde el muro MR1 por las losas al muro MR2 en este sentido de análisis, en donde este tiene un mayor nivel de colaboración. Por otro lado,

cuando el sentido es negativo, se alcanzan niveles de curvatura similares en ambos casos, tanto aislado como acoplado, lo cual concuerda con lo esperado.

Finalmente, es de especial interés comparar las curvaturas de los muros MR1 y MR2 del sistema acoplado, en donde se puede observar que la curvatura en la base presente en el MR2 cuando la dirección de análisis es negativa es levemente mayor a la que presenta el MR1 cuando va en sentido positivo. Esto sugiere que las grandes diferencias entre un muro y otro es producto de la altura de la rótula plástica, en donde el muro MR1 tiene una rótula cercana a la altura de piso inferior, mientras que el MR2 cercana a la mitad. Análogamente, las curvaturas crecen aproximadamente en esa proporción, al igual que en la otra dirección. Cabe notar que las curvaturas máximas del MR2 son más grandes que las del MR1 debido a tiende a concentrar mucha más curvatura en la base que el otro muro.

### 5.6.7. Perfil de Desplazamiento en Altura

Con el fin de complementar los resultados obtenidos y lograr una mayor comprensión del comportamiento del sistema, se grafica los perfiles de desplazamiento en ambas direcciones del borde interno del muro MR1 y MR2 del sistema acoplado, en donde cabe mencionar que los drifts graficados corresponden a los aplicados a nivel de techo del muro MR1, zona en la cual se aplica la carga lateral. A continuación, en la Figura 5.55, se presenta la comparación de estos resultados entre el MR1 del caso aislado y el acoplado.

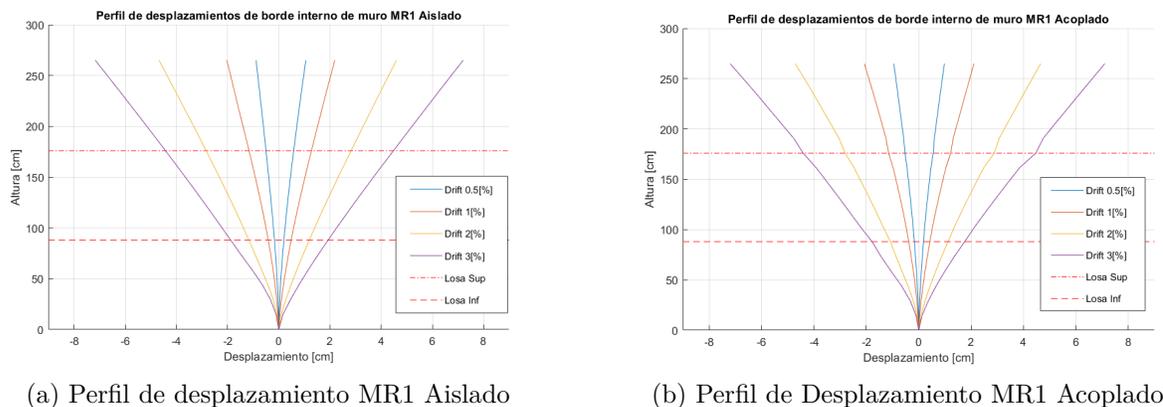


Figura 5.55: Comparación de perfiles de desplazamiento en altura MR1

En la figura previa se puede observar que en ambos casos el desplazamiento en altura es simétrico, lo cual es acorde a lo esperado, y que la principal diferencia entre el comportamiento de ambos muros es que para el caso acoplado existe un ligero incremento el desplazamiento a nivel de las losas a medida que va aumentando el nivel de deriva. Esto se explica por el traspaso de carga que existe entre un muro y otro a través de las losas y los constantes esfuerzos de tracción/compresión y corte existentes en estas zonas.

Adicionalmente, se grafica el perfil de desplazamiento para el caso del borde interior de muro MR2, el cual es el de mayor interés ya que se espera que se encuentre más afectado en

comparación al MR1. Esto se presenta en la Figura 5.56 a continuación.

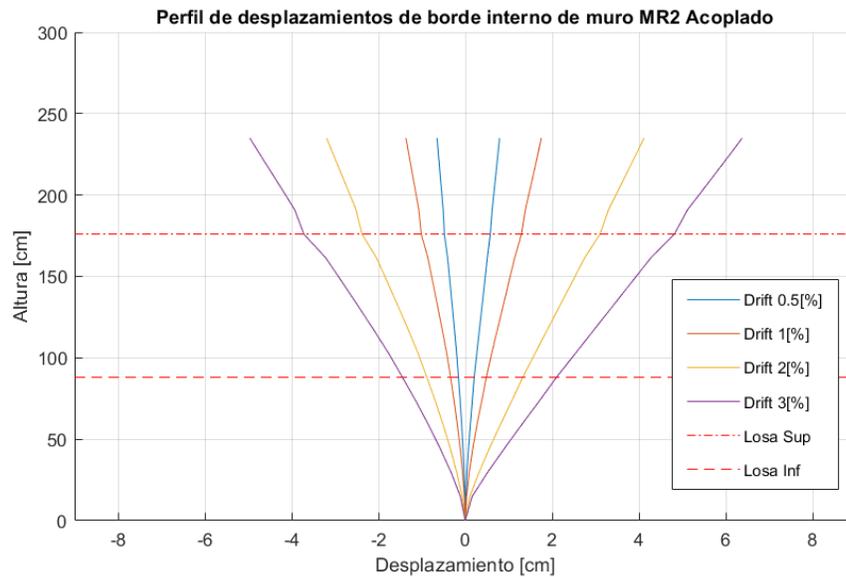


Figura 5.56: Perfil de desplazamiento en altura MR2 Acoplado

En la figura anterior se puede observar que, a diferencia del muro MR1, el desplazamiento en altura deja de ser simétrico de acuerdo al sentido de desplazamiento. En particular, el desplazamiento que se genera cuando se aplica la carga en sentido positivo va aumentando en comparación al generado en sentido negativo, lo cual se hace más notorio a medida que va aumentando el nivel de deriva. De esta manera, para un Drift del 3[%] se llega a desplazamientos de techo ligeramente superiores a 6[cm] en el sentido positivo mientras que para la misma deriva, pero en sentido negativo se llega a un desplazamiento de aproximadamente 5[cm]. Lo anterior se explica ya que a medida que aumenta el nivel de deriva, se empieza a plastificar la base del muro MR2 generando una ligera inclinación de este muro hacia la derecha. Esto provoca que cuando el desplazamiento es en sentido negativo, el desplazamiento global del borde del muro MR2 sea menor a cuando el desplazamiento es en sentido positivo. A continuación, en la Figura 5.57 se presenta el modelo en su estado inicial después de llegar derivas del 3[%], con lo cual se presenta de manera gráfica lo anteriormente comentado.

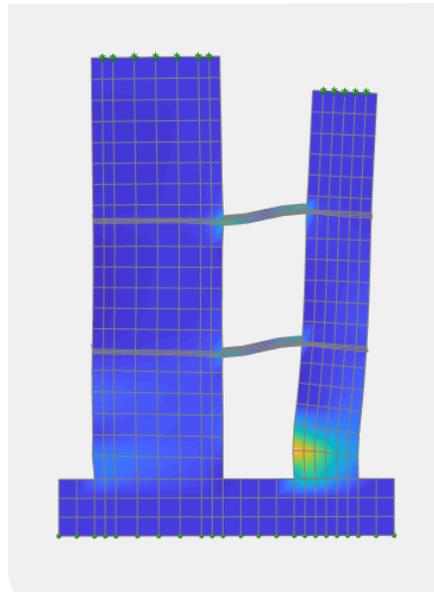
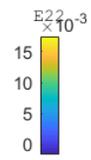


Figura 5.57: Modelo Post drift del 3[%] - Factor de Escala Gráfico 20



## Capítulo 6

# Montaje Experimental

En el presente capítulo se define una propuesta del montaje de las probeta y la metodología para la implementación de ensayos a futuro. Esto, según las limitaciones impuestas por el laboratorio del departamento de ingeniería civil, en la Facultad de Ciencias físicas y matemáticas de la Universidad de Chile. A continuación se presenta una descripción del laboratorio y de los implementos necesarios para el desarrollo de un correcto del ensayo.

### 6.1. Laboratorio de Ensayo

El laboratorio de estructuras en que se realizará el ensayo, tal como fue comentado anteriormente, se ubica en las inmediaciones de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Esta posee una superficie total de más de  $200[m^2]$ , posee un muro de reacción con dimensiones de  $3.7[m]$  de alto,  $3.95[m]$  de largo y  $1.4[m]$  de espesor y además, una losa de reacción con dimensiones de  $18.45[m]$  de largo,  $9.7[m]$  de ancho y  $0.6[m]$  de espesor. Tanto el muro como la losa de reacción fueron construidos de forma tal de permitir el anclaje de equipos y probetas de ensayo, y ambos disponen de perforaciones espaciadas cada  $40[cm]$  en sus direcciones principales y fueron diseñadas para soportar cargas de  $100[tonf]$  aplicadas en la parte superior del muro y  $100[tonf]$  aplicadas en el centro de la losa. A continuación, en la Figura 6.1 se presenta un plano general de este laboratorio.

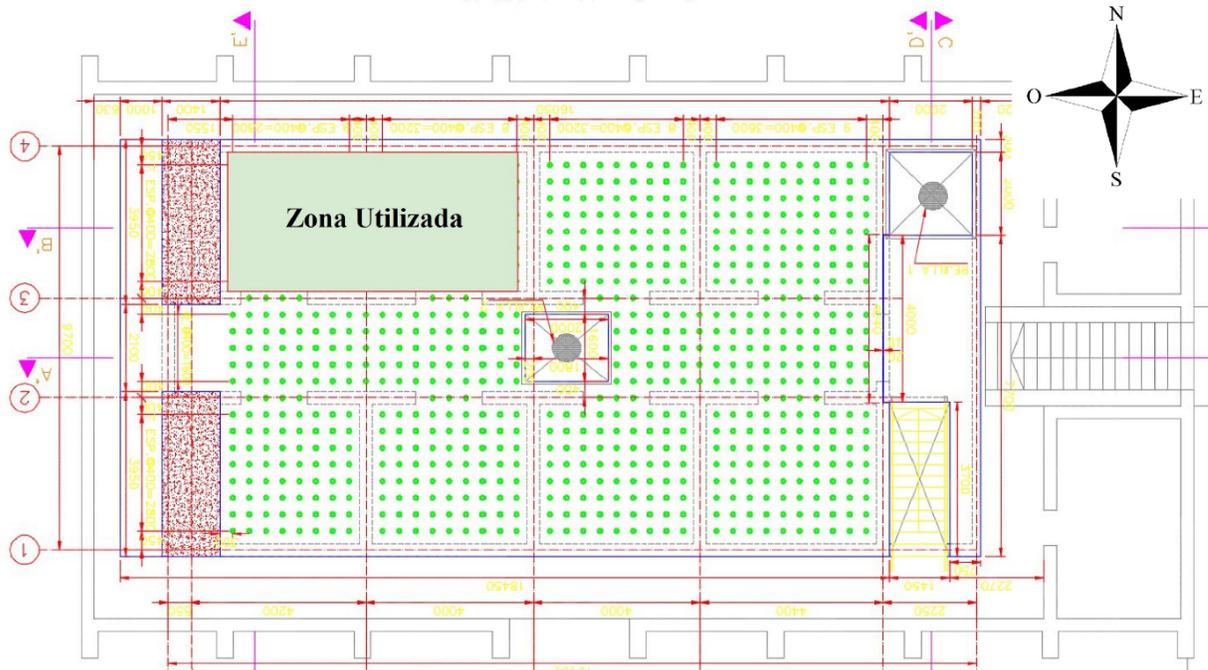


Figura 6.1: Planta general del Laboratorio de Estructuras

## 6.2. Montaje Experimental

Una vez ya hormigonada la totalidad de la probeta, considerando ambos muros, losas, pedestal y vigas de carga, se deberá montar el ensayo cíclico de estos. El muro MR1 será el cargado lateralmente a través del actuador hidráulico, tal como se presenta en el esquema simplificado presente en la Figura 6.2, donde se visualizan los elementos para materializar el ensayo.

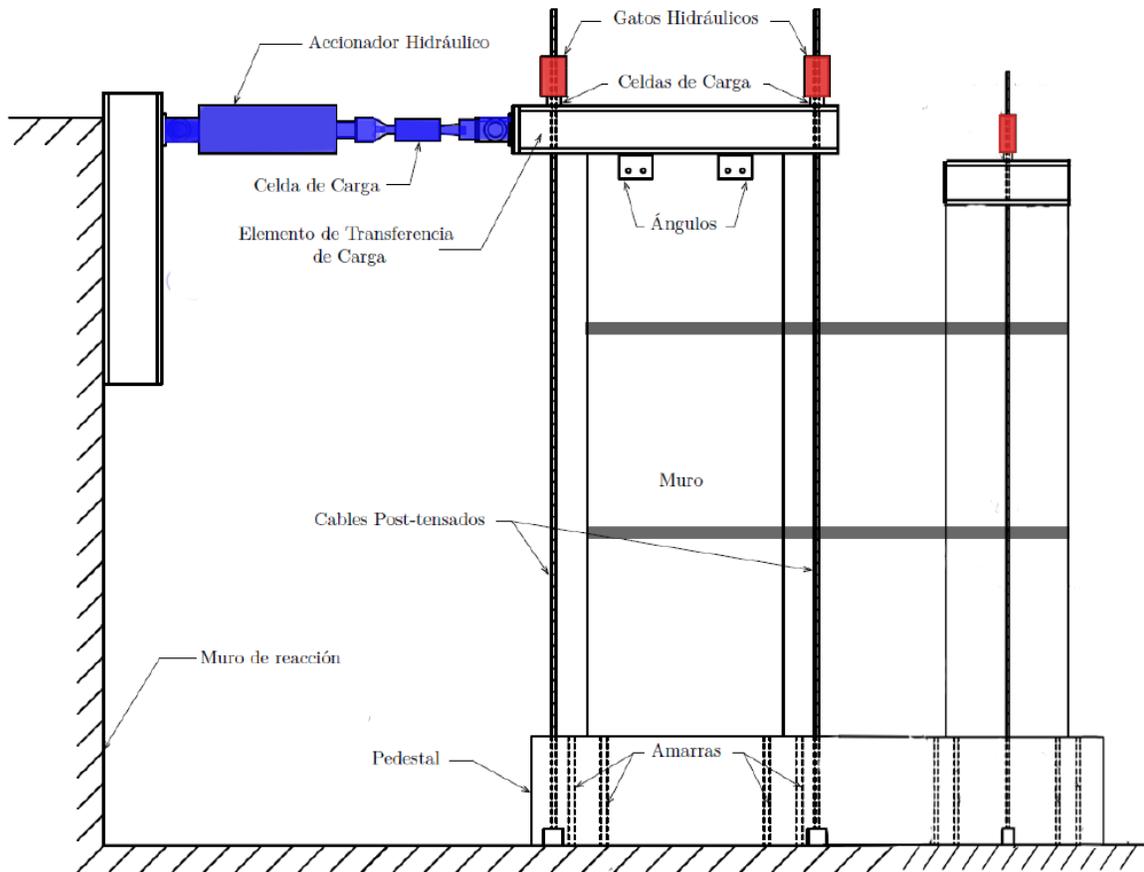


Figura 6.2: Esquema montaje experimental

Donde el actuador hidráulico que aplica la carga lateral se presenta en color azul y los que aplican la carga axial en color naranja. La losa y el muro de reacción permiten el correcto empotramiento de la probeta y actuador hidráulico, mientras que para la restricción lateral se dispondrá de un marco de acero el cual impide el desplazamiento de la probeta fuera del plano de los muros. Estas estructuras y herramientas adicionales se explican con mayor detalle a continuación.

### 6.2.1. Actuador Hidráulico - Carga Lateral

El actuador a utilizar funciona a través de un mecanismo hidráulico, el cual permite que el pistón se expanda o contraiga un máximo de 600[mm] y un mínimo de 130[mm] respectivamente, controlando así el desplazamiento lateral de la probeta. Además, las cargas aplicadas para obtener cierto grado de deformación se registran a través de una celda de carga propia del actuador, de marca Interface y modelo 1200HC.1244, la cual posee una capacidad de 1200[kN]. A continuación, se presenta el actuador hidráulico mencionado en la Figura 6.3.



Figura 6.3: Actuador hidráulico

La ubicación del actuador corresponde a la altura que coincide con el centro de la viga de carga de del muro MR1, postensando los apoyos rotulados que posee esta herramienta tanto en el muro de reacción como en la rótula dispuesta en la viga anteriormente mencionada.

Posteriormente, al iniciar el ensayo, el desplazamiento aplicado por este actuador será controlado mediante una botonera conectada a una bomba hidráulica. Esta permite regular el flujo del aceite dentro del actuador para desplazar la probeta en dirección positiva y negativa con una precisión de décimas de milímetros.

### 6.2.2. Gatos Hidráulicos - Carga Axial

Se dispondrán de 4 gatos hidráulicos, los cuales tienen como principal función el postensado y la aplicación de la carga axial en el muro MR1. Además, mediante su propio sistema de control, consistente en una bomba hidráulica con capacidad de controlar hasta 4 gatos en paralelo, cada uno de estos posee la capacidad de aplicar una carga de 150[tonf] a 1000[Psi]. A continuación, en la Figura 6.4, se presentan los gatos hidráulicos a utilizar.



Figura 6.4: Gatos hidráulicos

Para la aplicación de las cargas se dispondrán de cuatro barras de acero con hilo de 15[mm] hasta 32[mm] de diámetro, dos ubicadas al lado norte y dos al lado sur del muro MR1. Estas barras pasarán a través de los gatos hidráulicos para ser ancladas en la parte superior del montaje mediante un sistema de placa de acero más tuerca. Por otro lado, en el extremo inferior, cada barra pasará a través de la fundación para la aplicación de la carga axial, siendo anclada en la parte inferior con el mismo sistema de placa más tuerca.

Finalmente, para lograr llegar a la carga deseada, el sistema de control hará circular aceite por las mangueras hasta la cantidad de gatos a utilizar para darles la orden de extenderse o comprimirse.

### 6.2.3. Marco de Acero - Restricción Lateral

Una condición principal al momento de llevar a cabo el ensayo es la construcción de un marco de acero que tendrá como principal objetivo restringir el desplazamiento fuera del plano de los muros mientras se aplican las cargas y la probeta se deforma. Para asegurar esta restricción lateral se usarán barras, las que estarán ancladas a un puntal perteneciente al marco y además se encontrarán en contacto con las vigas de transferencia de ambos muros mediante una punta redondeada. De esta manera, las barras deslizarán fácilmente durante el ensayo pero impedirán el movimiento en la dirección fuera del plano. En la Figura 6.5 se presenta un ejemplo del sistema antes mencionado.



Figura 6.5: Sistema de restricción lateral

Además del objetivo antes mencionado, el marco cumplirá con la función de dar el soporte a todo el sistema. De esta manera, durante los ensayos, todo el sistema de carga axial, el cual se mueve solidariamente con el muro, se amarra a un teclé con la capacidad suficiente para resistir una posible falla frágil de cualquier sistema para así resguardar a las personas y equipos presentes.

#### 6.2.4. Celdas de Carga - Cuantificación de Cargas

Para el montaje experimental se utilizará celdas de carga. Estos corresponden a instrumentos que al conectarse con gatos hidráulicos permiten registrar las diferencias de voltaje tras la aplicación de cierta carga o desplazamiento por estos, con lo cuál se podrá medir esta carga.

Para cuantificar el valor de las cargas antes mencionadas, la celda se debe calibrar obteniendo una relación entre voltaje y carga, para luego ser conectada a un computador y posteriormente, a través del software Labview, registrar los voltajes y hacer la conversión respectiva. Cabe mencionar que se podrá monitorear en tiempo real la carga que está siendo aplicada a través de los gatos hidráulicos. A continuación, en la Figura 6.6 se muestra una celda de carga típica utilizada en estudios análogos dentro de la universidad.



Figura 6.6: Celda de Carga

### 6.2.5. Bombas Hidráulicas - Sistema de Control

El sistema de control, tanto para el actuador como para los gatos hidráulicos, consta de una bomba hidráulica cuya función es regular la presión del aceite interno, para así convertirlo en una extensión o compresión del actuador o gato hidráulico. Ambas bombas cuentan con dos mangueras que controlan la entrada y salida del aceite. En la Figura 6.7 se presentan las bombas hidráulicas a utilizar en el futuro ensayo.



(a) Bomba para Actuador



(b) Bomba para Gatos Hidráulicos

Figura 6.7: Bombas de Control



# Capítulo 7

## Conclusiones

En la presente memoria, se cumple con el principal objetivo de la investigación, el cual es estudiar analíticamente el comportamiento no lineal de muros rectangulares de hormigón armado acoplados mediante losas frente a una carga lateral cíclica y una carga axial constante, con la finalidad de poder comparar los resultados obtenidos con modelos de elementos finitos utilizados en trabajos anteriores y en particular con muros aislados y así entender en mayor profundidad la influencia de las losas en el comportamiento total del sistema.

Se estudia y caracteriza los parámetros representativos de muros rectangulares acoplados y losas típicas en la práctica constructiva chilena actual, luego se escalan estas propiedades y se generan los planos de la probeta para el futuro ensayo experimental. Se establece que el primer muro será basado en el muro M0 de 90[cm] de largo, 265[cm] de alto y 15[cm] de espesor estudiado por (Díaz, 2016) cumpliendo con las características típicas mencionadas anteriormente, el cual es acoplado mediante dos losas de 10[cm] de espesor y 70[cm] de ancho a un segundo muro con la mitad del largo del primero y armaduras de refuerzo adecuadas con el fin de resistir de manera correcta el análisis.

Se desarrolla un modelo de elementos finitos a través de la plataforma SAFE-Toolbox con el objetivo de estudiar la respuesta no lineal del acoplamiento de muros rectangulares mediante losas en comparación con modelos de muros aislados tanto del muro MR1 como del MR2. Se ejecuta un análisis de tipo cíclico para posteriormente obtener los esfuerzos y deformaciones en los muros y losas, con lo cual se ha llegado a conclusiones de acuerdo al comportamiento, concentración y variación de esfuerzos axiales, de corte y momento en los elementos, deformaciones máximas y curvatura de muros en el sistema.

Se observa que el modelo tiene un comportamiento congruente con lo esperado, modelando de correcta manera las cargas transmitidas mediante las losas y muros, las cuales son concordantes entre si. En particular, la transmisión de carga axial a través de las losas del MR1 al MR2 corresponde a aproximadamente un 40 [%] de la carga axial total en el sentido de análisis positivo y un 30 [%] en el sentido negativo. Adicionalmente, la transmisión de corte del MR1 al MR2 corresponde a un 50 [%] del corte total en el sentido de análisis positivo, mientras que en el sentido negativo es de un 20 [%] del corte total.

A partir de lo anterior, se determina que el acople de ambos muros mediante losas tiene una influencia considerable en comparación a los muros aislados, llegando a esfuerzos de



corte y momento basales menos demandantes para el muro MR1 en la dirección de análisis positiva y una considerable colaboración del muro MR2 en ese mismo sentido. Esto debido a que a través de las losas se transmiten las cargas de un muro a otro permitiendo que los esfuerzos se repartan de tal manera de disminuir los esfuerzos y las deformaciones máximas en la base de ambos muros y así permitir un mejor comportamiento en el sistema completo proporcionando una mayor ductilidad y capacidad de disipación en comparación con el caso aislado. Además, las deformaciones unitarias máximas a tracción en ambos sistemas, tanto aislado como acoplado, demuestran que la principal diferencia entre estos es en el aumento de deformaciones por sobre el nivel de la losa y disminución de estas en la zona bajo losa, concentrando las deformaciones en la base. Esto se debe al efecto de acople de las losas al rigidizar y empotrar en cierto grado los bordes internos de muro.

Restando lo anteriormente mencionado, los niveles de deformación en la base no se ven en gran medida afectados para el muro MR1 entre caso aislado y acoplado. sin embargo si existen diferencias en la distribución en altura de estas. Además, en el muro MR2 se presenta un aumento significativo en las deformaciones particularmente cuando el sentido de análisis es positivo, disminuyendo la altura de la rótula y concentrando las deformaciones máximas en la base, esto debido al gran corte transmitido desde el muro MR1 al MR2 mediante las losas.

Luego de estudiar montajes experimentales afines, se determina que el mejor para cumplir los objetivos de esta investigación corresponde uno adaptado a partir del estudio de (Lee, Oh, Hwang, Lee, y Lee, 2010). Una vez determinado este, se entrega una propuesta de montaje experimental con el objetivo de que en una futura investigación se estudie experimentalmente la probeta modelada con el fin de poder validar el programa y modelo. Se detallan todos los elementos para la construcción y el desarrollo del ensayo, tales como muro y losa de reacción, marcos rígidos para la restricción lateral y actuadores hidráulicos para la aplicación de cargas axiales y laterales, entre otros.

Finalmente. con el objetivo de estudiar en mayor profundidad el efecto de las losas de acople entre muros, se propone modificar variables dentro del presente modelo tales como distancia entre muros y/o geometría y cuantías del muro MR2, entre otros, con el fin de llevar a un mayor entendimiento de los efectos de estas variaciones en este tipo de sistemas.



# Bibliografía

- Belarbi, A., y Hsu, T. T. (1994). Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete. *Structural Journal*, 91(4), 465–474.
- Chaperon, M. M. (2018). Estudio de la respuesta numérica de losas acopladas con muros t de hormigón armado.
- Collins, M. P., y Porasz, A. (1989). Shear design for high strength concrete. *CEB Bulletin d'information*, 193, 77–83.
- Díaz, S. A. (2016). Estudio experimental y modelamiento en elementos finitos de muros esbeltos de hormigón armado con discontinuidades tipo bandera.
- Estay, C. G. (2008). Características de muros de hormigón armado diseñados en Chile.
- Henríquez, C. F. (2019). Estudio de la respuesta numérica de losas acopladas con muros rectangulares de hormigón armado.
- Lee, S.-H., Oh, S.-H., Hwang, W.-T., Lee, K.-B., y Lee, H.-S. (2010). Static experiment for the seismic performance of a 2 story rc shear wall system. *Journal of the earthquake engineering society of Korea*, 14(6), 55–65.
- Lequesne, R., Parra-Montesinos, G., y Wight, J. K. (2009). Test of a coupled wall with high performance fiber reinforced concrete coupling beams. En *Thomas tc hsu symposium: Shear and torsion of concrete structures*.
- Manríquez, I. (2016). Ensayo de muros bandera de hormigón armado con carga lateral cíclica medido por fotogrametría y comparado con modelo puntal-tensor.
- Manríquez, I., Díaz, S., Massone, L., Rojas, F., y Herrera, R. (2017). Analytical and experimental cyclic response of rc walls with setback discontinuities. *Santiago*.
- Massone, L. M., Orakcal, K., y Wallace, J. W. (2009). Modelling of squat structural walls controlled by shear. *ACI Structural Journal*, 106(5).
- McKenna, F., Fenves, G. L., Scott, M. H., y cols. (2000). Open system for earthquake engineering simulation. *University of California, Berkeley, CA*.
- Muñoz, F. (2018). *Estudio experimental y analítico de muros t de hormigón armado ante cargas cíclicas* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad de Chile.
- Muñoz, G. (2017). Estudio experimental-teórico de muros de hormigón armado con discontinuidad central en la base e influencia de la presencia de losas.
- Muñoz, G., Rivas, J., Massone, L., Rojas, F., y Herrera, R. (2017). Experimental response of rc walls with openings under cyclic loading. En *16th world conference on earthquake*.
- Palermo, D., y Vecchio, F. J. (2003). Compression field modeling of reinforced concrete



- subjected to reversed loading: formulation. *Structural Journal*, 100(5), 616–625.
- Paulay, T. (2002). The displacement capacity of reinforced concrete coupled walls. *Engineering Structures*, 24(9), 1165–1175.
- Peña, E. A. (2016). Implementación del programa de elementos finitos safe.py para análisis no lineal dinámico con factor de convergencia de carga.
- Rivas, J. A. (2016). Construcción y ensayo de probetas de muros de hormigón armado con discontinuidades centrales en la base.
- Rojas, F. (2012). *Development of a nonlinear quadrilateral layered membrane element with drilling degrees of freedom and a nonlinear quadrilateral thin flat layered shell element for the modeling of reinforced concrete walls* (Vol. 74) (n.º 03).
- Ruiz, M. P. J. L. (2019). Estudio experimental de muros t de hormigón armado mediante fotogrametría.
- Saatcioglu, M., y Razvi, S. R. (1992). Strength and ductility of confined concrete. *Journal of Structural engineering*, 118(6), 1590–1607.
- Silva, M. A. (2016). Estudio analítico del efecto del confinamiento y la cuantía de borde en el comportamiento de muros t. diseño de montaje experimental para el ensayo de éstos.
- Thorenfeldt, E. (1987). Mechanical properties of high-strength concrete and applications in design. En *Symposium proceedings, utilization of high-strength concrete, norway, 1987*.

# Anexo A

## Planos

### A.1. Planos de Fundación y Vigas de Carga

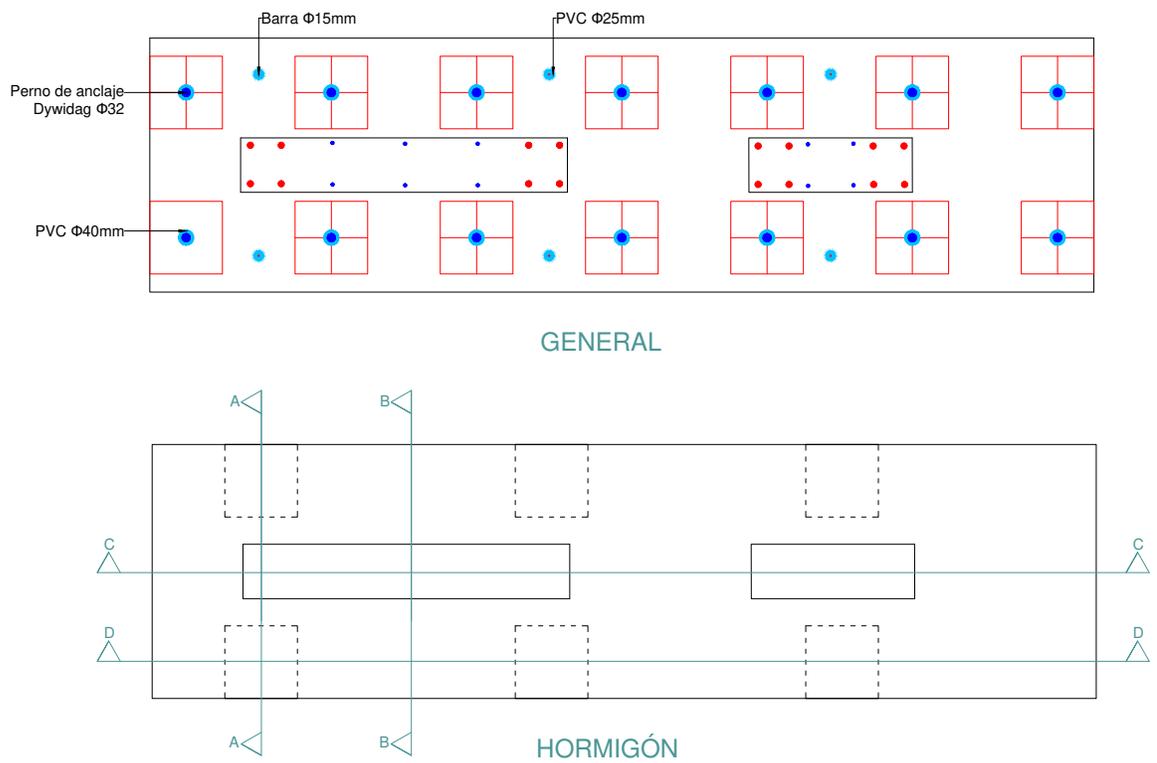
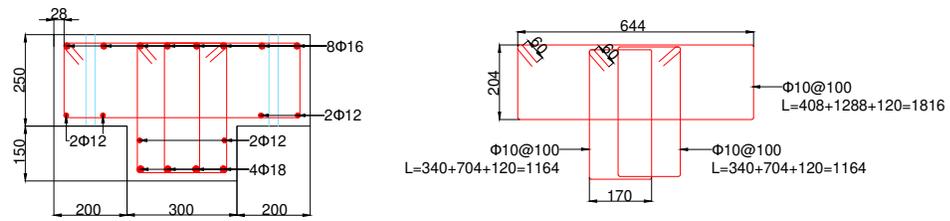
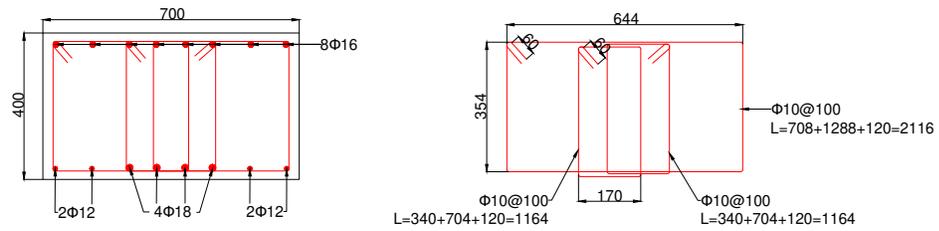


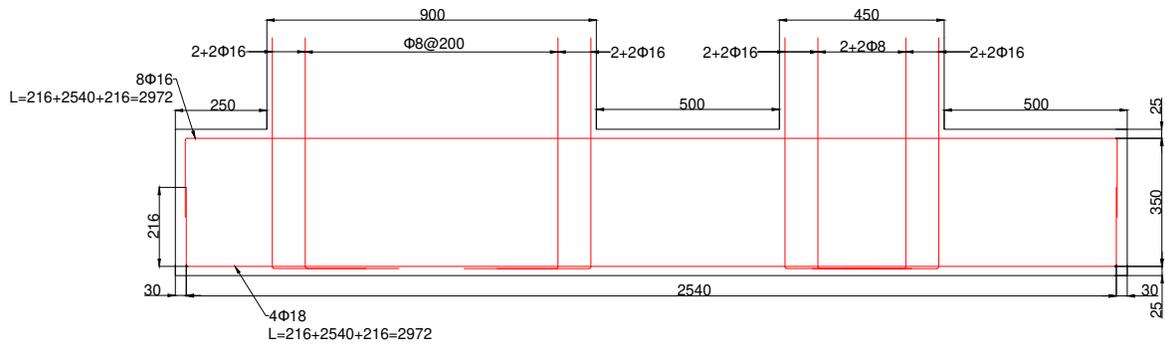
Figura A.1: Plano Vista en Planta Fundación



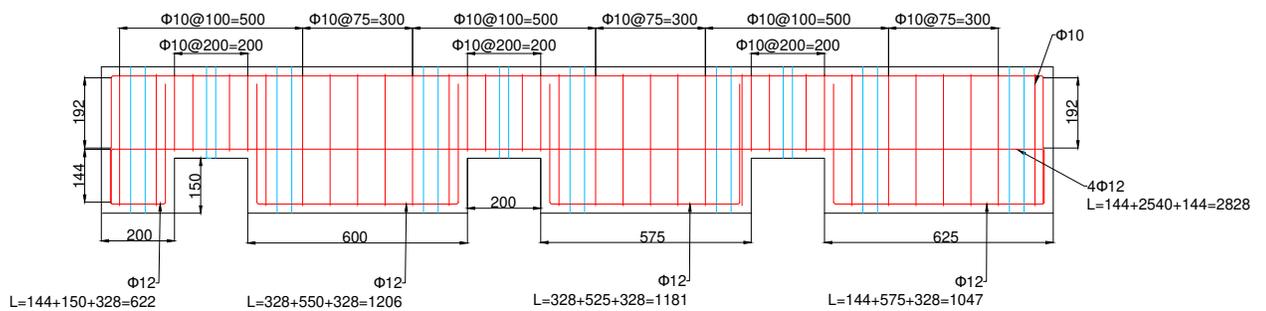
CORTE A-A



CORTE B-B

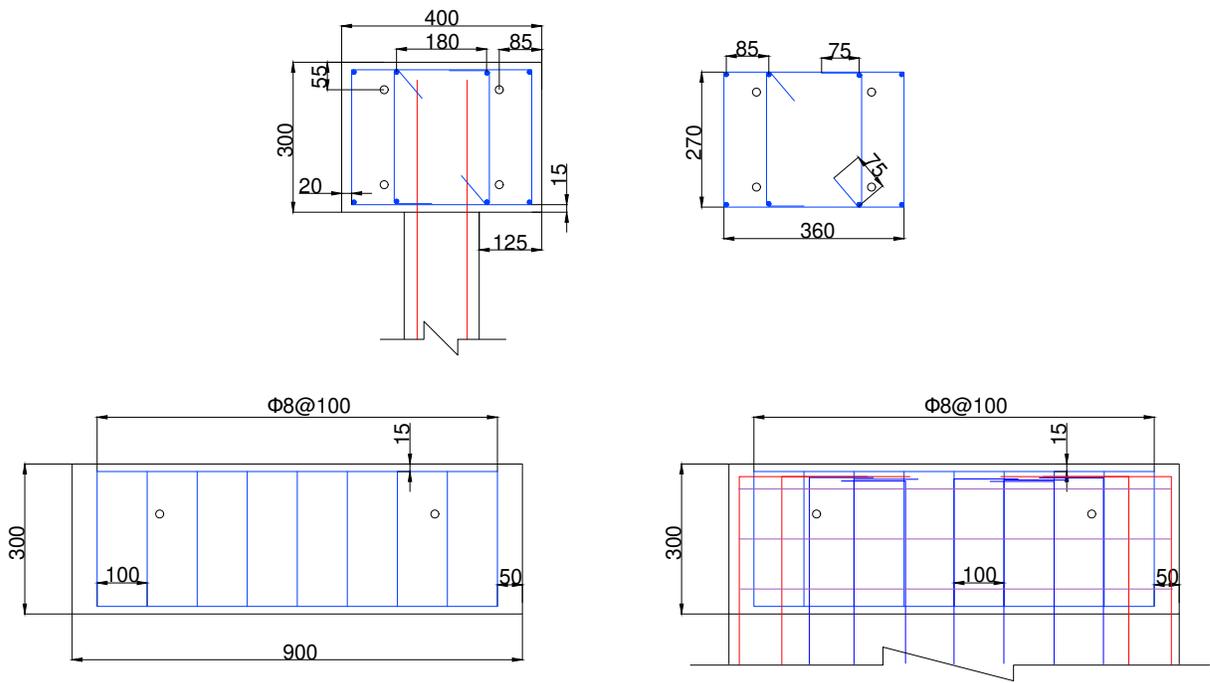


CORTE C-C



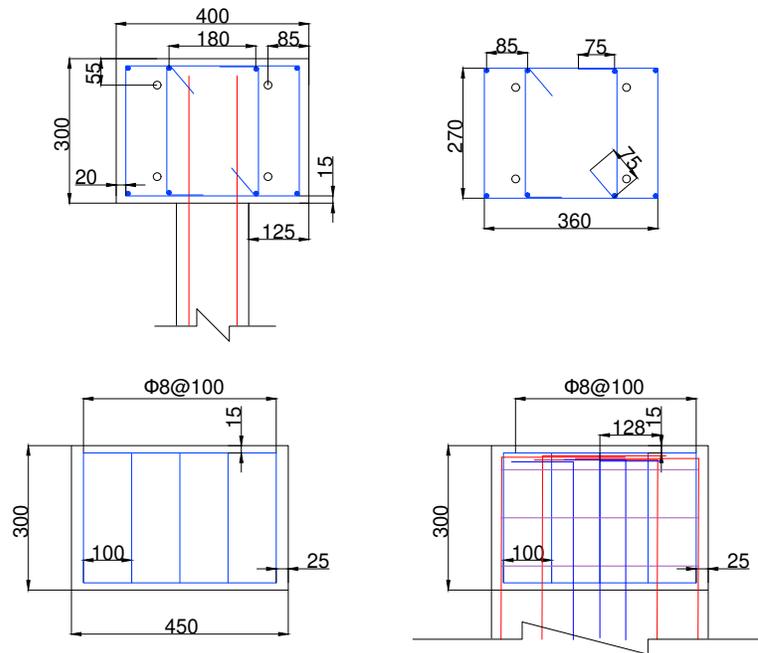
CORTE D-D

Figura A.2: Plano Cortes en Fundación



VIGA DE CARGA M1

Figura A.3: Plano Viga de Transferencia MR1



VIGA DE CARGA M2

Figura A.4: Plano Viga de Transferencia MR2

# Anexo B

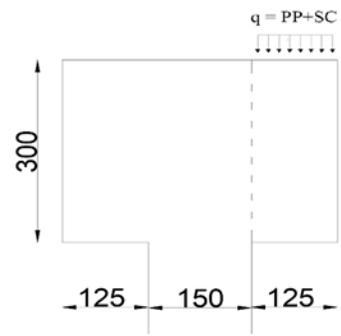
## Memoria de Cálculo

### B.1. Verificación de Diseño de la Viga de Transferencia

La probeta se debe cargar verticalmente con una fuerza axial de 36.9[ton] distribuidas sobre la viga de transferencia de carga del muro MR1. El particular se busca evitar que las barras de refuerzo trabajen en exceso con el fin de asegurar que esta viga se encuentre en el rango elástico durante el desarrollo de todo el ensayo.

A continuación, se verifican las tensiones por flexión y corte que actúan sobre el voladizo, las cuales se generan a partir de la diferencia entre los anchos del muro de ensayo (150 mm) y de la viga de transferencia de carga (400 mm).

Verificación de diseño Viga de transferencia					
Propiedades del Acero			Propiedades del hormigón		
$f_y$ [Mpa]	495,9		$f'_c$ [Mpa]	33	
$E_s$ [Mpa]	198800		$E_c$ [Mpa]	31529	
$\epsilon_s$ [-]	0,0025		$\epsilon_c$ [-]	0,004	
			$\beta_1$ [-]	0,813	
Datos generales Viga de transferencia			Cálculo de Carga solicitante		
$h$ [m]	0,3		PP [ton/m]	0,75	
$b$ [m]	1	(se asume ancho unit)	SC [ton/m]	102,5	
$l$ [m]	0,125	(voladizo)	$q$ [ton/m]	103,3	
$A=b*h$ [m <sup>2</sup> ]	0,3				
$P_u$ [ton]	36,9	(Carga axial)			
$S_{viga}$ [m <sup>2</sup> ]	0,36	(área en planta viga)			
$f'_c$ [Mpa]	33		$f'_c$ [ton/m <sup>2</sup> ]	3365	
$f_{cr}$ [Mpa]	1,78	$f_{cr} = 0,31 \cdot \sqrt{f'_c}$	$f_{cr}$ [ton/m <sup>2</sup> ]	182	





**Verificación de tensiones a partir de la fórmula de Navier**

M [ton m]	-0,81					$M = \frac{-q \cdot l^2}{2}$
I [m4]	0,00225					$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$
σ tracción [ton/m2]	53,8	<	fcr [ton/m2]	182	ok	$\sigma = -\frac{M \cdot y}{I}$

El mayor esfuerzo de tracción en el voladizo es menor a la capacidad máxima del hormigón a tracción (fcr)

**Verificación al corte**

Q [ton]	12,91					$Q = q \cdot l$
fct [Mpa]	1,7		fct [ton/m2]	178,3		$f_{ct} = 0,17 \cdot \sqrt{f'_c}$
τ adm [ton/m2]	44,6		Q adm [ton]	13,38		$\tau_{adm} = \frac{f_{ct}}{4}$
Q [ton]	12,9	<	Q adm [ton]	13,4	ok	$Q_{adm} = \tau_{adm} \cdot A$

El esfuerzo de corte presente sobre la sección es menor al corte admisible (Qadm)

==> De los resultados anteriores se que confirma que a armadura de refuerzo prácticamente no trabaja, con lo cual el hormigón de la viga de transferencia se encontrará en el rango elástico durante el desarrollo de todo el ensayo.

**Contacto entre muro MR1 y Viga de Transferencia**

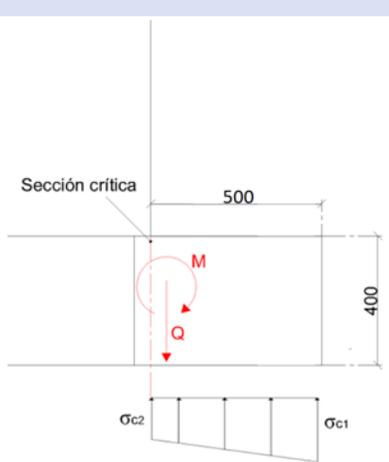
Datos generales		Cálculos		
Mu [kN-m]	590	Vc [ton]	12,1	$V_c = 0.17 \cdot b \cdot d \cdot \sqrt{f'_c}$
Pu [kN]	370			
Vu [kN]	295	Vs [ton]	28,0	$V_s = \frac{V_u}{0.75} - V_c$
b1 [m]	0,15			
h1 [m]	0,9			
d=0.9*h [m]	0,81	s [cm]	14,7	$s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{V_s}$
Av [cm2]	1,01			
				2 barras φ8

Por lo tanto en la zona de contacto entre el muro MR1 y su viga de carga basta con una doble malla horizontal phi8@10 cm

## B.2. Verificación de Diseño del Pedestal

Al igual que con la viga de transferencia, en el pedestal o fundación se desea evitar que las barras de refuerzo trabajen en exceso con el objetivo de asegurar que este elemento se encuentre en el rango elástico durante el desarrollo del ensayo.

A continuación, se calculan los esfuerzos que actúan sobre el pedestal y se verifican las tensiones generadas sobre sus secciones más críticas.

Verificación de Diseño Pedestal					
Propiedades del Acero			Propiedades del hormigón		
$f_y$ [Mpa]	495,9		$f'_c$ [Mpa]	33	
$E_s$ [Mpa]	198800		$E_c$ [Mpa]	31529	
$\epsilon_s$ [-]	0,0025		$\epsilon_c$ [-]	0,004	
			$\beta_1$ [-]	0,813	
Caso 1: Aplicación de Carga en Dirección Positiva					
Se determinan las fuerzas que actúan sobre el pedestal y se analiza la zona de borde en la dirección del muro MR2					
Datos generales Pedestal			Cálculo de Tensiones		
$c$ [m]	1,3		$F_s$ [ton]	50,40	$F_s = \frac{M}{d - \frac{c}{3}}$
$b$ [m]	0,7		$f_s$ [ton/m <sup>2</sup> ]	15666,8	$f_s = \frac{F_s}{A_s}$
$d$ [m]	2,1			$< f_y = 50567$ [ton/m <sup>2</sup> ]	
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0,00322	4 barras phi32	$f_c$ [ton/m <sup>2</sup> ]	110,8	$f_c = \frac{2 \cdot F_s}{c \cdot b}$
$M_u$ [ton m]	84	Momento basal			
Analizando la sección crítica					
Datos					
$b$ [m]	0,7				
$h$ [m]	0,40				
$l$ [m]	0,50				
Cálculo de Esfuerzos Internos					
$\sigma_{c1}$ [ton/m]	77,5		$\sigma_{c1} = f_c \cdot b$		
$\sigma_{c2}$ [ton/m]	71,0		$\sigma_{c2} = \frac{c-l}{c} \cdot \sigma_{c1}$		
$Q$ [ton]	37,1		$Q = \sigma_{c2} \cdot l + \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{c1} - \sigma_{c2}) \cdot l$		
$M$ [ton m]	9,4		$M = \sigma_{c2} \cdot \frac{l^2}{2} + (\sigma_{c1} - \sigma_{c2}) \cdot \frac{l^2}{3}$		
					



**Verificación de tensiones a partir de la fórmula de Navier**

f'c [Mpa]	33	f'c [ton/m2]	3365
fcr [Mpa]	1,78	fcr [ton/m2]	182
I [m4]	0,0037		
σtracción [ton/m2]	504,6	>	fcr [ton/m2] 182

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$\sigma = \frac{-M \cdot y}{I}$$

==> El hormigón no es capaz de resistir los esfuerzos de tracción por si solos

A continuación se procede a verificar las tensiones considerando la contribución del acero de refuerzo

**Datos**

**Cálculo de Tensiones**

c [m]	0,2		
b [m]	0,7		
d [m]	0,36		
As [m]	0,00147	(4φ18 y 4φ12)	
M [ton m]	9,4		
εc	0,00014	<	εc límite elástico = 0,0007

Fs [ton]	32,11		
fs [ton/m2]	21839,6	<	fy = 50567 [ton/m2]
fc [ton/m2]	458,7		

$$F_s = \frac{M}{d \cdot c}$$

$$f_s = \frac{F_s}{A_s}$$

$$f_c = \frac{2 \cdot F_s}{c \cdot b}$$

$$\epsilon_c = \frac{f_c}{E_c}$$

==> El pedestal trabaja en el rango elástico para las fuerzas solicitantes,  
El refuerzo de acero resiste los esfuerzos de tracción

Luego, se verifica si el hormigón es capaz de resistir las tensiones de corte para el caso en que no se utiliza refuerzo de acero.

**Verificación al corte**

A [m2]	0,28		
Q [ton]	37,13		
fct [Mpa]	1,7	fct [ton/m2]	178,3
τ adm [ton/m2]	44,6	Q adm [ton]	12,48
Q [ton]	37,1	>	Q adm [ton] 12,5

$$f_{ct} = 0,17 \cdot \sqrt[3]{f'_c{}^2}$$

$$\tau_{adm} = \frac{f_{ct}}{4}$$

$$Q_{adm} = \tau_{adm} \cdot A$$

==> El hormigón no es capaz de resistir los esfuerzos de corte por si solo

Se determina la separación máxima que debe usarse para la armadura al corte considerada en el diseño.



**Separación máxima para la armadura de Corte**

Datos			Cálculos		
Vu [ton]	37,1		Vc [ton]	25,1	$V_c = 0.17 \cdot b \cdot d \cdot \sqrt{f'_c}$
b [m]	0,7				
h [m]	0,4				
d [m]	0,36		Vs [ton]	24,4	$V_s = \frac{V_u}{0.75}$
Av [m2]	0,00047	estribos $\phi 10$			
			s [m]	0,35	$s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{V_s}$
			s [cm]	35,1	

Por lo tanto, en esta zona del pedestal se cumple el espaciamiento de la armadura de corte con estribos  $\phi 8 @ 10$  cm

**Aplicación de Carga en Dirección Positiva - Zona entre muros**

Se determinan las fuerzas que actúan sobre el pedestal en la zona entre muros. En esta, se considera el caso más desfavorable, el cual corresponde a la aplicación del momento total sobre el MR1, simulando un muro aislado que tiene como sección crítica del pedestal la mitad de la distancia entre ambos muros.

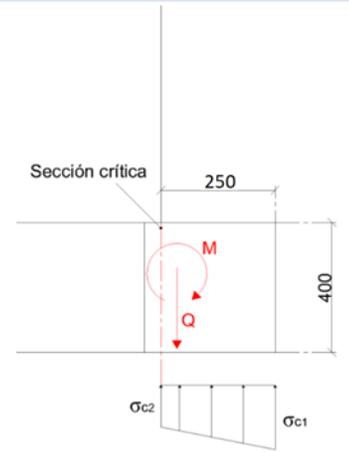
Datos generales Pedestal			Cálculo de Tensiones		
c [m]	0,7		Fs [ton]	96,92	$F_s = \frac{M}{d - \frac{c}{3}}$
b [m]	0,7				
d [m]	1,1		fs [ton/m2]	30128,5	$f_s = \frac{F_s}{A_s}$
As	0,00322	4 barras $\phi 32$	$f_c$ [ton/m2]	395,6	$f_c = \frac{2 \cdot F_s}{c \cdot b}$
Mu [ton m]	84	Momento basal			

**Analizando la sección crítica**

Datos	
b [m]	0,7
h [m]	0,40
l [m]	0,25

**Cálculo de Esfuerzos Internos**

$\sigma_{c1}$ [ton/m]	276,9	$\sigma_{c1} = f_c \cdot b$
$\sigma_{c2}$ [ton/m]	94,9	$\sigma_{c2} = \frac{c - l}{c} \cdot \sigma_{c1}$
Q [ton]	46,5	$Q = \sigma_{c2} \cdot l + \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{c1} - \sigma_{c2}) \cdot l$
M [ton m]	6,8	$M = \sigma_{c2} \cdot \frac{l^2}{2} + (\sigma_{c1} - \sigma_{c2}) \cdot \frac{l^2}{3}$





**Verificación de tensiones a partir de la fórmula de Navier**

f'c [Mpa]	33	f'c [ton/m2]	3365
fcr [Mpa]	1,78	fcr [ton/m2]	182
I [m4]	0,0037		
σtracción [ton/m2]	362,0	>	fcr [ton/m2] 182

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$\sigma = \frac{-M \cdot y}{I}$$

==> El hormigón no es capaz de resistir los esfuerzos de tracción por si solos

A continuación se procede a verificar las tensiones considerando la contribución del acero de refuerzo

**Datos**

**Cálculo de Tensiones**

c [m]	0,2		
b [m]	0,7		
d [m]	0,36		
As [m]	0,00147	(4φ18 y 4φ12)	
M [ton m]	6,8		
εc	0,0001	<	εc límite elástico = 0,0007

Fs [ton]	23,04		
fs [ton/m2]	15670,3	<	fy = 50567 [ton/m2]
fc [ton/m2]	329,1		

$$F_s = \frac{M}{d \cdot c}$$

$$f_s = \frac{F_s}{A_s}$$

$$f_c = \frac{2 \cdot F_s}{c \cdot b}$$

$$\epsilon_c = \frac{f_c}{E_c}$$

==> El pedestal trabaja en el rango elástico para las fuerzas solicitantes,  
El refuerzo de acero resiste los esfuerzos de tracción

Luego, se verifica si el hormigón es capaz de resistir las tensiones de corte para el caso en que no se utiliza refuerzo de acero.

**Verificación al corte**

A [m2]	0,28		
Q [ton]	46,48		
fct [Mpa]	1,7	fct [ton/m2]	178,3
τ adm [ton/m2]	44,6	Q adm [ton]	12,48
Q [ton]	46,5	>	Q adm [ton] 12,5

$$f_{ct} = 0,17 \cdot \sqrt{f'_c}$$

$$\tau_{adm} = \frac{f_{ct}}{4}$$

$$Q_{adm} = \tau_{adm} \cdot A$$

==> El hormigón no es capaz de resistir los esfuerzos de corte por si solo



Se determina la separación máxima que debe usarse para la armadura al corte considerada en el diseño.

**Separación máxima para la armadura de Corte**

Datos			Cálculos		
Vu [ton]	46,5		Vc [ton]	25,1	$V_c = 0.17 \cdot b \cdot d \cdot \sqrt{f'_c}$
b [m]	0,7				
h [m]	0,4				
d [m]	0,36		Vs [ton]	62,0	$V_s = \frac{V_u}{0.75}$
Av [m2]	0,00047	estribos $\phi 10$			
			s [m]	0,14	$s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{V_s}$
			s [cm]	13,8	

Por lo tanto, en esta zona del pedestal se cumple el espaciamiento de la armadura de corte con estribos  $\phi 8 @ 10$  cm

**Caso 2: Aplicación de Cargas en Dirección Negativa**

Se determinan las fuerzas que actúan sobre el pedestal y se analiza la zona más crítica, el borde en la dirección del muro MR1

Datos generales Pedestal			Cálculo de Tensiones		
c [m]	1,3		Fs [ton]	50,40	$F_s = \frac{M}{d - \frac{c}{3}}$
b [m]	0,7				
d [m]	2,1		fs [ton/m2]	15666,8	$f_s = \frac{F_s}{A_s}$
As	0,00322	4 barras $\phi 32$			$f_c = \frac{2 \cdot F_s}{c \cdot b}$
Mu [ton m]	84	Momento basal	fc [ton/m2]	110,8	

**Analizando la sección crítica**

Datos	
b [m]	0,7
h [m]	0,40
l [m]	0,25

**Cálculo de Esfuerzos Internos**

$\sigma_{c1}$ [ton/m]	77,5
$\sigma_{c2}$ [ton/m]	85,9
Q [ton]	20,4
M [ton m]	2,5

$$\sigma_{c1} = f_c \cdot b$$

$$\sigma_{c2} = \frac{c - l}{c} \cdot \sigma_{c1}$$

$$Q = \sigma_{c2} \cdot l + \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{c1} - \sigma_{c2}) \cdot l$$

$$M = \sigma_{c2} \cdot \frac{l^2}{2} + (\sigma_{c1} - \sigma_{c2}) \cdot \frac{l^2}{3}$$





**Verificación de tensiones a partir de la fórmula de Navier**

f'c [Mpa]	33	f'c [ton/m2]	3365
fcr [Mpa]	1,78	fcr [ton/m2]	182
I [m4]	0,0037		
σtracción [ton/m2]	134,5	>	fcr [ton/m2] 182

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$\sigma = \frac{-M \cdot y}{I}$$

==> El hormigón no es capaz de resistir los esfuerzos de tracción por si solos

A continuación se procede a verificar las tensiones considerando la contribución del acero de refuerzo

**Datos**

**Cálculo de Tensiones**

c [m]	0,2		
b [m]	0,7		
d [m]	0,36		
As [m]	0,00147	(4φ18 y 4φ12)	
M [ton m]	2,5		
εc	0,00004	<	εc límite elástico = 0,0007

Fs [ton]	8,56		
fs [ton/m2]	5820,1	<	fy = 50567 [ton/m2]
fc [ton/m2]	122,2		

$$F_s = \frac{M}{d \cdot \epsilon}$$

$$f_s = \frac{F_s}{A_s}$$

$$f_c = \frac{2 \cdot F_s}{c \cdot b}$$

$$\epsilon_c = \frac{f_c}{E_c}$$

==> El pedestal trabaja en el rango elástico para las fuerzas solicitantes,  
El refuerzo de acero resiste los esfuerzos de tracción

Luego, se verifica si el hormigón es capaz de resistir las tensiones de corte para el caso en que no se utiliza refuerzo de acero.

**Verificación al corte**

A [m2]	0,28		
Q [ton]	20,43		
fct [Mpa]	1,7	fct [ton/m2]	178,3
τ adm [ton/m2]	44,6	Q adm [ton]	12,48
Q [ton]	20,4	>	Q adm [ton] 12,5

$$f_{ct} = 0,17 \cdot \sqrt[3]{f_c'^2}$$

$$\tau_{adm} = \frac{f_{ct}}{4}$$

$$Q_{adm} = \tau_{adm} \cdot A$$

==> El hormigón no es capaz de resistir los esfuerzos de corte por si solo



Se determina la separación máxima que debe usarse para la armadura al corte considerada en el diseño.

**Separación máxima para la armadura de Corte**

Datos			Cálculos		
Vu [ton]	20,4		Vc [ton]	25,1	$V_c = 0.17 \cdot b \cdot d \cdot \sqrt{f'_c}$
b [m]	0,7				
h [m]	0,4				
d [m]	0,36		Vs [ton]	27,2	$V_s = \frac{V_u}{0.75}$
Av [m2]	0,00047	estribos $\phi 10$			
			s [m]	0,31	$s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{V_s}$
			s [cm]	31,5	

Por lo tanto, en esta zona del pedestal se cumple el espaciamiento de la armadura de corte con estribos  $\phi 8 @ 10$  cm

**Punzonamiento y Aplastamiento**

Se debe verificar que en las zonas del pedestal donde se presenten placas la carga axial solicitante sea menor a la resistente

**Punzonamiento**

Datos		
alpha s [-]	20	Coef. Para placa de borde
beta [-]	1	Relación largo/ancho de la placa
h [m]	0,4	Altura Pedestal
d [m]	0,36	
phi [-]	0,75	

**Cálculo para las placas centrales**

b0 [m]	1,98	Perímetro sección crítica	$V_{c1} = 0.17 \left( 1 + \frac{2}{\beta} \right) \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d$
Vc1 [ton]	213		$V_{c2} = 0.17 \left( 1 + \frac{\alpha_s d}{2b_0} \right) \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d$
Vc2 [ton]	200		
Vc3 [ton]	139		

Se escoge el mínimo de las expresiones anteriores

$$V_{c3} = \frac{\sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d}{3}$$

Vc=min{Vc1,Vc2,Vc3}	139
$\phi V_c$ [ton]	104
Pu [ton]	12,5

Pu = 12,5 [ton] <  $\phi V_c$  = 104 [ton] OK



## Cálculo para las placas de borde (Caso más desfavorable)

b0 [m]	1,62	Perímetro sección crítica
Vc1 [ton]	174	
Vc2 [ton]	187	
Vc3 [ton]	114	

Se escoge el mínimo de las expresiones anteriores

$V_c = \min\{V_{c1}, V_{c2}, V_{c3}\}$	114
$\phi V_c$ [ton]	85
Pu [ton]	12,5

$$P_u = 12,5 \text{ [ton]} < \phi V_c = 85 \text{ [ton]} \quad \text{OK}$$

==> Ninguna de las zonas analizadas falla por punzonamiento

## Aplastamiento

## Datos

A1 [m2]	0,04	Área de las placas
f'c [Mpa]	33	
$\phi$ [-]	0,65	

## Cálculo para las placas centrales

A2 [m2]	0,0625
$\phi V_c$ [ton]	93,0
Pu [ton]	12,5

$$\phi V_c = 0,65 \cdot 0,85 \cdot f'_c \cdot A_1 \cdot \sqrt{\frac{A_2}{A_1}}$$

$$P_u = 12,5 \text{ [ton]} < \phi V_c = 93 \text{ [ton]} \quad \text{OK}$$

## Cálculo para las placas de borde (Caso más desfavorable)

A2=A1 [m2]	0,04
$\phi V_c$ [ton]	74,4
Pu [ton]	12,5

$$P_u = 12,5 \text{ [ton]} < \phi V_c = 74,4 \text{ [ton]} \quad \text{OK}$$

==> Ninguna de las zonas analizadas falla por aplastamiento