



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

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MUROS RECTANGULARES CON LOSAS
ACOPLADAS DE HORMIGÓN ARMADO CON DISTINTAS CUANTÍAS DE
ACERO UTILIZANDO INSTRUMENTACIÓN ESTÁNDAR (LVDT)**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

CÉSAR AUGUSTO DÍAZ BUSTOS

PROFESOR GUÍA:
FABIÁN ROJAS BARRALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ
AUGUSTO HOLMBERG FUENZALIDA

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
Fondecyt Regular N°1200709

SANTIAGO DE CHILE
2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: CÉSAR AUGUSTO DÍAZ BUSTOS
FECHA: 2023
PROF. GUÍA: FABIÁN ROJAS BARRALES

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MUROS RECTANGULARES CON LOSAS ACOPLADAS DE HORMIGÓN ARMADO CON DISTINTAS CUANTÍAS DE ACERO UTILIZANDO INSTRUMENTACIÓN ESTÁNDAR (LVDT)

Los edificios de hormigón armado de mediana y gran altura construidos en Chile se sustentan principalmente en sistemas de muros, los cuales se acoplan con diferentes elementos estructurales, tales como vigas y losas. Estos, en conjunto, se encargan de soportar las cargas gravitacionales y sísmicas a las cuales se encuentran sometidas, además de otorgar rigidez.

Junto con esto, los elementos de acoplamiento, como las losas, imponen compatibilidad de desplazamiento y transmisión de esfuerzos y proporcionan un mecanismo de disipación de energía, mejorando con ello el desempeño que puede tener una estructura ante solicitaciones de diversa naturaleza (viento, sismo, uso, etc).

Para conocer cuál es el comportamiento de un sistema, tanto a nivel local como global, se desarrolló un estudio experimental de muros de sección rectangular, escalados y acoplados con losas de hormigón armado, el cual es sometido a cargas cíclicas. Estos muros contienen su cuantía de refuerzo de acuerdo con la tipología chilena de edificios.

Para levantar la información del ensayo se utilizaron transductores de desplazamiento lineal variable (LVDT's), instrumentos ampliamente utilizados en ensayos experimentales. Con esto, se obtuvo la información de desplazamientos y deformaciones que se presentan en los muros, ante diferentes niveles de solicitación. Con lo anterior, se busca caracterizar y comprender cual es el comportamiento de estos sistemas, determinando su capacidad e identificando los mecanismos de falla y su localización ante solicitaciones laterales cíclicas.

A partir de los resultados experimentales se pudo observar un aumento de capacidad del muro MR1 acoplado, en comparación al caso aislado. Junto a lo anterior, se observó la variación de la longitud de la rótula plástica en ambos casos, obteniendo una reducción de esta en el caso acoplado. Lo anterior satisface el comportamiento teórico de un sistema acoplado.

Este trabajo se enmarca en el proyecto FONDECYT regular N°1200709

*A mi familia, marido y amigos,
sin olvidar a todas aquellas personas
que han aportado cosas valiosas
a mi vida, me han acompañado,
guiado y aconsejado sabiamente.
Parte de este logro es gracias a uds.*

*Los llevo en mi corazón siempre,
a pesar de la distancia.*

*A mis profesores, a quienes
agradezco su entrega y dedicación,
en particular a Fabián Rojas,
por su guía y apoyo en esta
etapa tan importante.*

¡Muchas gracias a todos!

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Secundarios	2
1.3. Metodología de Trabajo	2
1.3.1. Alcances	2
1.3.2. Estructura de Trabajo	3
1.3.2.1. Introducción	3
1.3.2.2. Antecedentes y Revisión Bibliográfica	3
1.3.2.3. Descripción de Probetas	3
1.3.2.4. Trabajo y Montaje Experimental	3
1.3.2.5. Resultados obtenidos y Procesamiento de Datos	3
1.3.2.6. Conclusiones y Comentario Finales	3
2. Antecedentes de Estudio	4
2.1. Introducción	4
2.2. Estudio de Tipología de Muros en la Edificación Chilena.	4
2.2.1. Características Típicas de Losas y Muros	6
2.2.2. Marco Teórico	15
2.2.2.0.1 Sistemas de Muros de Hormigón Armado Acopladas con Losas	15
2.2.2.0.2 Grado de Acoplamiento	17
2.2.2.1. Comportamiento de Losas en Sistemas de Muros Acoplados	18
2.2.2.2. Curvatura y Desplazamientos en Muros Acoplados	23
2.2.2.2.1 Cálculo de Deformación por Corte	25
2.3. Montajes Experimentales Previos	27
2.3.1. Behaviour of Shear Walls with Slabs and Openings (Cheul Choi,2016)	27
2.3.1.1. Resumen	27
2.3.1.2. Objetivos	27
2.3.1.3. Montaje Experimental y Análisis	27
2.3.1.4. Resultados	29
2.3.1.5. Conclusiones	30
2.3.2. Experimental study of reinforced concrete and hybrid coupled shear wall systems (Yuan Cheng,2014)	30
2.3.2.1. Resumen	30
2.3.2.2. Objetivos	30

2.3.2.3.	Montaje Experimental y Análisis	31
2.3.2.4.	Conclusiones	33
3.	Descripción de la Probeta	34
3.1.	Descripción de la Probeta de Estudio	34
3.1.1.	Geometría de la Probeta	35
3.1.2.	Consideraciones en el Diseño	37
4.	Trabajo y Montaje Experimental	43
4.0.1.	Construcción y Traslado de la Probeta	43
4.0.2.	Caracterización de Materiales	46
4.0.2.1.	Acero	46
4.0.2.1.1	Ensayo a tracción	47
4.0.2.2.	Hormigón	49
4.0.2.3.	Ensayo a Compresión	51
4.0.3.	Montaje Experimental	53
4.0.3.1.	Laboratorio de Estructuras-Descripción General	53
4.0.4.	Montaje del Ensayo	55
4.0.4.1.	Muro de Reacción	56
4.0.4.2.	Sistema de Arriostamiento Lateral	56
4.0.4.3.	Actuador-Carga Lateral	57
4.0.4.4.	Celda de Carga	60
4.0.4.5.	Gato Hidráulico	61
4.0.4.6.	Bomba Hidráulica	61
4.0.4.7.	Sistema de Carga Axial	62
4.0.4.8.	Postensado de Barras	63
4.0.4.8.1	Postensado del Pedestal- Puntos Extremos	64
4.0.4.8.2	Postensado del Pedestal- Puntos Interiores del Pedestal	65
4.0.5.	Instrumentación de la Probeta	67
4.0.5.0.1	Transductor de Desplazamiento Lineal Variable (LVDT)	67
4.0.5.1.	Instrumentación Externa- Corrección de Datos	71
4.0.5.1.1	Calibración de los Instrumentos	72
4.0.5.1.2	Inclinómetros	73
4.0.5.1.3	Sistema de Adquisición de Datos	74
4.1.	Procedimiento de Ejecución del Ensayo	77
5.	Procesamiento de Datos y Resultados Obtenidos	79
5.1.	Procesamiento de Datos	79
5.2.	Resultados Experimentales	81
5.2.1.	Comportamiento Global	81
5.2.2.	Muro MR1	82
5.2.3.	Muro MR2	92
5.2.4.	Comportamiento Local	98
5.2.4.1.	Deformaciones en la Base	99
5.2.4.2.	Perfiles de Deformaciones en Altura	101
5.2.4.2.1	Muro MR1	101
5.2.4.2.2	Muro MR2	102
5.2.4.3.	Rótula Plástica	104

5.2.4.4.	Deformaciones por Corte	108
5.2.4.5.	Evolución del daño en Losas	111
6.	Conclusiones	113
	Bibliografía	115
Anexo A.	Longitud y Espesor De Muros	117
A.1.	Muros Rectangulares	117
A.1.1.	Longitudes por Tramos	117
A.1.2.	Espesores por Tramos	118
A.2.	Muros L	119
A.2.1.	Longitudes por Tramos	119
A.2.2.	Espesores por Tramos	120
A.3.	Muros T- Alas	121
A.3.1.	Longitudes por Tramos	121
A.3.2.	Espesores por Tramos	122
Anexo B.	Cálculo de Cuantías de Acero en Muros	123
Anexo C.	Planos	125
C.1.	Losa de Acoplamiento	125
C.2.	Pedestal del Muro	128
Anexo D.	Curvas de Tensión vs Deformación -Acero	130
Anexo E.	Reparaciones de Muros y Losas	133
E.1.	Reparaciones	133
E.1.	Detalles LVDT's Utilizados	136

Índice de Tablas

2.1.	Tramos de Estudio	6
3.1.	Dimensiones de los Muros MR1 y MR2	35
3.2.	Dimensiones de las Losas	36
3.3.	Capacidades de Muros Ensayados	38
3.4.	Resumen de Armadura y Cuantías de la Probeta	42
4.1.	Resultados Obtenidos del Ensayo a Tracción del Acero	49
4.2.	Resistencias Obtenidas en Ensayo a Compresión de las Probetas de Hormigón.	52
4.3.	Resistencias Promedio Obtenidas en Ensayo a Compresión.	52
4.4.	Desplazamientos Asociados por Derivas para el Ensayo	59
4.5.	Sensores Instalados en el Muro	68
4.6.	Cantidad de Sensores por Variable a Medir	70
4.7.	Detalle Inclínómetros Utilizados	73
5.1.	Sensores sin Registro de Mediciones	99
A.1.	Longitudes Promedio por Tramos	118
A.2.	Longitudes Promedio por Tramos	119
A.3.	Espesor Promedio por Tramos	120
A.4.	Longitudes Promedio por Tramos	121
A.5.	Espesor Promedio por Tramos	122

Índice de Ilustraciones

2.1.	Ejemplar de Edificio Abordado en el Presente Estudio- Esquema en 3D	5
2.2.	Zona de Estudio-Vista en Planta	5
2.3.	Espesores de Losas por Tramos	6
2.4.	Cuantías de Refuerzo de Losas	7
2.5.	Cuantía de Borde en Muros Rectangulares	9
2.6.	Cuantía de Armadura Distribuida en Muros Rectangulares	10
2.7.	Cuantía de Borde en Muros L	11
2.8.	Cuantía de Armadura Distribuida- Muros L	12
2.9.	Cuantía de Borde en Muros T (alas)	13
2.10.	Cuantía de Armadura Distribuida en Muros T (alas)	14
2.11.	Modos de Falla en Muros Cantilever[3]	15
2.12.	Esquema de Sistema de Muros Acoplados[4]	16
2.13.	Comportamiento de Sistema de Muros de Corte Acoplados con Losas ante Car- gas laterales[8]	18
2.14.	Plano de Modelo de 10 pisos, realizado por Henriquez [1]	19
2.15.	Plano de Modelo de 10 pisos, realizado por Henriquez [1]	20
2.16.	Plano de Modelo de 10 pisos, realizado por Henriquez [1]	20
2.17.	Modelo del Edificio de 10 pisos, con Distribución de Carga Horizontal a lo largo de su Altura [1]	21
2.18.	Distribución de Momento Transferido por la Losa hacia el Muro [1]	21
2.19.	Distribución de Momento Transferido por la Losa hacia el Muro [1]	22
2.20.	Modelo de Muro con Rótula Plástica,-Componentes Elástica e Inelástica. Modelo de Rótula Plástica Simplificado [7]	24
2.21.	Modelo de Flexión que Cuantifica el Desplazamiento Vertical[14]	26
2.22.	Planos de Armaduras de la Probeta WS-0.23 [15]	28
2.23.	Montaje Experimental de Probetas en el Desarrollo de la Investigación [15] . .	28
2.24.	Falla y Grietas que Presentó la Probeta WS-0.23 [15]	29
2.25.	Montaje Experimental [4]	31
2.26.	Deformación del Edificio y Deformaciones Normales de Fisuración del Hormigón [16]	32
3.1.	Vista Lateral de Armadura [20]	36
3.2.	Vista Lateral de Armadura	39
3.3.	Vista Lateral de Armadura	40
3.4.	Vista Lateral de Armadura	40
3.5.	Vista Lateral de Armadura de las Losas	41
3.6.	Vista Lateral de Armadura	41
3.7.	Vista Lateral de Armadura	42
4.1.	Proceso Inicial de Construcción de Armadura	43

4.2.	Armadura de la Probeta Finalizada	44
4.3.	Traslado de la Probeta a la Facultad	45
4.4.	Bombeo del Hormigón	45
4.5.	Preparación de Moldes Para Confección de Probetas Cilíndricas	46
4.6.	Deformación del Edificio y Deformaciones Normales de Fisuración del Hormigón [16]	47
4.7.	Vista Lateral de Armadura	48
4.8.	Ensayo de Asentamiento de Hormigón o Cono de Abrams	50
4.9.	Confección de Probetas Cilíndricas	51
4.10.	Probetas Cilíndricas Previo a Ensayo [7 Días].	51
4.11.	Fijación de LVDT's Para Medición de Deformaciones a Compresión	52
4.12.	Plano General Laboratorio de Estructuras [17]	53
4.13.	Espacio Físico utilizado en el Laboratorio de Estructuras	54
4.14.	Construcción parcial del moldaje en el sitio de ensayo.	54
4.15.	Modelo de Montaje Experimental Planificado	55
4.16.	Montaje Experimental Previo al Ensayo	55
4.17.	Muro de Reacción	56
4.18.	Marco de Acero y Sistema de Arriostamiento Lateral	57
4.19.	Actuador Utilizado en el Ensayo	58
4.20.	Bomba Utilizada para Funcionamiento del Actuador [23]	59
4.21.	Protocolo de Desplazamiento	60
4.22.	Gato Hidráulico Disponible en el Laboratorio.	60
4.23.	Gato Hidráulico Disponible en el Laboratorio.	61
4.24.	Bomba Hidráulica Utilizada	62
4.25.	Traslado y Montaje de Sistemas de Carga Axial	63
4.26.	Elementos Utilizados Para Postensado, sin uso de placas metálicas en la Base de la Silla Acopladora (Puntos Extremos del Pedestal)	64
4.27.	Postensado de Barras-Puntos Extremos del Pedestal	65
4.28.	Postensado de Barras-Puntos Extremos del Pedestal	66
4.29.	Esquema Referencial de LVDT- <i>Schaevitz</i> [25]	67
4.30.	Esquema General de LVDT's Utilizados [25]	68
4.31.	Esquema de Disposición de LVDT'S en las Caras Interiores del Muro	69
4.32.	Nomenclatura Utilizada	69
4.33.	Instrumentos Instalados en el Muro.	70
4.34.	Cajas de Instalación de LVDT's [26]	71
4.35.	Esquema de Montaje de Sensores Externos Para Corrección de los Datos Obtenidos	72
4.36.	Inclinómetros utilizados. Figura Referencial[27].	73
4.37.	Inclinómetros Instalados en el Sistema de Muros a Estudiar	74
4.38.	Cajas de Instalación de LVDT's [26]	75
4.39.	Cajas de Instalación de LVDT's [26]	75
4.40.	Equipos utilizados para la adquisición de datos	76
5.1.	Ejemplo de Aplicación de offset a una Señal no Centrada.	80
5.2.	Registro de Carga Axial Aplicada al Muro MR1	81
5.3.	Inclinómetros Instalados en el Sistema de Muros a Estudiar	82
5.4.	Ciclos de Desplazamientos MR1	83
5.5.	Curva de Histeresis- Muro MR1	84

5.6.	Patrón de Grietas- Deriva del 0.6 %, segundo ciclo.	85
5.7.	Patrón de Grietas- Deriva del 0.9 %, segundo ciclo.	86
5.8.	Patrón de Grietas- Deriva del 1.35 %, segundo ciclo.	86
5.9.	Inicio de Perdida de Recubrimiento, Drift 1.35 %- MR1	87
5.10.	Patrón de Grietas- Deriva del 2 %, segundo ciclo.	87
5.11.	Patrón de Grietas- Deriva del 2 %, segundo ciclo.	88
5.12.	Patrón de Grietas- Deriva del 3 %, segundo ciclo.	88
5.13.	Patrón de Grietas- Deriva del 3 %, segundo ciclo.	89
5.14.	Patrón de Grietas- Deriva del 4 %, segundo ciclo.	89
5.15.	Patrón de Grietas- Deriva del 4 %, segundo ciclo.	90
5.16.	Daño Registrado en el Canto Izquierdo- Deriva del 4 %	91
5.17.	Ciclo de Desplazamientos MR2	92
5.18.	Patrón de Grietas- Deriva del 0.6 %, segundo ciclo.	93
5.19.	Patrón de Grietas- Deriva del 0.9 %, segundo ciclo.	93
5.20.	Patrón de Grietas- Deriva del 1.35 %, segundo ciclo.	94
5.21.	Patrón de Grietas- Deriva del 2 %, segundo ciclo.	94
5.22.	Patrón de Grietas- Deriva del 3 %, segundo ciclo.	95
5.23.	Patrón de Grietas- Deriva del 4 %, segundo ciclo.	96
5.24.	Pérdida recubrimiento al 4 % de drift-Borde derecho	96
5.25.	Pérdida de recubrimiento al 4 %. Muro MR2- Borde Izquierdo	97
5.26.	Sensores con Mediciones Defectuosas (Nulas).	98
5.27.	Perfil de Deformaciones en la Base de Ambos Muros- Dirección Positiva	99
5.28.	Perfil de Deformaciones en la Base de Ambos Muros- Dirección Negativa	100
5.29.	Perfil de Deformaciones en Altura-Muro MR1	102
5.30.	Perfiles de Deformación en Altura- MR2	103
5.31.	Evolución rótula plástica en dirección positiva. En ambos muros	105
5.32.	Evolución rótula plástica en dirección negativa. En ambos muros	106
5.33.	Desplazamientos a Corte, primer Piso en Ambos Muros	108
5.34.	Desplazamientos de Techo Obtenidos por Fotogrametría- Primer Piso	109
5.35.	Desplazamientos de Techo Obtenidos por Fotogrametría- Primer Piso	110
5.36.	Desplazamientos a Corte, primer Piso en Ambos Muros	111
5.37.	Evolución del daño en Losas- Drift	112
A.1.	Espesores de Muros Rectangulares por Tramos	117
A.2.	Espesores de Muros Rectangulares por Tramos	118
A.3.	Longitud de Muros L-Sector Pasiillo por Tramos	119
A.4.	Espesores de Muros L-Sector Pasillo por Tramos	120
A.5.	Espesores de Muros T- Alas	121
A.6.	Espesores de Muros T- Alas	122
B.1.	Ensayo de Tracción para Barras del $\phi 16$	123
B.2.	Ensayo de Tracción para Barras del $\phi 16$	124
C.1.	Vista Lateral de Armadura	125
C.2.	Vista Lateral de Armadura	126
C.3.	Vista Lateral de Armadura	127
C.4.	Vista Lateral de Armadura	128
C.5.	Vista Lateral de Armadura	129
C.6.	Vista Lateral de Armadura	129
D.1.	Ensayo de Tracción para Barras del $\phi 6$	130

D.2.	Ensayo de Tracción para Barras del $\phi 8$	131
D.3.	Ensayo de Tracción para Barras del $\phi 10$	131
D.4.	Ensayo de Tracción para Barras del $\phi 12$	132
D.5.	Ensayo de Tracción para Barras del $\phi 16$	132
E.1.	Daños presentados en la zona central del muro y pedestal	133
E.2.	Elementos de borde y losa dañados	134
E.3.	Resultado de las Reparaciones	135

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La edificación chilena se sustenta en sistemas de muros de hormigón armado, los cuales se acoplan con frecuencia a losas, que se encargan de soportar las cargas gravitacionales y sísmicas a las cuales se encuentran sometidas, además de otorgar rigidez a las edificaciones.

Chile se caracteriza por ser un país que ha sufrido históricamente sismos de alta intensidad, como fue el ocurrido el 27 de febrero del 2010 ($M_w=8,8$ en la escala Richter), en donde se evidenciaron diversos problemas en el desempeño de algunos elementos estructurales en edificaciones de hormigón armado, especialmente en muros de distinta sección transversal.

Las fallas más frecuentes en muros se relacionan con la carencia de confinamiento en los elementos de borde, pandeo excesivo de barras longitudinales y presencia de discontinuidades en la zona base.

Por lo anteriormente expuesto, resulta relevante evaluar las respuestas de muros de hormigón armado ante nuevas configuraciones de armadura para el confinamiento de muros, así como también la influencia del acoplamiento de muros a través de losas, dado a que se ha prestado poca atención a su comportamiento en conjunto. Este aspecto es importante de investigar, aún más considerando que estos elementos poseen una alta interacción en sistemas estructurales utilizados en la actualidad, especialmente en edificios.

Con el fin de obtener información de las deformaciones desarrolladas en el hormigón durante el ensayo, como los desplazamientos de techo, se utilizará instrumentación estándar, la cual consiste en un conjunto de sensores conformados por LVDT's de diversa longitud y rango operacional. Adicionalmente, se utilizarán celdas de carga para cuantificar la carga lateral y axial a la cual fue sometida la probeta.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Desarrollar un estudio experimental de un sistema de muros rectangulares de hormigón armado, escalados y, acoplados mediante losas de hormigón armado, de acuerdo con la tipología chilena de edificios, que será sometido a cargas cíclicas. La medición de desplazamientos y deformaciones locales se realiza por medio del uso de Instrumentación Estándar (LVDT).

Lo mencionado previamente va orientado, principalmente, a caracterizar el comportamiento de un sistema acoplado con losas, tanto a nivel global, como local. Lo que permitirá conocer de forma preliminar cual es comportamiento general de una estructura y donde se localizan sus deformaciones .

1.2.2. Objetivos Secundarios

- Revisión Bibliográfica de distintos conceptos disponibles en la literatura. Análisis de ensayos de muros acoplados con diferentes elementos.
- Estudio de tipología de muros de hormigón armado utilizados en la edificación Chilena.
- Análisis y estudio del comportamiento de sistemas acoplados en base a los ensayos realizados.
- Definición de las características (dimensiones, cuantías de refuerzo) de las probetas a ensayar y supervisión de la construcción del sistema de muros acoplados.
- Ejecución del ensayo experimental con registro de desplazamientos ,en puntos específicos, de los muros de hormigón armado y la caracterización de la resistencia de los materiales utilizados en la construcción de la probeta.
- Obtención, recopilación y procesamiento de datos obtenidos a través de la instrumentación estándar (LVDT).
- Comentarios y conclusiones de los resultados obtenidos.

1.3. Metodología de Trabajo

Presentamos a continuación los alcances del trabajo, tareas a desarrollar de forma secuencial, orientada a los resultados esperados:

1.3.1. Alcances

Se estudiará el comportamiento experimental de muros rectangulares, acoplados con losas de hormigón armado ante cargas cíclicas, con diferentes cuantías de reforzamiento en los puntos de acoplamiento.

Para levantar la información entregada por los ensayos, se utilizará 2 métodos de instrumentación; Estándar (LVDT) y Fotogrametría. Para efectos del presente trabajo, se utilizarán

los datos obtenidos a través de LVDT's en cada muro, exceptuando la losa como elemento estructural instrumentado.

Finalmente, se procesarán los datos obtenidos desde la instrumentación, para posteriormente estudiar los resultados y caracterizar el comportamiento de los muros en sus distintas configuraciones.

1.3.2. Estructura de Trabajo

A continuación, se presentará la organización del presente trabajo, el cual estará conformado de los siguientes apartados:

1.3.2.1. Introducción

En este capítulo se presentarán las motivaciones, fundamentos y objetivos que se desean lograr.

1.3.2.2. Antecedentes y Revisión Bibliográfica

En este capítulo se presentarán los antecedentes obtenidos a partir de bibliografía y trabajos similares desarrollados previamente, los cuales serán de utilizados de forma referencial para definir parámetros experimentales, ejecución de los ensayos e interpretación de los resultados obtenidos.

1.3.2.3. Descripción de Probetas

En este capítulo se realizará una descripción de los criterios de diseño y metodología de construcción del muro a ensayar. También se describirá la geometría, dimensiones y propiedades de los materiales que conformarán las probetas a estudiar.

1.3.2.4. Trabajo y Montaje Experimental

En este capítulo se describirá el proceso de montaje e instrumentación de las probetas a ensayar, usando como referencia montajes experimentales realizados previamente en el laboratorio. También se realizará una descripción de la ejecución del ensayo.

1.3.2.5. Resultados obtenidos y Procesamiento de Datos

Se realizará una descripción, procesamiento y análisis de los resultados obtenidos de la probeta de muro ensayada, en términos de desplazamientos y deformaciones.

También, se realizará una descripción del procesamiento de datos obtenidos, detallando cuales fueron los procedimientos a realizar y algunas consideraciones.

1.3.2.6. Conclusiones y Comentario Finales

En este capítulo se entregarán las conclusiones obtenidas a partir del análisis los datos de obtenidos a través de la Instrumentación Estándar (LVDT) de la probeta ensayada. También se entregarán comentarios sobre consideraciones que se deben tomar en cuenta al momento de realizar ensayos que requieran utilizar LVDT's.

Capítulo 2

Antecedentes de Estudio

2.1. Introducción

En el presente capítulo se presentará el marco teórico de diversos estudios y publicaciones relacionadas a tipología de muros diseñados o utilizados en la edificación chilena y sistemas de muros rectangulares acoplados a distintos elementos estructurales (vigas y losas), con énfasis en la losa como elemento estructural de acoplamiento.

En primera instancia, se realizará un estudio sobre las características de muros de hormigón armado utilizados en la edificación Chilena, estudiando diferentes geometrías de muros situadas en la zona de pasillo en edificios habitacionales.

Luego se presentará la definición de un Sistema de Muros Acoplados con Losas, estudio que aborda los efectos del acoplamiento en muros de hormigón armado, grado de acoplamiento y comportamiento de losas como elemento estructural. Adicionalmente, se presentan 2 estudios experimentales para comprender la metodología experimental, montaje y conclusiones del comportamiento de sistemas de muros acoplados con diferentes configuraciones.

2.2. Estudio de Tipología de Muros en la Edificación Chilena.

Para realizar un estudio de la diversa tipología de muros utilizados en la edificación chilena, se estudiaron los planos de 10 edificios construidos durante el periodo 2018-2019.

Los edificios seleccionados cuentan con una cantidad mínima de 15 pisos, hasta un máximo de 26, con una altura promedio de 2,3[m] por nivel.

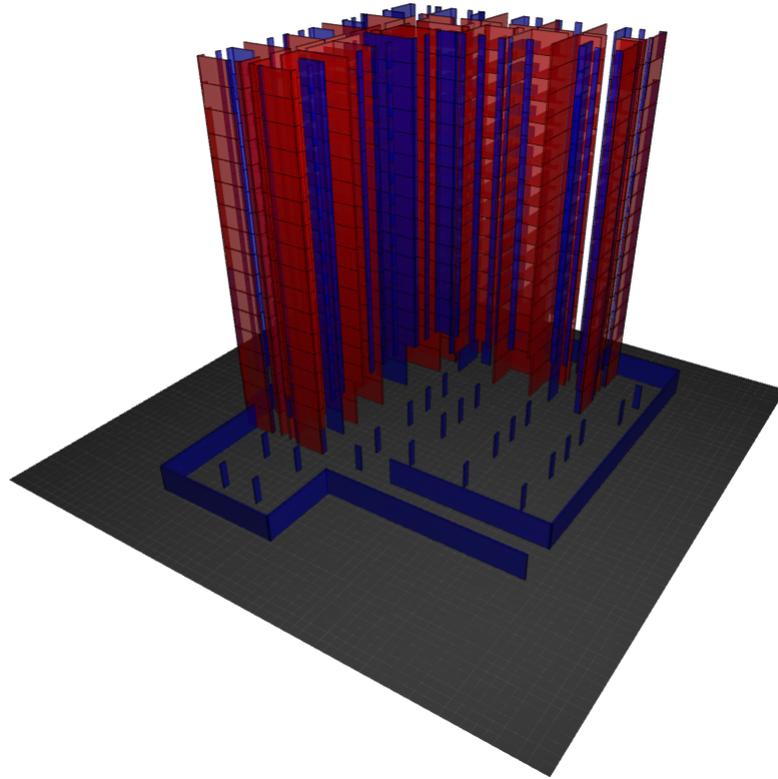


Figura 2.1: Ejemplar de Edificio Abordado en el Presente Estudio- Esquema en 3D

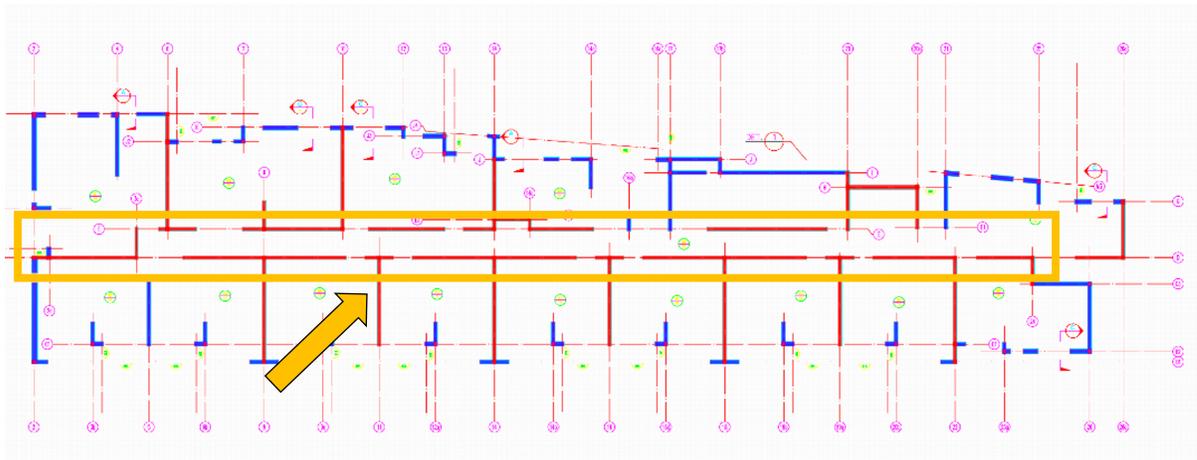


Figura 2.2: Zona de Estudio-Vista en Planta

Este estudio fue focalizado exclusivamente en el conjunto de muros de longitudes iguales en todos los pisos, ubicados en la zona de pasillos, analizando a su vez la zona de vanos de puertas, que son lugares de interés para conocer el refuerzo empleados en dichas áreas para que sean operativas durante un eventual sismo.

Para realizar el análisis de los elementos, utilizaremos la siguiente subdivisión de tramos para estudiar como varían las cuantías de acero, espesores y longitudes de muros en altura:

Tabla 2.1: Tramos de Estudio

Tramos	Pisos o Niveles
1	Subterráneo-2ºPiso
2	3º Piso- 10º Piso
3	10º Piso - Último Piso

2.2.1. Características Típicas de Losas y Muros

- Losas

Para comprender de forma más detallada cuales son las características de las losas utilizadas en la construcción de edificios, específicamente como son materializados estos elementos en zonas críticas, tales como vanos de puertas y ventanas, se realiza un estudio para conocer los espesores y la cuantía de refuerzo utilizados en estas áreas.

En este sentido, se analizaron 62 losas, debido a que estas son similares en cada piso, existiendo leves diferencias de espesor y cuantía de refuerzo, principalmente en los primeros pisos (Tramo N°1).

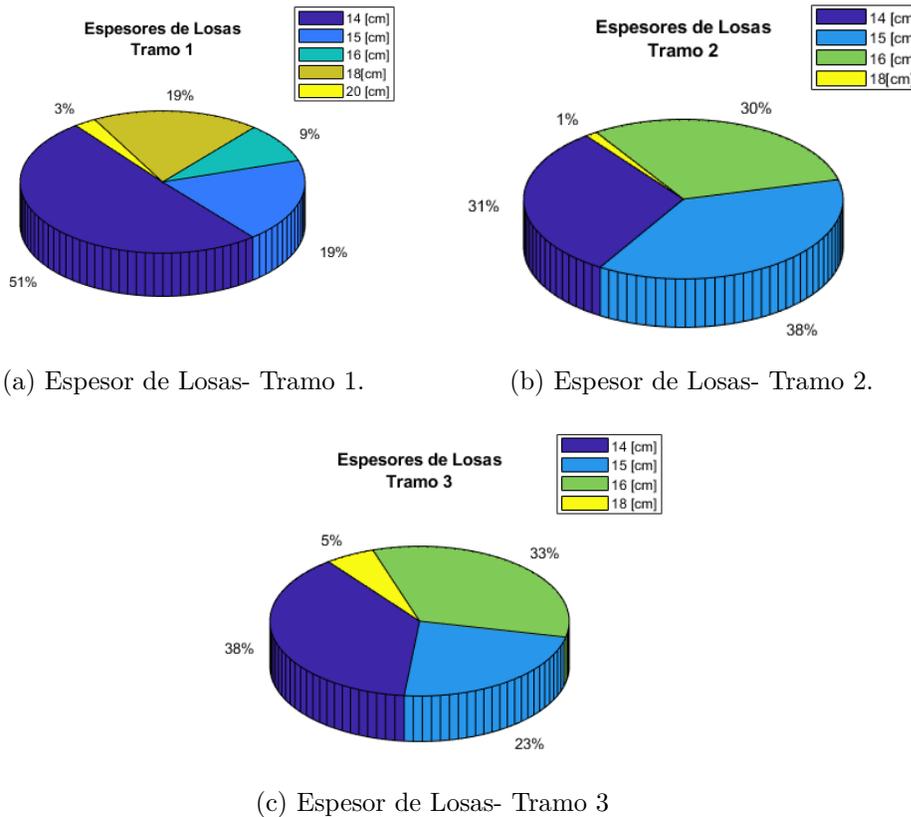
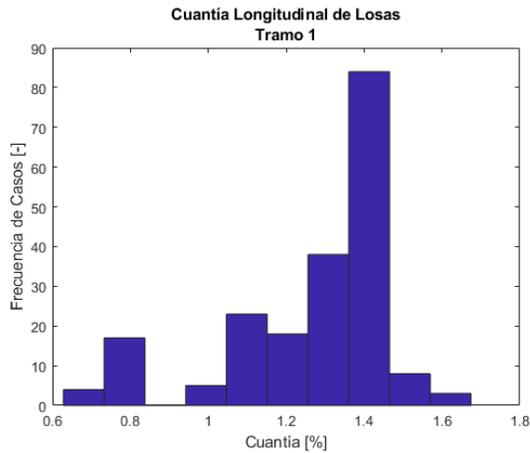


Figura 2.3: Espesores de Losas por Tramos

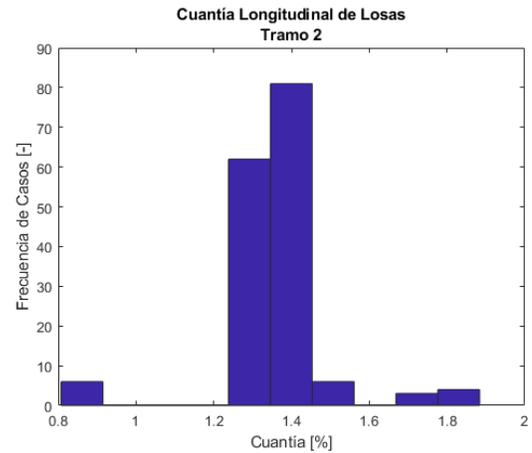
Analizando los resultados obtenidos, se tiene que los espesores de losa se encuentran de forma en el intervalo de 14-15 [cm] principalmente, existiendo presencia de espesores mayores en niveles inferiores, como en los pisos comprendidos en el tramo N°1 (Subterráneo-2°Piso).

Por otro lado, en cuanto a las cuantías de refuerzo dispuestas en las zonas de vanos de puerta (zona de acoplamiento de muros), se aprecia que la cantidad de barras utilizadas frecuentemente se encuentra entre 6-8 barras, con un diámetro de 16[mm], obteniendo con ello una cuantía aproximada de 1.32 %- 1.45 %.

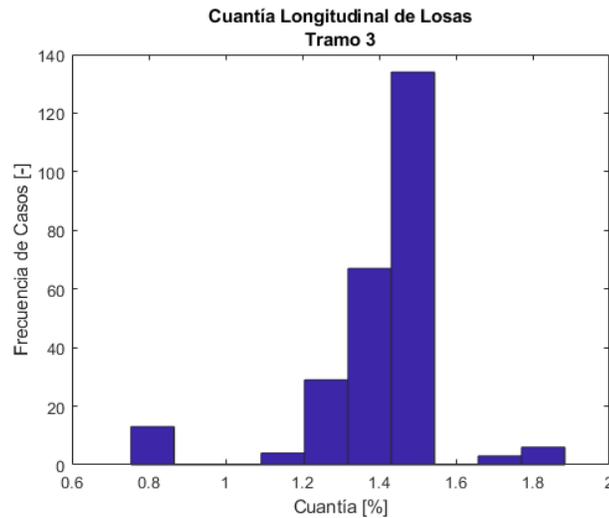
Estos valores son similares a los entregados por Henríquez [1] en el mismo análisis, pero con edificios diseñados entre los años 2010-2014. A su vez, estas cuantías se mantiene en altura del edificio, sin diferir substancialmente.



(a) Cuantía de Armadura de Refuerzo- Tramo 1



(b) Cuantía de Armadura de Refuerzo- Tramo 2



(c) Cuantía de Armadura de Refuerzo- Tramo 2

Figura 2.4: Cuantías de Refuerzo de Losas

- **Muros**

Dada a la diversidad de tipología de muros ubicados en pasillos, se divide el análisis de acuerdo con la geometría de estos elementos.

En este sentido, los elementos estudiados de acuerdo con cada tipología de muro son los siguientes:

- **Muros Rectangulares:** 118
- **Muros "L"(Sección de Pasillo):** 471
- **Muros T (Solo Alas):** 689

Con lo anterior es posible analizar como varían las propiedades geométricas (espesor) y las cuantías de acero utilizadas en los elementos de borde, mallas transversales y longitudinales en altura.

El total de muros estudiados son 1.278, los cuales corresponden a muros por sistema y piso, los cuales fueron separados de acuerdo a su tipología. Esto se hizo procurando realizar una selección de muros con una longitud constante en todos los pisos.

Con respecto a la altura, se tiene que la mínima de piso a cielo (sin incluir la losa) es de 230[cm], cumpliendo con lo dispuesto por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (Artículo 4.1.1) para alturas mínima en lugares habitables.

La metodología utilizada para el calculo de las cuantías de cada muro será adjuntada como anexo del presente trabajo.

Características Típicas de Muros Rectangulares

De acuerdo con la información adjunta en A.4, se tiene que los espesores varían 20-30[cm] en pisos inferiores, disminuyendo a 20 [cm] a alturas mayores. En general, se encontraron espesores mayores (25-30[cm]) en muros dispuestos en el subterráneo y primer piso.

Por otro lado, las longitudes de estos elementos varían entre 4-7[m], contando con muros más extensos en los primeros 2 tercios de los edificios estudiados. El promedio de longitud es de 4,2 [m].

En cuanto a las cuantías del refuerzo utilizada en los bordes, se tiene que estas varían entre 2.75-3.5 % para el primer tramo, 3.25-2.2 % para el segundo y 2.2-1.8 % para el último tramo. Lo anterior se debe principalmente a la alta cantidad de armadura utilizada en pisos inferiores, como también sus diámetros.

La cantidad de barras y diámetros tienden a disminuir en altura, lo cual se puede ver reflejado en el decrecimiento de las cuantías por tramos, como se puede observar en 2.9.

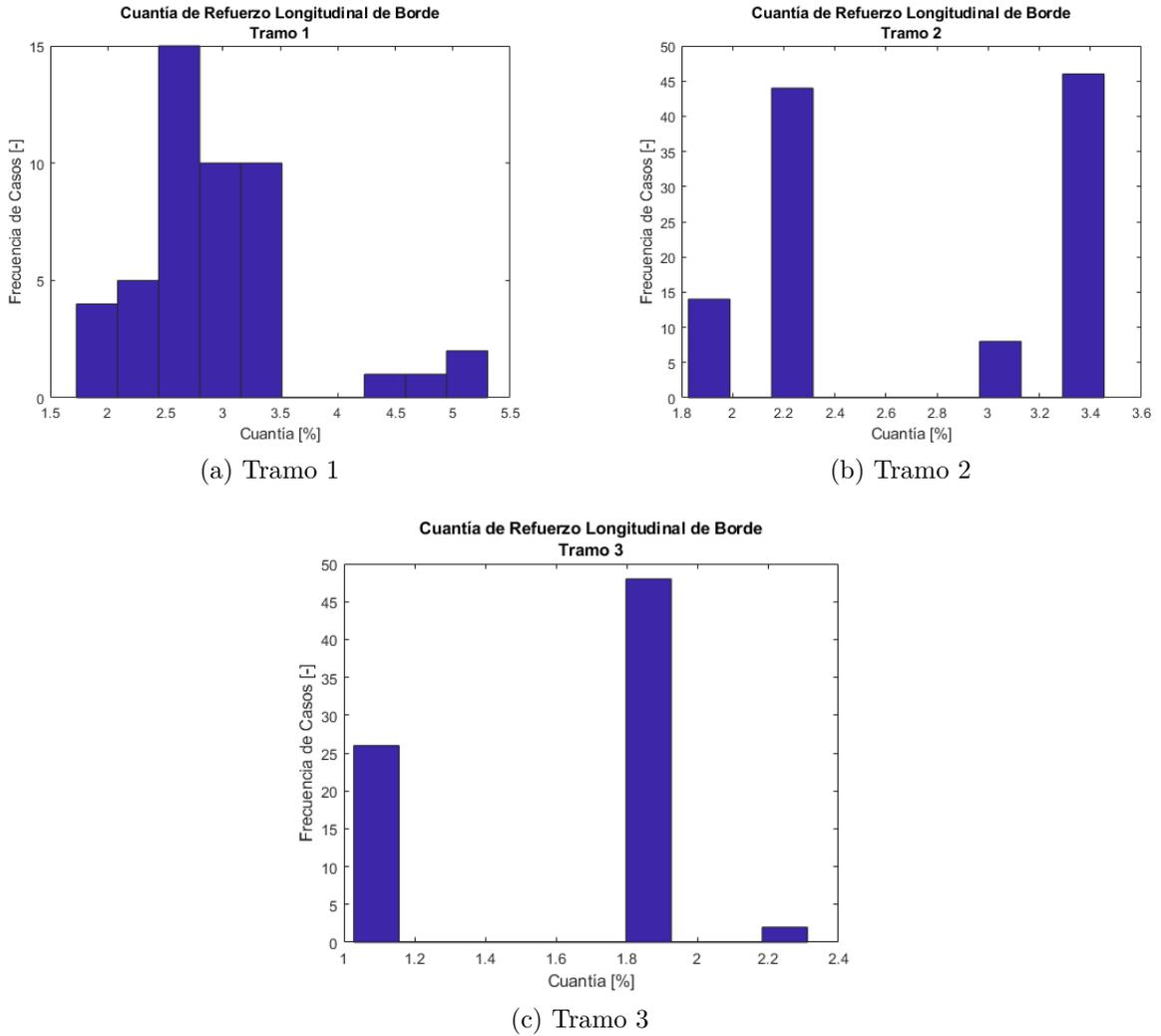


Figura 2.5: Cuantía de Borde en Muros Rectangulares

Finalmente, debemos considerar que los muros poseen una armadura distribuida, la cual consiste generalmente en una doble malla, con el mismo valor en la dirección transversal y longitudinal. Esta irá variando con la altura debido al decrecimiento en los diámetros y al espaciamiento con las cuales está dispuesta en el muro.

Para analizar dicha variación, se utilizó la misma subdivisión por tramos previamente mencionada, con la finalidad de estudiar de como estas cuantías varían en altura. En general para los primeros niveles se tienen mallas del $\phi 8@10[cm]$, las cuales en algunos casos variaban a $\phi 12@10[cm]$. Para tramos superiores, se observan mallas dobles de $\phi 8@15[cm]$

De acuerdo con la información de los planos, se tiene que las cuantías oscilan entre el 0.45 %-0.25 % en el primer tramo, para luego alcanzar valores entre el 0.3-0.25 %, cumpliendo con la cuantía mínima exigida por la ACI 318-19 (punto 11.6.2- (b)).

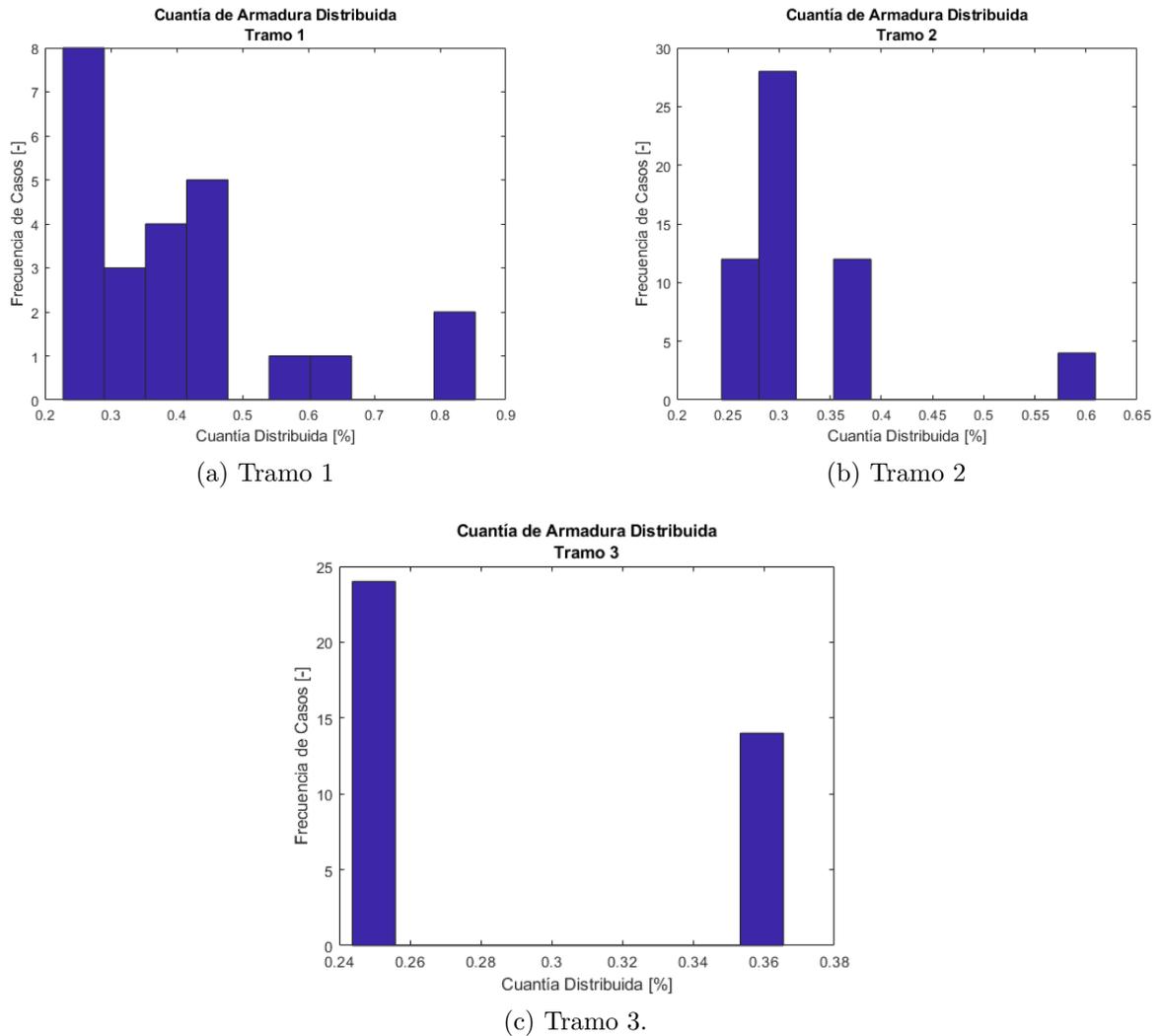


Figura 2.6: Cuantía de Armadura Distribuida en Muros Rectangulares

Características Típicas de Muros -L

Para este caso, solo se analizó el segmento del muro que se encontraban dispuesto sen la zona de pasillo, tal como se comentó previamente. En cuanto al espesor, que este varia entre 25-30[cm] en el primer tramo y disminuye a 20[cm] para los tramos superiores (A.3).

Las longitudes de estos varían entre 3-4,5[m], manteniendo su distribución en los 2 últimos tramos, principalmente (A.4).

En cuanto a las cuantías de borde, se considera la información obtenida en la zona de la cabeza del muro (zona de intersección de muros rectangulares) y en la punta del muro.

Considerando lo anterior, se tiene que las cuantías de borde varían entre el 2.5-3.5 % en el primer tramo, con una moda del 2.5 %, en el segundo tramo varia en el mismo rango, pero con una cuantía del 2.2 % y, en el último tramo se tiene una cuantía de borde entre el 1.8-2.3 %, con una moda de 1.74 %.

En general, las cuantías que se ubicaban entre el 3-3.5% correspondían a zonas en donde se contaba con alta congestión de barras, las cuales se ubicaban específicamente en la cabeza de muro o zona de conexión de muros rectangulares.

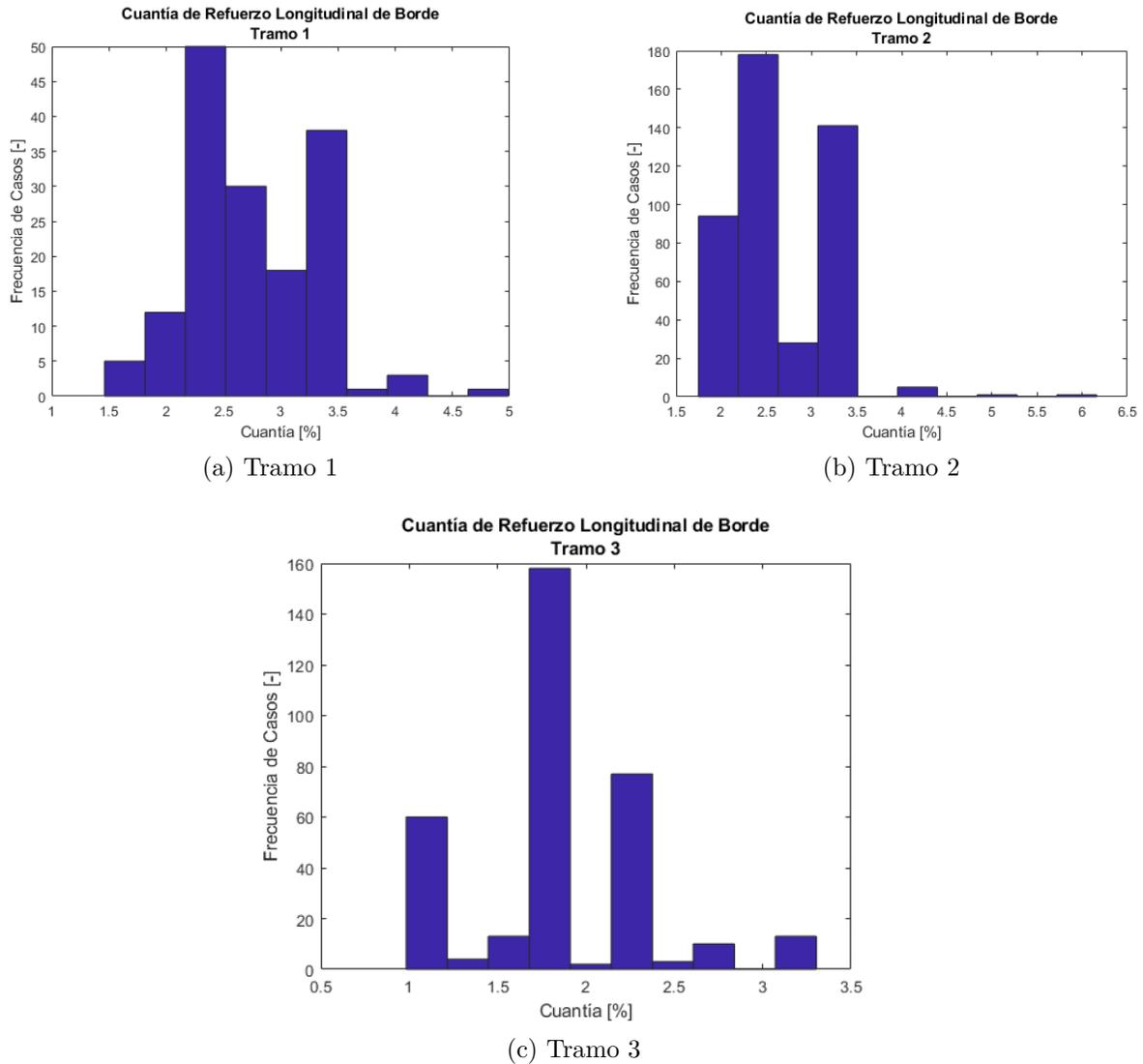


Figura 2.7: Cuantía de Borde en Muros L

En cuanto a las cuantías distribuidas, estas variaban entre 0.25-0.35% en su mayoría en el primer tramo. Para pisos superiores (tramos 2 y 3), se observa que las cuantías distribuidas tienden a cumplir con lo mínimo exigido por la ACI-318-19, es decir 0.25%. Análogamente a lo comentado para muros rectangulares, las cuantías distribuidas tienden a ir decreciendo en altura. Lo anterior se debe a la reducción en los diámetros de las barras utilizadas y el aumento del espaciamiento en las cuales estas son dispuestas en su orientación vertical/horizontal.

Lo anterior se puede observar en los histogramas presentados a continuación:

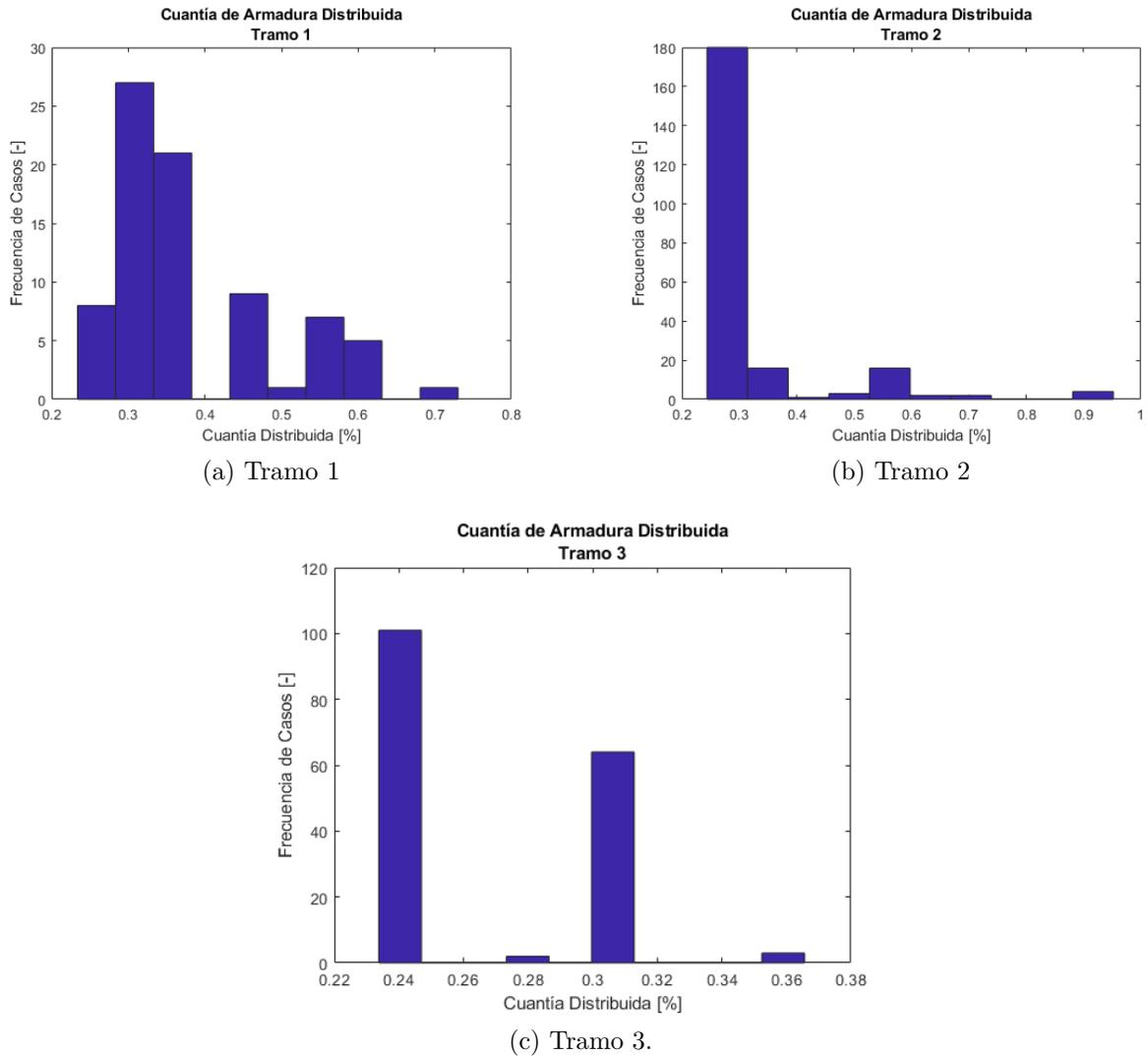


Figura 2.8: Cuantía de Armadura Distribuida- Muros L

Características Típicas de Muros T- Alas

Similar al análisis realizados en los tipos de muros anteriores, el espesor varía entre 25-30[cm] en el primer tramo y disminuye a 20[cm] en los tramos posteriores. En el mismo análisis realizado previamente por Chaperon[2] en muros T, diseñados entre los años 2010-2014, obteniendo valores similares de espesores, los cuales disminuyen a 20[cm] en pisos superiores.

De forma general, los espesores de 25 [cm] se encuentran específicamente en muros situados en el primer tramo, en edificios con 20-24 pisos.

Las longitudes totales de las alas se encuentran entre 6-9 [m] en el primer tramo, manteniendo estos valores en toda la altura de los edificios estudiados.

En cuanto a las cuantías de borde respecta, se observa que estas varían entre el 2.1-3.45 % en el primer tramo, en donde la moda se sitúa entre el 2-2.5 %.

Para el segundo tramo, se tiene que las cuantías varían en el mismo rango, con una moda de 2.3 %. Finalmente, para el tercer tramo se obtienen cuantías de borde en su mayoría ubicadas entre el 2.5-2.0 %, con una moda del 2.0 %.

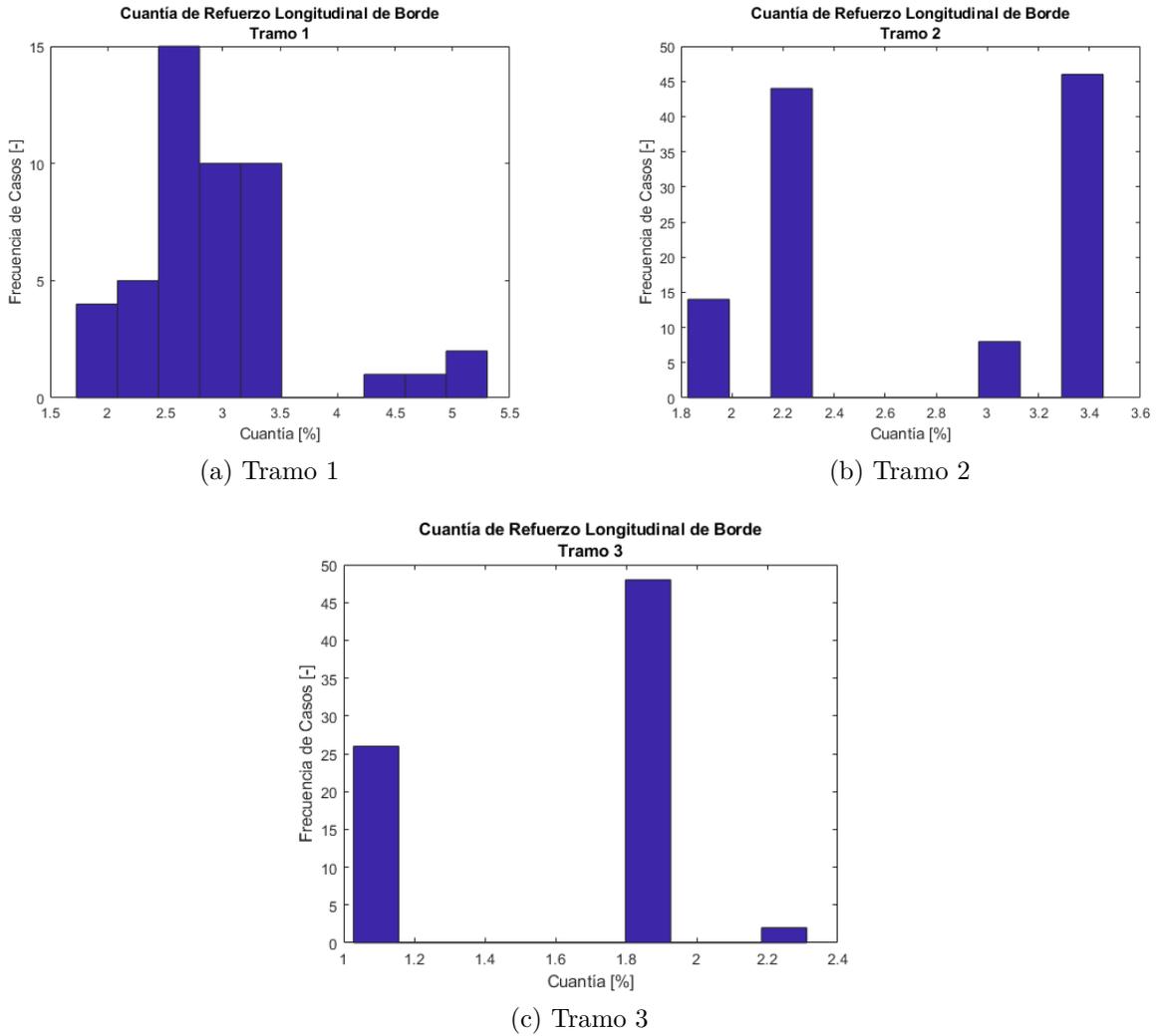


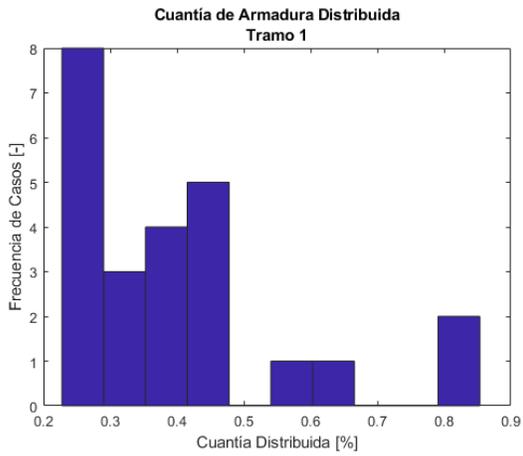
Figura 2.9: Cuantía de Borde en Muros T (alas)

En cuanto a las cuantías distribuidas, estas variaban entre 0.3-0.4 % en su mayoría en el primer tramo.

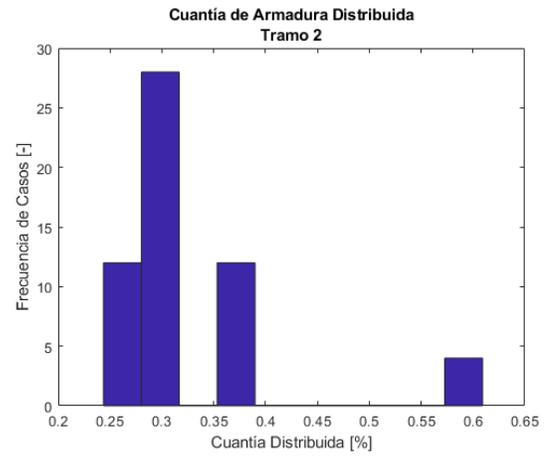
Para pisos superiores (tramos 2 y 3), se observa que las cuantías distribuidas varían entre el 0.25-0.3 %, con una moda del 0.25 %, satisfaciendo con lo mínimo exigido por la ACI-318-19.

Similar a las geometrías de muros previamente descritas, se tiene que estos valores tienden a disminuir por las razones previamente comentadas.

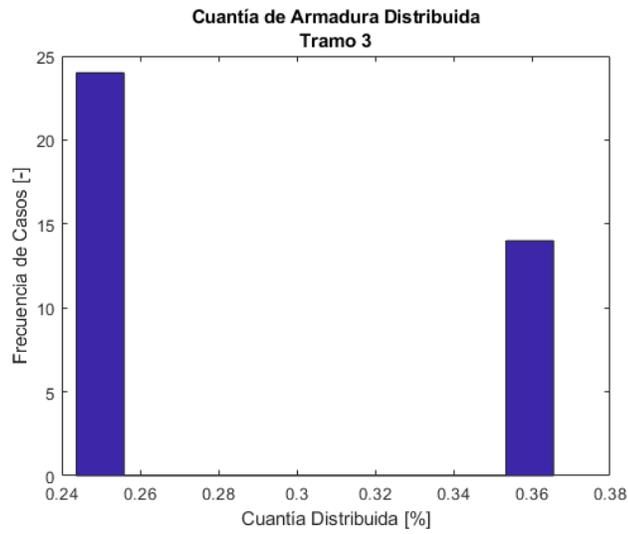
Lo anterior se puede observar en los histogramas presentados a continuación:



(a) Tramo 1



(b) Tramo 2



(c) Tramo 3.

Figura 2.10: Cuantía de Armadura Distribuida en Muros T (alas)

2.2.2. Marco Teórico

En la siguiente sección se presentará de toda la información recopilada de publicaciones y literatura relacionada al tema, en donde se explicará conceptualmente algunos parámetros relativos al estudio de sistemas de muros acoplados con losas.

2.2.2.0.1. Sistemas de Muros de Hormigón Armado Acopladas con Losas

Se entiende por un sistema de muros acoplados de hormigón armado a un conjunto de 2 o más muros conectados por un elemento estructural, el cual puede ser losas o vigas de hormigón armado. La presencia de estos elementos imponen compatibilidad de desplazamientos de acuerdo con su ubicación en altura.

Este sistema se ha mostrado como una forma efectiva y eficiente de controlar las demandas de desplazamiento por sismos, principalmente, además de proveer un buen comportamiento dúctil al sistema, limitar el desplazamiento máximo y otorgar una alta disipación de energía [3]. La finalidad del diseño de estos muros se realiza orientado a generar fluencia en los extremos de los elementos de acople.

El medio de disipación de energía del que disponen los muros en voladizo al momento de ser sometido ante cargas laterales se produce mediante la acción del refuerzo de acero, el cual toma la flexión del elemento estructural. Luego, el hormigón comienza a sufrir fisuras y distribuir los esfuerzos hasta que la armadura de tracción alcanza la plastificación, pudiendo rotar con cargas inferiores, sin un incremento de carga. Este comportamiento se conoce como rótula plástica, el cual corresponde a un concepto teórico en el que se idealiza el comportamiento de la sección y en donde se forma una articulación capaz de girar sin requerir la aplicación de una fuerza mayor.

Dicha rótula se ubica en la sección de momento máximo, que generalmente se ubica en la parte inferior de los muros y se desarrolla en una altura con longitud determinada (L_p). Considerando lo anterior, podemos inferir que un sistema de muros acoplados ofrece ventajas para disipar energía, al comportarse como 2 mecanismos que funcionan de forma separada, en cada muro.

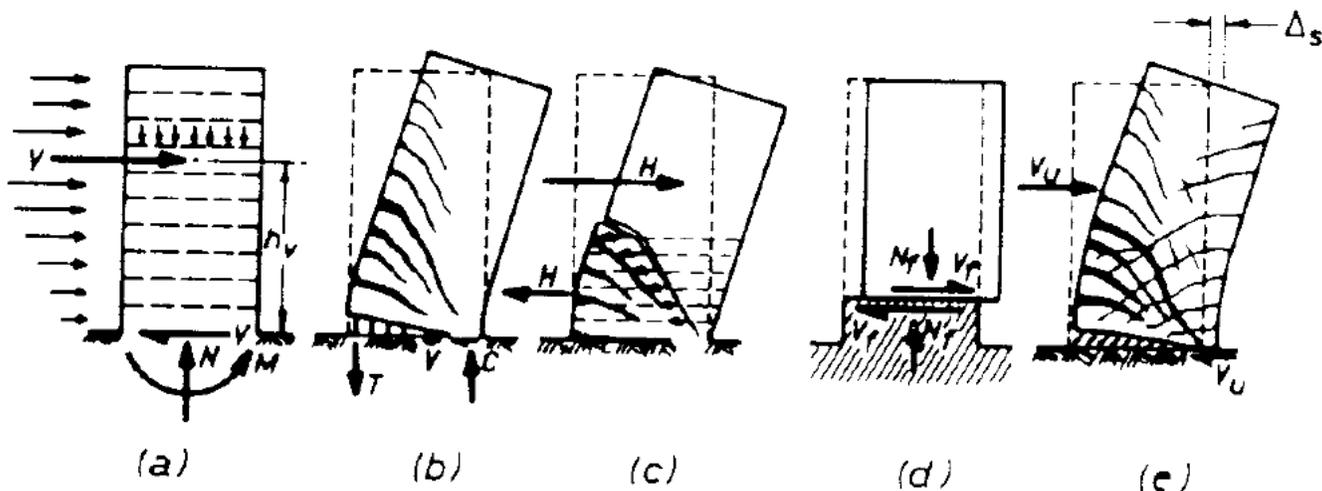


Figura 2.11: Modos de Falla en Muros Cantilever[3]

En la siguiente figura se presenta un diagrama de un sistema de muros acoplados y fuerzas que se presentan al momento de solicitar lateralmente este sistema:

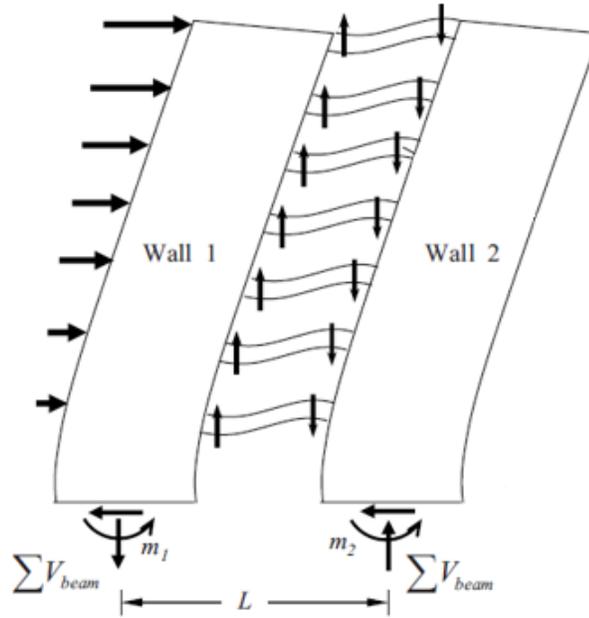


Figura 2.12: Esquema de Sistema de Muros Acoplados[4]

En cuanto al modelamiento de estos sistemas de muros, estos corresponden a 2 muros en voladizo. Como se puede apreciar en la figura, cuando el sistema se encuentra ante sollicitaciones laterales, se originan momentos en la base de ambos muros y corte en los elementos de acople, principalmente.

El momento total del sistema se expresa de la siguiente forma:

$$M_{total} = m_1 + m_2 + L \cdot \sum V_{beam} \quad (2.1)$$

En donde L se define como la distancia entre el centroide de cada muro y $\sum V_{beam}$, que corresponde a la suma del corte aportado por cada elemento de acople, que llega como fuerza axial a cada muro.

Dada a la configuración previamente mostrada, se puede observar que se existe un mayor momento inverso en la base de los muros, dado el acople de estos a través de vigas, mejorando así la resistencia en comparación a un muro individual, sin perder la rigidez característica de los muros ante cargas laterales.

2.2.2.0.2. Grado de Acoplamiento

El Grado de Acoplamiento o DOC, se define como la relación entre el momento volcante total resistido por la acción de acoplamiento ($m_1 + m_2$) y el momento volcante total (M_{Total}), el cual se expresa de la siguiente forma [5]:

$$DOC = \frac{L \cdot \sum V_{beam}}{(m_1 + m_2)} \quad (2.2)$$

La carga ' $\sum V_{beam}$ ' corresponde a la suma de todas las fuerzas de corte transferidas por las vigas a cada muro, respectivamente y L se define como la distancia entre el centroide de cada muro

Este concepto es definido por Harries [6] como una expresión que permite estimar la relación entre la rigidez de una viga de acoplamiento con la rigidez de los muros. Este se define como la relación entre el momento volcante resistido por la acción del acoplamiento y el momento volcante total, el cual se expresa de forma analítica en la expresión previamente presentada en 2.2

Dado a lo anterior, se tiene que si la rigidez del elemento de acoplamiento es alta, el muro tendrá un comportamiento similar a un muro en voladizo con aperturas, lo cual en este caso limita las opciones de disipación de energía del sistema. Esto debido a que se limita solo a la formación de la rótula plástica en la base del muro, desaprovechando el mecanismo que se genera internamente en las zonas de acoplamiento entre los muros.

Por el contrario, si la rigidez del elemento de acoplamiento es baja, se tiene que el sistema se comportará como un sistema de muros acoplados, es decir ambos muros desarrollarán rótulas plásticas en la zona inferior y los elementos de acople también desarrollarán este comportamiento en las zonas de conexión con los muros.

Alfaro y Massone realizaron un estudio paramétrico sobre el sistema de 2 muros acoplados con losas. Estas últimas fueron modeladas como elementos de vigas con rótulas, como mencionamos previamente, que se ubican en los extremos de las conexiones con los muros [7].

En los parámetros abordados en el estudio, que afectan al grado de acoplamiento se encuentran: **Carga axial, longitud de muros, cuantía de borde y número de pisos.**

En el caso de la carga axial, Alfaro [7] obtuvo que al aumentar la carga axial de los muros, se confiere mayor rigidez a estos, lo que se traduce en una disminución del acoplamiento del sistema.

Por otro lado tenemos la longitud de los muros, los cuales al aumentar su longitud crece su rigidez, en consecuencia disminuyendo el grado de acoplamiento. Caso similar ocurre con las cuantías de borde.

Para el caso de la cantidad de pisos, esto se traduce en la altura de edificio, en donde se obtuvo que en sistemas de muros con mayores alturas, estos se comportan con mayor flexibilidad en comparación a muros de alturas inferiores, lo cual genera que el acoplamiento del sistema crezca.

2.2.2.1. Comportamiento de Losas en Sistemas de Muros Acoplados

Dado a que el comportamiento del sistema se caracteriza por utilizar losas de hormigón armado como elemento de acoplamiento entre ambos muros, es importante conocer cómo se comporta dicho elemento, analizando los esfuerzos a los cuales se ve sometido ante sollicitaciones laterales al sistema completo.

En investigaciones con respecto al comportamiento de losas en edificios conformados con muros de corte, como el realizados por Alexander Coull [8], se estudia el comportamiento de losas de piso acoplado a muros de corte, cargados lateralmente. En este estudio se observó que mediante la flexión del muro que recibe la carga, existen rotaciones en la sección transversal de los muros. En consecuencia, la losa es forzada a flexionarse y rotar fuera del plano donde se conecta con los muros.

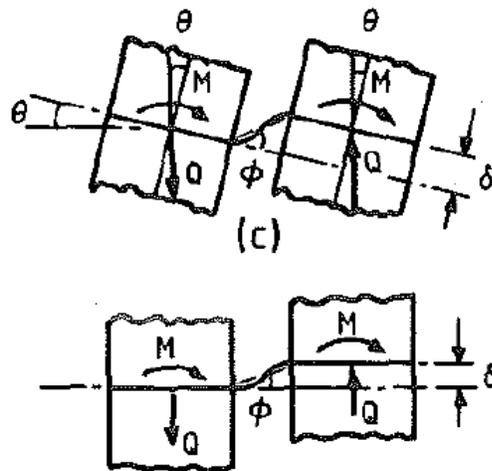


Figura 2.13: Comportamiento de Sistema de Muros de Corte Acoplados con Losas ante Cargas laterales[8]

Los esfuerzos que en consecuencia se generan, se transmiten desde el muro izquierdo hacia el otro en forma de momento y corte, como se puede apreciar en la figura anterior 2.13.

Para realizar este análisis, Coull realizó un estudio sobre un sistema de muros acoplados mediante elementos finitos, en donde también se aborda la distribución general de las fuerzas de corte, momento de flexión y rotación en un cuadrante donde de una losa conecta a 2 muros de espesor δ que sufren una rotación unitaria.

Una de las conclusiones obtenidas de este estudio fue la distribución de esfuerzos en la losa, los cuales no eran uniformes en su ancho total, concentrándose principalmente en las zonas de conexión con el muro. El ancho de esta zona, donde se concentran tensiones depende de las dimensiones de la losa (ancho, largo y espesor) y separación entre muros.

Posteriormente, Henriquez Pizarro [1] realizó un estudio paramétrico similar, utilizando modelos numéricos no lineales, enfocado a estudiar la respuesta de losas acopladas con muros rectangulares de hormigón armado.

Lo anterior se realiza, como se indica en el trabajo previamente comentado, debido a la poca atención que se realiza al análisis post fluencia de las losas y esfuerzos de flexión y corte que se generan y son capaces de resistir.

Para lo anterior, se lleva a cabo un estudio del comportamiento dinámico de una estructura de muros acoplados con losas, en donde se utilizan las cargas de la estructura y carga de uso, para posteriormente realizar un análisis del tipo "pushover" por control de desplazamiento.

Para esto, se aplica una carga lateral en la parte superior de los muros, para finalmente estudiar el comportamiento de las losas y que efecto estas causan en el sistema. Para lo anterior se utiliza un modelo constituido por 10 pisos, como se puede apreciar en el siguiente plano:

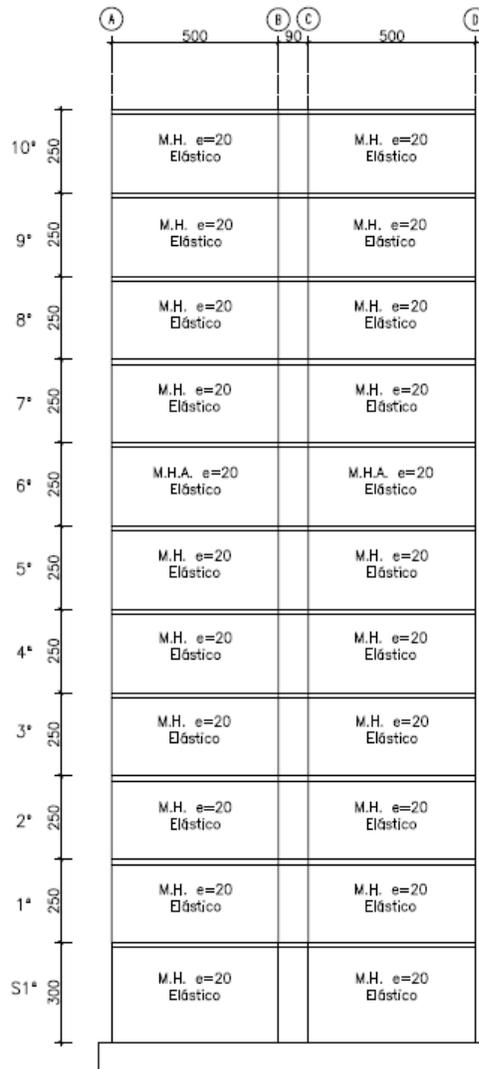


Figura 2.14: Plano de Modelo de 10 pisos, realizado por Henriquez [1]

Luego, se realiza el estudio de los parámetros a estudiar, en donde se encuentra la distribución del momento y rotación de las losas, para lo cual se realizan cortes en la losa de pasillo para tomar puntos para analizar la variación de deformaciones y esfuerzos en los ejes

tomados.

Adicionalmente, se adjunta un esquema de la orientación con la cual se dispuso la armadura se presenta en la siguiente figura:

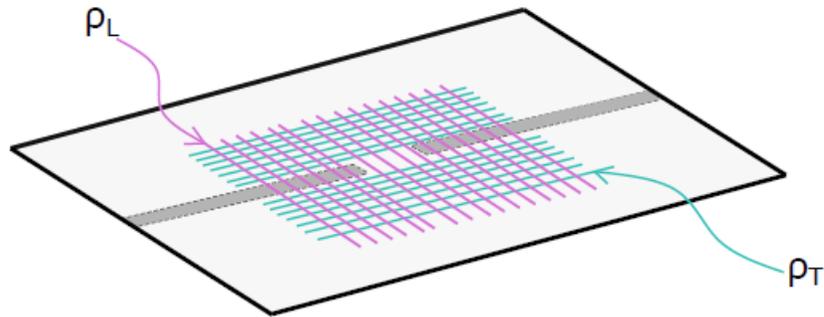


Figura 2.15: Plano de Modelo de 10 pisos, realizado por Henriquez [1]

Para efectos del estudio, el proceso de modelamiento fue realizado en el programa SAFE-Toolbox desarrollado por Rojas [9].

Para esto, las losas fueron consideradas como elementos inelásticos, los muros elásticos o inelásticos dependiendo del modelo (uno con 10 pisos y el otro con 1 solo piso), mientras que el modelamiento de la fundación es elástico, como se diseñó para efectos del presente estudio [10].

Para estimar el largo de los bordes de los muros, se utilizó la expresión propuesta por Silva [11] para tal efecto, obteniendo:

$$L_{Borde} = 0.1 \cdot L \quad (2.3)$$

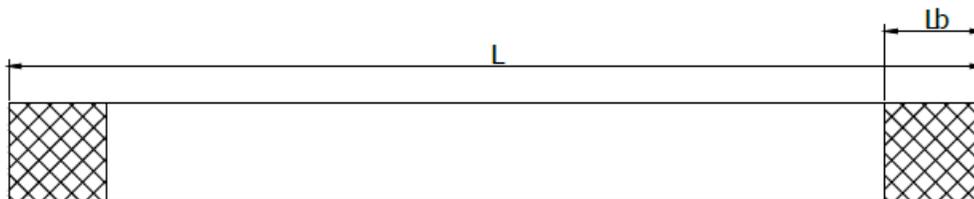


Figura 2.16: Plano de Modelo de 10 pisos, realizado por Henriquez [1]

Por otro lado, se analizan los esfuerzos transmitidos en los muros al momento de someter al sistema a carga lateral, transmitiendo esfuerzo de flexión y corte a los cuales son sometidas las losas, a diferentes niveles.

Cabe señalar que los elementos correspondientes a las losas se consideran como inelástico y el resto de elementos como elásticos, los cuales corresponden a los muros y fundaciones.

Luego, se analiza el corte ejercido por la losas en los muros de cada piso del modelo, el cual es obtenido como la suma de carga axial de todos elementos que se encuentre debajo de la losa de cada uno de los muros, y luego realizando una diferencia entre la carga axial del piso y el piso superior contiguo se obtiene dicha carga. Lo anterior se explica a través del siguiente esquema:

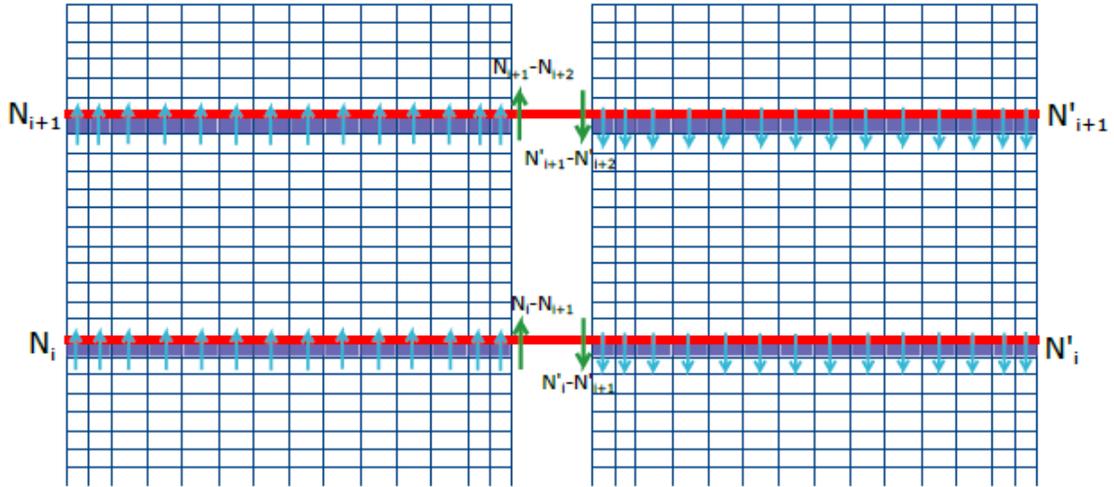


Figura 2.17: Modelo del Edificio de 10 pisos, con Distribución de Carga Horizontal a lo largo de su Altura [1]

Para la estimación de la concentración de momento, se considera la misma vecindad de elementos señalados en la proximidad del muro, en donde se consideró el esfuerzo por unidad de ancho de cada elemento. Con esto se calcula la integral de distribución de momento total transferido a la losa, obteniendo con ello la siguiente distribución:

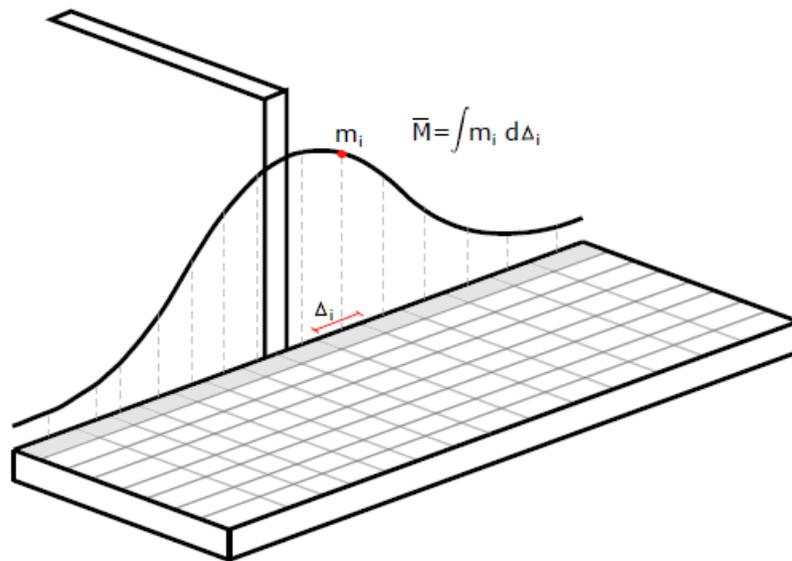


Figura 2.18: Distribución de Momento Transferido por la Losa hacia el Muro [1]

Analizando la figura 2.18, se obtiene que al someter el sistema de muros a carga laterales, se ejercen esfuerzos sobre las losas, las cuales se concentran en la zona de contacto entre muro y losa, respectivamente.

La distribución se concentra en la zona central del espesor del muro, decreciendo hacia los extremos. Lo anterior nos indica que los esfuerzos fuera de una región determinada decrecen de tal forma que no es necesario considerar el ancho completo de la losa, sino un ancho efectivo en donde se concentran los esfuerzos máximos.

Este ancho efectivo se calcula como la concentración de momento transmitido dividido por el máximo momento por unidad de largo [1].

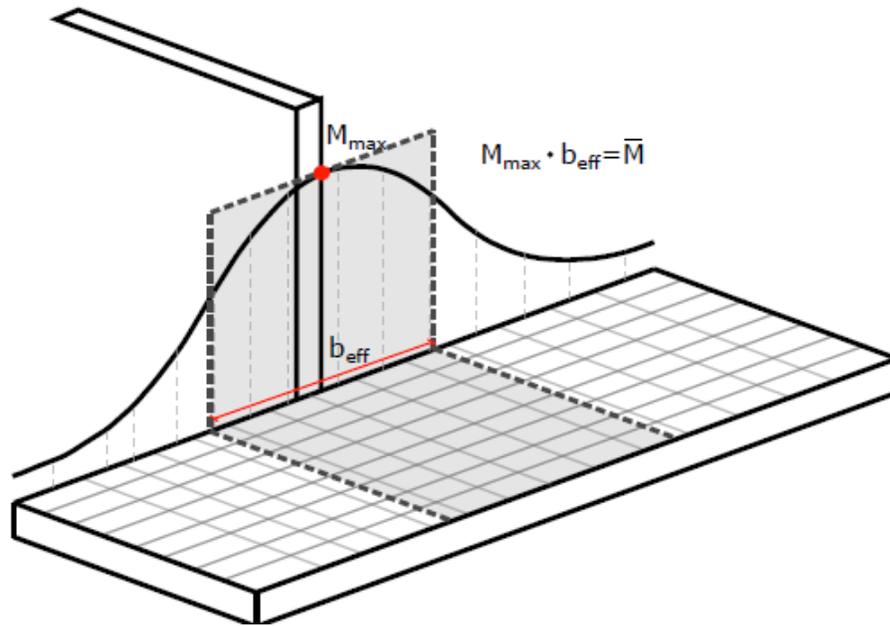


Figura 2.19: Distribución de Momento Transferido por la Losa hacia el Muro [1]

Con los resultados obtenidos para la distribución de momento para el caso de 10 pisos, se llegó a la conclusión de que mientras más alto sea el piso, se alcanza un momento mayor, lo cual ocurre desde el primer piso hasta el quinto. Luego, para la mitad superior del edificio, se obtuvieron valores similares entre cada piso.

Por otro lado, al observar la distribución de rotación en cada piso del modelo, se obtuvo que ocurren mayores rotaciones en niveles de piso inferiores y estas decrecen a medida en que se avanza a pisos superiores.

También se estudia la concentración de corte, en donde se obtuvo que el corte decrece a medida que aumenta el nivel de piso, es decir para pisos inferiores el corte es mayor y este va decreciendo hasta el piso 10.

Finalmente, se estudia el comportamiento del ancho efectivo en cada piso, en donde se obtuvo que los valores obtenidos son equivalente a 4 y 5 espesores de losa (15 [cm]). Este valor decrece a medida que aumenta el nivel de piso.

2.2.2.2. Curvatura y Desplazamientos en Muros Acoplados

Durante el terremoto del 2010 se aprobó el estándar de diseño que se utilizaba en Chile para edificios de hormigón armado, en donde se realizó una evaluación del estado de los edificios posterior al terremoto, revelándose importantes daños en muros delgados con secciones transversales rectangulares y T, los cuales fueron sometidos a cargas de compresión y laterales importantes.

En este sentido, se encontraron daños recurrentes por desprendimiento de hormigón, pandeo excesivo de las barras longitudinales y fractura de barras de refuerzo en algunos casos.

Dado a lo anterior, este aspecto fue abordado por el decreto Decreto Supremo 60, en el cual se establecen requerimientos para limitar el daño en muros bajo una carga sísmica.

Un requerimiento aborda las deformaciones unitarias en la fibra más comprimida de la sección crítica del muro, la cual deberá ser menor o igual a 0.008 cuando se alcanza el desplazamiento de diseño.

Este requerimiento queda determinado por la capacidad de curvatura (ϕ), la cual debe ser mayor que la demanda de curvatura o curvatura última máxima de la sección transversal (ϕ_u).

Al tratarse de un tema que requiere el cálculo de la curvatura máxima, esta puede ser calculada a través de la siguiente expresión:

$$\phi = \phi_y + \frac{(\delta_u - \delta_y)}{l_p \cdot (h_w - \frac{l_p}{2})} = \frac{\varepsilon_c}{c} \leq \frac{0.008}{c} \quad (2.4)$$

En donde:

- ϕ_y : Curvatura Elástica.
- c : Profundidad del Eje Neutro.
- h_w : Altura del Muro.
- l_p : Longitud Rótula Plástica.
- δ_y : Desplazamiento Elástico o Fluencia.
- δ_u : Desplazamiento Último o de Diseño.

Lo anterior se representa en la siguiente figura:

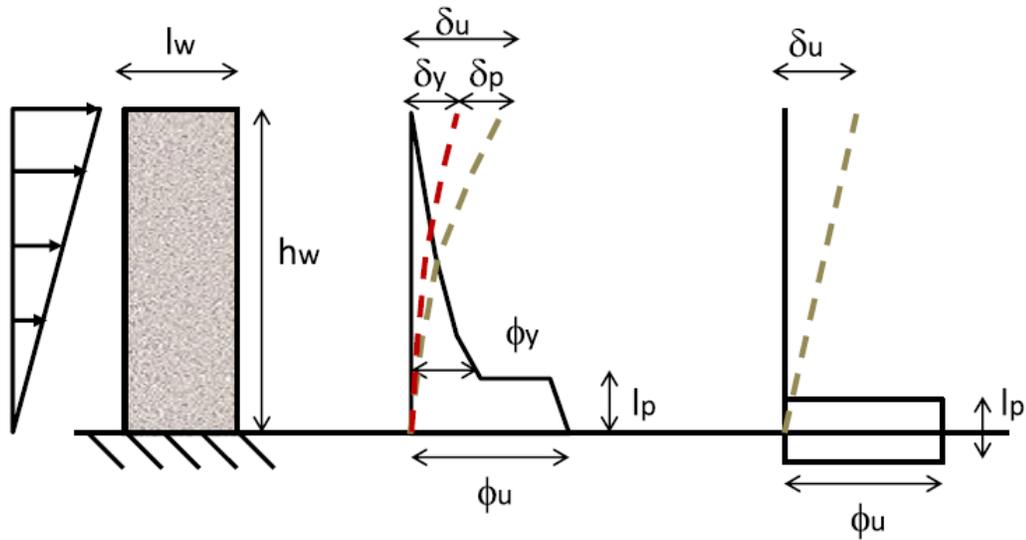


Figura 2.20: Modelo de Muro con Rótula Plástica,-Componentes Elástica e Inelástica. Modelo de Rótula Plástica Simplificado [7]

El segundo requerimiento limita la carga axial máxima, la cual debe ser menor o igual al 35 % de la capacidad a compresión de la sección de hormigón ($0.35 \cdot f'_c \cdot A_g$).

El límite que se impone para la carga axial pretende asegurar una mínima capacidad de deformación plástica del muro.

Para el modelo presentado en la figura 2.20 se asume la existencia de rótula plástica donde se concentra de las deformaciones inelásticas, en la base del muro.

Dado que no estudiamos el comportamiento de un muro rectangular, sino a un sistema de muros acoplados, Alfaro [7] realizó un estudio de la curvatura y desplazamiento en 2 muros rectangulares alineados, acoplados con losas rectangulares en cada piso.

Lo relevante del estudio se encuentra en que se realiza una estimación del desplazamiento elástico de un sistema de muros acoplados, en donde a partir de los diagramas de momento de muros para muros de distinta longitud, se llegó a la siguiente expresión para estimar la deformación de fluencia de muros acoplados:

$$\delta_{y-coupled} = \delta_y \cdot \left(1.4 \cdot \frac{h_0}{h_w} - 0,37\right)^{0.4} \quad (2.5)$$

En donde δ_y corresponde al desplazamiento de fluencia de un muro no acoplado y h_0 corresponde a la altura donde se alcanza un punto de inflexión en el diagrama de momento. Cabe mencionar que la función utilizada para la distribución de momento no considera el efecto de los momentos puntuales que se presentan por la acción de las losas.

Para el desplazamiento inelástico-modelo de rótula plástica, se obtuvo la siguiente expresión para la curvatura:

$$\phi_u = \frac{\delta_u}{h_w \cdot l_p} \quad (2.6)$$

En este aspecto, el estudio realizado por Alfaro [7] utiliza un modelo de sistemas acoplados con losas y propone un procedimiento general para estimar el desplazamiento de fluencia, el cual se basa en la estimación de desplazamiento de muros individual (sin acoplamiento) y la ubicación del punto de inflexión en el diagrama de momentos, cuyo valor se puede obtener a partir de los modelos de diseño.

Por otro lado, existen otras expresiones para estimar la longitud de la rótula plástica, las cuales dependen principalmente de las propiedades geométricas y la carga axial a la cual se somete un muro.

Basado en estudios anteriores, como el realizado por Paulay e Azumeri (1975), con correcciones realizadas por Paulay y Priestley en 1993, se obtiene la siguiente ecuación:

$$l_p = \alpha_1 \cdot 0.8 \cdot l_w + \beta \cdot h_w \quad (2.7)$$

En donde α y β son parámetros calibrados, que toman los valores $\beta=0.044$ y $\alpha = 0.25$ de acuerdo a lo recomendado por Paulay y Priestley (1993) [12].

Por otro lado, Bohl y Adebear [13] analizó este parámetro y observó que la longitud de la rótula plástica es fuertemente afectada por la carga axial, variando un 50% considerando una fuerza de axial de $0.35 f'_c A_g$ en comparación a un muro sin fuerza axial.

La expresión propuestas por los autores para muros aislados se presenta a continuación:

$$l_p = (0.2 \cdot l_w + 0.05 \cdot h_w) \cdot \left(1 - 1.5 \cdot \frac{P}{f'_c \cdot A_g}\right) \leq 0.8 \cdot l_w \quad (2.8)$$

2.2.2.2.1. Cálculo de Deformación por Corte

Para analizar cómo se comporta el muro completamente, se debe tener claro si el comportamiento de este elemento estructural es netamente a flexión o corte.

En el área experimental, se debe evaluar la precisión y consistencia de los resultados obtenidos, incluyendo el efecto de acoplamiento entre las deformaciones inelásticas de flexión y corte. Considerando lo anterior, es relevante determinar si el muro se comporta netamente a flexión o posee una componente importante a corte, permitiendo cuantificar este último y evaluando si este es relevante para efectos de diseño.

Considerando lo anterior, Massone [14] planteó una expresión para estimar la contribución de la deformación corte en un muro solicitado lateralmente, la cual se presenta a continuación:

$$U_s = \frac{(\sqrt{D_1^{meas^2} - (h - V_2)^2} - U_{f2}) - (\sqrt{D_2^{meas^2} - (h - V_1)^2} + U_{f1})}{2} \quad (2.9)$$

Sin embargo, existe una versión simplificada, en donde se consideran las correcciones por desplazamiento vertical de los puntos de apoyo de las diagonales y se puede aplicar a muros esbeltos. Considerando lo anterior, la ecuación queda expresada de la siguiente forma:

$$U_{scorregida} = \frac{\sqrt{(D_1^{meas^2} - h^2)} - \sqrt{(D_2^{meas^2} - h^2)}}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{V_1 - V_2}{l} - \alpha \cdot \frac{V_1 - V_2}{l} \cdot h \quad (2.10)$$

En donde:

- D_{meas} : Medición de Diagonales de Corte (LVDT), dispuestas a 45°..
- V_i : Desplazamientos Verticales de Puntos de Apoyo.
- l : Ancho del Muro
- α : Distancia desde la parte superior del primer piso hasta el centro de la distribución de curvatura.

Los valores de α varían de acuerdo a la forma de distribución de carga, en este caso al tener una distribución de carga triangular, se utiliza $\alpha = 0.67$.

Dicha expresión se obtiene a través del siguiente esquema:

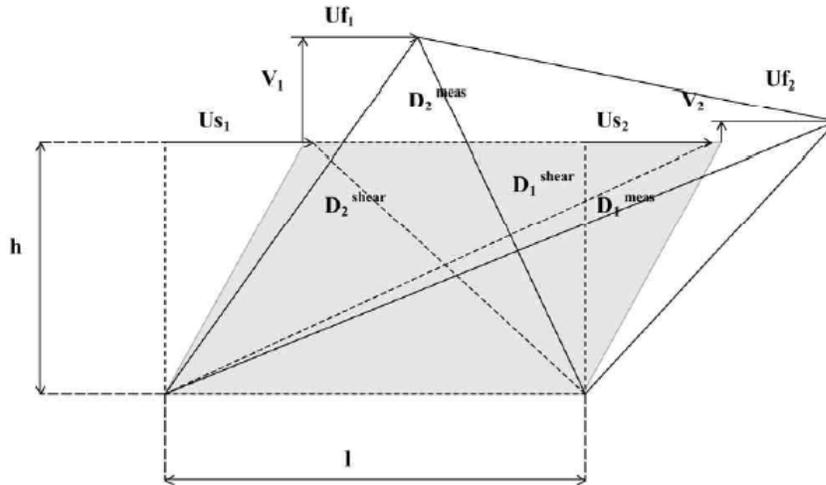


Figura 2.21: Modelo de Flexión que Cuantifica el Desplazamiento Vertical[14]

2.3. Montajes Experimentales Previos

En este apartado se presentarán estudios experimentales relacionados al estudio del comportamiento de sistemas de muros acoplados con losas y vigas, respectivamente.

Dado la baja disponibilidad de investigaciones experimentales de sistemas de muros acoplados con losas, los montajes presentados a continuación buscan delinear el montaje experimental utilizados por otros investigadores y las conclusiones obtenidas de estos.

2.3.1. Behaviour of Shear Walls with Slabs and Openings (Cheul Choi,2016)

2.3.1.1. Resumen

La investigación se buscaba conocer el comportamiento experimental de muros de corte a media escala de hormigón armado con aberturas, considerando aberturas acopladas con losas, los cuales fueron sometidos a cargas cíclicas laterales.

2.3.1.2. Objetivos

Caracterizar experimentalmente el comportamiento de muros de hormigón armado acoplados con losas, analizando la influencia de la abertura en términos de resistencia a flexión y corte, de acuerdo con la ubicación de esta.

La presente investigación estuvo orientada a estudiar la reducción de la resistencia de los muros ante presencia de aberturas.

Para efectos de lo anterior, solo se considera el análisis realizado a la probeta con aberturas instalada en el muro con losas, dada a la similitud que presenta esta probeta con el sistema de muros que será estudiado experimentalmente en la presente memoria.

2.3.1.3. Montaje Experimental y Análisis

Para el montaje experimental, se consideraron 3 tipos de probetas de muros de corte de hormigón armado, uno solido (sin aberturas) y 2 con aberturas en su interior.

Para efectos del presente trabajo, solo se consideró la probeta con abertura instalada en el muro de corte con losas. A continuación se muestran los detalles de la probeta con abertura de interés (WS-0.23):

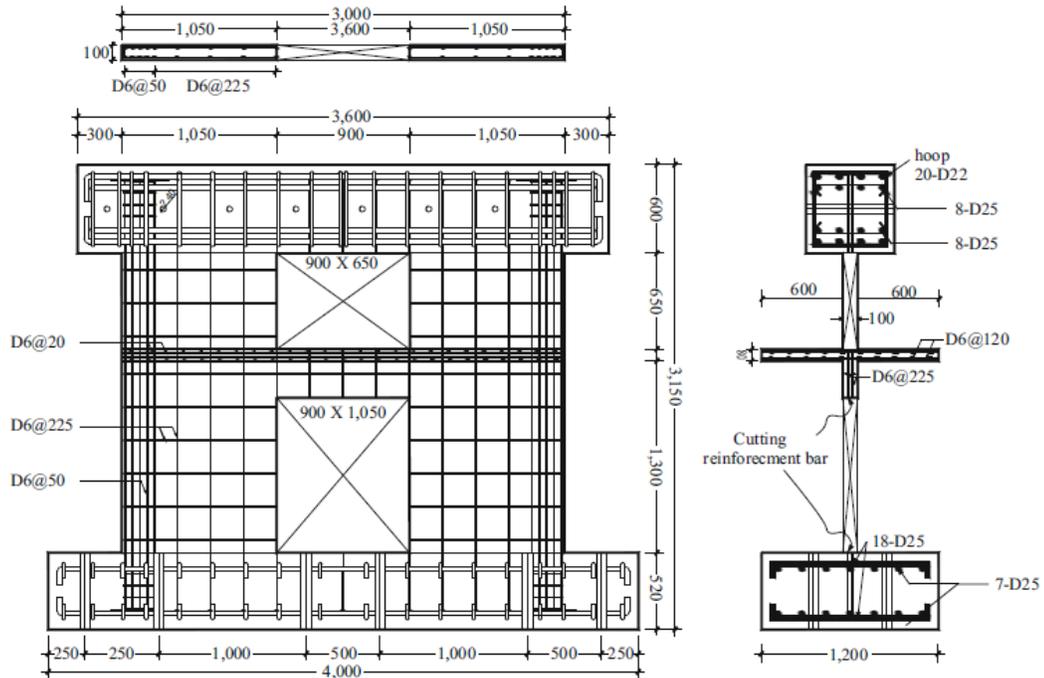
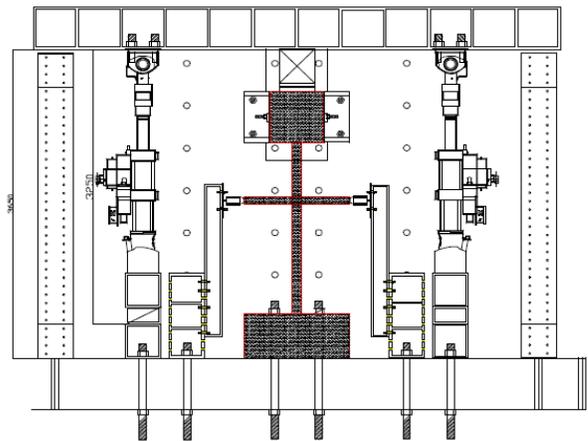


Figura 2.22: Planos de Armaduras de la Probeta WS-0.23 [15]

El montaje de la probeta en el laboratorio se presenta en el siguiente esquema:



(a) Cerca del Muro en Tracción



(b) Cerca del Muro en Compresión

Figura 2.23: Montaje Experimental de Probetas en el Desarrollo de la Investigación [15]

Como se aprecia en las figuras, se aprecia que la probeta fue empotrada al suelo a través de la fundación de esta mediante 4 barras de acero de 68[mm] de diámetro en cada extremo.

La carga axial de la probeta se realizó de forma similar a la carga de un muro en voladizo vertical, aplicando la fuerza lateral a través de una viga rígida ubicada en la parte superior de este.

Para la carga axial del muro, se utilizaron 2 actuadores verticales, en los cuales se aplicó una carga de 630[kN]. Luego, se aplicó una carga lateral en la viga rígida o viga de transferencia mediante un actuador hidráulico de 2000[kN], el cual fue montado entre un muro de reacción disponible en el laboratorio y el muro a ensayar. La carga fue aplicada por control de desplazamiento.

Para la probeta considerada en este apartado, la losa se apoyó en las cuatro esquinas. Además utilizaron vigas guía para controlar el movimiento fuera del plano y simular el efecto de diafragma de una losa en la dirección transversal del eje fuerte.

2.3.1.4. Resultados

Para la probeta WS-0.23 se tuvo una resistencia última máxima de 500[kN]. El efecto de la reducción de resistencia debido a la abertura no fue relevante. Se mostró una diferencia de resistencia de un 30 % del muro con respecto a muros con presencia de aberturas sin losas.

La presencia de la losa contribuyó al efecto de acoplamiento entre ambos muros. A continuación se puede apreciar el daño sufrido por la probeta ya finalizado el ensayo:

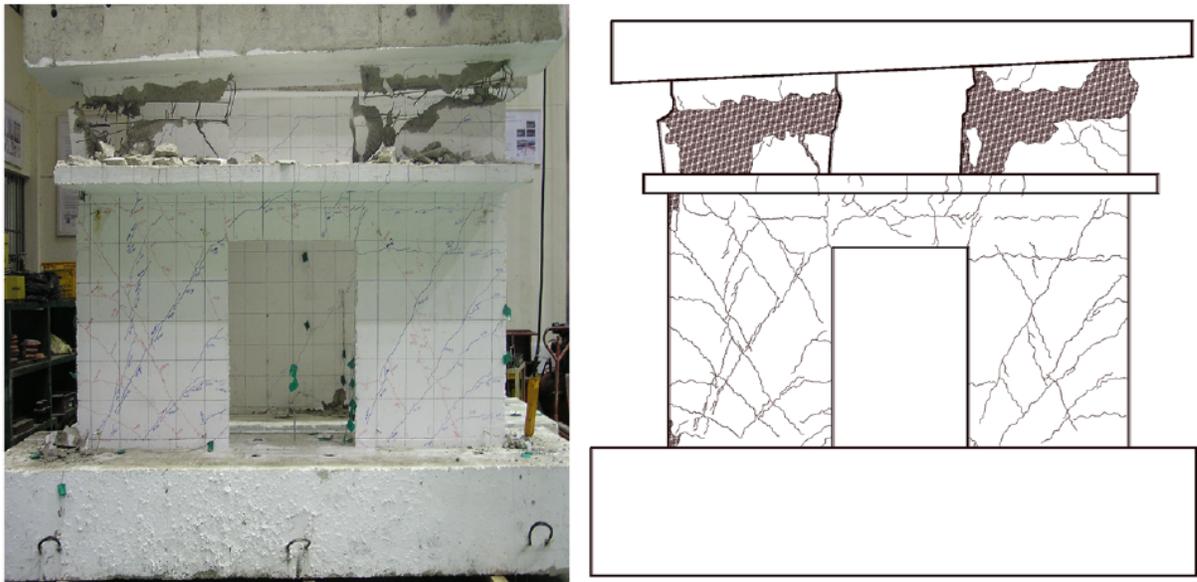


Figura 2.24: Falla y Grietas que Presentó la Probeta WS-0.23 [15]

También se analiza la deformación de la losa, en donde se estudió la sección crítica de la losa, observándose que sufre concentración de tensiones dado al acoplamiento de los muros a través de esta.

Adicionalmente se estudió el comportamiento del refuerzo horizontal del muro, en la proximidad de la abertura. Se apreció que las deformaciones de este en relación a la desplazamiento lateral aumentaron proporcionalmente con la distancia al centro de la abertura.

2.3.1.5. Conclusiones

Con respecto a la probeta considerada, se obtuvo que la presencia de la losa muestra una curva de degradación de rigidez más suave al caso de un muro con aberturas debido a la rigidez de la conexión que existe en este último. Se considera que la degradación de la rigidez se ve más afectada por la rigidez de un elemento de acoplamiento que por el cambio de una abertura en el muro.

Lo anterior pudo ser causado por la resistencia a flexión que aportan las losas, lo cual mejoró el desempeño del sistema ante cargas laterales.

También se encontró una correlación entre la deriva alcanzada por el muro con las deformaciones que sufre el refuerzo horizontal, pues a mayor distancia del centro de la abertura, se generaban mayores tensiones en el refuerzo.

2.3.2. Experimental study of reinforced concrete and hybrid coupled shear wall systems (Yuan Cheng, 2014)

2.3.2.1. Resumen

Se ensayaron 2 tipos de muros de corte acoplados de 4 pisos cada uno, los cuales fueron ensayados bajo acción de la gravedad y por desplazamientos laterales.

El primer ejemplar consiste en un muro de corte tradicional acoplado (CW-RC) con vigas de hormigón armado, el cual entregó una respuesta histerética dúctil hasta un 3,0 % de deriva.

El segundo ejemplar, consiste en un muro de corte acoplado con vigas de acero con un punto bajo de fluencia (CW-S), el cual falló después de completar un 2,0 % de ciclos de deriva.

Los resultados obtenidos indican que un diseño con vigas de acoplamiento dúctiles no garantiza un comportamiento dúctil en el sistema de muros acoplados. Los muros de corte deben ser diseñados en función a la capacidad axial y la viga de acople a la capacidad a corte.

En este sentido, se evalúan especificaciones de diseño estipuladas en la ACI 318 (2011) para un sistema de muros acoplados de hormigón armado y vigas de acero, orientado a sistemas híbridos de muros de corte acoplados y reconocer el potencial de uso que se le puede dar al acoplamiento con este tipo de acero de baja fluencia.

2.3.2.2. Objetivos

- Investigar el comportamiento de los sistemas de muros acoplados de hormigón armado con vigas de acople con refuerzo diagonal y acero, respectivamente.
- Evaluar especificaciones de diseño del código de construcción ACI 318 para sistemas de muros acoplados con vigas de hormigón armado y acero.

2.3.2.3. Montaje Experimental y Análisis

El diseño de la probeta a estudiar se presenta en el siguiente esquema:

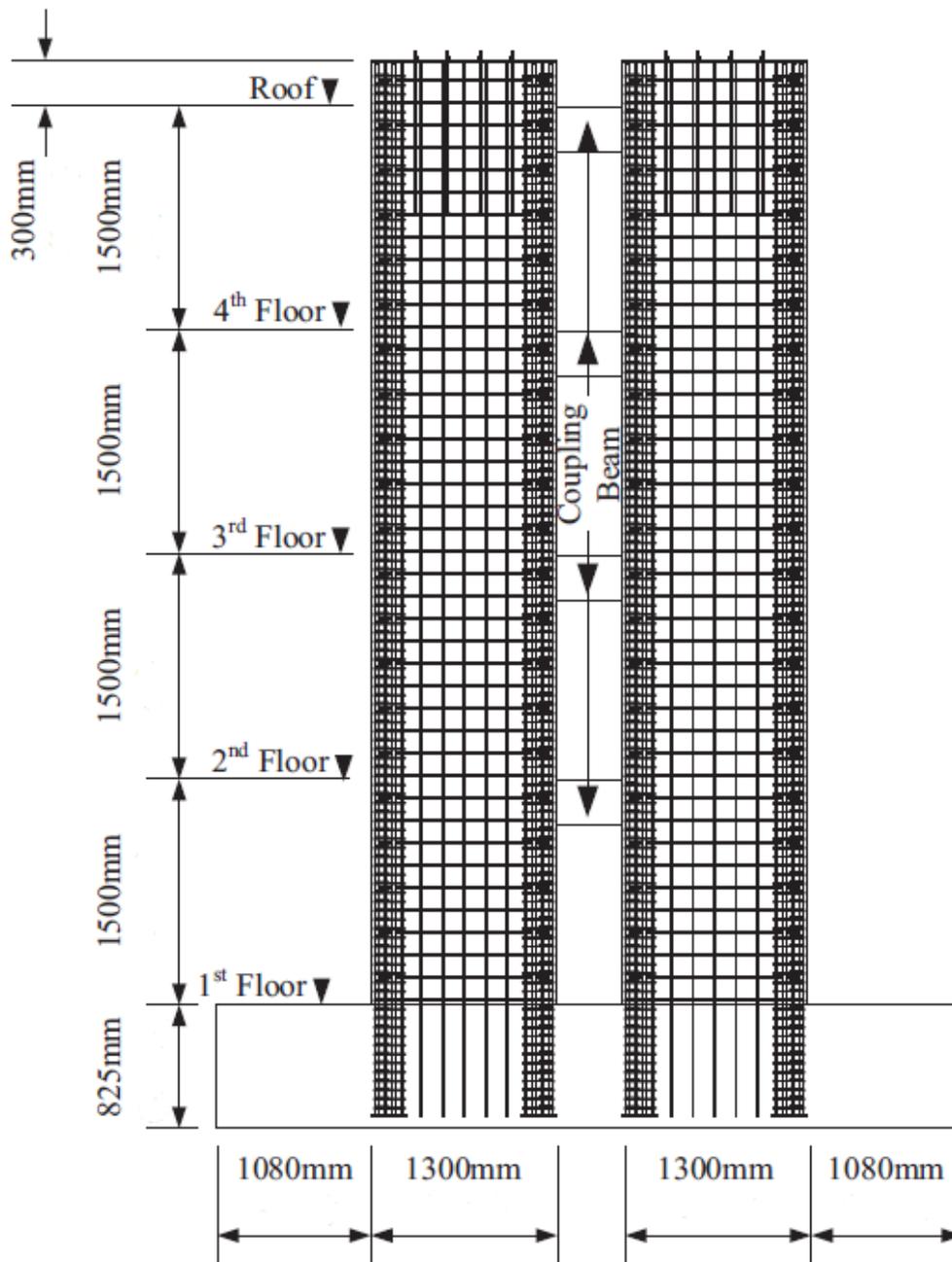


Figura 2.25: Montaje Experimental [4]

Para cada probeta diferenciada por su tipo de acople, se cargaron horizontalmente con 1960[kN] a través de actuadores hidráulicos anclados a un muro de reacción, los cuales fueron instalados en el techo y tercer piso de la probeta, respectivamente.

En las siguientes figuras se presenta de forma esquemática el montaje experimental:

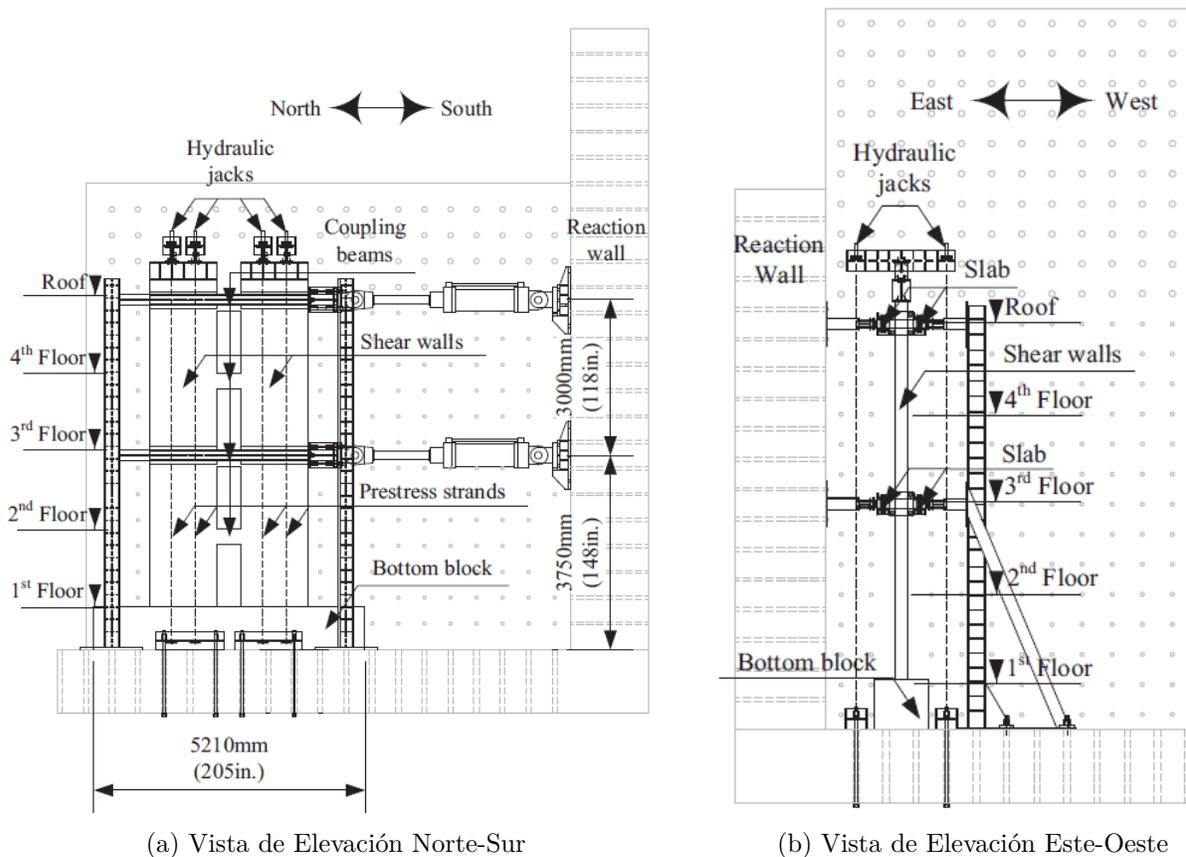


Figura 2.26: Deformación del Edificio y Deformaciones Normales de Fisuración del Hormigón [16]

La definición de signos para las derivas, hacia el norte es positiva (se mueve hacia el norte) y negativa hacia el sur. El actuador en el 3º piso se encuentra controlado por la mitad de la carga del actuador del techo. Esta configuración se encuentra orientada a obtener un perfil de carga dominante en el primer modo de las probetas ensayadas.

Para ambas probetas a ensayar (CW-S y CW-CR) se aplicó una carga por efecto de la gravedad adicional de 245[kN], las cual se aplica a través de 4 gatos hidráulicos que tiran 7 barras hebras pretensadas de 15[mm] al mismo tiempo antes de aplicar el desplazamiento lateral.

Una vez alcanzada la carga de gravedad deseada, la presión hidráulica se bloqueó y luego los 4 gatos hidráulicos se trasladaron hacia el muro norte, para repetir el mismo procedimiento.

Para medir los desplazamientos, se utilizaron LVDT's en los 4 pisos y techo, los cuales fueron eliminados después de completar ciclos de derivas del 2,00 %.

Se observó que las deformaciones se concentraron en pisos inferiores a partir de la deriva del 2,00 %. Entre 3,00 % y 4,00 % de deriva se experimentó la mayor demanda de deriva en ambos muros, los cuales se comportaron de forma similar hasta el 2,00 % de deriva.

Un aspecto a considerar para efectos constructivos es el procedimiento utilizado para el vertido del hormigón en las probetas, la cual se dividió en 3 etapas, la cual se realizó 1° hasta el piso 2, luego hasta el piso 3 y finalmente hasta terminar la probeta.

El comportamiento general de los muros mostró, que luego del ciclo de deriva del 1.00 %, la probeta CW-RC mostró daños en los muros y vigas de acoplamiento. Posteriormente el desprendimiento del hormigón comenzó en la viga de acoplamiento a una deriva del 1.25 %. Finalmente, el muro con viga de H.A falló sin completar el primer ciclo al 3 % de deriva.

Al final del ensayo, se pudo observar que en el muro CW-RC exhibió diferentes niveles de daño en cada piso, siendo los pisos 2 y 4 con mayor desprendimiento de hormigón y presencia predominante de grietas.

2.3.2.4. Conclusiones

Sobre los resultados obtenidos en la investigación, se pueden rescatar los siguientes puntos:

- La probeta de muro CW-RC falló sin completar el primer ciclo de carga de deriva del 3.00 %.
- La probeta de muro CW-S falló después de completar el 1° ciclo de 2.00 % de deriva, debido al sobre-dimensionamiento de la viga de acoplamiento. Sin embargo, este muro resistió mejor el momento volcante, mejor degradación de la rigidez del muro y una mayor capacidad de disipación de energía.
- Las vigas de acoplamiento diseñadas para fines de la publicación inducen demandas de corte axiales más altas en sistema de muros de corte acoplados.
- El diseño de los muros debe estar provisto en base a cargas de corte y axiales, de acuerdo a las capacidades de la viga de acoplamiento.
- Las vigas de acoplamiento sobredimensionadas inducen demandas axiales y corte más altas en el sistema de muros acoplados.

Capítulo 3

Descripción de la Probeta

En el presente capítulo se entregará la descripción de las propiedades geométricas y mecánicas de los materiales utilizados para la construcción de la probeta.

Dado a que el diseño de esta probeta proviene de trabajos anteriores desarrollados en la facultad (Díaz Olivares, 2016) [17], se tiene en cuenta las limitaciones de espacio que impone el laboratorio.

3.1. Descripción de la Probeta de Estudio

La probeta fue diseñada en base a investigaciones realizadas en años anteriores en la facultad en muros rectangulares, de tal forma de adaptar el comportamiento individual de este muro a la conformación de un sistema de muros acoplados con losas.

El Diseño final para la construcción de la probeta fue realizado por Matías Valdivia [10], quién a su vez tomó en consideración las investigaciones experimentales realizadas por otros investigadores, entre los que se encuentran: Díaz Olivares (2016) [17], Manríquez Rojas (2016) [18] y Rivas Montenegro (2016) [19]. En estas investigaciones se realiza un estudio de muros rectangulares con diferentes tipos de discontinuidades, en particular en muros del tipo bandera.

Para el diseño de nuestro sistema de muros de estudio, se utilizó un muro rectangular sin discontinuidades (MR1), el cual fue diseñado de acuerdo con los estándares utilizados en construcciones nacionales, para contar con una probeta de estudio representativa de las construcciones chilenas actuales. Exceptuando al muro principal (MR1), se considera otro muro rectangular (MR2), el cual se conecta con MR1 mediante el acoplamiento de 2 losas de hormigón armado.

Esto se realiza con el objetivo de estudiar la respuesta de muros acoplados, en particular la capacidad de transferencia de carga entre ambos muros y la respuesta global del sistema ante cargas cíclicas.

El diseño previamente descrito fue realizado por Matias Valdivia (2022)[10] y modificado por Nicolás Segura [20], él cual cambio algunos detalles relacionados a las dimensiones con fines constructivos.

Para garantizar un correcto empotramiento y transferencia adecuada de la carga del ensayo, se diseñaron elementos secundarios, como la viga de transferencia ubicada en la parte superior de cada muro y una fundación común para ambos muros.

La viga de carga cuenta con 4 agujeros laterales, los cuales son utilizados para acomodar 4 barras de acero Dywidag ®.

Por otro lado, el pedestal cuenta con 14 agujeros, los cuales son utilizados para acomodar 14 barras Dywidag ® para el anclaje de este elemento a la losa de reacción. Los agujeros previamente mencionados son materializados través del posicionamiento de tubos de PVC dispuestos en la etapa de construcción de moldaje. Los planos del pedestal se encuentran adjuntos al final del presente informe (Ver Anexo C.2)

Estos elementos fueron diseñadas para que trabajen en el rango elástico, con la finalidad de evitar daños directos sobre los muros y que además sean elementos de apoyo para el anclaje y transferencia de las cargas a las cuales se encontrará sometida la probeta durante el ensayo.

En apartados posteriores se explicará en detalle las características de la probeta a ensayada.

3.1.1. Geometría de la Probeta

Dado a los antecedentes previamente mencionados, se estimó conveniente considerar la altura de estas por condiciones físicas del laboratorio. Las dimensiones de cada muro se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3.1: Dimensiones de los Muros MR1 y MR2

Muro	Variable	Dimensión [m]
MR1	Espesor	0.15
	Largo	0.9
	Altura	2.65
MR2	Espesor	0.15
	Largo	0.45
	Altura	2.35

La altura entre ambos muros se deben principalmente a factores constructivos, dado que en el muro principal (MR1) es necesario instalar pasadores a través de la viga de carga para aplicar la carga lateral en el muro, obteniendo con ello 2 muros con relación de aspecto mayor o igual a 3 ($h/L \leq 3$).

Con respecto a las dimensiones de MR2, en particular el ancho, esto fue realizado para obtener un muro más esbelto y con ello obtener un muro con menor rigidez. Lo anterior se realiza con la finalidad de encontrar una respuesta más precisa de la influencia del acoplamiento por losas entre ambos muros, como se explica en el trabajo desarrollado por Valdivia (2022) [10].

Por otra parte, las 2 losas de acoplamiento por las cuales se conectan ambos muros se encuentran dispuestas a 0.83[m] y 1.76 [m] sobre el pedestal del muro.

Ambas losas poseen las mismas dimensiones, las cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3.2: Dimensiones de las Losas

Dimensiones Losas	
Variable	Medida [m]
Espesor	0.1
Largo	1.8
Ancho	0.45

La fundación sobre el cual se ubican ambos muros tiene las dimensiones de 2.6[m] de largo, 0.7[m] de ancho y 0.4 [m] de espesor.

Finalmente, las vigas de transferencia de carga cuenta con 0.3[m] de altura, 0.4[m] de ancho y 0.9[m] de largo para MR1 , variando solo el ancho en MR2, el cual mide 0.45 [m]

A continuación se presenta el esquema actualizado de la probeta a estudiar:

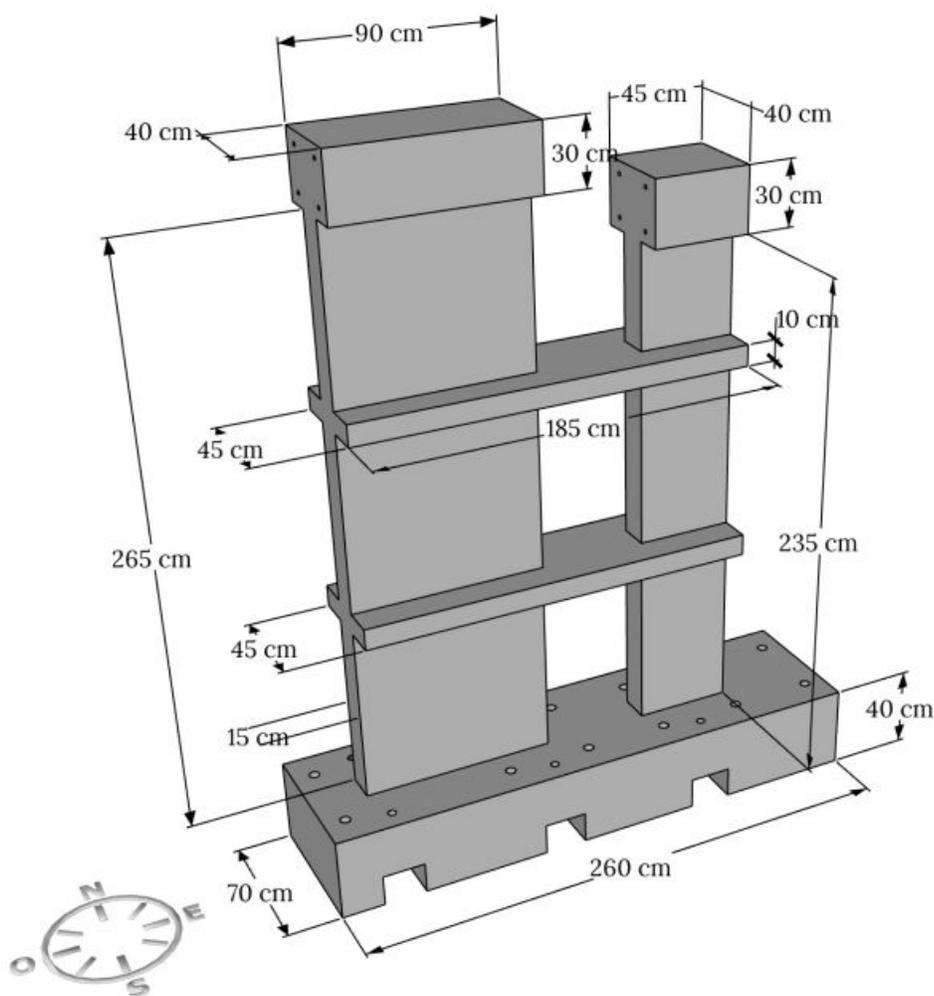


Figura 3.1: Vista Lateral de Armadura [20]

3.1.2. Consideraciones en el Diseño

El diseño y detallamiento de los muros fueron realizados de acuerdo a lo estipulado en la normativa actual a partir de la ACI 318 junto con el decreto 60 (2011).

En esta última se incorporan detallamiento de muros de hormigón armado de acuerdo con los antecedentes recopilados en el terremoto del año 2010 en Chile, entre los cuales se encuentra el límite de la carga axial que pueden recibir los muros a compresión ($<0.35 \cdot A_g \cdot f'_c$), para lo cual se consideró un 10% de la capacidad máxima de la sección a compresión pura ($0.1 \cdot A_g \cdot f'_c$).

El muro MR1 fue diseñado a partir de los antecedentes aportados por Díaz Olivares [17] y estos fueron considerados por Valdivia[10] para el diseño final. En este último se utiliza una cuantía del 5% para el refuerzo longitudinal de borde del muro, distribuido en el 10% del largo del muro. Lo anterior fue modificado con el objetivo de mejorar la respuesta del muro dado al acoplamiento de las losas al muro MR2.

Para esto, se consideraron 4 barras de $\phi 16$ en los bordes, equivalente a una cuantía del 3.97% y el confinamiento se realizó con estribos del $\phi 6$ espaciados cada 100[mm]. Estos últimos fueron dispuestos hasta una altura de 1.7[m] sobre el pedestal del muro, finalizando en la ubicación de la segunda superior.

La armadura longitudinalmente distribuida consiste de una doble malla con barras del $\phi 8$ espaciadas cada 200[mm].

Para la armadura transversal, de forma análoga a la malla horizontal, a barras del $\phi 6$ espaciadas cada 200[mm]. En la parte superior del muro en donde se encuentra la viga de transferencia, el espaciamiento se reduce a 100[mm].

Adicionalmente, en la zona superior se agregan 8 barras del $\phi 6$ para aumentar la capacidad de la unión del muro con la viga de transferencia, como indica Valdivia[10].

Para el muro MR2, se tiene que el refuerzo longitudinal de borde se encuentran conformado por 4 barras del $\phi 12$, lo cual es equivalente a una cuantía del 2,32%, con un confinamiento y cuantía igual al utilizado en MR1.

Para la armadura transversal, se utilizaron barras del $\phi 6$ espaciadas cada 100[mm] a lo largo del muro, y la armadura longitudinal corresponde a 4 barras del $\phi 8$. Lo anterior se mantiene constante en toda la altura del muro.

El recubrimiento utilizado en ambos muros es de 15[mm] para la armadura de borde, y estos se encuentra empotrados en el pedestal que cumple el rol de fundación común para ambos muros. La armadura longitudinal de borde en la zona del pedestal tiene un doblado en 90° , el cual tiene una profundidad de empotramiento de 375[mm] y el largo de doblado es de 260[mm]. Para la armadura central se tiene la misma profundidad de empotramiento de las barras, pero con un largo de doblado de 130[mm].

Para el caso de las barras longitudinales que llegan a la viga de transferencia de carga, se tiene que en ambos muros estas barras se doblan en un ángulo de 90° , con un largo de doblado de 260[mm] para barras de borde y 130[mm] aprox. para barras centrales.

Las capacidades nominales de cada muro se detallarán en la siguiente tabla. Cabe mencionar que el diseño es abordado con mayor detalle en el trabajo de Segura[20].

Tabla 3.3: Capacidades de Muros Ensayados

	V_n [tonf]	Mn [tonf·m]
Muro MR1	29	44
Muro MR2	23	8.6

Estos cálculos fueron realizados de acuerdo a lo estipulado en la ACI-318S-08, en donde el cálculo de momento fue realizado a través del diseño por flexo-compresión para la capacidad a momento y el corte fue calculado en base al refuerzo central de cada muro.

Con respecto a las losas, ambas son idénticas, por lo que tienen una distribución de armaduras igual. El refuerzo transversal consiste en una doble malla del $\phi 8$ espaciada cada 100[mm], mientras que la armadura transversal se encuentra conformado por una doble malla de barras de $\phi 8$ espaciadas 50[mm].

En la siguientes figuras se presenta un esquema de la armadura del muro, como también de las losas que conforman la probeta de estudio:

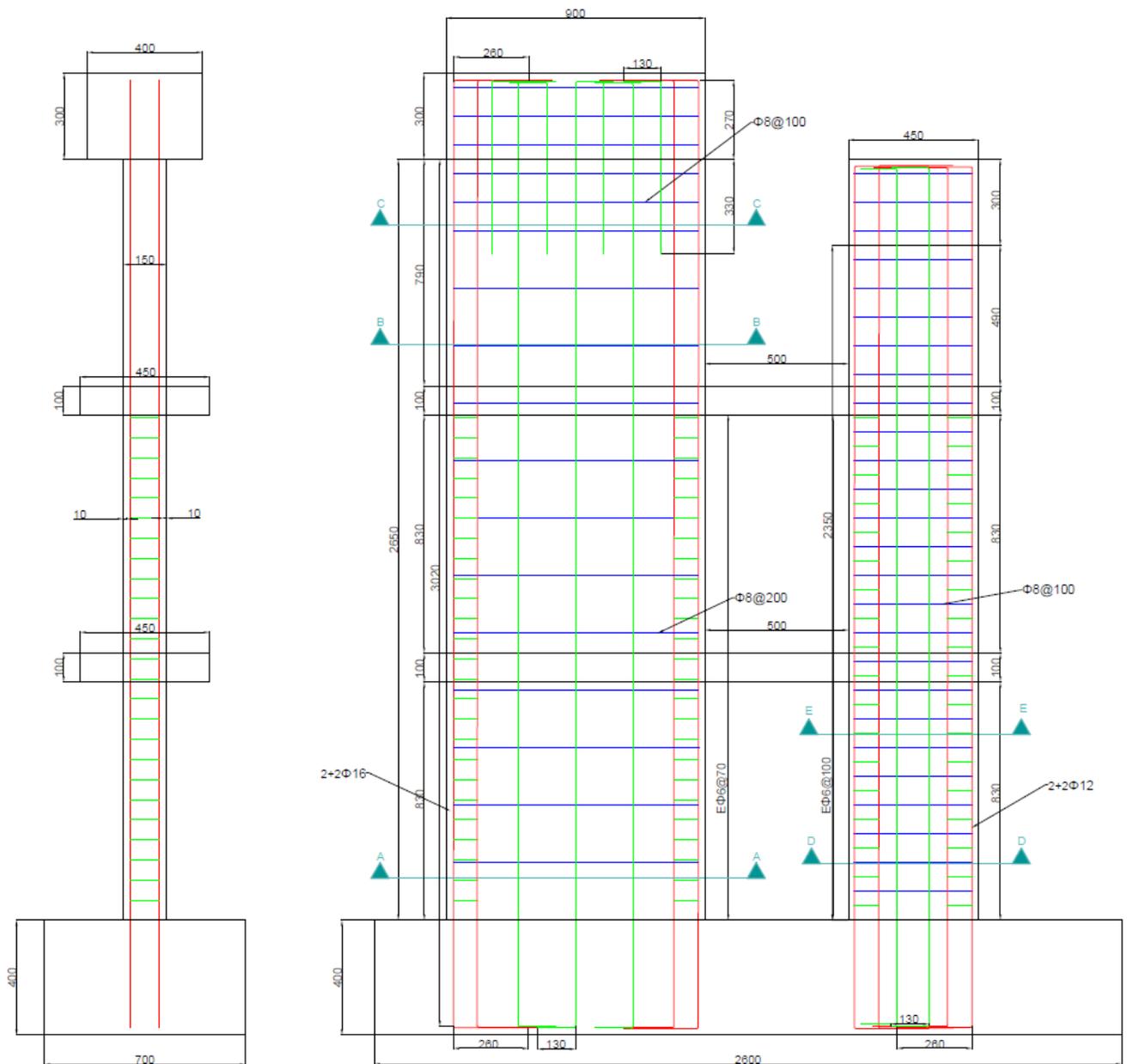
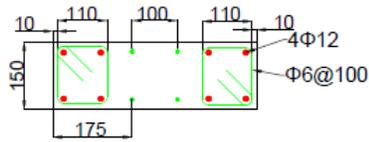
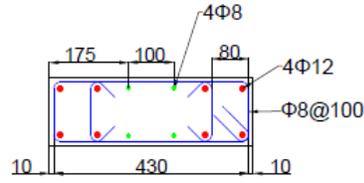


Figura 3.2: Vista Lateral de Armadura

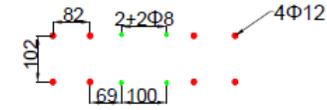
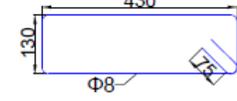
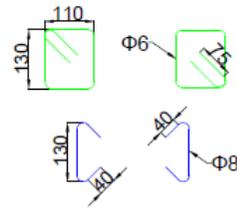


CORTE E-E



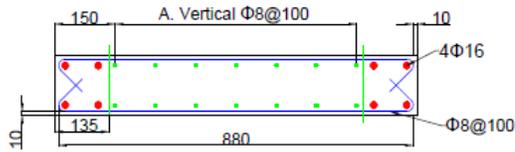
CORTE D-D

CORTES MURO 2
ESCALA 1:10

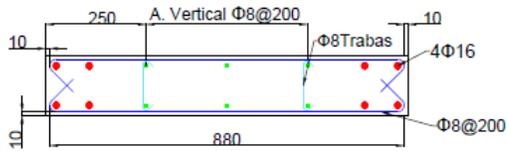


DETALLES MURO 2
ESCALA 1:10

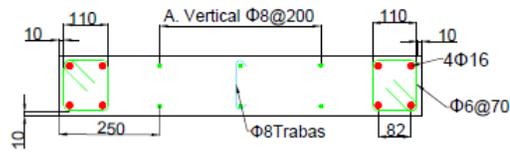
Figura 3.3: Vista Lateral de Armadura



CORTE C-C

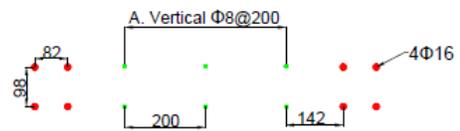
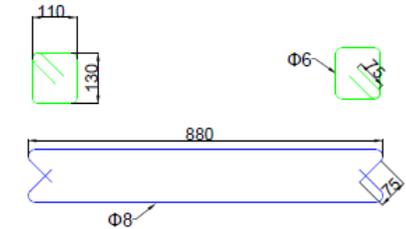


CORTE B-B



CORTE A-A

CORTES MURO 1
ESCALA 1:10



DETALLES MURO 1
ESCALA 1:10

Figura 3.4: Vista Lateral de Armadura

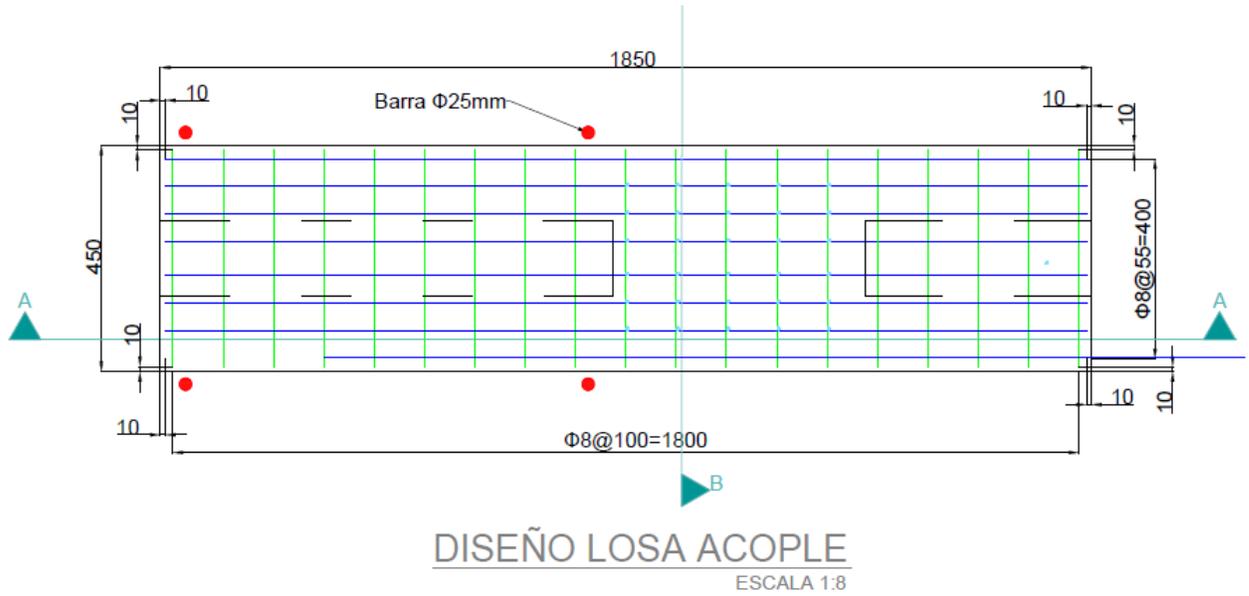


Figura 3.5: Vista Lateral de Armadura de las Losas

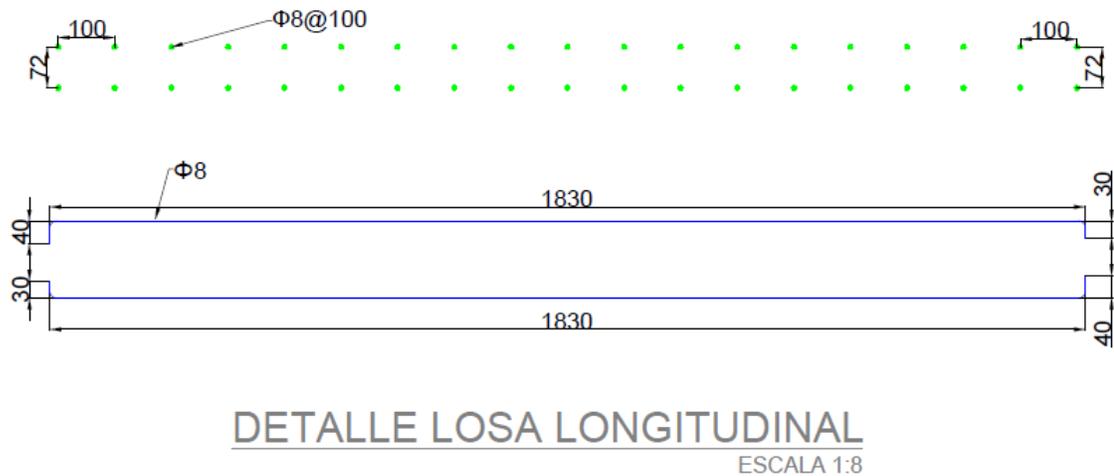
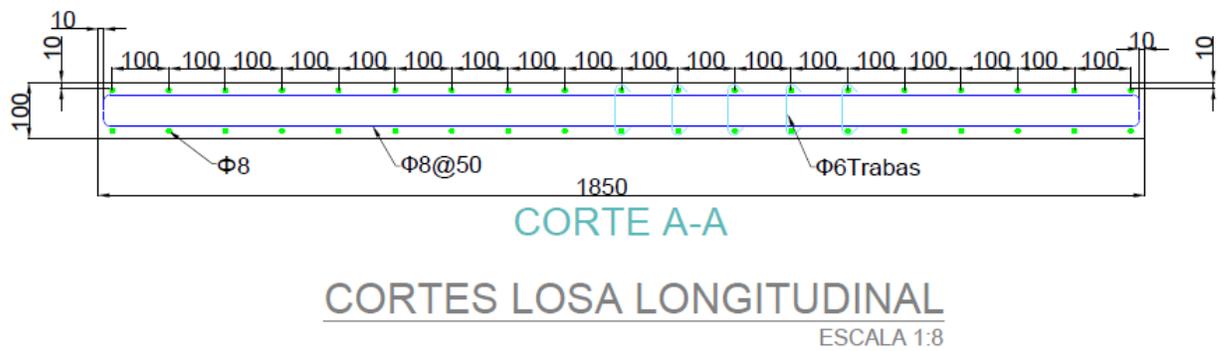
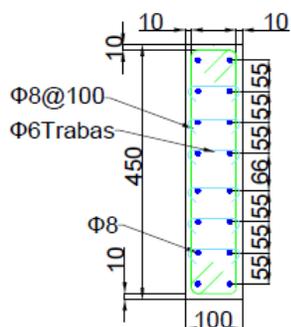


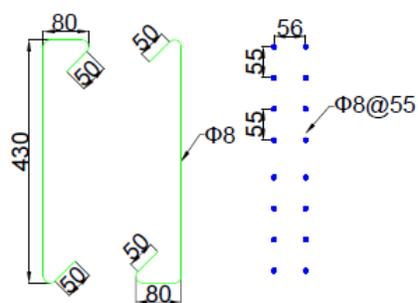
Figura 3.6: Vista Lateral de Armadura



CORTE B-B

CORTES LOSA TRANSVERSAL

ESCALA 1:8



DETALLE LOSA TRANSVERSAL

ESCALA 1:8

Figura 3.7: Vista Lateral de Armadura

Tabla 3.4: Resumen de Armadura y Cuantías de la Probeta

Elemento	Refuerzo	Armadura	Cuantía [%]
Losas	Transversal	$\phi 8@100$	1,01
	Longitudinal	$\phi 8@55$	1,83
MR1	Borde	$4\phi 16$	3,97
	Confinamiento	$\phi 6@70$	0,54
	Central Vertical	$\phi 8@200$	0,32
	Central Horizontal	$\phi 8@200$	0,34
MR2	Borde	$4\phi 12$	2,32
	Confinamiento	$\phi 6@100$	0,38
	Central Vertical	$4\phi 8$	0,71
	Central Horizontal	$\phi 8@100$	0,67

Capítulo 4

Trabajo y Montaje Experimental

4.0.1. Construcción y Traslado de la Probeta

Para la construcción del muro, inicialmente se confeccionó la armadura en dependencias del Laboratorio de Incendios, IDIEM Cerrillos.

Luego de finalizar la confección de la armadura, ésta fue trasladada al Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad, donde fue instalada en las posiciones de ensayo.

A continuación se presentan algunas fotografías del proceso constructivo de la armadura:



Figura 4.1: Proceso Inicial de Construcción de Armadura



Figura 4.2: Armadura de la Probeta Finalizada

Esta labor fue realizada con ayuda de un camión pluma, previo al proceso de hormigonado de la probeta, pues dada a las limitaciones asociadas a la conservación de las propiedades mecánicas de la probeta, se optó por realizar el proceso de moldaje y hormigonado en el mismo sitio donde sería ensayada la probeta..

Una vez instalados los muros en el laboratorio, se iniciaron las labores relacionadas a la limpieza de barras de la armadura, confección de moldaje y acomodamiento de los tubos para el paso de las barras requeridas para el sistema de carga axial, el cual será explicado en el siguiente apartado.



(a) Arribo de la Probeta a dependencias del Laboratorio de Estructuras, Idiem.



(b) Instalación y traslado de la probeta al interior del laboratorio

Figura 4.3: Traslado de la Probeta a la Facultad

Para la confección del moldaje, se dispuso de forma vertical el muro, misma posición utilizada para el hormigonado de este. Dada a la complejidad de esta labor, se utilizó un vibrador post vertido del hormigón, con el objetivo de evitar la formación de nidos y reducir la cantidad de reparaciones futuras en el muro.

El proceso de hormigonado fue realizado en un intervalo total de **2[horas]** aproximadamente por la empresa **MELÓN**. El hormigón fue vertido por secciones en el muro (pedestal, muro y losas, respectivamente) con ayuda de una bomba, la cual facilito el vertido del hormigón desde la parte superior de la probeta.

Dicha labor fue realizada con precaución, para evitar generar una presión hidrostática excesiva en los moldes que los hiciera perder su capacidad para retener el hormigón en su interior.



(a) Camión de Bombeo del Hormigón



(b) Instalación de Tuberías de Bombeo

Figura 4.4: Bombeo del Hormigón

Adicionalmente, para caracterizar la resistencia del hormigón utilizado en el muro, se hormigonaron 24 probetas cilíndricas, las cuales tienen un diámetro de 15[cm] y una altura de 30[cm] de altura, procurando que estas cumplan con la relación 2/1 en su altura y diámetro.



Figura 4.5: Preparación de Moldes Para Confección de Probetas Cilíndricas

Estas probetas son apisonadas de acuerdo con lo establecido en la norma NCh 1017of.2009 (Confección en Obra y Curado de Probetas para Ensayos de Compresión, Tracción Por Flexión y Por Hendimiento) y curadas en el mismo sitio en donde se ubica el muro, con la finalidad de dar representatividad a las muestras.

Posterior al proceso de hormigonado y retiro de moldajes, se realizaron labores de reparación en la probeta, en donde se observaron nidos en los bordes de cada muro, además de la losas.El detalle de este procedimiento será adjunto en anexos E.

4.0.2. Caracterización de Materiales

Para llevar un correcto seguimiento de la calidad de los materiales y conocer sus propiedades, se realizaron ensayos en el hormigón y acero, respectivamente.

A continuación se presentarán con mayor detalle los ensayos realizados a los diferentes materiales y los resultados obtenidos:

4.0.2.1. Acero

Para el ensayo a tracción realizado en las barras en los diferentes diámetros utilizados en el refuerzo de la probeta ($\phi 6, 8, 10, 12$ y $\phi 16$). Para ello, se utilizó la máquina servohidráulica universal INSTRON-modelo 600LX con capacidad de 300[kN] a tracción y 600[kN] a compresión.

Esta máquina se encuentra ubicada en dependencias del laboratorio del Departamento

de Ingeniería Civil de la facultad. La ejecución de los ensayos se realizó por control de desplazamientos.

Las barras de acero corrugadas utilizadas en la probeta fueron adquiridas en la compañía de aceros CAP, el cual es de manufactura nacional.

Este corresponde específicamente a un acero de Grado A630-420H según la NCh204.

4.0.2.1.1. Ensayo a tracción

Para caracterizar las propiedades mecánicas del acero, se realizaron ensayos a tracción a las distintas barras en sus diferentes diámetros ($\phi 6$, 8, 10, 12 y $\phi 16$).

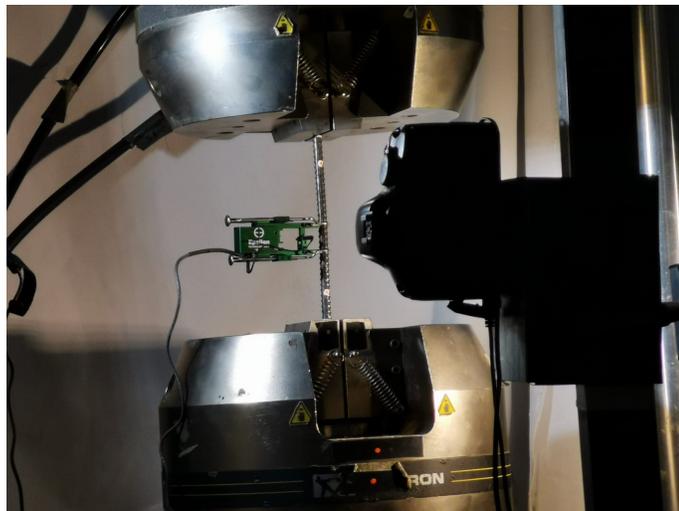
Cabe mencionar que no se realizaron ensayos para las barras de $\phi 18$, ya que solo se ensayaron las barras utilizadas principalmente en la armadura del muro, excluyendo las barras utilizadas como refuerzo del pedestal.

Para realizar el ensayo, se utilizó una tasa de deformación de 5[mm/mm] sobre las probetas. Las barras utilizadas cuenta con una longitud de 200[mm], las cuales fueron extraídas de los retazos de acero sobrante en la faena de la construcción de la armadura, facilitados por los maestros que llevaron a cabo esta labor.

Para las lecturas de desplazamiento se utilizaron las mediciones entregadas por la máquina universal y por el extensómetro **Epsilon-modelo 3542** y fueron registradas por los computadores disponibles en el Laboratorio de Dinámica y Estructuras de la facultad, los cuales operan de forma separada cada instrumento (Máquina Universal y Extensómetro).



(a) Vista de Elevación Norte-Sur



(b) Vista de Elevación Este-Oeste

Figura 4.6: Deformación del Edificio y Deformaciones Normales de Fisuración del Hormigón [16]

Se utilizaron ambos instrumentos, dado que al momento de ensayar las probetas de acero a tracción, estas se deslizan internamente en las mordazas de la máquina universal por cuestiones de acomodamiento, por lo que se utiliza un extensómetro para medir en el rango lineal

de deformación de la probeta (para obtener E_s).

El extensómetro luego fue retirado de la probeta, dado a que este no se encuentra diseñado para resistir la eyección ejercida por la máquina hasta la falla de la probeta.

El montaje experimental utilizado se puede observar a continuación:

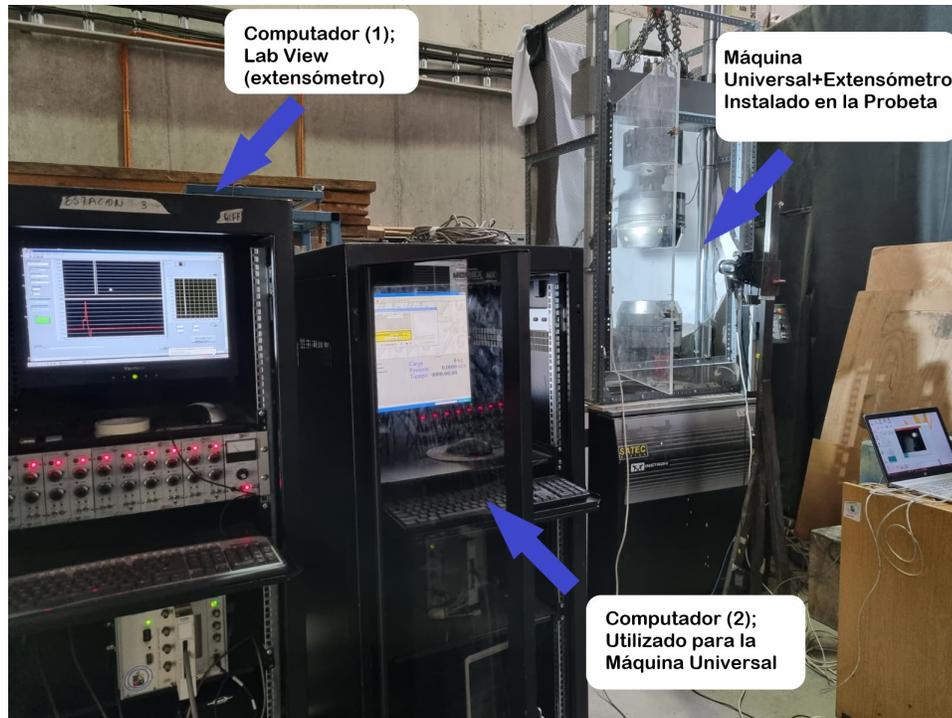


Figura 4.7: Vista Lateral de Armadura

En la figura anterior 4.7 se puede observar el **computador (1)**, el cual es utilizado para registrar los datos entregados por el extensómetro a través del software Lab View.

El **computador (2)** se encarga de controlar y registrar los datos de la máquina universal a través del software Partner.

A través de este equipo se realiza la programación del ensayo en la Máquina Universal, ingresando la tasa de deformación deseada y los datos de la probeta a ensayar.

Analizando las curvas obtenidas (ver Anexo D) para cada diámetro, se puede notar la diferencia de pendiente obtenida en el rango elástico en la máquina universal y extensómetro.

En esta última curva, podemos notar que la pendiente entregada por el extensómetro es mayor a la obtenida en la máquina universal, lo cual se debe principalmente a que, al momento de la ejecución del ensayo, las barras deslizan internamente en la mordaza de la máquina universal por efecto del acomodamiento, afectando a la lectura en la parte inicial del ensayo.

Se realizaron algunas consideraciones para la confección de los gráficos, en donde se eliminó la caída de tensión debido al retiro del extensómetro, luego de superar la zona lineal del ensayo.

Por otra parte, analizando el comportamiento de los gráficos, se puede notar que en las barras $\phi 6$, $\phi 8$ y $\phi 12$ no se observa zona elástico-plástica o fluencia marcada, dado que la procedencia de estas barras es de rollos, lo cual se puede corroborar en los catálogos de la empresa CAP para sus diferentes diámetros.

Los resultados obtenidos para cada barra se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Resultados Obtenidos del Ensayo a Tracción del Acero

Diámetro	E [Gpa]	f_y [MPa]	f_u [MPa]	f_u/f_y [-]	ϵ_y [%]	ϵ_u [%]	ϵ_u/ϵ_y [-]
$\phi 6$	230.5	471	625	1.33	0.20	15.67	82
$\phi 8$	204.2	491	815	1.66	0.23	9.07	36
$\phi 10$	201,0	466	736	1.58	0.24	15.02	63
$\phi 12$	194.3	489	750	1.54	0.26	12.33	47
$\phi 16$	195.8	472	697	1.47	0.27	21.57	81

4.0.2.2. Hormigón

El proveedor del hormigón utilizado en la probeta y en las muestras cilíndricas fue la empresa Melón. Este material corresponde a un hormigón H25, con resistencia nominal de 25 [MPa], con un tamaño de árido máximo de 13 [mm].

Como medida de control, se realizó ejecución del ensayo de asentamiento o Cono de Abrams, de acuerdo con lo estipulado en la norma NCh 1019.Of2009 (Hormigón-Determinación de la Docilidad-Método del Asentamiento del Cono de Abrams).

Se tomaron muestra de hormigón directamente del camión, en el rango de descarga de material ubicado entre 10 % y 90 % aprox.

De acuerdo a la guía de despacho, el hormigón contaba con un cono 14 [cm], el cual fue verificado a través de la ejecución del ensayo de asentamiento, obteniendo un cono 16[cm]. Esta diferencia se encuentra contemplada como un margen de error aceptable, de acuerdo a los establecido por la norma NCh 1019.Of2009 [21].

A continuación se presenta la ejecución del ensayo:



(a) Disposición de Elementos para el Ensayo



(b) Vertido y Apisonamiento de la Primera Capa de Hormigón



(c) Vertido y Apisonamiento de la Tercera Capa de Hormigón

Figura 4.8: Ensayo de Asentamiento de Hormigón o Cono de Abrams

Luego de la ejecución del ensayo de asentamiento, se procedió a extraer hormigón directamente del camión para la confección de las probetas cilíndricas. Lo anterior se realiza considerando las disposiciones normativas presentadas en la norma Nch 1017-Of2009 [22].

En la siguientes figuras se presenta parte del procedimiento realizado para la confección de las probetas cilíndricas:



(a) Extracción de Muestra Desde el Camión



(b) Probetas Rellenadas y Selladas

Figura 4.9: Confección de Probetas Cilíndricas

La ejecución de los ensayos a compresión de las probetas fue realizada a los 7, 14, 21 días y el día del ensayo del muro. A continuación se presentarán más detalles sobre el ensayo.

4.0.2.3. Ensayo a Compresión

Para la ejecución del ensayo a compresión, se utilizaron las muestras recogidas desde el camión del hormigón, las que fueron ensayadas en los periodos indicados previamente.

Las dimensiones promedio de las probetas fueron de 10.5[cm] de diámetro y 21 [cm] de altura.



Figura 4.10: Probetas Cilíndricas Previo a Ensayo [7 Días].

El ensayo fue realizado en la misma máquina universal utilizada para los ensayos de las barras de acero en tracción. Se considero una tasa de deformación del 0.3 [mm/min].

La carga se obtiene directamente de la máquina universal, en particular de la celda instalada en esta. La deformación de la probeta es obtenida a través de la ponderación de 2 LVDT's, los cuales son fijados a 2 anillos fijados y ubicados a una distancia 4 [cm] de cada extremo de la probeta.



Figura 4.11: Fijación de LVDT's Para Medición de Deformaciones a Compresión

A continuación se presenta un resumen de las propiedades obtenidas a través de los ensayos:

Tabla 4.2: Resistencias Obtenidas en Ensayo a Compresión de las Probetas de Hormigón.

Tiempo [Días]	f'_c1 [MPa]	f'_c2 [MPa]	f'_c3 [MPa]	f'_c4 [MPa]
7	27.8	27.2	28.8	23.7
14	33.6	31.8	31.7	31.9
28	28.5	32.6	31.4	32.5
Test Day	46.2	37.1	36.1	33.4

Tabla 4.3: Resistencias Promedio Obtenidas en Ensayo a Compresión.

Tiempo [Días]	f'_c [MPa]
7	26.9
14	32.3
28	31.2
Test Day	38,2

4.0.3. Montaje Experimental

4.0.3.1. Laboratorio de Estructuras-Descripción General

Para comprender las labores realizadas en el laboratorio de estructuras, en el presente apartado se describirán la serie de elementos utilizados para el levantamiento y manipulación de piezas, así como el espacio físico utilizado para llevar a cabo la ejecución del ensayo.

En la siguiente figura 4.12 se presenta el plano en planta del laboratorio de Estructuras, ubicado en dependencias del IDIEM, ubicado al interior de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, de la Universidad de Chile. También se destaca la zona utilizada para la instalación de elementos y ejecución del ensayo:

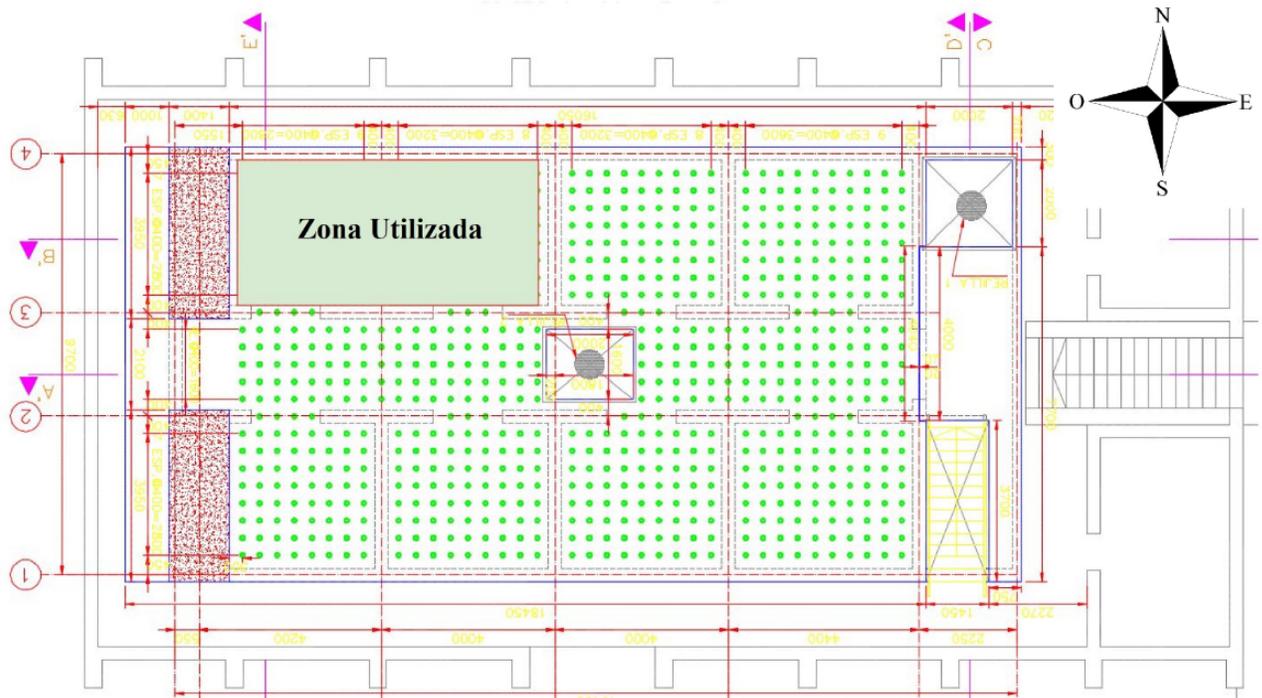


Figura 4.12: Plano General Laboratorio de Estructuras [17]

En las siguientes figuras (4.13 y 4.14) se presenta la zona utilizada para el ensayo del muro ($2.5[m^2]$ aprox.), en las cuales se puede observar el emplazamiento de la armadura y parte del moldaje confeccionado previo al proceso de hormigonado, además de otros elementos que será descritos a continuación:



Figura 4.13: Espacio Físico utilizado en el Laboratorio de Estructuras



Figura 4.14: Construcción parcial del moldaje en el sitio de ensayo.

El montaje experimental se llevó a cabo en el mismo lugar donde fue hormigonado el muro, con el objetivo de evitar daños en este. El laboratorio como tal, posee un muro y losa de reacción el cual dispone de agujeros ¹, a través de los cuales es posible anclar los elementos necesarios para la ejecución del ensayo.

El diseño del muro de reacción fue realizado para que este pueda resistir grandes cargas solicitantes, trabajando en el rango lineal a cargas de 1000[tonf] en su punto más alto, de acuerdo con lo especificado por Muñoz [23].

¹ Los agujeros cuentan con un espaciamiento de 40[cm], pero no es uniforme en la extensión de la losa

4.0.4. Montaje del Ensayo

En este apartado se describirá el esquema que se utilizó para la ejecución del ensayo, como también el protocolo usado para el montaje de los diferentes elementos necesarios para este fin.

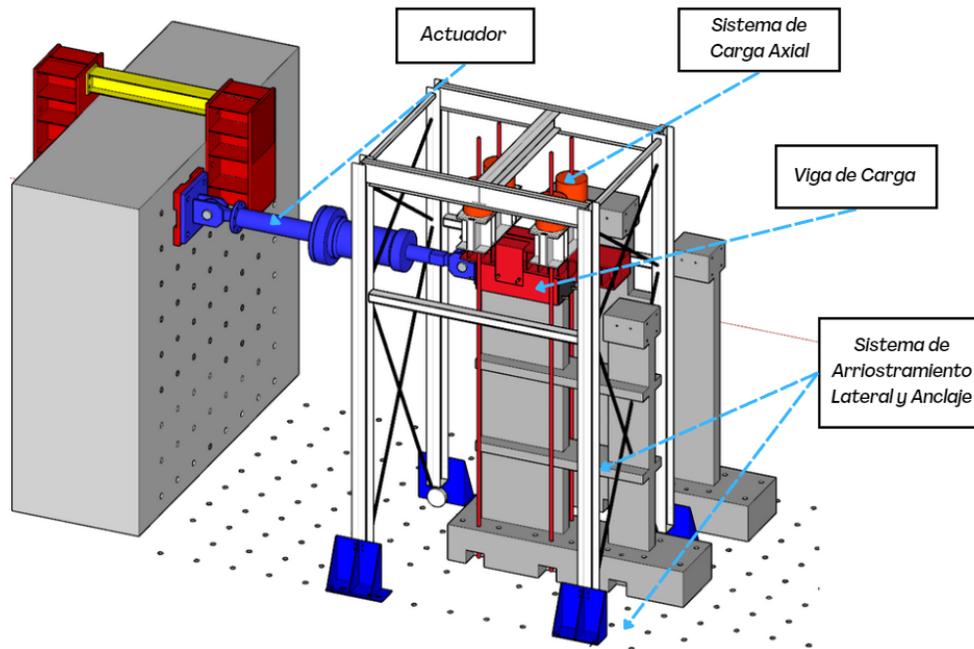


Figura 4.15: Modelo de Montaje Experimental Planificado

Al igual, se adjunta el montaje final logrado en el laboratorio, previo a la ejecución del ensayo:



Figura 4.16: Montaje Experimental Previo al Ensayo

4.0.4.1. Muro de Reacción

Como fue mencionado previamente, el laboratorio de estructuras cuenta con un muro de carga, el cual fue diseñado para trabajar en el rango elástico y para resistir grandes solicitaciones sin sufrir deformaciones.

El muro dispone de agujeros, los cuales son utilizados como mecanismo de anclaje de diversos elementos, como la placa metálica y la rótula utilizada para fijación del actuador. Lo anterior se puede observar en la siguiente figura:



Figura 4.17: Muro de Reacción

4.0.4.2. Sistema de Arriostamiento Lateral

El sistema se encuentra conformado por 4 columnas, construidas con perfiles de acero de sección transversal H, las cuales se encuentran unidas por puntales tubulares y arriostras metálicas.

La función de este elemento es mantener centrado el muro y resistir el pandeo fuera del plano, además de sostenerlo en caso de sufrir alguna falla.

Para la restricción lateral, se utilizan 4 barras ancladas en las vigas tubulares del marco de acero, las cuales se disponen en la zona de la viga de carga por el lado norte y sur del muro MR1.

De esta forma se restringe el movimiento fuera del plano del muro en caso de un colapso durante la ejecución del ensayo.



(a) Marco de Acero



(b) Disposición de Barras para Restricción Fuera del Plano

Figura 4.18: Marco de Acero y Sistema de Arriostramiento Lateral

Además, el marco permite dar soporte al sistema de carga axial, el cual una vez iniciado el ensayo, se mueve solidariamente con el muro.

Cabe señalar que el marco es anclado a la losa de reacción mediante cuñas, con lo cual el sistema es empotrado a la posición de ensayo.

4.0.4.3. Actuador-Carga Lateral

Este instrumento de grandes dimensiones se posiciona en una altura que coincide con el centro de la viga de transferencia de carga en el muro principal (MR1), el cual fue anclado al muro de reacción mediante el acoplamiento de una placa y 2 rótulas en sus extremos.

El anclaje de la rótula al muro de reacción se realiza con pernos helicoidales Dywidag® de diámetro 32[mm] de alta resistencia. Esto permite obtener un buen empotramiento, de tal forma de evitar la rotación y deslizamiento horizontal de la rótula. Dicha labor se finaliza fijando tuercas en ambos extremos del perno (atrás del muro y adelante de la placa de la rótula) con ayuda de una llave inglesa.

Su función es desplazar el muro de forma cíclica, hasta alcanzar un nivel de deriva determinado, de acuerdo con el criterio de ejecución del ensayo.

A su vez, el actuador es capaz de medir la carga necesaria para alcanzar un determinado nivel de deriva, la cual es capturada por una celda de carga **Interface, modelo 1200HC.1244**, con capacidad de 1200 [kN], la cual conforma el actuador (se ubica entre el émbolo del actuador y la rótula que da hacia el muro del ensayo).

El control de los desplazamientos se realiza mediante una botonera, conectada a una bomba hidráulica 4.20.

A través de este elemento, es posible regular el flujo de aceite dentro del actuador y comprimirlo/traccionarlo, con una precisión de décimas de milímetros, contando con una capacidad de empujes superior a 100[tonf].

Dado a lo anterior, el sistema bomba-actuador no permite medir y registrar desplazamientos como tal, por lo cual se utiliza un LVDT sobre este elemento, de tal forma de llevar control y registro de estos datos, los cuales se pueden observar continuamente en la interfaz de Lavbiew® al momento de la ejecución del ensayo.

Por último, la unión de la viga de transferencia con el actuador se realiza con ayuda de una rótula más pequeña, que se fijó con pernos helicoidales Dywidag® de diámetro 15[mm]. En este sentido, se utiliza la misma metodología previamente descrita para la fijación de la rótula que conecta el muro de reacción con el actuador.

Cabe señalar esta metodología para fijar ambas rótulas se realiza dada a las dificultades que representa postensar estos pernos/barras a dichas alturas, lo cual no afecta la instalación de actuador para efectos de la ejecución del ensayo.



Figura 4.19: Actuador Utilizado en el Ensayo



Figura 4.20: Bomba Utilizada para Funcionamiento del Actuador [23]

El desplazamiento aplicado por el actuador, el cual cumple con los requisitos impuestos por la ACI374.1 [24], el cual busca una forma de estandarizar este tipo de ensayos con los experimentos realizados a nivel nacional e internacional.

Este protocolo consiste en desplazamientos cíclicos pseudo-estáticos que incluyen al menos 2 derivas de techo en el rango lineal del sistema a ensayar, con incrementos graduales de estos hasta llegar a la falla global de muro a ensayar. Estos desplazamiento se calculan en base a una altura de 2.8 [m] medida desde la base del muro hasta el punto medio de la viga de transferencia.

Para cada nivel de carga, se realizaron tres ciclos, tomando como punto neutro la posición inicial del pistón del actuador. Tomando en consideración el protocolo de carga utilizado por [17], los ciclos de desplazamiento se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.4: Desplazamientos Asociados por Derivas para el Ensayo

Deriva [%]	Desplazamiento [mm]
0.10 %	2.8
0.20 %	5.6
0.30 %	8.4
0.40 %	11.2
0.60 %	16.8
0.90 %	25.2
1.35 %	37.8
2.00 %	56
3.00 %	84
4.00 %	112

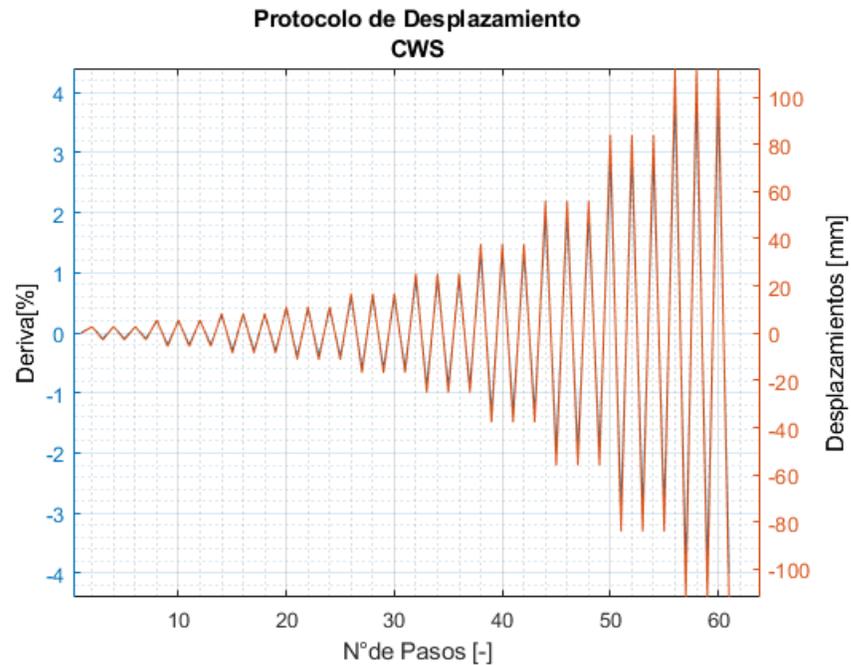


Figura 4.21: Protocolo de Desplazamiento

4.0.4.4. Celda de Carga

Una celda de carga es un instrumento, compuesto por un cilindro de acero, el cual tiene en su interior un conjunto de Galgas Extensiométricas o Strain Gages.

Este instrumento actúa como un transductor que convierte la fuerza en una salida eléctrica mensurable o medible.

Dado a que los gatos hidráulicos son controlados por presión, estos requieren ser regulados por fuerza para diversos usos (postensado de barras por ejemplo), por lo cual se utiliza este instrumento para dicho objetivo.



Figura 4.22: Gato Hidráulico Disponible en el Laboratorio.

4.0.4.5. Gato Hidráulico

Es un elemento utilizado para levantar cargas u objetos y que resistir grandes cargas. Este se encuentra conformado por un cilindro, el cual posee en su interior un embolo con una capacidad de 150[ton] a tracción y compresión.

Este elemento es utilizado tanto para el postensado de las barras en el pedestal del muro, y para conferir carga axial al muro (sistema de carga axial).



Figura 4.23: Gato Hidráulico Disponible en el Laboratorio.

4.0.4.6. Bomba Hidráulica

Con la finalidad de controlar la presión del fluido en el actuador, como en cada gato hidráulico, se utiliza una bomba hidráulica para regular la presión del aceite interno, para que este se traduzca en una extensión o compresión del embolo de gato hidráulico o el funcionamiento del actuador.

La operación de esta bomba tiene 2 modalidades: manual y automática, siendo la primera más utilizada dado a que se puede ajustar la lectura de la celda de carga como se requiera en el momento.

Lo anterior es útil principalmente para mover los émbolos de cada uno de los 4 gatos hidráulicos que son instalados en el sistema de carga axial a la mitad de su carrera, evitando inducir carga en el sistema de carga axial.

En el apartado del 'Postensado' se entregarán más detalles con respecto al funcionamiento del sistema.



Figura 4.24: Bomba Hidráulica Utilizada

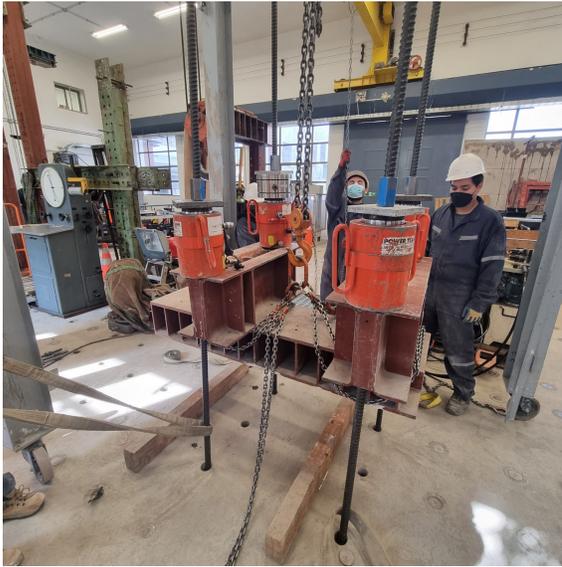
4.0.4.7. Sistema de Carga Axial

Este sistema consiste en el uso de un conjunto de perfiles de acero de sección H, dispuestos sobre la viga de carga sobre el muro MR1, con la cual es posible instalar las barras de acero Diwydag ($D=32[\text{mm}]$) a lo largo de la altura del muro.

Para lo anterior, se disponen de 4 gatos hidráulicos sobre los perfiles H, con los cuales se confiere la carga axial al muro a través de 4 barras de acero Diwydag ($D=32[\text{mm}]$).

La presión para brindar la carga axial se realiza con ayuda de la bomba hidráulica previamente mencionada.

Luego de instalar el sistema, se procede a comprimir el muro hasta que este alcance el 10% de su capacidad de compresión ($0.1A_g f'_c$), la cual es obtenida desde los ensayos de resistencia del hormigón.



(a) Configuración de Izaje del Sistema de Carga Axial



(b) Disposición Final del Sistema

Figura 4.25: Traslado y Montaje de Sistemas de Carga Axial

La carga axial utilizada fue estimada con la resistencia nominal del hormigón, considerando un H25, con un $f_c=25$ [MPa], obteniendo con ello una carga axial de $0,1A_g f'_c=37,91$ [tonf].

4.0.4.8. Postensado de Barras

Dada la relevancia que tiene empotrar el muro a un lugar fijo para la ejecución del ensayo para evitar rotación y deslizamiento del pedestal, se fija el muro a través del procedimiento de postensado de barras. Utilizando barras Dywidag ®de 32[mm] de diámetro, con las cuales se realizó anclaje del muro a la losa de reacción.

Lo anterior se realiza con un gato hidráulico, una celda de carga, una silla acopladora, placas metálicas donde donde se posiciona la silla y la bomba hidráulica (ver figura 4.26.)

Dada a la particularidad del muro, en especial por la presencia de la losa en el primer piso, no se contaba con el espacio suficiente para realizar el postensado convencional, por lo cual se implementó un sistema para ejecutar esta actividad por encima y abajo del pedestal, el cual se detalla a continuación.



Figura 4.26: Elementos Utilizados Para Postensado, sin uso de placas metálicas en la Base de la Silla Acopladora (Puntos Extremos del Pedestal)

4.0.4.8.1. Postensado del Pedestal- Puntos Extremos

Esta labor se realizó por la parte superior del pedestal, debido a que se disponía del espacio suficiente para el montaje de todos los elementos necesarios para postensado de cada una de las barras en su respectivo agujero.

Lo anterior se realiza con ayuda de tuercas hexagonales Dywidag ®de alta resistencia, del mismo diámetro de las barras ($D=32$ [mm]). La carga aplicada en cada barra es de 15 toneladas, que se aplicó con ayuda de la bomba hidráulica. Se procura no exceder la resistencia de fluencia de la barra, dado que se debe considerar la carga aplicada durante la ejecución del ensayo. Luego de alcanzar la carga deseada para cada barra, se finaliza el proceso apretando la tuerca posicionada en la parte inferior de la silla de acople con ayuda de una llave inglesa.

Cabe mencionar que la ejecución de esta labor debe ser realizada de una forma específica, posicionando la silla de acoplamiento en diagonal sobre placas metálicas (ver figura 4.27.c) para evitar los daños mostrados en las figuras (4.27.a y 4.27.b).

A continuación se presenta la situación descrita previamente y una configuración recomendada para llevar a cabo esta labor, sin tener que incurrir en reparaciones en el pedestal:



(a) Daños Sufridos por el Pedestal al Momento del Postensado (1)



(b) Daños Sufridos por el Pedestal al Momento del Postensado (2)



(c) Forma Recomendada Para Postensar Barras en los Extremos del Pedestal

Figura 4.27: Postensado de Barras-Puntos Extremos del Pedestal

4.0.4.8.2. Postensado del Pedestal- Puntos Interiores del Pedestal

Como se indicó previamente, la zona central del muro, en donde se encuentra las losas de acoplamiento, estas limitan el espacio vertical disponible para el posicionamiento de todos los elementos requeridos para postensar cada barra. Por esta razón, se decidió implementar un sistema para lograr postensar cada barra, pero por la parte inferior de la losa de reacción.

Para lo cual, se utilizaron 2 teclas manuales, los cuales fueron apoyados por dos eslingas sintéticas.

Estás últimas se apoyaron en 2 puntos fijos, como lo son 2 barras posicionadas en la parte superior de la losa, de tal forma de contar con puntos de apoyos resistentes para el izaje de los elementos necesarios para esta labor.

Una vez posicionados todos los elementos, se procedió a postensar cada barra y acomodando los puntos de apoyo de acuerdo a la posición de la barra que se requería para empotrar el muro a la losa de reacción.



(a) Daños Sufridos por el Pedestal al Momento del Postensado (1)



(b) Daños Sufridos por el Pedestal al Momento del Postensado (2)



(c) Forma Recomendada Para Postensar Barras en los Extremos del Pedestal

Figura 4.28: Postensado de Barras-Puntos Extremos del Pedestal

4.0.5. Instrumentación de la Probeta

La instrumentación en estructuras es una tendencia ampliamente utilizada en la actualidad, con la finalidad de observar su comportamiento ante solicitaciones de diversa naturaleza (sismo y viento, entre otros).

En particular, se utiliza la instrumentación para realizar investigación experimental, la cual se aplica a diferentes niveles, entre los cuales se encuentra el caracterizar la resistencia de un material ó conocer el comportamiento de un elemento estructural, ya sea a nivel local o global.

En este sentido, podemos estimar la capacidad de un determinado elemento estructural ante cargas laterales, desplazamientos, ductilidad, entre otros.

A continuación se detallará la instrumentación utilizada para llevar a cabo el presente estudio, los cuales consiste principalmente en LVDT's e inclinómetros.

4.0.5.0.1. Transductor de Desplazamiento Lineal Variable (LVDT)

LVDT ó Transductor de Desplazamiento Lineal Variable es un dispositivo electromecánico utilizado para convertir un movimiento mecánico, como lo sería un desplazamiento lineal en una señal eléctrica. La finalidad de este dispositivo es realizar la conversión de una magnitud física a una magnitud eléctrica, en este caso en voltaje.

Físicamente, se trata de un instrumento que se encuentra conformado por un cilindro metálico hueco en el que un eje de menor diámetro (Núcleo o Core) se mueve longitudinalmente al interior de este. A medida que la posición del núcleo varia al interior del LVDT, este registra una variación de voltaje.

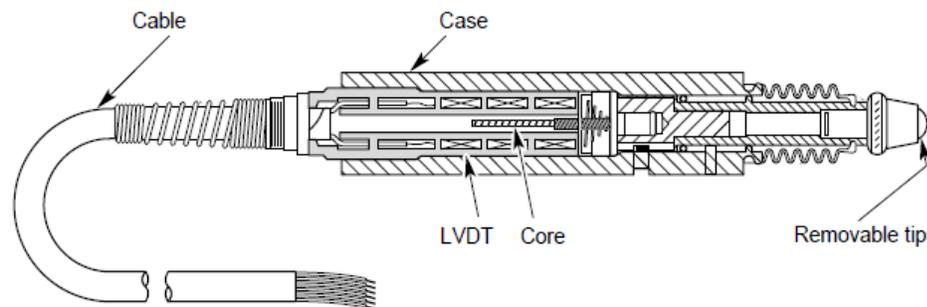


Figura 4.29: Esquema Referencial de LVDT-Schaevitz [25]

Para efectos del presente trabajo, se utilizaron LVDT's provenientes de 3 diferentes fabricantes; *Schaevitz* DC-SE, *Macrosensors* DC 750 y *Omega* LD620-25.

Los sensores *Macrosensors* cuentan con una salida bipolar, es decir poseen excitación eléctrica positiva y negativa. En cambio, los sensores *Schaevitz* DC-SE y *Omega* LD 620-25 son sensores unipolares que solo poseen excitación eléctrica positiva.

A continuación se presentan un esquema de los sensores utilizados:



Figura 4.30: Esquema General de LVDT's Utilizados [25]

La disponibilidad de estos sensores en el laboratorio era limitada, por lo que se elaboró un plan de instrumentación orientada a optimizar los recursos disponibles y levantar la mayor cantidad de información posible del ensayo.

Dado que el muro no fue analizado exclusivamente a través de la instrumentación previamente mencionada, se realizó en paralelo un estudio de fotogrametría del muro, por lo cual se aisló la cara sur del muro para la instalación de los LVDT's. Lo anterior se realiza con la finalidad de no intervenir con el campo de visión de las cámaras que se utilizan para la fotogrametría.

Para conocer el comportamiento local de los muros a distintos niveles de deriva, se dispuso de sensores de desplazamientos en los bordes para medir el efecto de la flexión de los muros, tanto a compresión como a tracción, como así también diagonales para medir la desangulación del muro ante distintos niveles de solicitaciones.

La cantidad de sensores disponible de sensores, como su disposición se presentan a continuación:

Tabla 4.5: Sensores Instalados en el Muro

Tipo de Sensor	Cantidad
LVDT	48
Inclinómetros	4

La disposición de los instrumentos se divide en dos partes; cara interna y externa. A continuación, se presenta la disposición de los instrumentos en la cara interna del muro, correspondiente a los sensores de flexión y corte, respectivamente:

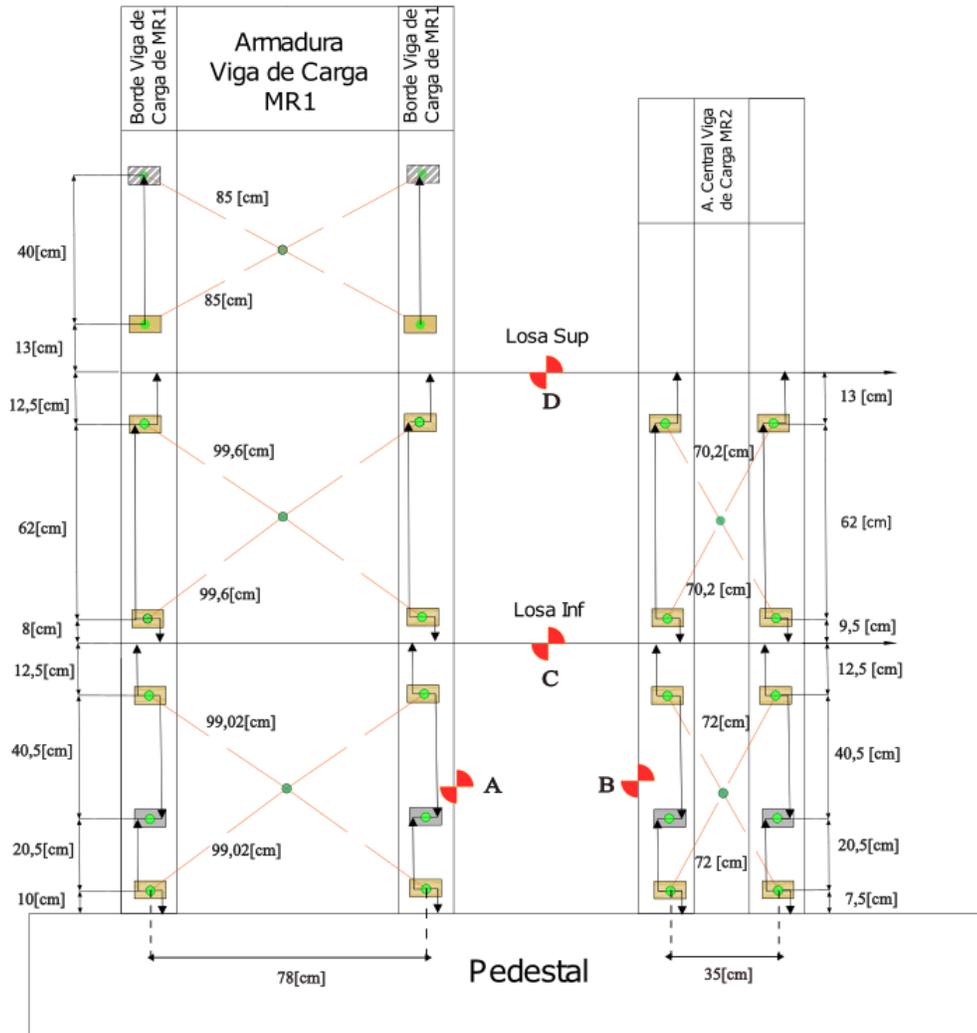


Figura 4.31: Esquema de Disposición de LVDT'S en las Caras Internas del Muro



Figura 4.32: Nomenclatura Utilizada



Figura 4.33: Instrumentos Instalados en el Muro.

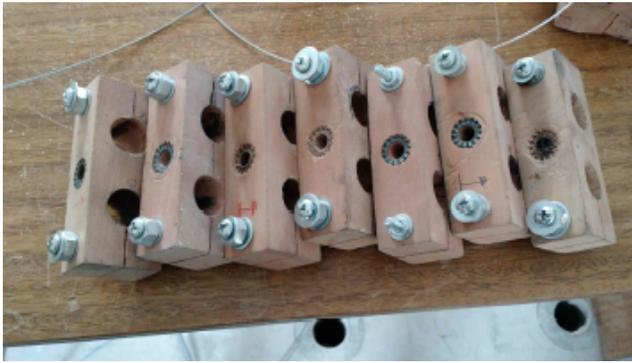
La distribución de LVDT's, de acuerdo a las variables a medir en la cara interna, como sensores externos se detalla a continuación:

Tabla 4.6: Cantidad de Sensores por Variable a Medir

Variable a Medir	Cantidad
Rotación Pedestal	4
Desplazamiento Horizontal- Pedestal	1
Desplazamiento de Techo (Deriva)	3
Flexión (Bordes)	30
Corte (Diagonales)	10
Total	48

Como se puede observar, gran parte de los sensores se ubica en el primer y segundo piso de ambos muros. En este sentido, se dispone de mayor cantidad de sensores en el primer piso, debido a que en este nivel se concentra el daño y el comportamiento inelástico del muro.

Estos sensores fueron montados en cajas de madera que fueron fijadas a través de hilos sin fin dispuestos previamente en la fase de moldaje del muro, con lo cual se encuentran unidas al muro en todo el espesor de este.



(a) Cajas para LVDT's de Flexión



(b) Cajas para LVDT's de Corte y Pedestal (Rotación)

Figura 4.34: Cajas de Instalación de LVDT's [26]

Cabe mencionar que las varillas de los sensores fueron ubicadas al centro de su longitud carrera (cero de medición), de tal forma que al momento de analizar los datos obtenidos del ensayo se simplifique el análisis.

Además, es necesario realizar una distinción entre las cajas utilizadas para disponer los lvdt's de flexión, corte y pedestal, dado que los 2 primeros se disponen en los hilos sin fin dispuestos en las caras interiores del muro y, en cambio las cajas utilizadas para posicionar los sensores del pedestal se adhieren directamente a este elemento, por lo que requieren de ser posicionado en una superficie lisa, sin desniveles, como lo son las pletinas de aluminio que se pueden observar en la figura 4.38.b

4.0.5.1. Instrumentación Externa- Corrección de Datos

Para conocer el comportamiento global de la estructura, en particular de cada muro a diferentes niveles de deriva, se dispuso de sensores externos con los cuales podemos conocer como se comporta la estructura.

Adicionalmente, debemos considerar que la estructura dadas sus dimensiones, esta tenderá a deslizar y/o rotar, lo cual aporta desplazamientos de techo que no son reales. Por esta razón se debe realizar una corrección, de tal forma de obtener el desplazamiento de techo efectivo de la estructura.

Esta corrección consiste en eliminar el aporte en el desplazamiento de techo debido al desplazamiento horizontal y/o rotación del pedestal del muro.

La expresión utilizada para dicha corrección, realizada previamente por Díaz [17] es la siguiente:

$$\Delta_{Corrección} = \Delta_{superior} - \Delta_{inferior} - \frac{(\Delta_{Rotación(Derecha)} - \Delta_{Rotación(Izquierda)}) \cdot \Delta H}{\Delta L} \quad (4.1)$$

Para realizar uso de esta expresión 4.1, es necesario utilizar la misma disposición de LVDT's externos realizada por Díaz [17], tal como se presenta a continuación;

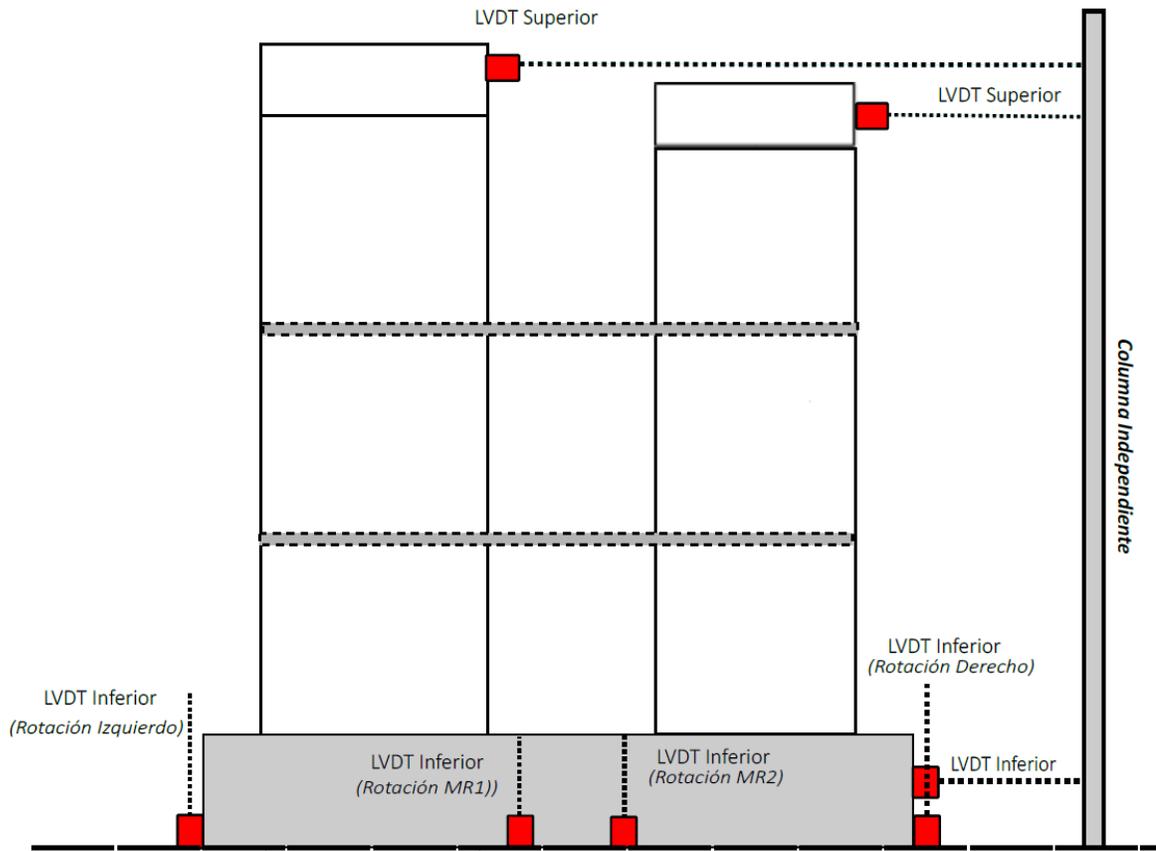


Figura 4.35: Esquema de Montaje de Sensores Externos Para Corrección de los Datos Obtenidos

El detalle de los sensores se adjunta como Anexo (E.1) , en donde se especifica el fabricante, N° de serie, constante de calibración y ubicación en el muro.

4.0.5.1.1. Calibración de los Instrumentos

La calibración de sensores consiste en levantar la constante por la cual debe ser multiplicada la lectura de un LVDT para obtener el desplazamiento registrado. Dicha constante varía con la información entregada por el fabricante con el transcurso de la vida útil del instrumento, lo cual se puede deber a diversos factores (uso constante de los instrumentos, manipulación de pines de conexión, arreglos eléctricos e interacción con diversos instrumentos, entre otros).

Por este motivo es importante esta calibración, ya que la información que entrega el fabricante de cada tipo de sensor sufre cambios y este número debe ser cuantificado previo al uso de los sensores, de tal forma de asegurar un correcto escalamiento de las lecturas de cada sensor instalado en el sistema de muros a estudiar.

La obtención de estos valores se realiza tomando cada sensor, fijando este sobre una regla y medir 4 desplazamientos con sus respectivas lecturas de voltaje, las cuales son obtenidas a través de la interfaz de LabView.

Posteriormente, se anotan dichos desplazamientos con sus respectivas lecturas de voltaje en una planilla Excel, para finalmente obtener la pendiente de estos datos a través de una regresión lineal de las lecturas, la cual corresponde a la constante de calibración de cada LVDT.

4.0.5.1.2. Inclinómetros

Adicionalmente, se agregaron 4 inclinómetros como parte de la instrumentación desplegada en los muros, los cuales fueron dispuestos en las posiciones indicadas en la figura ??



Figura 4.36: Inclinómetros utilizados. Figura Referencial[27].

La mitad de los inclinómetros fueron dispuestos en el primer piso de ambos muros, específicamente en los cantos interiores para medir desplazamiento pandeo fuera del plano.

Los restantes fueron dispuestos en la zona central de ambos muros, en las losas del primer y segundo piso, respectivamente. La finalidad de estos últimos sensores fue medir la rotación de la losa y el posible pandeo fuera del plano de cada muro en el primer piso.

El detalle de los instrumentos se presentará en la siguiente tabla:

Tabla 4.7: Detalle Inclinómetros Utilizados

Número	Tipo	Modelo	Nº de Serie	Rango (+/-)[°]	Calibración [°/V]	Variable a Medir
1	Schaevitz	AccuStar	D2390168	60	30	Canto Interior-Muro MR1
2			D2390176			Canto Interior-Muro MR2
3			D2390177			Losa 1º -Piso
4			D2390171			Losa-2ºPiso

Cabe señalar que estos instrumentos fueron montados sobre placas de madera con superficie uniforme, las cuales posteriormente fueron adheridas a los muros y losas con epóxico Araldite de secado rápido.

La disposición en los muros y losas previo al ensayo se presenta a continuación:

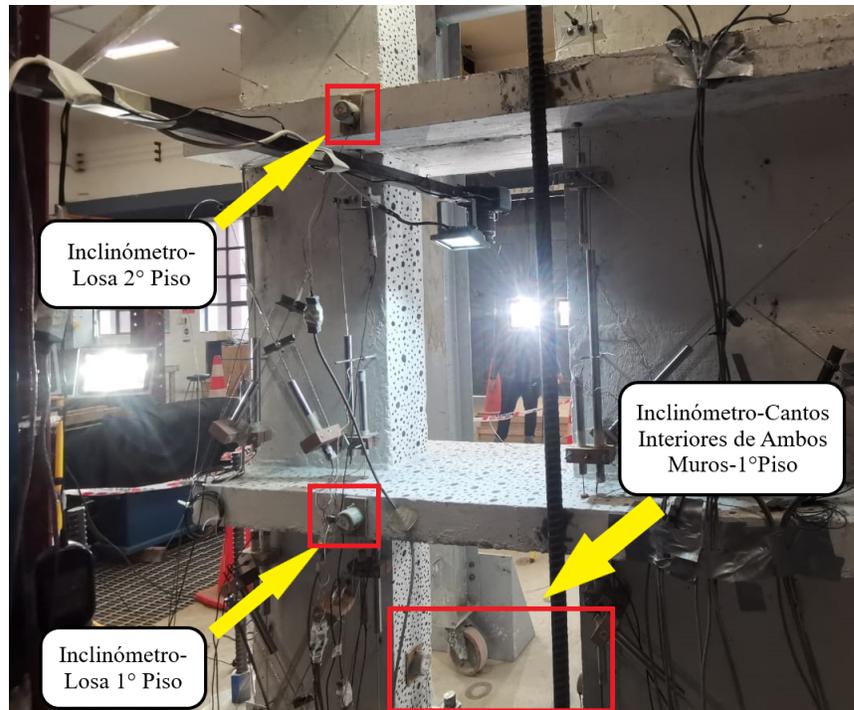


Figura 4.37: Inclinómetros Instalados en el Sistema de Muros a Estudiar

4.0.5.1.3. Sistema de Adquisición de Datos

Considerando los detalles entregados previamente en cuanto al plan de instrumentación, se puede notar la elevada cantidad de instrumentos que requieren ser conectados y sincronizados para levantar la información durante la ejecución del ensayo.

Por esta razón, se requiere utilizar un sistema que sea capaz de tomar las señales analógicas provenientes desde las mediciones registradas por los instrumentos y transformar estas en datos que puedan ser manejados desde un sistema digital.

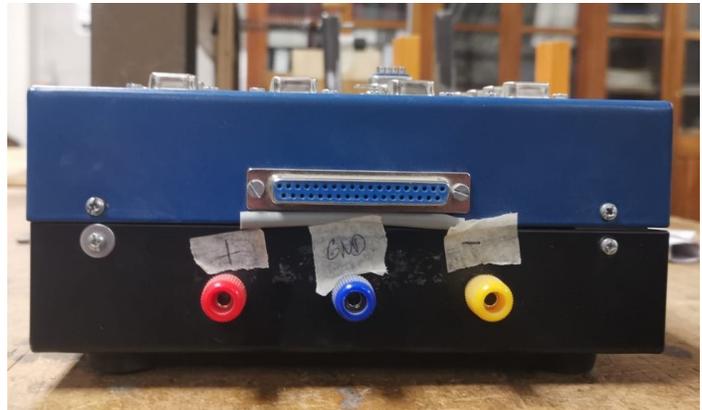
Para esto, en primera instancia se requiere disponer de una gran cantidad de conexiones, específicamente 54 para conectar todos los sensores, procurando proteger de interferencias y deriva eléctrica de cada instrumento.

Para este propósito, en el laboratorio de estructuras se dispone de dos cajas de conexiones: La primera cuenta con una capacidad de 32 entradas DB9 y salida DB37. Esta última salida es la que lleva las señales de los sensores a un módulo de adquisición de datos.

Además, se dispone de 3 entradas de voltaje (positivo, negativo y neutro) para conectar una fuente de poder, encargada de energizar cada instrumento.



(a) Cajas para LVDT's de Flexión



(b) Cajas para LVDT's de Corte y Pedestal (Rotación)

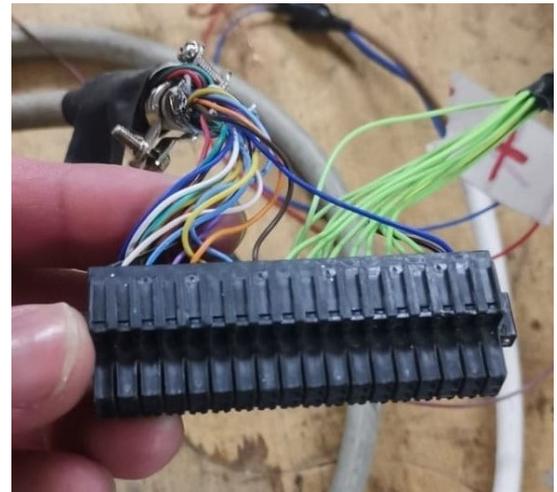
Figura 4.38: Cajas de Instalación de LVDT's [26]

La segunda caja cuenta con 16 entradas DB9, pero solo se pueden conectar sensores unipolares.

Considerando la cantidad de conexiones requeridas para llevar a cabo el plan de instrumentación en la probeta, se decidió construir una tercera caja con 12 entradas DB9, en la cual se puede instalar LVDT's unipolares e inclinómetros.



(a) Caja Auxiliar con 12 Conexiones DB9



(b) Acomodamiento de Cables de la 2º y 3º caja en el mismo puerto DB37

Figura 4.39: Cajas de Instalación de LVDT's [26]

La finalidad de la construcción de esta última caja era generar un alargador de la caja de 16 conexiones DB9, de tal forma de tener la cantidad de conexiones requeridas para llevar a cabo el plan de instrumentación en su totalidad.

Cabe señalar que cada caja fue testeada conexión a conexión previo al montaje en el laboratorio, garantizando que cada puerto de conexión funcionara correctamente.

Considerando lo anterior, los equipos utilizados para el sistema de adquisición de datos se detallan a continuación:

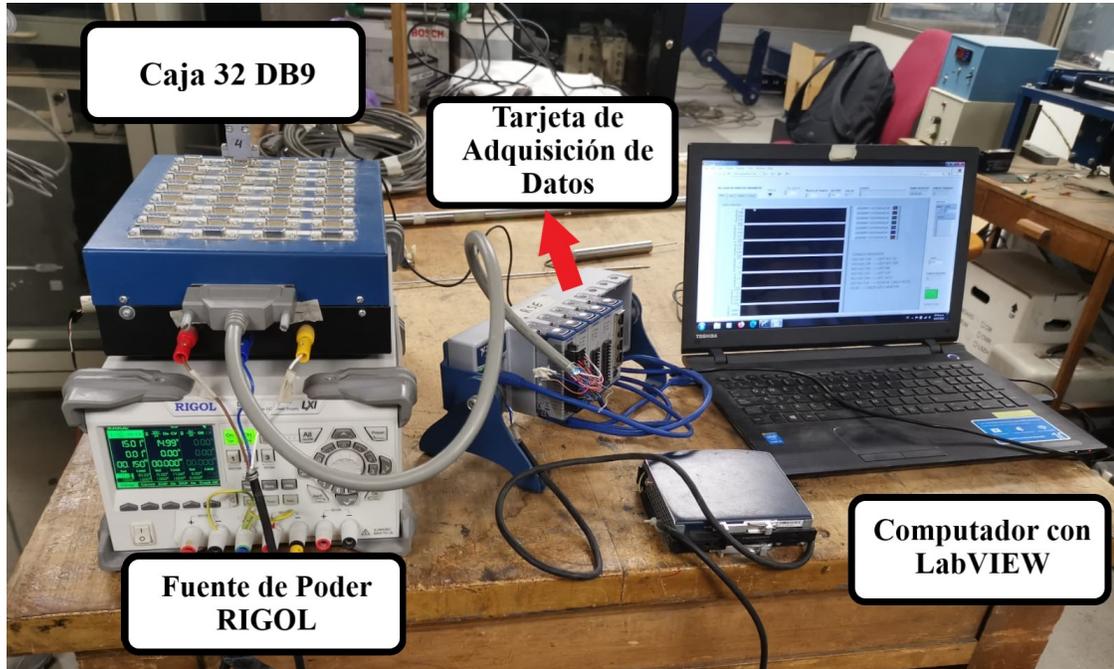


Figura 4.40: Equipos utilizados para la adquisición de datos

- **Cajas de Conexión y Cables:** Se utilizaron 3 cajas de conexiones, como se detalló previamente, para lo cual se utilizaron cables DB9 macho-hembra, de una extensión de 5-6 [m], con los cuales se conectó cada instrumento (exceptuando los cables de las celdas de carga).

Dada a las características de los sensores, en particular por la salida de voltaje, se privilegió la conexión de los LVDT's **Macrosensors**® en la caja de 32 conexiones DB9, dada la salida bipolar de estos instrumentos.

El resto de sensores fueron dispuestos en las cajas de 16 y 12 salidas DB9, dado a que estos no presentan la particularidad de los LVDT's **Macrosensors**®.

- **Fuente de Poder:** Se utilizó una fuente de voltaje marca RIGOL®(modelo DP832), con alimentación de $\pm 15[V]$ para cada las cajas de conexiones previamente mencionadas, energizando la totalidad de los sensores de medición (LVDT's e inclinómetros).
- **Computador con LabView:** Las señales levantadas por cada sensor sfueron procesadas y almacenadas en este equipo a través del software de adquisición y presentación de datos LabView ®, mediante la creación específica de un instrumento virtual para la ejecución de ensayos estáticos.

La particularidad de la creación del instrumento virtual es que permite visualizar en tiempo real las lecturas entregadas por la tarjeta de adquisición de datos, realizar seguimiento de las lecturas entregadas por cada sensor, implementar filtros para limpieza de las lecturas y almacenar estos datos en un archivo. La organización de estas lecturas se realiza por columnas ordenadas de acuerdo al número de conexión de cada sensor (Canal).

- **Tarjeta de Adquisición de Datos** Este se encuentra conformado por un Chasis adquisición de datos National Instruments®, modelo NI cDAQ-9188XT, en el cual permite la conexión de 8 módulos de lectura de datos.

Para efectos del presente trabajo, se utilizaron 2 módulos NI9205 para lectura de voltajes y otro módulo NI9235 para lectura de la celda de carga. Los módulos NI9205 fueron conectados a las cajas de conexiones señaladas previamente a través de una salida DB37.

La capacidad máxima de conexiones de cada módulo NI9205 es 32, pudiendo con ello conectar este número de sensores a dicho módulo.

El equipo de adquisición de datos es energizado a través de una fuente NIPS-15. Por otra parte, para llevar los datos al computador, se utiliza un conector RJ45 (Cable de Red).

4.1. Procedimiento de Ejecución del Ensayo

Para llevar a cabo la ejecución del ensayo, considerando todos los detalles previamente mencionados, a modo de resumen, se realizaron los siguientes pasos:

1. Posicionamiento de la Rótula en el Muro de Reacción. Esta debe ser posicionada de acuerdo con la disposición final de la probeta .

Adicionalmente, se debe cuidar que el actuador pueda operar en el rango requerido para la ejecución del ensayo, por lo que se posicionaron placas auxiliares debajo de este elemento, de tal forma de obtener este rango de operación deseado.

2. Posicionamiento de barras en el pedestal y postensado de estas.
3. Instalación de rótula en la viga de carga en MR1.
4. Instalación de placas laterales en la viga de carga.
5. Instalación de sistema de carga axial.
6. Posicionamiento y anclaje del marco de acero.
7. Ajuste de sistema de restricción lateral.
8. Fijación del sistema de carga axial al marco de acero.
9. Fase de pruebas de instrumentación y calibración.
10. Instalación de equipos de adquisición de datos (computador, fuente de poder, cajas de conexiones, cables DB9).
11. Instalación de Instrumentación, procurando dejar los lvdt's en el centro de su carrera de lectura.

Para el posicionamiento de los LVDT's externos (para medir el comportamiento global de la probeta), se utilizaron apoyos de madera, los cuales fueron posicionados y nivelados en una columna independiente, la cual a su vez fue fijada a la losa de reacción.

Los sensores posicionados en la zona del pedestal, fueron fijados a este elemento en las cajas de madera mencionadas en el apartado 4.38.a.

En el caso de los inclinómetros, estos fueron dispuestos sobre placas de madera, y luego fijados sobre el muro con ayuda del adhesivo epóxico Araldite ®.

Capítulo 5

Procesamiento de Datos y Resultados Obtenidos

En el presente capítulo se realizará una breve explicación sobre el procesamiento de datos obtenidos a través de la instrumentación de la probeta, lo cual se resume al procesamiento de registros obtenidos y, escalamiento de estas por su respectiva constante de calibración.

Por otra parte, se realizará un análisis de los resultados experimentales obtenidos desde la instrumentación (LVDT's, inclinómetros y celdas de carga), orientado a estudiar el comportamiento global y local de la probeta en diferentes zonas de interés.

Un aspecto a considerar para efectos de la instrumentación (LVDT'S e inclinómetros) es que estos conservan la posición en la cual fueron instalados hasta determinado nivel de deriva, por lo cual al momento de llegar a desplazamiento altos, se comienza apreciar desprendimiento del hormigón, alterando las posiciones de los hilos sin fin en donde se empotran los instrumentos. Esto impacta a las mediciones registradas en esos instantes hasta la finalización del ensayo. Por esta razón, solo se considerarán los datos obtenidos hasta el 1.35 %.

La convención a utilizar para reconocer la orientación de desplazamientos será deriva positiva o deriva en compresión cuando el muro MR1 es desplazado hacia el este. Los desplazamientos o derivas negativas, se considera cuando el muro MR1 es desplazado hacia el oeste, siguiendo la convención explicitada en el esquema 4.12.

5.1. Procesamiento de Datos

Para el procesamiento de los registros adquiridos durante la ejecución del ensayo se debe considerar que todos los sensores no se encuentran centrados, por lo cual al momento de registrar desplazamientos, estos entregan valores que no necesariamente inician en cero.

Dado a lo anterior, se deben centrar las lecturas de todos los sensores, con el objeto de obtener las mediciones efectivas registradas en el ensayo. Para esto, se debe aplicar un offset a las lecturas a cada sensor utilizado.

Para explicar lo anterior, se puede bosquejar una función sinusoidal, en donde la señal se encuentra desplazada verticalmente en $0.4[\text{mm}]$, situación similar a las señales obtenidas del ensayo, sin intervención previa.

En este sentido, se tiene que para centrar la señal, ésta debe ser desplazada verticalmente $0.4[\text{mm}]$, lo cual se puede lograr restando al registro el primer dato de las mediciones (ver figura 5.1).

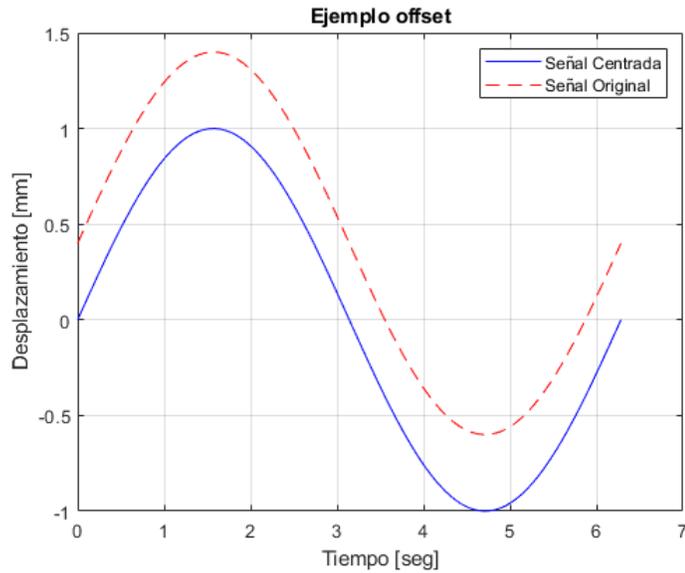


Figura 5.1: Ejemplo de Aplicación de offset a una Señal no Centrada.

Posterior a la aplicación del offset, se deben transformar dichos valores a desplazamientos. Esto se realiza mediante la aplicación de las constantes de calibración de cada instrumento (ver tabla 4.18.a), obteniendo con estos valores los desplazamientos registrados durante la ejecución del ensayo.

Cabe mencionar que durante la ejecución del ensayo se debe prestar atención a las condiciones de cada sensor, dado que al momento de alcanzar grandes desplazamientos de techo, la probeta pierde recubrimiento del hormigón, afectando a las posiciones de los hilos sin fin, lo que inside en las lecturas registradas. Existen otros casos en donde se disponen de los instrumentos sobre la superficie del muro, por lo que al momento de perder recubrimiento, eso se desprenden.

El procesamiento de datos fue realizado a través de Matlab®, en el cual se realizaron los pasos previamente mencionados.

5.2. Resultados Experimentales

5.2.1. Comportamiento Global

En el presente apartado se analizará el comportamiento global de la probeta, como así también el comportamiento de ambos muros de forma separada.

En cuanto a la carga axial con la cual fue cargada el muro MR1, se tiene que esta fue fijada nominalmente para cada gato con 9[ton], pero de acuerdo con los datos entregados por la celda de carga, se observa que este valor se fue oscilando entre 9,1-9,2[ton], alcanzando en promedio la carga nominal.

Dicha carga se mantiene constante en el tiempo, con leves variaciones, como se puede observar en el registro capturado por la celda de carga 5.2.

Como se aprecia en la figura, existen leves variaciones en las cargas registradas, lo cual se debe al ajuste de cada barra al momento de desplazar el muro MR1, causando que algunas barras sean más solicitadas que otras, dependiendo de la posición de desplazamiento del muro.

También se puede observar que la curva no se encuentra inicialmente en cero, dado a que al momento de iniciar la carga de los gatos hidráulicos, estos registraron caídas de voltaje. Esta situación también se pudo observar en el proceso del postensado de barras en el pedestal.

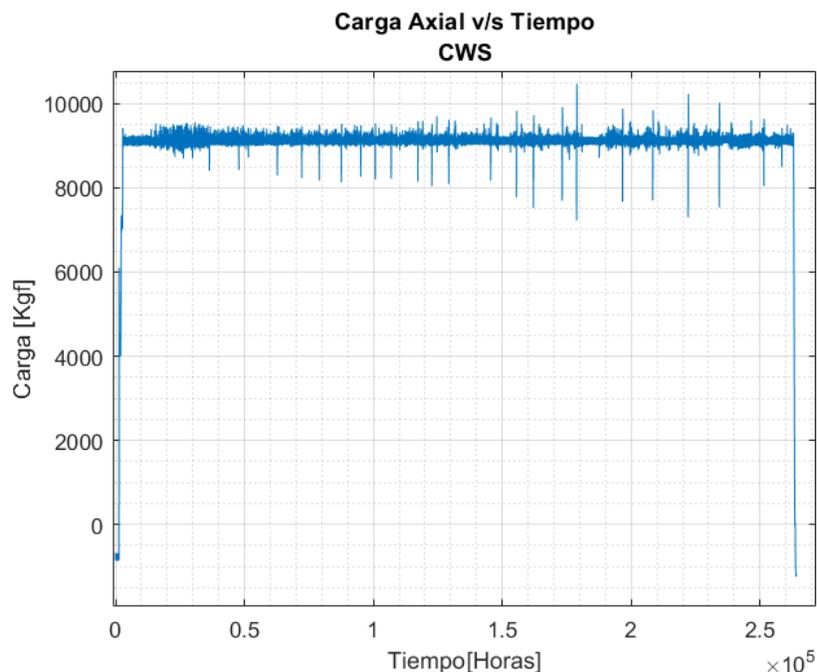


Figura 5.2: Registro de Carga Axial Aplicada al Muro MR1 .

Otro aspecto a considerar es el cumplimiento del protocolo de desplazamiento, el cual fue realizado manualmente, como se explicó en el capítulo anterior.

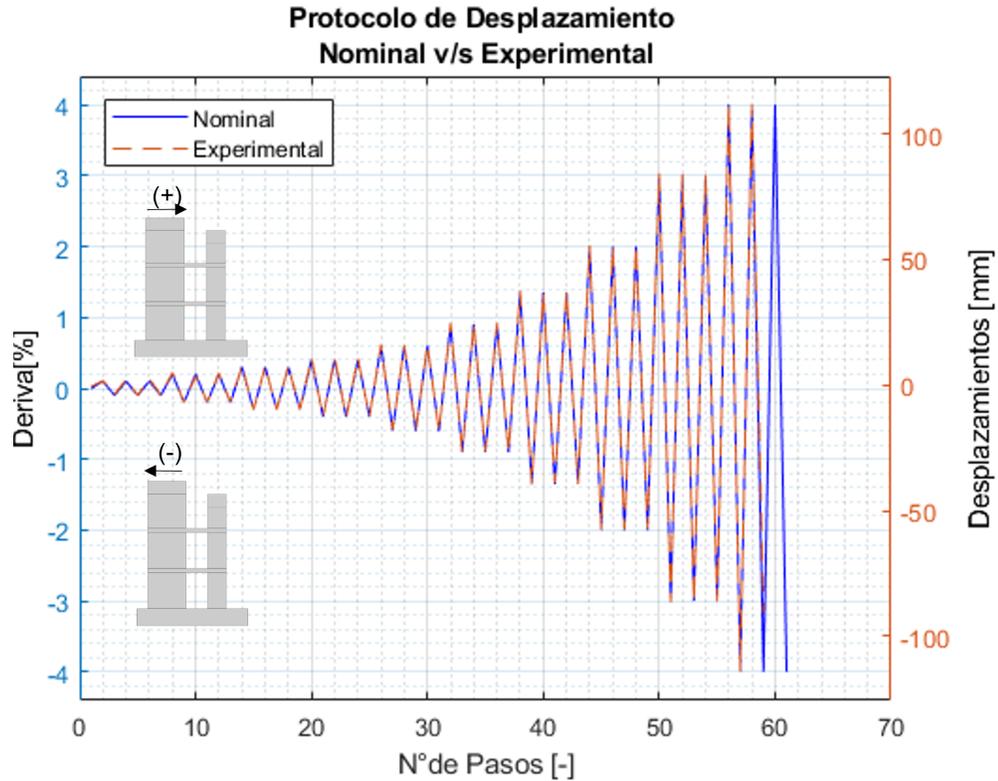


Figura 5.3: Inclinómetros Instalados en el Sistema de Muros a Estudiar

De acuerdo con lo presentado en la figura 5.3, se logró cumplir dicho protocolo hasta la mitad del segundo ciclo del 4% de drift ², en donde se presentó pérdida de recubrimiento y corte del refuerzo longitudinal en el borde izquierdo del muro MR1.

Cabe mencionar que los desplazamientos experimentales presentados en el gráfico corresponden a los corregidos del muro, eliminando la contribución por rotación y deslizamiento del muro en el desplazamiento medido, lo cual se explica con mayor detalle en la sección 4.0.5.1.

5.2.2. Muro MR1

Para conocer el comportamiento experimental del muro, es necesario conocer primero cuanto este se desplaza realmente a diferentes niveles de sollicitación lateral, lo cual se utilizó un conjunto de sensores dispuestos en la parte exterior del muro, como se puede apreciar en la figura 4.24.

La finalidad de dichos sensores es cuantificar el desplazamiento de techo real del muro, permitiendo eliminar los aportes de desplazamiento por levantamiento (corrección por rotación) y traslación del pedestal.

² se logró alcanzar hasta el drift 3.25 %- Dirección Negativa

Utilizando la expresión 4.1, los resultados para el ciclo de desplazamientos del muro son las siguientes:

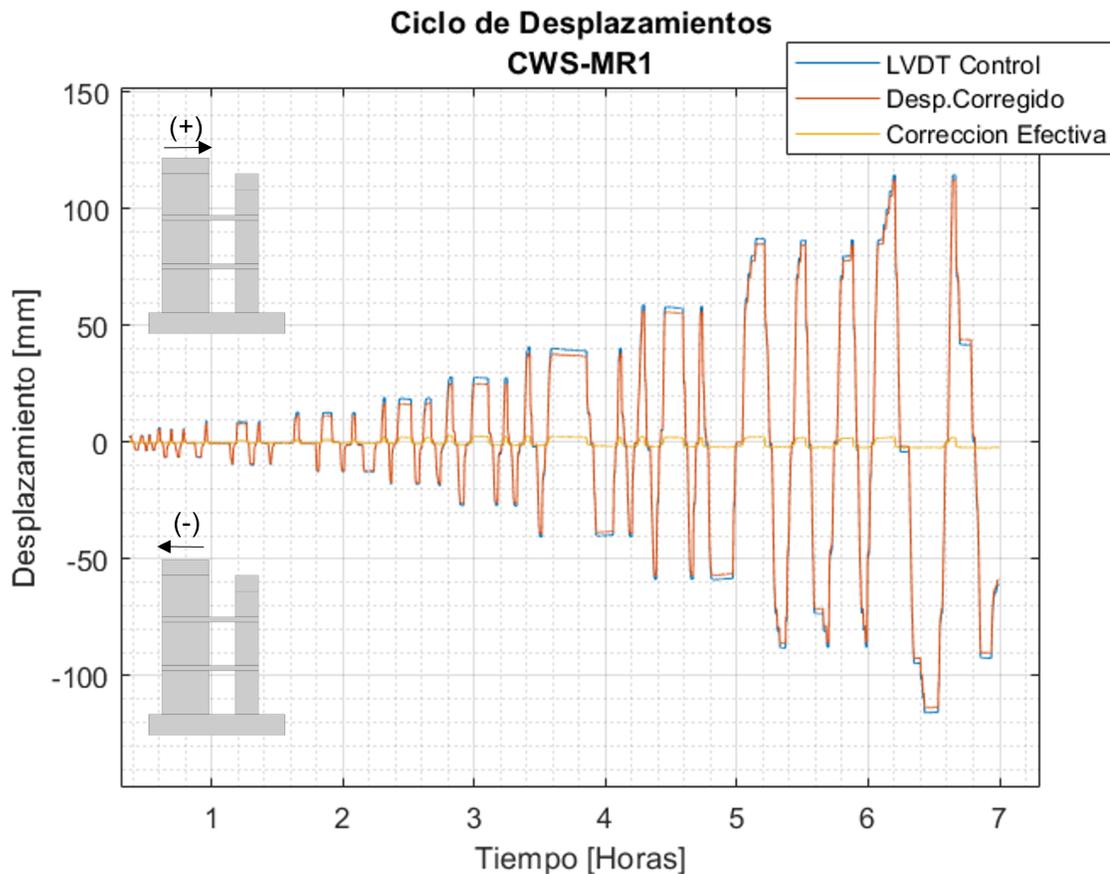


Figura 5.4: Ciclos de Desplazamientos MR1

Analizando los resultados obtenidos, se puede observar que la corrección no es simétrica en ambos sentidos de desplazamiento, lo que se debe principalmente a la traslación del pedestal hacia el oeste. Dicha traslación se comenzó a presentar a las 2,3[horas]. Desde dicho instante se pierde la simetría de la corrección, corrigiendo 5 [mm] como máximo hacia el oeste y 2.94 [mm] como máximo hacia el este, diferencia que coincide con el desplazamiento lateral que sufrió el pedestal.

Tomando en cuenta los resultados previamente mencionados, en la figura 5.5 se presenta la histéresis obtenida para el muro, considerando la corrección por desplazamiento y los registros obtenidos por la celda de carga del actuador.

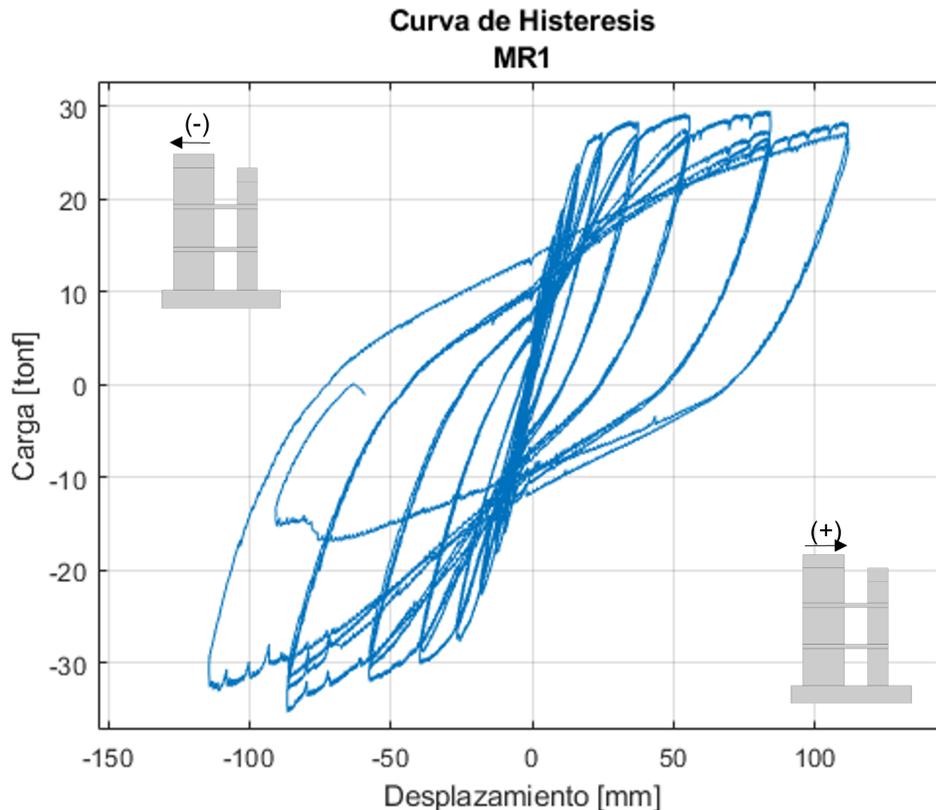


Figura 5.5: Curva de Histeresis- Muro MR1

El comportamiento lineal de la estructura se mantiene hasta el 0.6% de drift (aprox), lo cual se puede apreciar en el cambio de rigidez que experimenta la curva de histéresis a este nivel de desplazamiento. A deformaciones mayores, se puede apreciar una degradación progresiva de la rigidez, la cual comienza a presentarse al momento en que el muro alcanzó una resistencia de 28.4[ton], a un drift del 2%.

Desde el 1.35% de drift se puede apreciar una pérdida de simetría de la curva, en donde el muro comienza a resistir más carga hacia el oeste, alcanzando una resistencia de máxima de 35.4 [tonf], 5.79 [tonf] mayor a la resistencia máxima alcanzada en la dirección positiva (29.6 [ton]).

Lo anterior se puede deber principalmente a la presencia de las losas, en particular cuando la losa superior comienza a perder recubrimiento progresivamente y alcanza su límite de fluencia debido a la compresión a la cual se ve sometida en derivas positivas.

Para derivas mayores al 2%, en el extremo de la losa superior que conecta al muro se genera una rotula plástica, observándose con ello que al momento de desplazar el muro hacia la dirección Este, dicha zona no genera resistencia al desplazamiento, con lo cual la losa tiende a rotar; es decir se reduce la capacidad de este elemento de transmitir carga axial al muro.

En el caso del desplazamiento negativo, se puede notar que la losa superior es traccionada, restringiendo el desplazamiento del muro en dicha dirección.

El comportamiento general del muro es a flexión, lo cual se puede notar por el desarrollo de grietas horizontales en el borde del este, lo que se visualizó durante la ejecución del ensayo. Lo anterior se puede apreciar con claridad al 0.6 % de drift (ver figura 5.6).

Por otra parte, podemos analizar la progresión del daño que sufrió el muro MR1 en el primer piso. Para esto utilizamos las imágenes capturadas durante la ejecución del ensayo en cada nivel de deriva. El color rojo se usó para grietas generadas en la deriva señalada y azul para grietas preexistentes.

Podemos observar el grietas a flexión en el muro desde el 0.4 % de drift, viéndose éstas marcadas en los bordes del muro, las cuales se comienza a desarrollar con mayor profundidad al 0.6 % de drift, teniendo una deformación basal de $\varepsilon_t = 0.006$ a tracción y $\varepsilon_c = -0.002$ a compresión.

A este nivel de desplazamiento ya obtenemos que las barras del borde izquierdo alcanzaron tres veces el valor de fluencia obtenido en el ensayo a tracción ??.

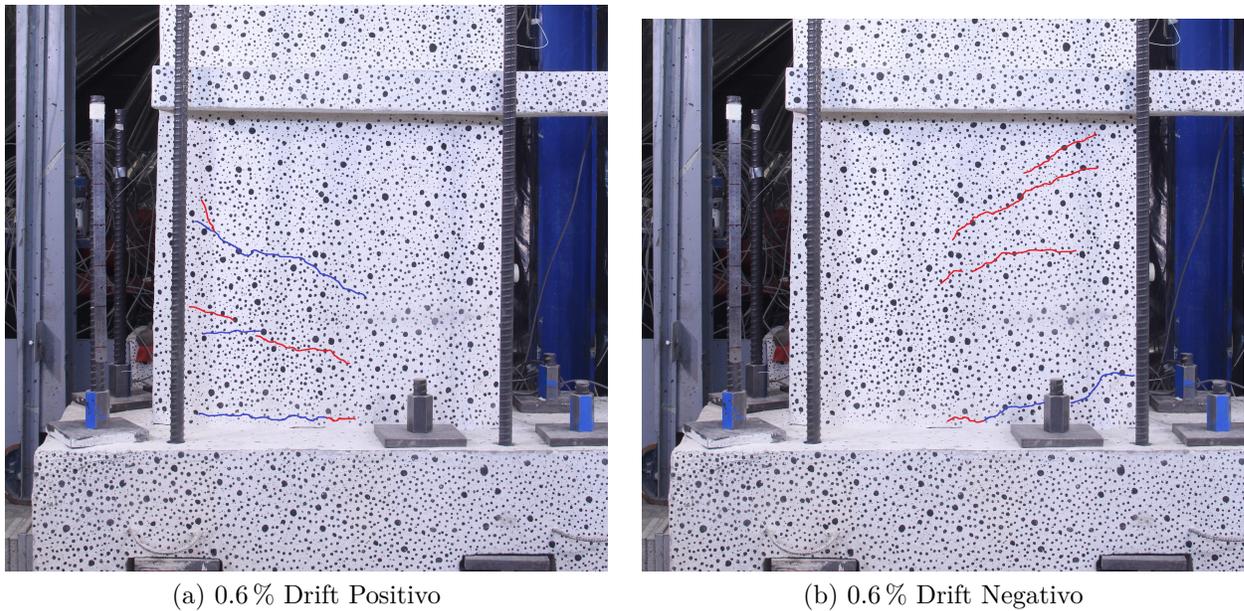
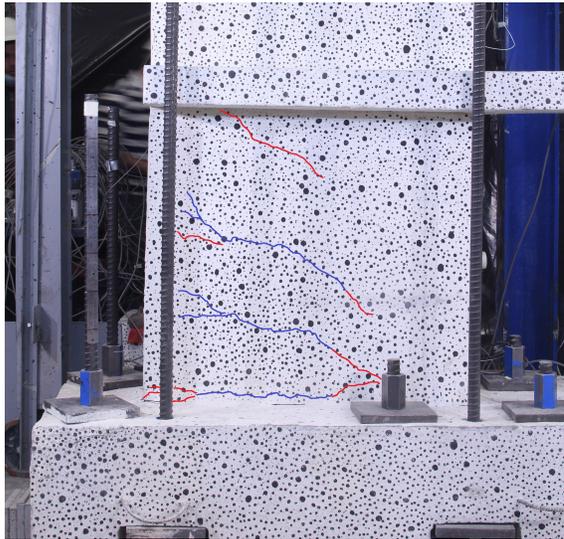


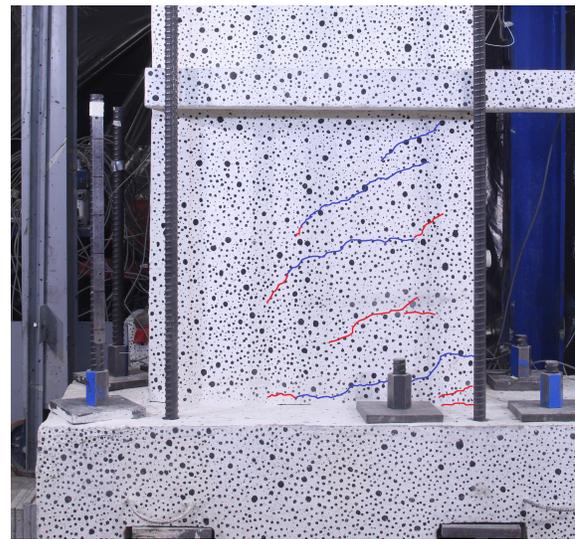
Figura 5.6: Patrón de Grietas- Deriva del 0.6 %, segundo ciclo.

En el drift de 0.9 % se puede notar un aumento en la longitud de grietas y aparición de grietas de flexión en los bordes del muro. Estas poseen una orientación horizontal marcada en la zona derecha del muro a desplazamientos negativos.

También se puede apreciar el efecto del corte en el muro, lo cual se observa por la orientación diagonal de las grietas de mayor longitud.



(a) 0.9 % Drift Positivo



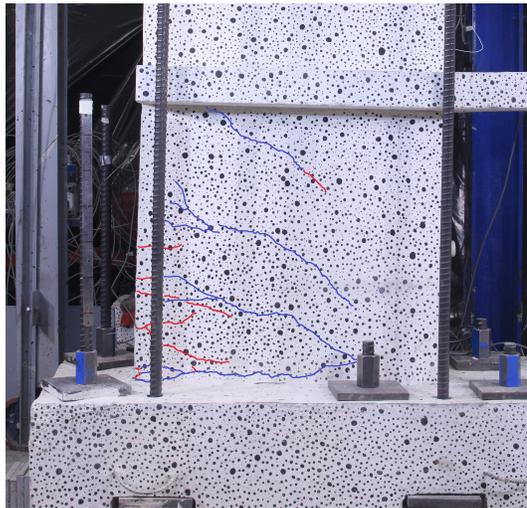
(b) 0.9 % Drift Negativo

Figura 5.7: Patrón de Grietas- Deriva del 0.9 %, segundo ciclo.

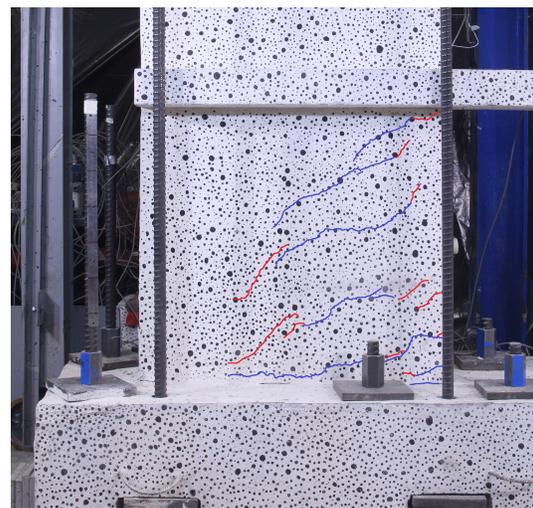
Ya alcanzado el 1.35 % drift, se observa el desprendimiento de hormigón en el borde izquierdo del muro y una abertura de una grieta en la base del muro al momento de ser comprimido el muro, lo cual se puede observar en las figuras 5.8 y 5.9.

Las deformaciones basales registradas para el desplazamiento positivo del muro son $\varepsilon_t = 0.022$ en el borde traccionado y $\varepsilon_c = -0.008$ en el borde comprimido.

Para desplazamientos negativos, se observa que se alcanzan deformaciones basales del $\varepsilon_t = 0.017$ en el borde traccionado y $\varepsilon_c = -0.011$ en el borde comprimido.



(a) 1.35 % Drift Positivo



(b) 1.35 % Drift Negativo

Figura 5.8: Patrón de Grietas- Deriva del 1.35 %, segundo ciclo.

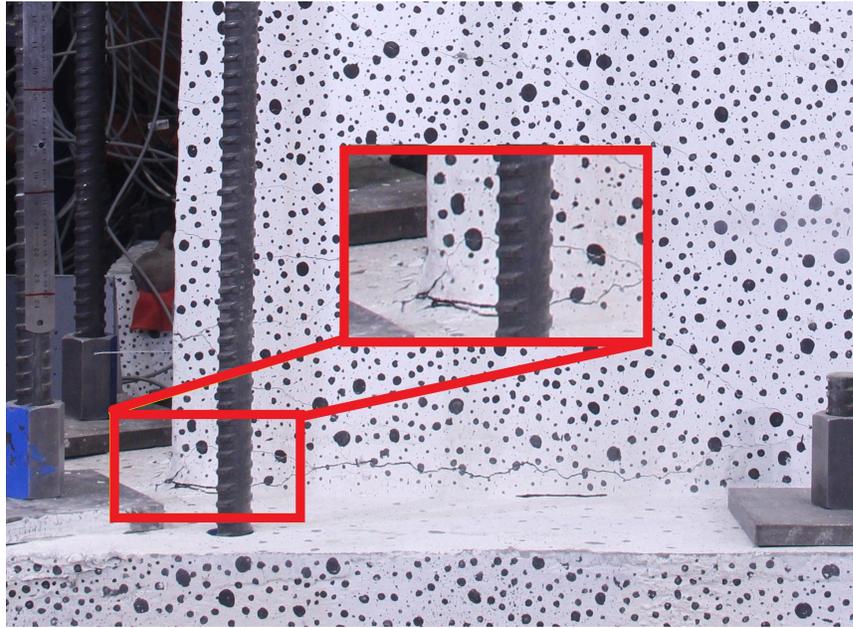
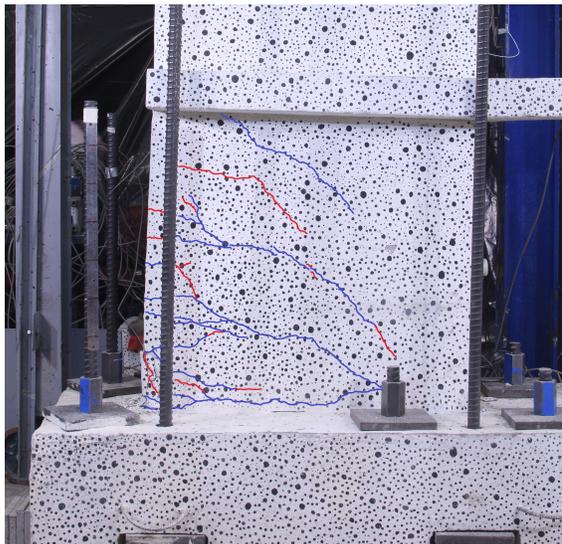


Figura 5.9: Inicio de Perdida de Recubrimiento, Drift 1.35 %- MR1

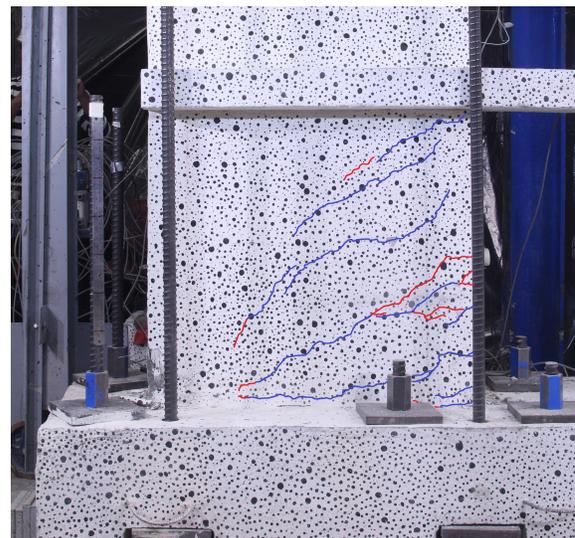
Con respecto a la distribución de grietas, se puede notar que estas se presentan en mayor cantidad y longitud en desplazamientos positivos.

Ya alcanzado el drift del 2 %, se puede notar una perdida considerable del recubrimiento en el borde izquierdo. En este momento se comienza apreciar el inicio de pérdida del recubrimiento en el borde inferior derecho, observándose una concentración de grietas en dicha zona. Además, es posible observar el desarrollo de una grieta horizontal en la base.

Lo anterior se puede apreciar con detalle en las figuras:

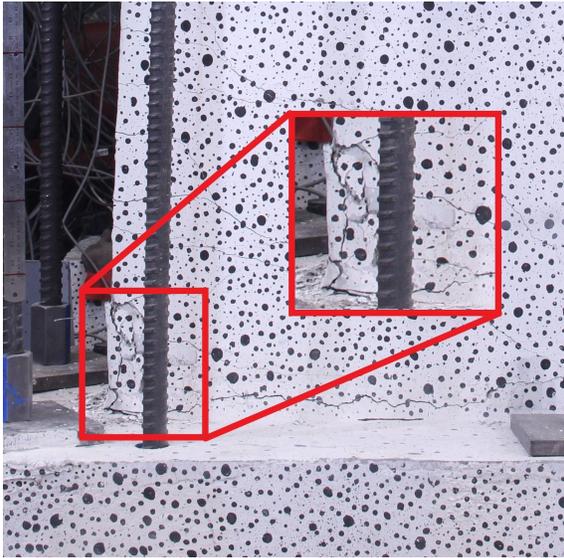


(a) 2 % Drift Positivo



(b) 2 % Drift Negativo

Figura 5.10: Patrón de Grietas- Deriva del 2 %, segundo ciclo.



(a) 2% Drift Positivo



(b) 2% Drift Negativo

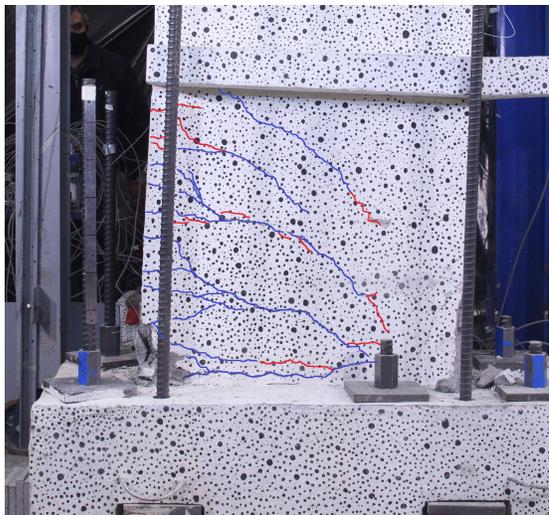
Figura 5.11: Patrón de Grietas- Deriva del 2%, segundo ciclo.

También se puede apreciar que la longitud de las grietas a este nivel de drift cubre gran parte de la base del muro, las cuales se van distribuyendo en altura y poseen una orientación horizontal y diagonal (ver 5.10).

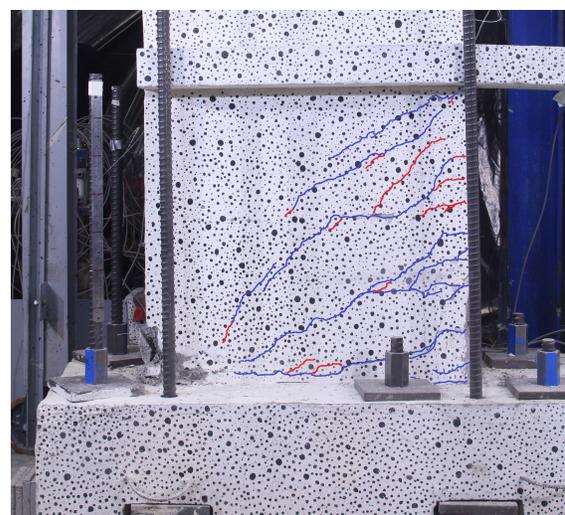
Para el drift del 3%, se tiene desprendimiento de hormigón en ambos extremos y exposición de las barras de refuerzo en el borde izquierdo.

En el borde derecho se observa que la pérdida de hormigón se desarrolla a una mayor altura y profundidad con respecto al borde izquierdo, lo cual nos indica que el daño fue distribuido en forma asimétrica en la zona inferior del muro (bordes).

Lo anterior se puede observar en las figuras 5.13.a y 5.13.b:

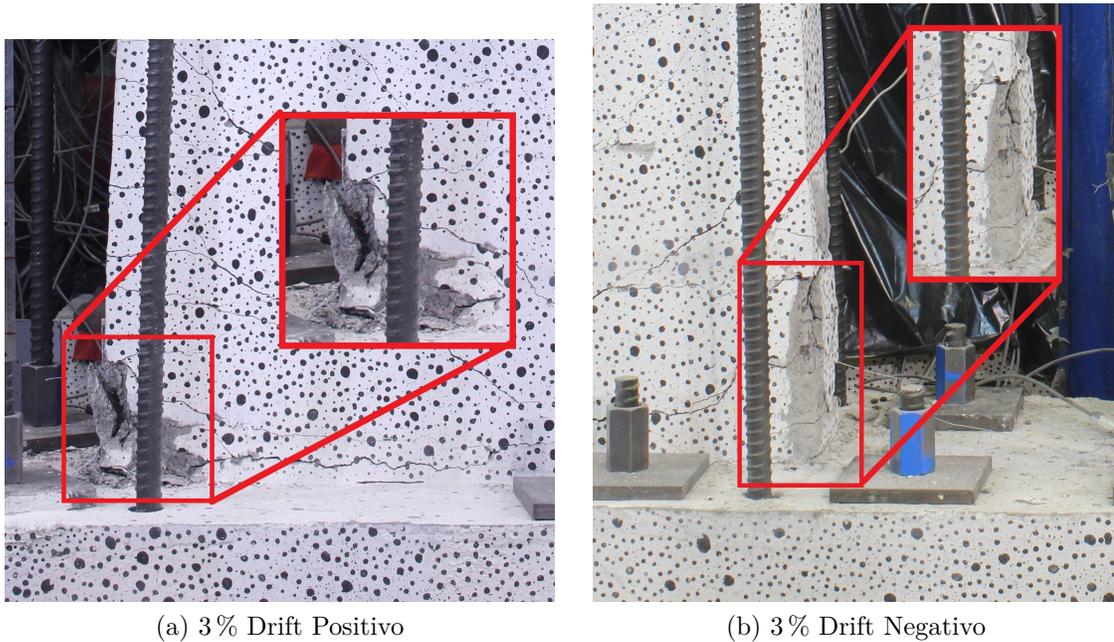


(a) 3% Drift Positivo



(b) 3% Drift Negativo

Figura 5.12: Patrón de Grietas- Deriva del 3%, segundo ciclo.



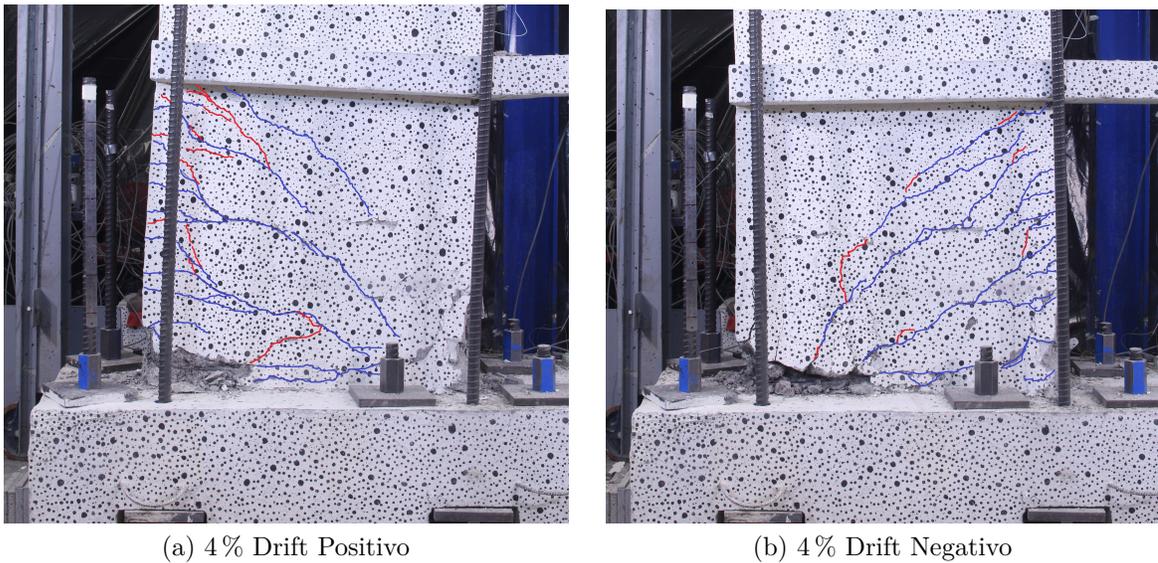
(a) 3% Drift Positivo

(b) 3% Drift Negativo

Figura 5.13: Patrón de Grietas- Deriva del 3%, segundo ciclo.

En cuanto a la distribución de grietas respecta, se observa una mayor profundidad y longitud de estas, en comparación al drift anterior, siendo grietas de flexión y corte. Además, se puede ver que la longitud de grietas es mayor a en la dirección positiva, lo cual nos indica que el daño se distribuye de forma asimétrica en cada borde del muro.

Finalmente, se tiene el drift del 4%, en donde el muro solo logra resistir hasta el segundo ciclo ³:



(a) 4% Drift Positivo

(b) 4% Drift Negativo

Figura 5.14: Patrón de Grietas- Deriva del 4%, segundo ciclo.

³ Alcanzó una deriva del 3,25%- Segundo Ciclo

En el desplazamiento positivo, se tiene que a este punto existe un incremento en la pérdida de recubrimiento en dicha zona, exponiendo el acero de refuerzo de borde.

Además, se puede observar pandeo del refuerzo longitudinal, lo cual se comenzó a manifestar de forma temprana en el último ciclo del 3% de drift.

Para desplazamientos negativos, se tiene que la cabeza del borde izquierdo del muro sufre una pérdida del recubrimiento por aplastamiento del hormigón, exponiendo la primera capa del refuerzo de borde. A su vez, se puede apreciar que el muro comienza a salir del plano.

Con respecto a la cara norte del muro, en donde se encuentra dispuesta la instrumentación, se aprecia que el daño que ha sufrido el muro en esta cara es mucho mayor que el visto en la cara sur, siendo el borde izquierdo el que registra mayor desprendimiento de hormigón.

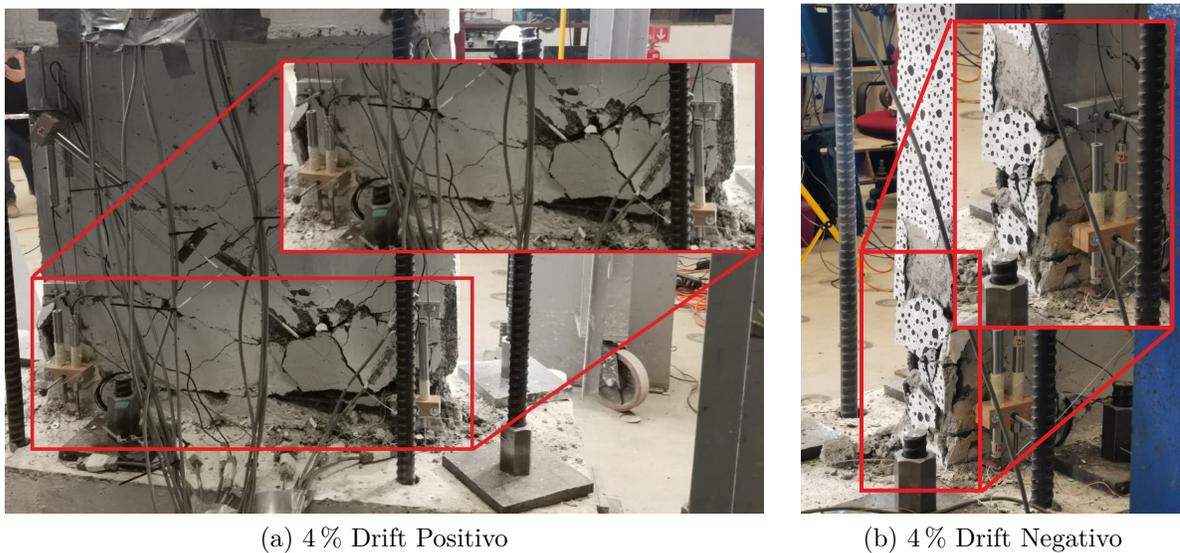


Figura 5.15: Patrón de Grietas- Deriva del 4%, segundo ciclo.

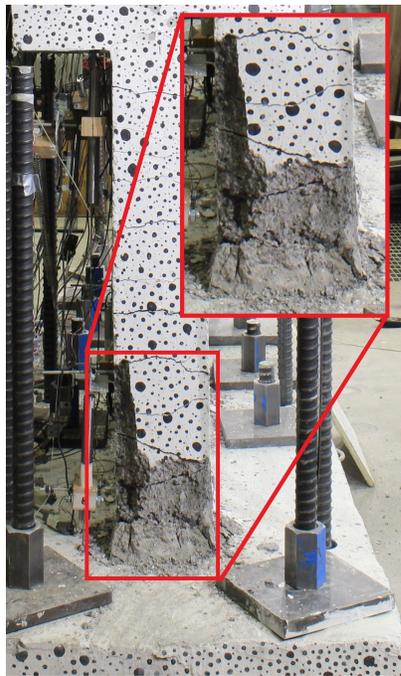
En esta cara se puede ver el daño por aplastamiento del hormigón, exponiendo la primera capa de la armadura de refuerzo del borde en el borde izquierdo con lo cual se reduce drásticamente la resistencia del muro a compresión en dicho punto.

Luego de finalizar el primer ciclo del 4%, se determinó con el equipo de investigación someter el muro a un segundo ciclo, completando la mitad de este sin problemas, con una reducción considerable de la resistencia del muro, comportamiento que se puede apreciar en la curva de histéresis 5.5.

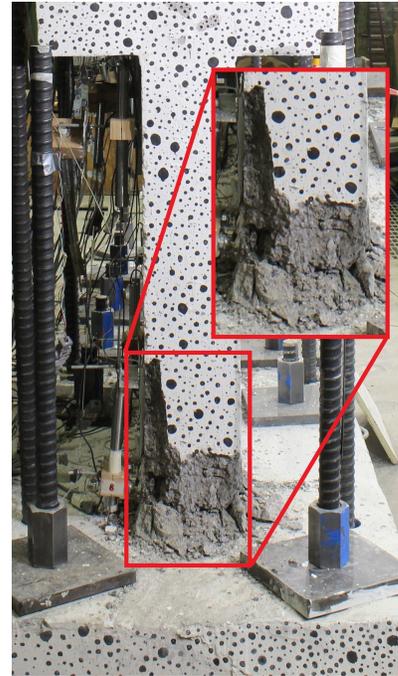
Al momento de intentar de completar el segundo ciclo, el muro comienza a sufrir inestabilidad global fuera del plano, por lo que se decide detener el ensayo para evitar el colapso del muro.

En este sentido, es posible observar el pandeo del refuerzo longitudinal en el borde izquierdo, además de pandeo de las barras horizontales del refuerzo distribuido en la zona central.

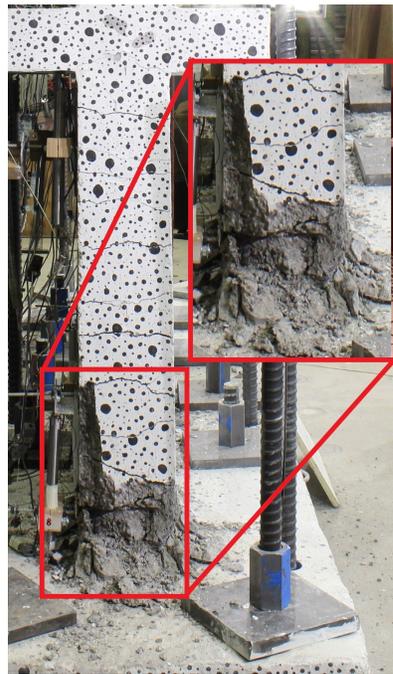
La progresión del daño del muro, específicamente en la zona del canto izquierdo, se puede apreciar con mayor detalle en las siguientes figuras:



(a) 4-Primer Ciclo %



(b) -4 % -Segundo Ciclo



(c) 4 % -Segundo Ciclo



(d) -4 %-Segundo Ciclo. Se Observa Pandeo del Refuerzo

Figura 5.16: Daño Registrado en el Canto Izquierdo- Deriva del 4 %

5.2.3. Muro MR2

Los desplazamientos reales alcanzados por el muro, realizando la corrección por traslación y rotación del pedestal fueron los siguientes:

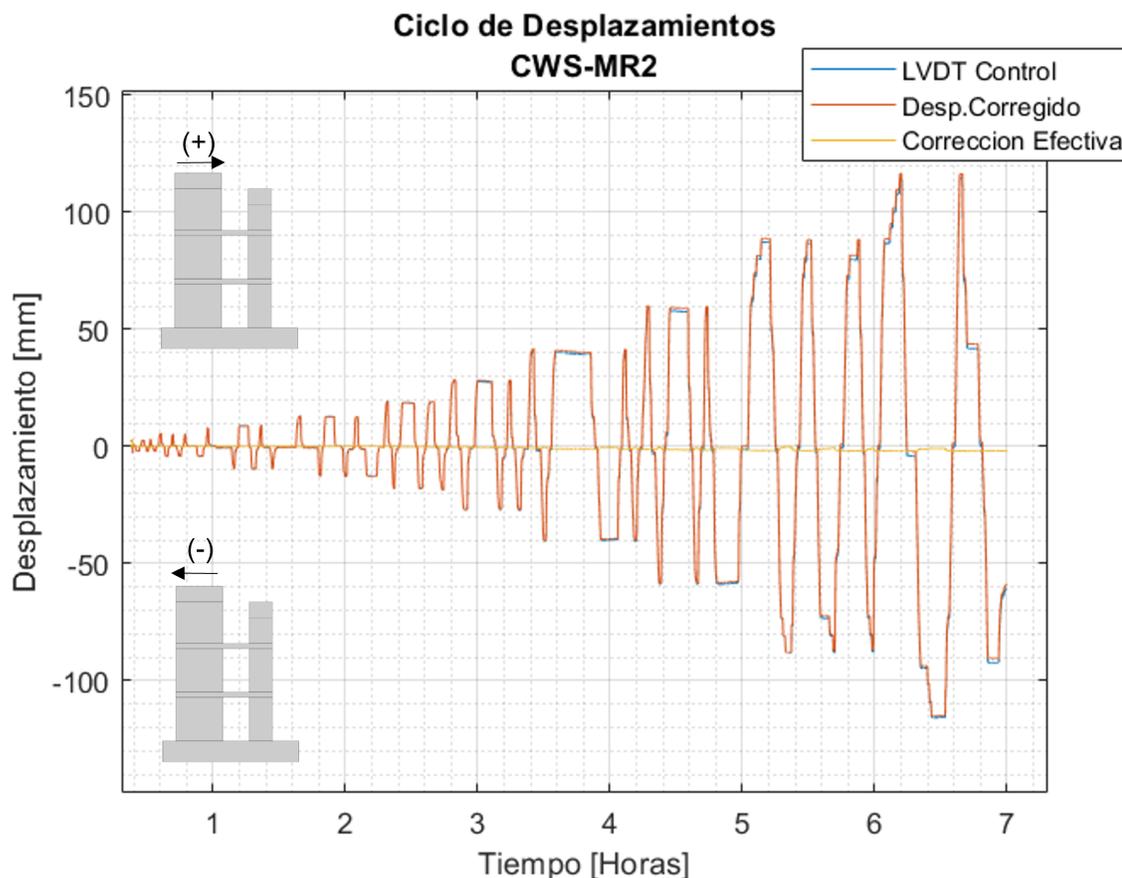


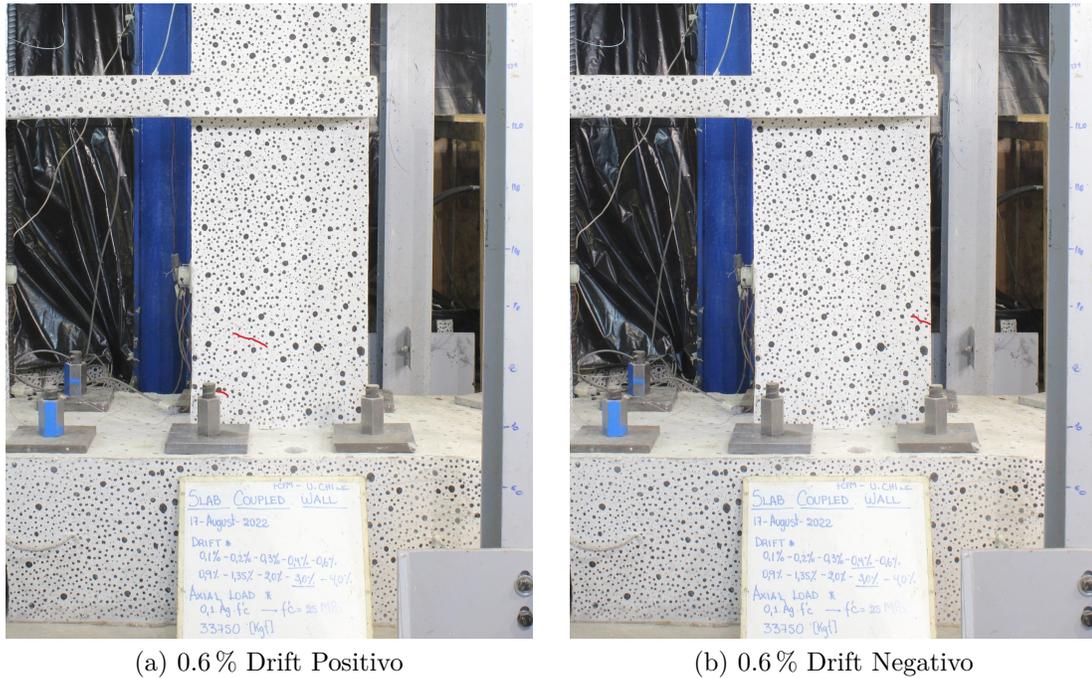
Figura 5.17: Ciclo de Desplazamientos MR2

Podemos notar a primera vista que la corrección añade desplazamiento al muro en la dirección positiva (Este) y resta en la dirección negativa (Oeste). Lo anterior se debe al deslizamiento que sufrió el pedestal durante la ejecución del ensayo.

De acuerdo con las mediciones registradas por los LVDT'S instalados en el pedestal (bajo el muro), se registraron bajos desplazamientos por rotación del pedestal en comparación a los medidos en la zona del muro MR1.

Por otro lado, analizamos la evolución del daño en MR2, realizando un seguimiento de las grietas desarrolladas, específicamente en el nivel 1, a lo largo del ensayo.

En la deriva del 0.6% se tiene la aparición de las primeras fisuras en el borde izquierdo del muro, a una altura aproximada de 10 -25[cm]. Por su parte, al drift de -0.6% se observa la aparición de una fisura de menor longitud en comparación con su contraparte (+0.6%), y se genera a una altura aprox. de 30[cm].

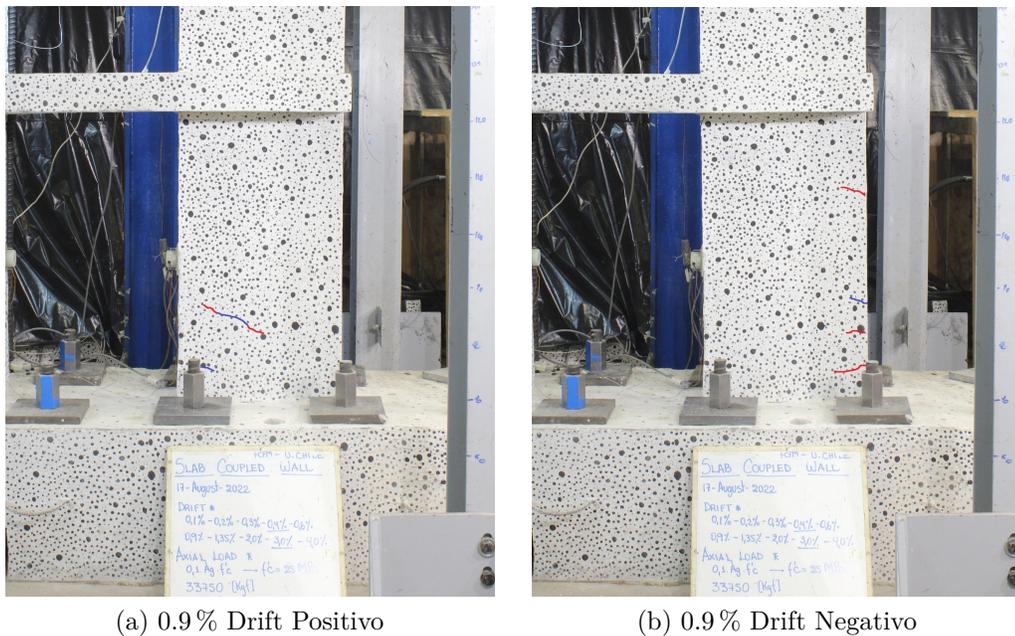


(a) 0.6% Drift Positivo

(b) 0.6% Drift Negativo

Figura 5.18: Patrón de Grietas- Deriva del 0.6 %, segundo ciclo.

Avanzando a la deriva del 0.9 % se genera un aumento en la longitud de la grieta que se ubicaba a mayor altura en el drift anterior. En cambio, en el drift del -0.9 % se tiene la aparición de nuevas grietas a lo largo del borde derecho.



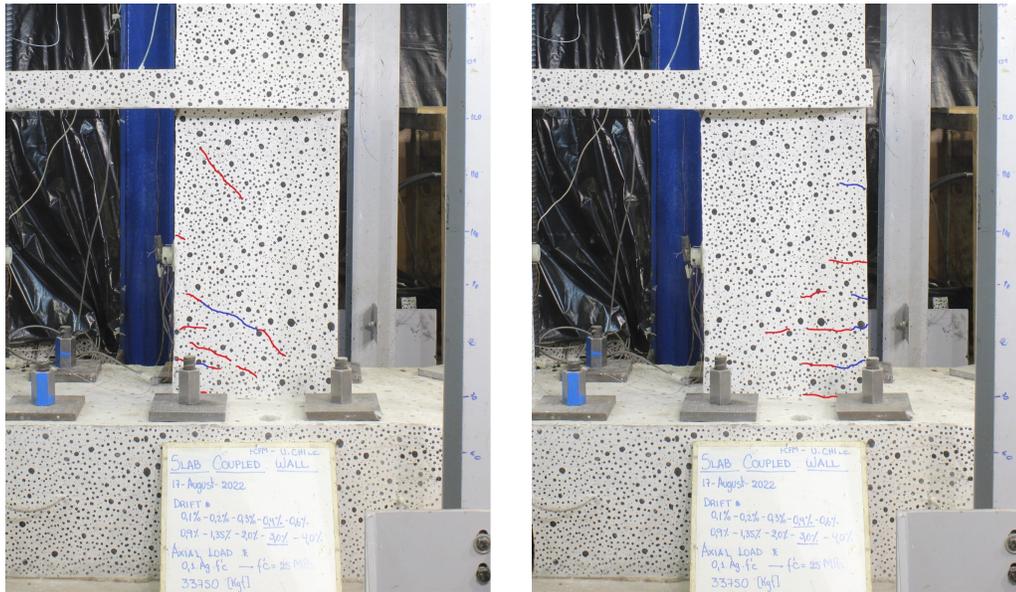
(a) 0.9% Drift Positivo

(b) 0.9% Drift Negativo

Figura 5.19: Patrón de Grietas- Deriva del 0.9 %, segundo ciclo.

Al aplicar una deriva del 1.35 %, se percibe un aumento en la longitud de ambas grietas que fueron identificadas en la deriva del 0.6 %, y también se generan nuevas grietas diagonales en el borde.

En la deriva del -1.35 %, se observa una extensión de las grietas preexistentes, en dirección horizontal con respecto al borde del muro, además de manifestarse una grieta en la base del muro.



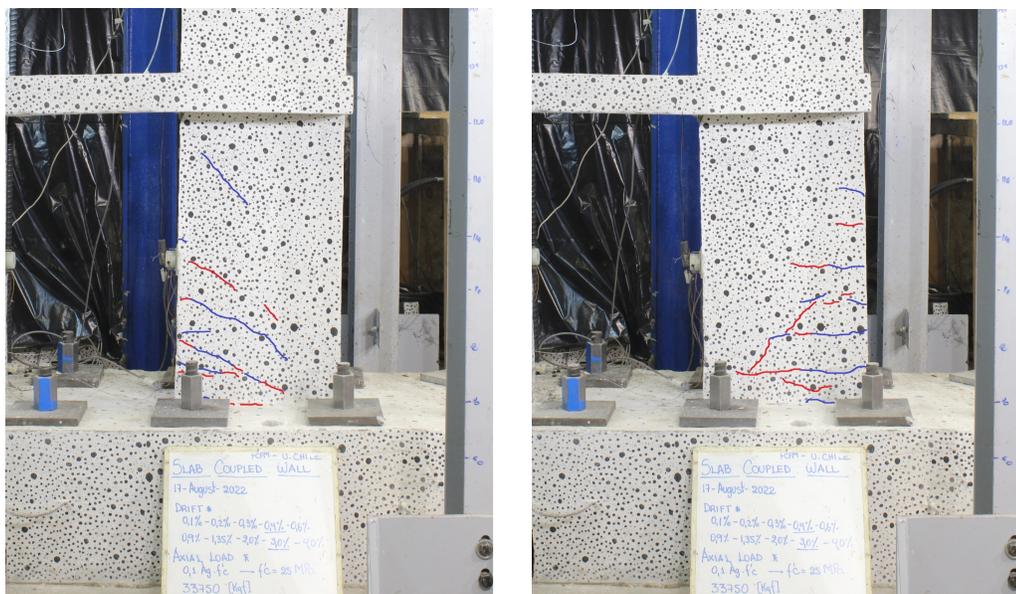
(a) 1.35 % Drift Positivo

(b) 1.35 % Drift Negativo

Figura 5.20: Patrón de Grietas- Deriva del 1.35 %, segundo ciclo.

En la deriva del 2 % se generan nuevas grietas, y se extienden las existentes de drifts anteriores, y similar a lo que se observó en el drift de -1.35 %, aparece una grieta horizontal en la base del muro.

Por otra parte, se tiene que en el -2 % de drift aparecen grietas diagonales, concentrándose el daño en la parte inferior del muro.



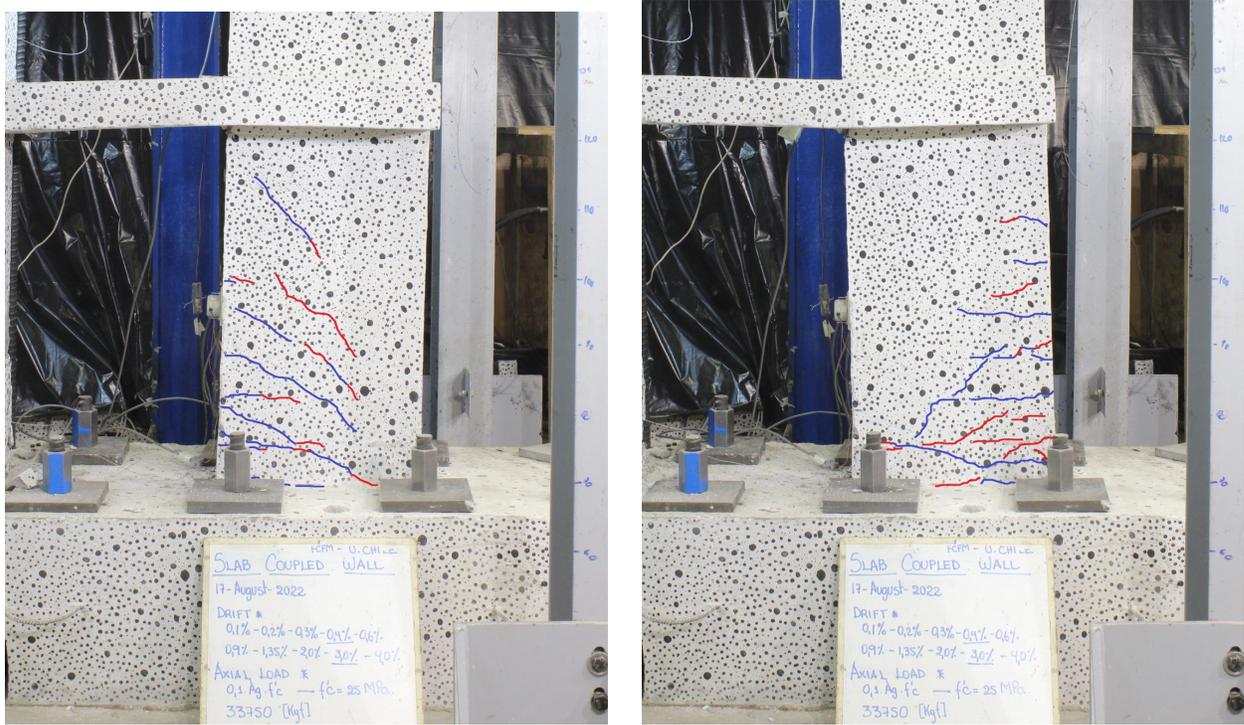
(a) 2 % Drift Positivo

(b) 2 % Drift Negativo

Figura 5.21: Patrón de Grietas- Deriva del 2 %, segundo ciclo.

Al nivel de deriva del 3% se puede observar una mayor cantidad de grietas diagonales originadas a lo largo del ensayo, concentrándose el daño en la base del muro, hasta la mitad de este en altura.

Además, casi no se desarrollan nuevas grietas sobre la mitad de la altura del muro, en cambio, desde la mitad hacia abajo, se distinguen nuevas grietas que concentran el daño en la base del muro.

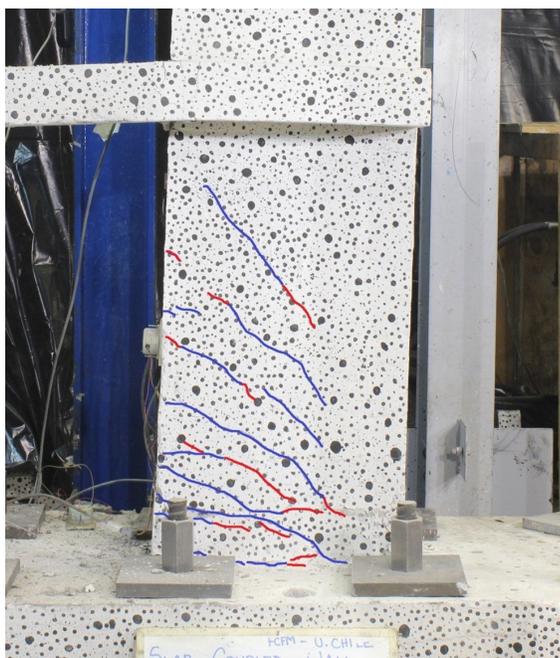


(a) 3% Drift Positivo

(b) 3% Drift Negativo

Figura 5.22: Patrón de Grietas- Deriva del 3%, segundo ciclo.

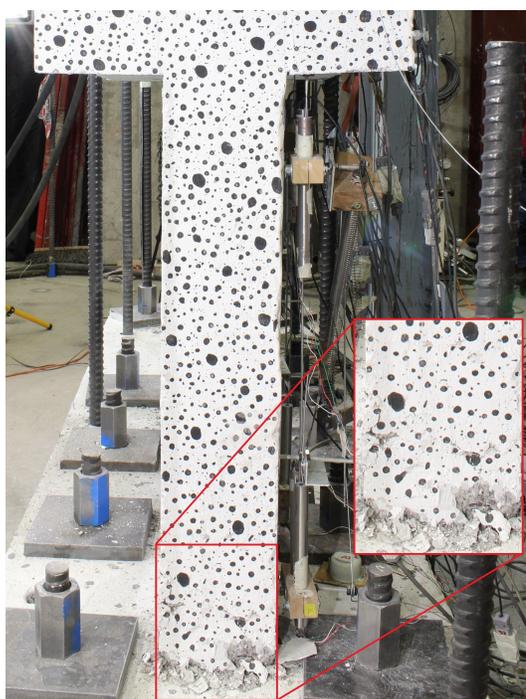
Finalmente, en la última deriva del ensayo (4%) se observa que en general no aparecen nuevas grietas, solo se prolongan.



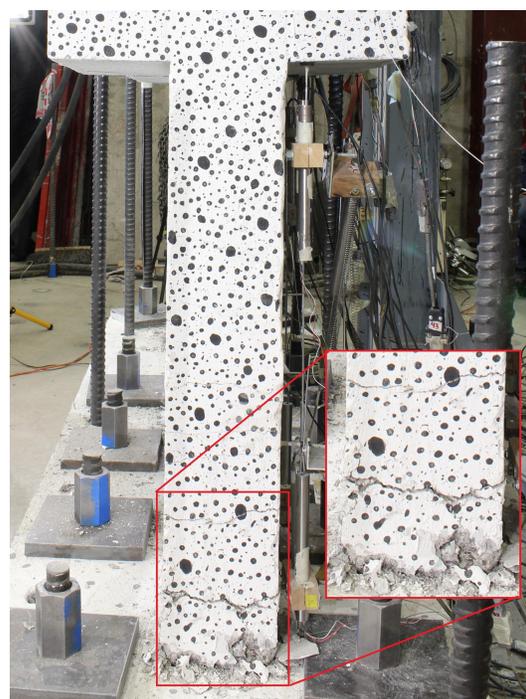
(a) 4% Drift Positivo

Figura 5.23: Patrón de Grietas- Deriva del 4%, segundo ciclo.

Si bien no se ve una pérdida de recubrimiento a simple vista, al menos de manera frontal, se tuvo pérdida de recubrimiento en los bordes laterales del muro, como se puede apreciar a continuación.

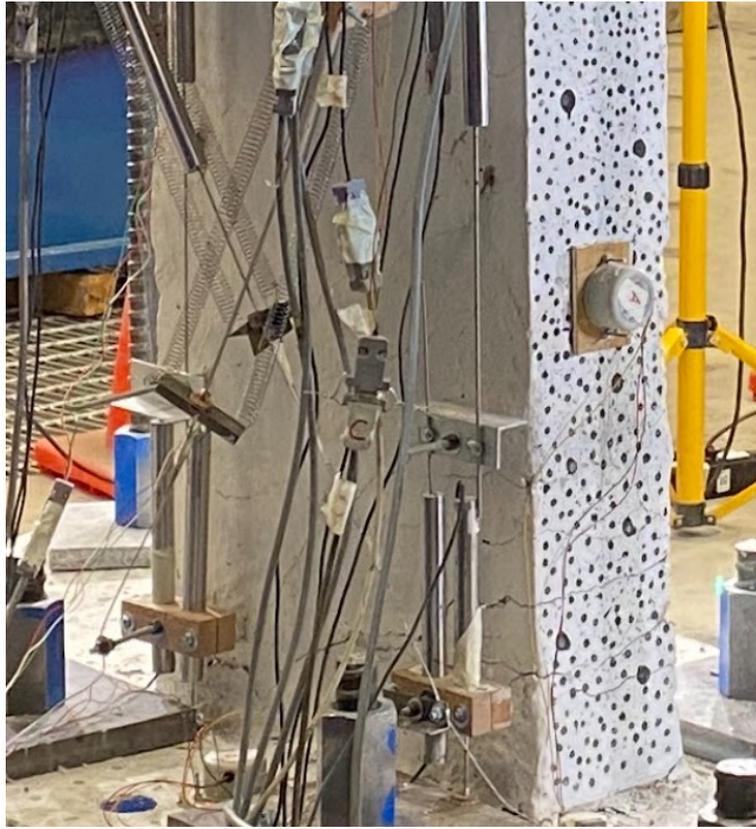


(a) 4% Drift-Dirección Positiva



(b) -4% Drift- Dirección Negativa

Figura 5.24: Pérdida recubrimiento al 4% de drift-Borde derecho



(a) 4 % Drift-Dirección Positiva

Figura 5.25: Pérdida de recubrimiento al 4 %. Muro MR2- Borde Izquierdo

5.2.4. Comportamiento Local

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos a través de la instrumentación dispuesta en las caras interiores del muro, analizando las mediciones obtenidas.

Es importante mencionar que algunos instrumentos sufrieron problemas de funcionamiento, lo cual pudo ser causado por la cantidad de ellos conectados de forma simultanea o fallas no detectadas previo a la ejecución del ensayo.

Lo anterior se pudo notar al momento de verificar los registros de voltaje en toda la instrumentación dispuesta en el muro, en donde estos instrumentos en particular no registraron mediciones durante la ejecución del ensayo.

En el siguiente esquema se presentan las ubicaciones de los sensores previamente mencionados:

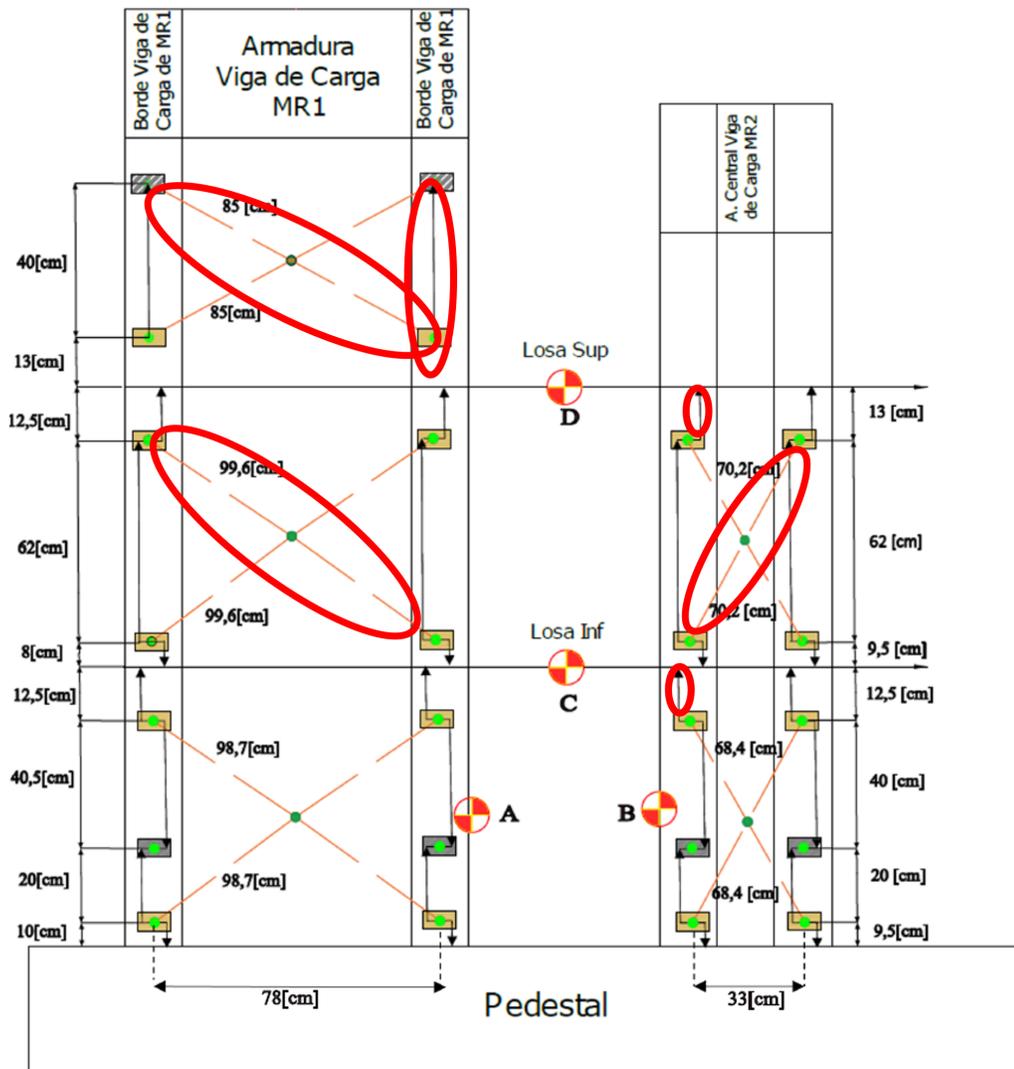


Figura 5.26: Sensores con Mediciones Defectuosas (Nulas).

Tabla 5.1: Sensores sin Registro de Mediciones

Tipo	Canal	Nº de Serie	Ubicación	Variable a Medir
Macrosensor	5	6172316	MR1-2º Nivel	Corte
Macrosensor	11	6165446	MR1-3º Nivel	Corte
Macrosensor	13	6165448	MR2- 2º Nivel	Corte
Macrosensor	15	6165450	MR1-3º Nivel	Flexión
Macrosensor	16	6165451	MR1-2º Nivel	Flexión
Macrosensor	24	6166560	MR1-2º Nivel	Flexión
Omega	46	0 201	MR2- 2º Nivel	Flexión
Omega	47	1401	MR2- 1º Nivel	Flexión

5.2.4.1. Deformaciones en la Base

Las deformaciones unitarias se obtienen desde los sensores inferiores, ubicados en la base de cada muro, como se puede apreciar en el esquema 4.31.

Estos se encuentran dispuestos en 2 puntos de mediciones para levantar las deformaciones que se generan en la base del muro, dispuestos al centro de la zona del refuerzo de borde.

Para efectos de los datos presentados, se utilizaron los registros correspondientes al segundo ciclo de cada drift, dada a la representatividad que estos valores entregan al comportamiento de la probeta, según lo observado durante la ejecución del ensayo.

Los resultados obtenidos para ambos muros a desplazamientos positivos se presentan a continuación:

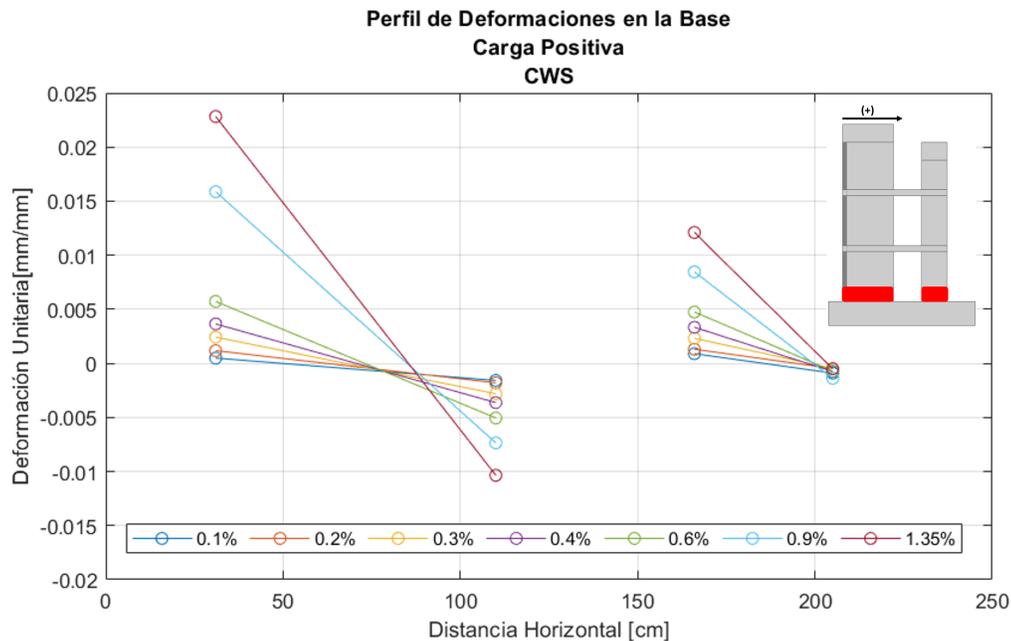


Figura 5.27: Perfil de Deformaciones en la Base de Ambos Muros- Dirección Positiva

De acuerdo con los resultados obtenidos, se tiene que el muro MR1 alcanza la fluencia al 0.3% de drift, considerando la deformación unitaria obtenida experimentalmente en el ensayo a tracción (4.1). A su vez, el muro MR2 alcanza la fluencia al 0.4%.

Se puede notar que en ambos muros alcanzan deformaciones muy similares a etapas tempranas del ensayo, manteniendo dicha respuesta a tracción hasta 0.6 %.

Desde el 0.9%, se puede observar que la respuesta a tracción en ambos muros cambia substancialmente, en donde el muro MR1 alcanza casi el doble de deformaciones unitarias que en el muro MR2, al mismo desplazamiento de techo.

En cuanto a la compresión, podemos notar que el muro MR1 se lleva gran contribución de esta. Lo anterior es consistente con lo observado en la evolución del daño de ambos muros durante la ejecución del ensayo, en donde el muro MR1 se sufrió más daño en la zona inferior, tanto en la zona traccionada, como en la zona comprimida.

Por otro lado, al contar con la distribución de deformación en la base de cada muro, es posible estimar experimentalmente cual es la ubicación del eje neutro ante cargas positivas.

En el caso del muro MR1, la línea neutra se ubica a una distancia de 58[cm] del borde izquierdo de este. Esto se debe a que este muro al estar sometido a carga axial constante (debido a la carga aplicada por los 4 gatos hidráulicos), la línea neutra se desplaza hacia el borde traccionado.

Para MR2, se tiene que la longitud en donde se genera la zona de compresión es muy baja, ubicándose la línea neutra a 37[cm] desde el borde izquierdo del muro, cercana al borde derecho. Lo anterior se debe este muro solo recibe la carga axial percibida por el efecto del corte de las losas de acoplamiento.

Análogo a anterior, los resultados a desplazamientos negativos son los siguientes:

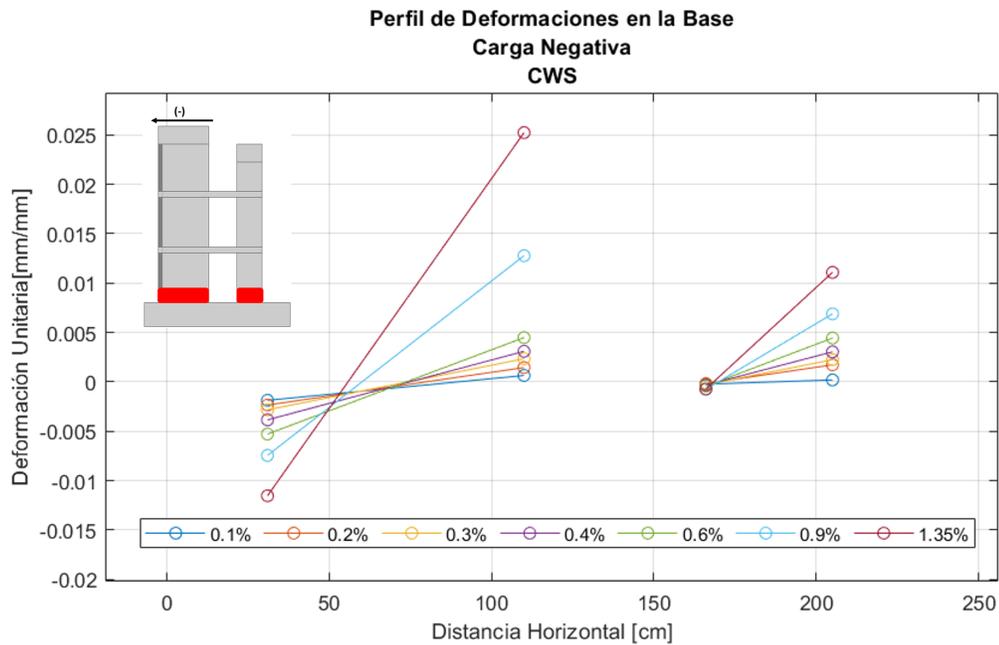


Figura 5.28: Perfil de Deformaciones en la Base de Ambos Muros- Dirección Negativa

Al observar el gráfico 5.28, es posible apreciar que el borde derecho del muro MR1 alcanza deformaciones similares en ambas direcciones de aplicación de carga, a pesar que en esta dirección el muro recibe la carga axial proveniente desde los gatos hidráulicos y el aporte del corte de las losas de acoplamiento.

A pesar de lo anterior, en la evolución del daño se pudo notar que el daño se encontró en el borde izquierdo de este muro, incluso situando la falla del refuerzo de borde en esta zona en la parte final del ensayo.

En MR2 se obtuvo un comportamiento similar, pero en este caso el borde derecho sufrió mayores deformaciones a tracción que ante cargas negativas. En el caso de las deformaciones a compresión, estas se limitan a una zona muy pequeña, concentradas en el borde derecho.

Analizando las deformaciones en ambos muros, se observa que la deformación de fluencia se alcanza al 0.3% de drift en MR1 y 0.4% en MR2 en los bordes traccionados, siendo el muro grande quien alcanza la fluencia primero en ambas direcciones de aplicación de carga.

5.2.4.2. Perfiles de Deformaciones en Altura

Con la finalidad de conocer la distribución en altura y la influencia de las losas de acoplamiento, se presentarán las deformaciones unitarias alcanzadas por el muro en diferentes zonas de interés, como lo son los bordes.

Cabe mencionar que no todos los perfiles tienen la misma altura, dado a que se tuvo que descartar lecturas de algunos sensores, lo cual fue comentado en detalle al inicio del presente apartado.

5.2.4.2.1. Muro MR1

De acuerdo con los resultados obtenidos, se tiene que el muro experimenta mayores deformaciones a tracción y compresión en el borde izquierdo, zona en donde se concentró gran parte del daño del muro, lo cual se vio reflejado en la trituración del hormigón y posterior pandeo del refuerzo longitudinal.

En este sentido, la zona de la base es quien registra mayores concentraciones de deformaciones, alcanzando un valor de $\varepsilon_t = 0.0228$ y $\varepsilon_c = -0.011$ en el borde izquierdo, quien registró mayores daños.

Por otra parte, en el borde derecho se observa una distribución más uniforme de deformaciones en la zona inferior, alcanzando valores inferiores al borde opuesto ante la misma demanda de desplazamiento de techo.

En el punto $h=867,5$ [mm], altura en donde se ubica la losa inferior, se observa una reducción de las deformaciones en el borde izquierdo. No es posible comparar con las deformaciones del sobre la losa al lado derecho, dado que dicho sensor al estar dispuesto sobre la losa se comenzó ver afectado por la rotación de esta y no por las deformaciones alcanzadas por el muro en esta cota.

Podemos notar que el muro alcanza deformaciones en la base de magnitudes similares,

pero esto va cambiando en altura. Como se puede apreciar, las deformaciones a tracción del borde izquierdo son considerablemente mayores en comparación al borde derecho, alcanzando valores de $\varepsilon_t = 0.0033$, a una altura $h=502.5$ [mm].

En cuanto a las deformaciones en la zona superior del muro, solo se cuenta con información del borde izquierdo, en el cual se puede notar que los valores alcanzados tanto a tracción, como a compresión son inferiores a los alcanzados en el primer nivel, lo cual es consistente con lo visto en el desarrollo del ensayo.

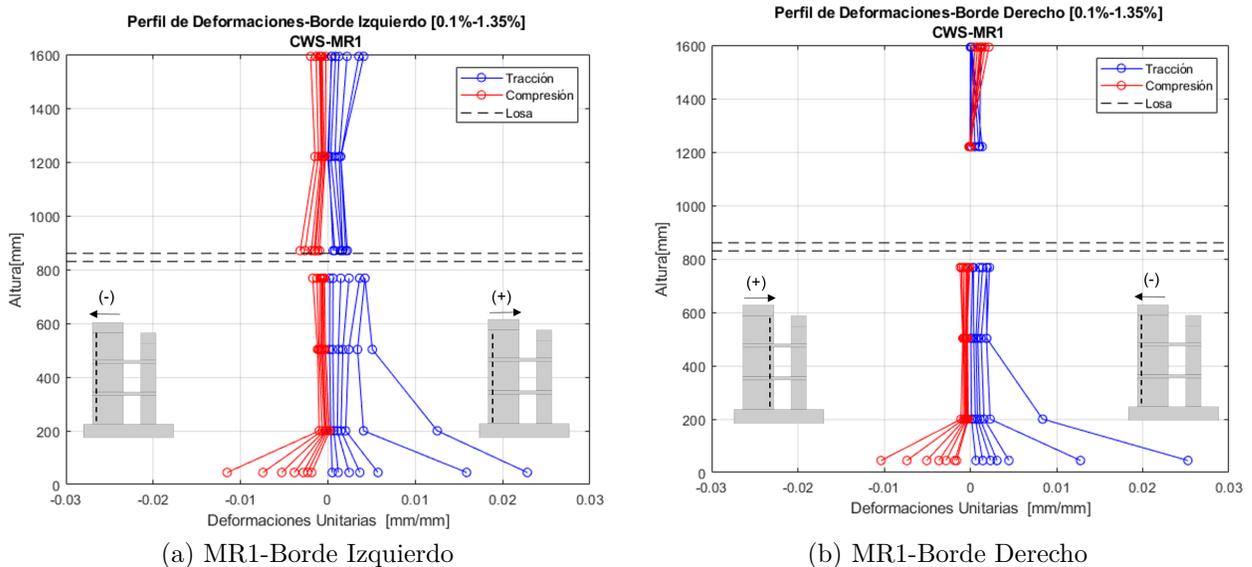


Figura 5.29: Perfil de Deformaciones en Altura-Muro MR1

El efecto de contribución de deformaciones en la losa superior no fue abordado, debido principalmente a que no había puntos de control dispuestos sobre este elemento en ambos muros, por lo que no fue posible capturar el comportamiento en esta zona.

5.2.4.2.2. Muro MR2

Análogo al muro MR1, se tiene que las deformaciones a tracción alcanzadas en la base son similares, tanto a desplazamientos positivos y negativos, respectivamente.

En cuanto a las deformaciones por compresión, se tiene que el daño se concentra principalmente en el borde derecho.

Un aspecto relevante es que los valores a compresión del borde derecho se presentan hasta una altura aproximada de $H=495$ [mm], alcanzando valores de $\varepsilon_c = -0.001$, incluso teniendo desprendimiento de material a derivas bajas.

Luego, las deformaciones a compresión decrecen en altura, tomando valores muy cercanos a cero en la zona donde se encuentra ubicada la losa.

En cuanto a las deformaciones a tracción, se alcanzan deformaciones unitarias no menores sobre la losa, alcanzando valores de $\varepsilon_t = 0.0046$ en esta zona al 1.35 % de drift.

En ambos bordes se tiene un comportamiento similar a tracción en la zona inferior, pero existe diferentes comportamiento a compresión, como se comentó previamente.

En este apartado se tiene que no se dispone de información del borde izquierdo por errores de funcionamiento del sensor, por lo que solo se pudo abordar el comportamiento del muro hasta $H=502.5$ [mm].

En este sentido, podemos notar que los bordes no adyacentes a la zona de acoplamiento de la losa registran mayores daños, lo cual se puede observar tanto en las mediciones, como en la evolución de las grietas en este muro.

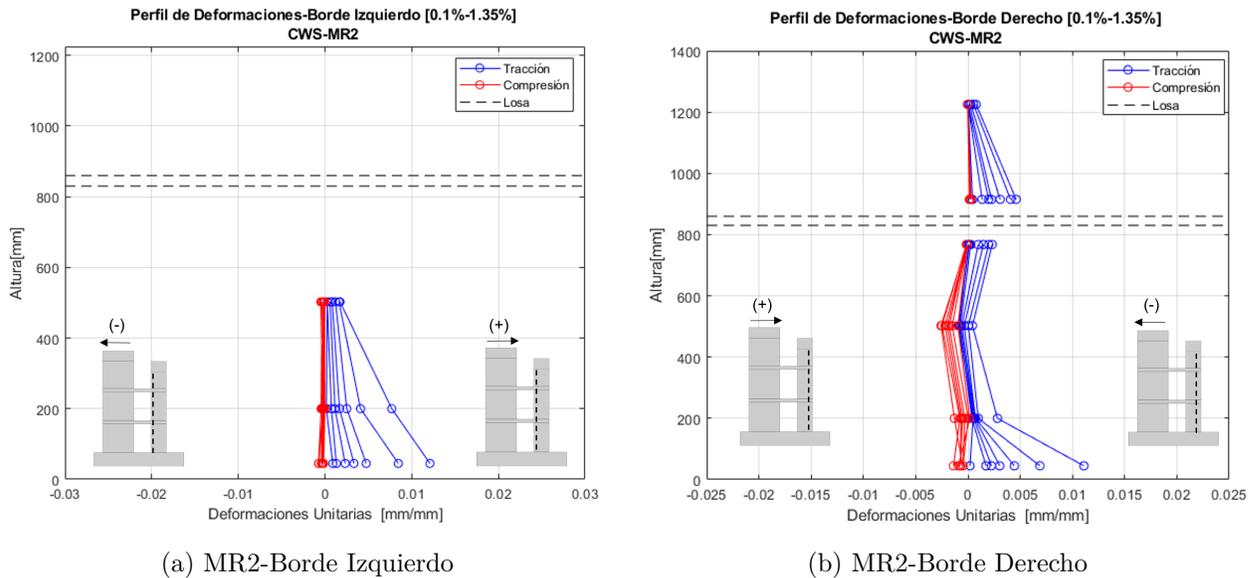


Figura 5.30: Perfiles de Deformación en Altura- MR2

En general, considerando los resultados obtenidos, podemos notar que los muros poseen un comportamiento asimétrico en cuanto a lo que respecta a deformaciones. Se presentan grandes deformaciones en la zona de la base, principalmente, lo cual ratifica que la mayor concentración de daños en ambos muros se genera en esta zona.

Existen otra zona de interés, en donde también se presentan altos niveles de deformaciones, como lo es la zona de acoplamiento de la losa inferior, en ambos muros. Se procuró capturar este comportamiento a través de la disposición de los sensores, pero dado a que estos puntos de medición estaban apoyados sobre la losa y no empotrados en el muro, la medición fue afectada por la rotación del elemento de acople.

De este análisis se excluye en comportamiento en ambos muros en $H=1780$ [mm], punto en donde se encuentra la losa superior. Esto se debe a que no se disponían de puntos de medición sobre este elemento, por lo cual no fue posible estudiar el comportamiento de la losa en los puntos donde se genera el acoplamiento.

5.2.4.3. Rótula Plástica

En esta sección, utilizamos la información presentada en los perfiles de deformación en altura para estimar la longitud de la rótula plástica en cada muro. El cálculo de este parámetro se puede realizar a partir de las deformaciones unitarias a tracción que se generan en el muro en sus bordes. Con lo anterior, se puede determinar la localización del daño en el muro y cuanto este se extiende en altura.

En este sentido, se busca identificar hasta que altura el muro alcanza deformaciones unitarias a tracción iguales o superiores al valor de la fluencia de la armadura de borde (ε_y) obtenido experimentalmente, el cual se encuentra en la tabla 4.1, dado a que ambos muros utilizan diferentes diámetros en su refuerzo de borde.

Con lo anterior es posible determinar el l_p^* , utilizando la metodología de Chan [28], la cual corresponde a la mitad de la distancia medida desde la base hasta la altura donde se alcanza la fluencia. La medición de este parámetro fue realizada para cada nivel de deriva de techo alcanzada, dado a que la longitud de la rótula plástica varía con el desplazamiento de techo y otros aspectos mencionados en el marco teórico.

Dada las limitaciones impuestas por la ubicación de los sensores, solo se pudo tomar valores discretos, ya que no fue posible obtener mediciones continuas en toda la longitud del borde en cada muro. Esto, sin embargo, sobreestima este parámetro al tener puntos discretos de medición.

Al contar con puntos discretos, se realizó una línea de tendencia de los valores obtenidos desde los perfiles de deformación en altura. Adicionalmente, se realizó una comparación de los valores de l_p con ecuaciones presentadas en la literatura. Las ecuaciones utilizadas para realizar este análisis corresponden la ecuación planteada por Paulay y Azumeri 2.7 (1993) y Bohl y Adebar [13] (2011), expresiones previamente explicadas en el marco teórico.

Cabe mencionar que estas expresiones fueron deducidas a partir de estudio de muros aislados, no en muros acoplados, por lo que no se tiene en cuenta la variación de la carga axial causado por el aporte del corte de ambas losas, ni la variación de l_p por deriva de techo.

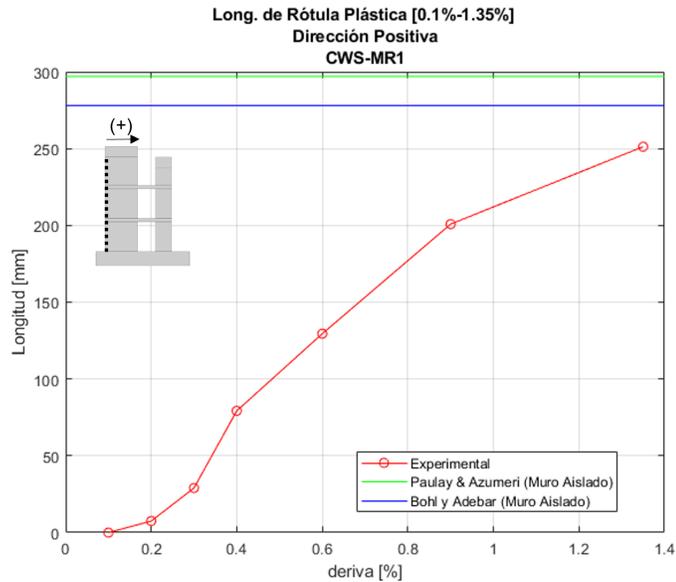
Aún considerando lo anterior, se realizó una estimación de la carga axial aportada por efecto del corte que ejercieron las losas sobre ambos muros, la cual fue variando de acuerdo a la dirección de desplazamiento. Asumiendo que la losa se encuentra en fluencia, se puede estimar el aporte en carga axial por cada losa a través de la siguiente expresión:

$$P_{extra} = N^{\circ} P_{isos} \cdot V_n \quad (5.1)$$

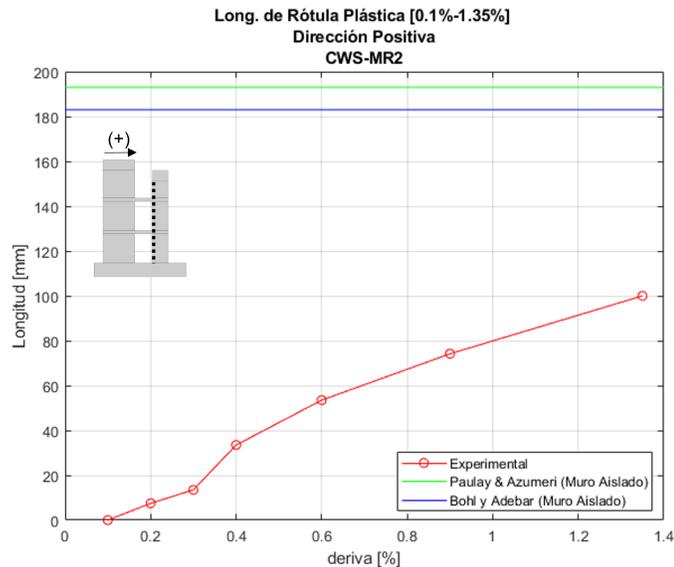
En donde V_n corresponde al corte nominal de la losa y l al largo de la losa de acoplamiento. El cálculo del corte se realizó de acuerdo con la información de los planos de la losa en la zona de acople, como si fuera una viga.

El resultado obtenido es $P_{extra} = 18[tonf]$, el cual esta dado a la dirección de desplazamiento del muro. En particular, el muro comprimido es que percibe esta carga axial extra debido al efecto del corte aportado por cada losa.

Los gráficos obtenidos para la dirección positiva se presentan a continuación:



(a) MR2-Borde Izquierdo



(b) MR2-Borde Derecho

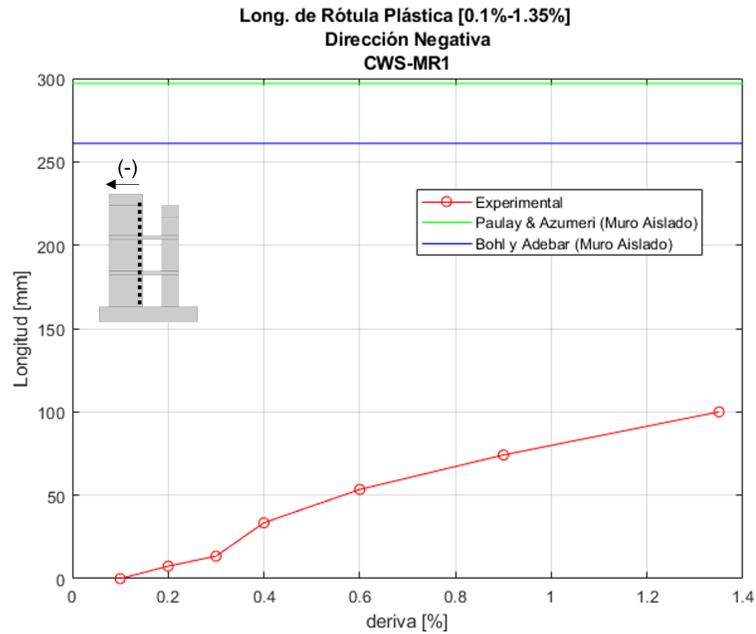
Figura 5.31: Evolución rótula plástica en dirección positiva. En ambos muros

En esta dirección podemos notar que el largo de la rótula plástica en MR1 fue similar al caso aislado, valor entregado por la expresión de Bohl y Adebar[13]. En el caso de la expresión entregada por Paulay y Azumeri[3] se obtuvo una sobreestimación de l_p , lo cual se debe principalmente a que no se tiene en consideración la influencia de la carga axial en el largo de la rótula plástica.

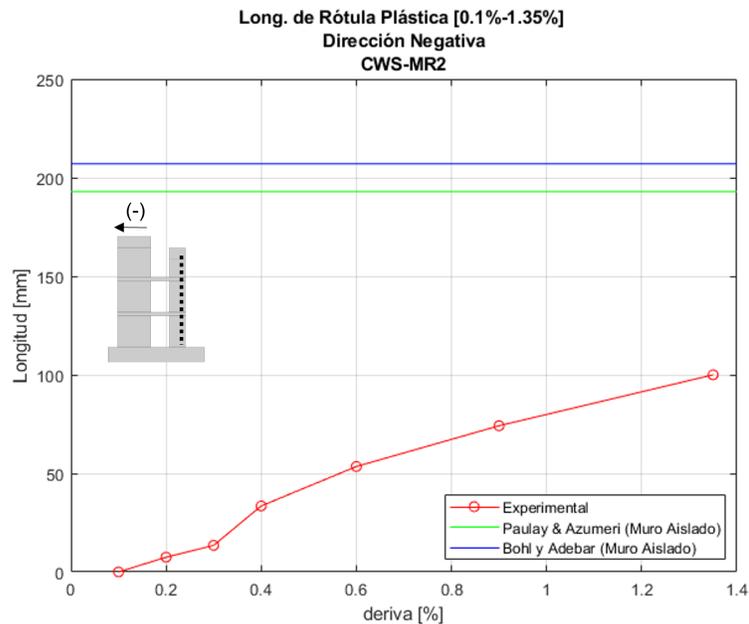
En cuanto al muro MR2, se tiene que el valor experimental alcanzado es aproximadamente la mitad del valor entregado por las ecuaciones previamente comentadas. Estas ecuaciones están realizadas para muros aislados, sin considerar la variación de la carga axial por efecto del acoplamiento de las losas.

En este sentido, se puede notar una reducción de la rótula plástica de un 50 % aprox. en el muro pequeño.

Por otro lado, ante desplazamientos negativos, se observa que la carga axial aportada por el esfuerzo de corte de las losas pasa como carga axial al muro MR1. Considerando lo anterior, se obtuvieron los siguientes resultados:



(a) MR2-Borde Izquierdo



(b) MR2-Borde Derecho

Figura 5.32: Evolución rótula plástica en dirección negativa. En ambos muros

En este caso se puede observar que la longitud de la rótula plástica alcanzado experimentalmente es similar en ambos bordes de los muros. En este sentido, podemos notar una reducción de L_p en MR1, lo cual es consistente dado a que el muro en este sentido de desplazamiento se encuentra en compresión, contando con la carga axial aportada por efecto del corte de las losas de acople.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa una reducción de la rótula plástica en MR1 de 60 % aproximadamente al 1.35 % de drift en comparación al valor obtenido por la expresión de Bohl y Adebar. En este sentido, se aprecia que la ecuación de Azumeri y Paulay sobrestima este valor con un amplio margen, entregando 3 veces el valor experimental alcanzado.

Por otra parte, los resultados obtenidos para MR2 indican que l_p mantiene el mismo valor alcanzado en la dirección positiva de desplazamiento, lo cual difiere del comportamiento esperado, dado a que el muro no cuenta con la carga axial adicional por el aporte por corte de las losas de acoplamiento. Este mismo efecto se ve reflejado también en la expresión de Bohl y Adebar, en donde para la dirección negativa se asume una carga axial en el muro de $P= 0$ [tonf].

Este aspecto se puede deber a diversas variables, en particular a un error de la medición de los sensores dispuestos en la fibra externa de MR2 o por considerar valores discretos para la estimación de este parámetro en el caso experimental. Para obtener una mejor precisión, es recomendable disponer de varios puntos de medición en los bordes de cada muro, de tal forma de poder levantar la información del perfil de deformaciones con mayor continuidad y con ello identificar el punto exacto en donde se genera la fluencia en el muro.

Podemos observar que los valores obtenidos a partir de estas expresiones difieren de los resultados experimentales. Lo anterior se debe principalmente a que son ecuaciones utilizadas para muros aislados, y solo consideran algunos parámetros de estos, como la geometría, si estos son sometidos a carga axial constante, sin considerar la variación de este parámetro por deriva de techo. En el caso de sistemas acoplados se tiene un aspecto adicional que es la variación de la carga axial debido al aporte del esfuerzo de corte sobre los muros, por lo que estas estimaciones analíticas solo deben ser consideradas para realizar una comparación con muros aislados.

5.2.4.4. Deformaciones por Corte

Considerando la necesidad de evaluar las deformaciones por corte y como este se distribuyen en ambos muros, utilizamos las mediciones obtenidas de los sensores dispuestos en diagonal en la zona del primer piso, los cuales se pueden apreciar en el esquema 4.31. Para estas mediciones, podemos utilizar la expresión 2.9 para cuantificar cual es la deformación por corte en el primer piso en ambos muros y ver su magnitud a diferentes niveles de demanda.

Considerando lo anterior, los resultados obtenidos para diferentes derivas en ambos muros son los siguientes:

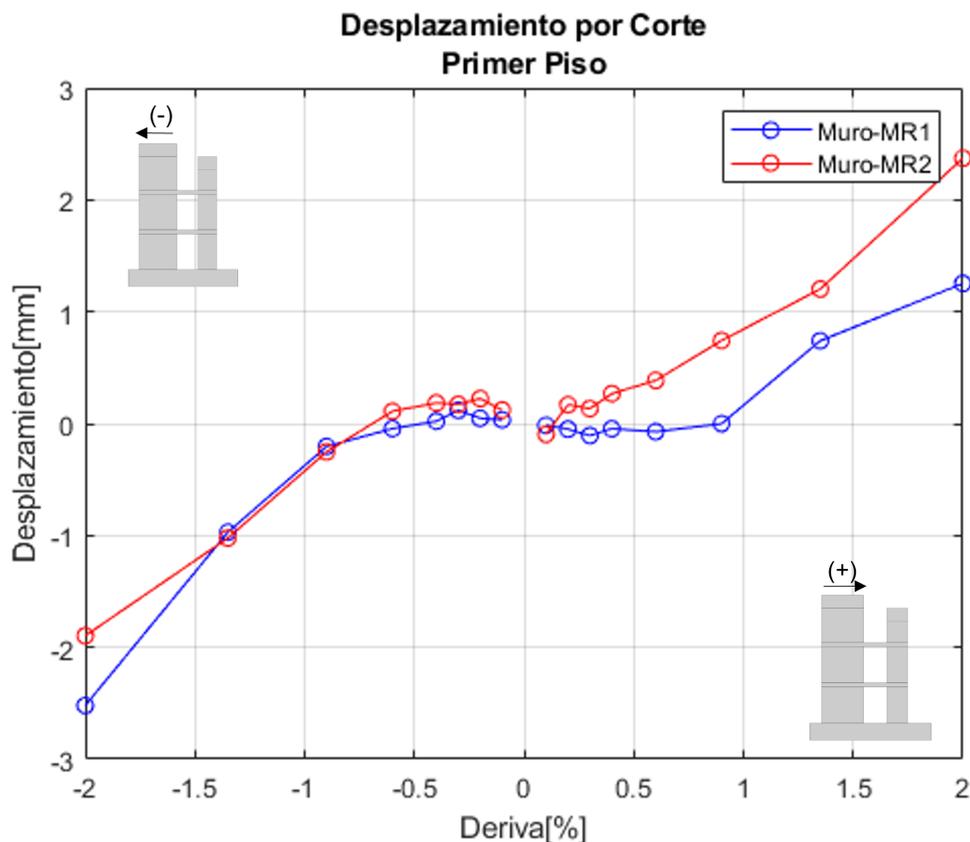


Figura 5.33: Desplazamientos a Corte, primer Piso en Ambos Muros

A partir del gráfico presentado previamente, podemos notar que el muro que desarrolla más deformaciones a corte es el muro comprimido, que en este caso es MR2. Esto es esperable, debido a que gran parte de la deformación por flexión es asumida por el muro MR1 en esta dirección, desarrollando menores deformaciones a corte.

Por otro lado, ante desplazamientos negativos, se tiene que el muro MR1 (el cual es comprimido en esta dirección) es el que muestra mayor deformación a corte, lo cual se debe principalmente a que las deformaciones a flexión son mayoritariamente asumidas por el muro MR2.

En este sentido podemos notar que las deformaciones por corte se transmiten de forma muy aproximada en cada muro, teniendo leves diferencias de acuerdo con la dirección de desplazamiento.

Con los datos anteriormente mencionados, también es posible analizar la contribución del corte en el desplazamiento de techo del primer piso.

Para lo anterior, dado a que no se dispuso de un LVDT de control para la medición del desplazamiento de techo en el primer piso, se utilizaron los desplazamientos medidos a través de fotogrametría, los cuales se encuentran detallados en el trabajo realizado Génesis Díaz [29].

Los resultados para los desplazamientos de techo en el primer piso se presentan a continuación:

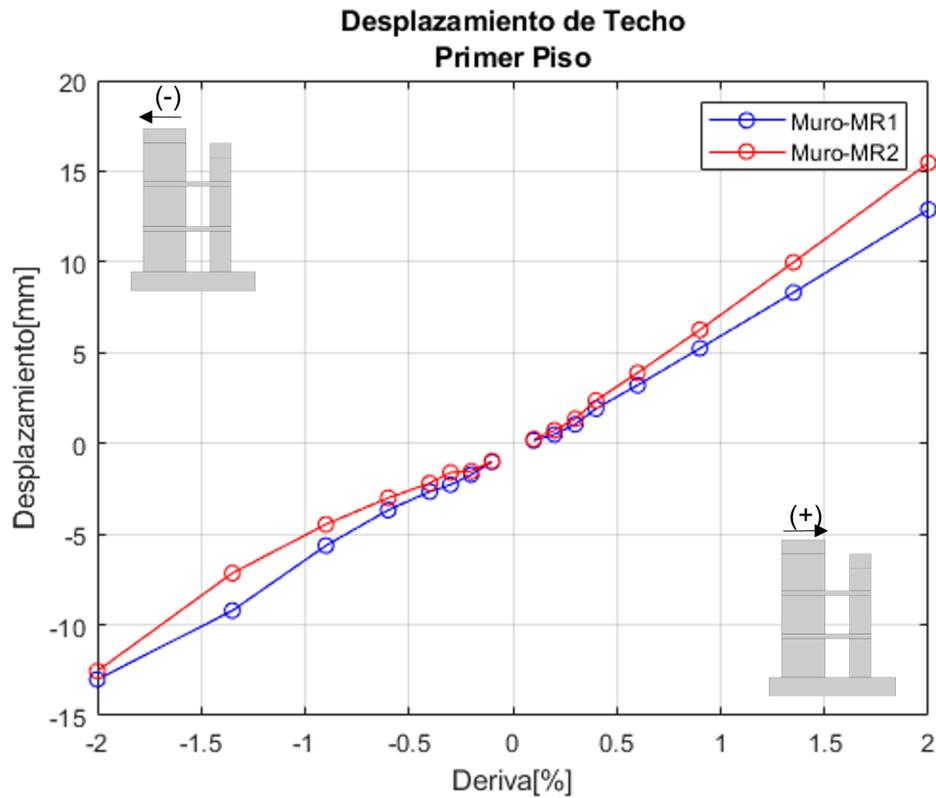


Figura 5.34: Desplazamientos de Techo Obtenidos por Fotogrametría- Primer Piso

Con lo anterior, es posible estimar la contribución de la deformación por corte en el primer piso en ambos muros, en términos porcentuales, determinando con ello el comportamiento de ambos. Considerando lo anterior, procedemos a estimar la contribución del desplazamiento por corte en el primer nivel a través de la siguiente expresión:

$$C_{corte} = \frac{Desp.Corte(U_s)}{Desp.Total(U_{total})} \quad (5.2)$$

Los resultados obtenidos para la contribución porcentual de desplazamiento de corte del muro se presentan a continuación:

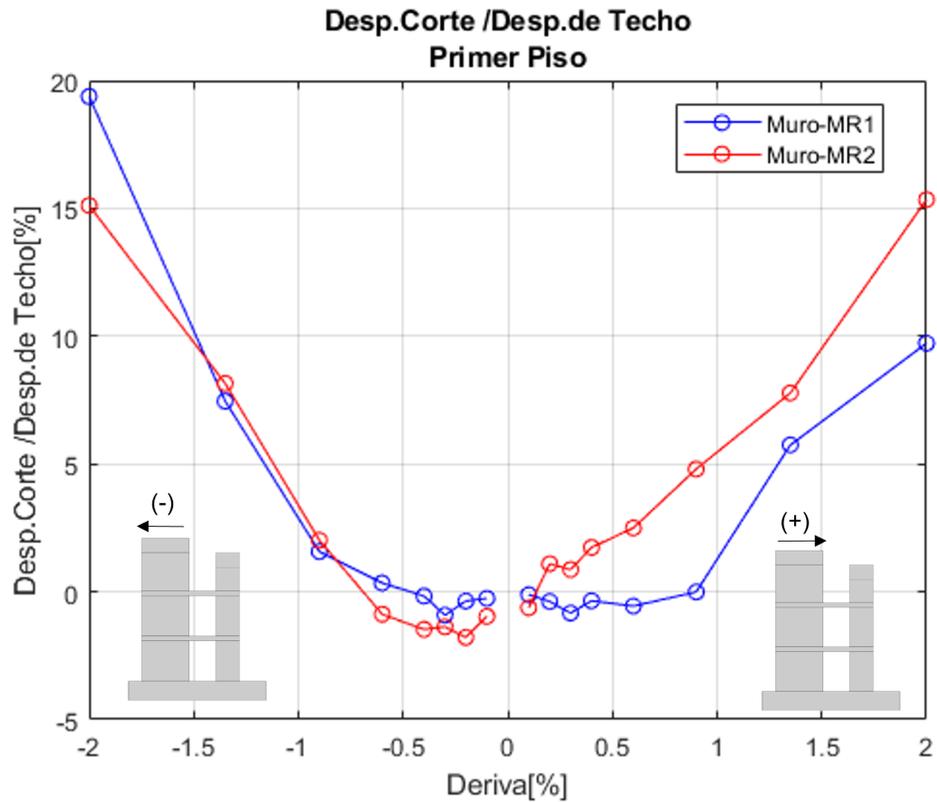


Figura 5.35: Desplazamientos de Techo Obtenidos por Fotogrametría- Primer Piso

A partir del gráfico podemos observar que la contribución de la deformación por corte en el primer piso varía entre 10-20 [%], siendo el muro comprimido el que asume la contribución más alta. En este sentido, al tratarse de porcentaje bajos, podemos inferir que el comportamiento del muro es principalmente a flexión.

5.2.4.5. Evolución del daño en Losas

Otro aspecto importante de analizar es la evolución del daño en las losas, lo cual nos permitirá comprender cual fue la contribución de estas en el desarrollo del ensayo.

En el siguiente gráfico se presentan las rotaciones que sufrió la losa durante la ejecución del ensayo hasta el 2%⁴:

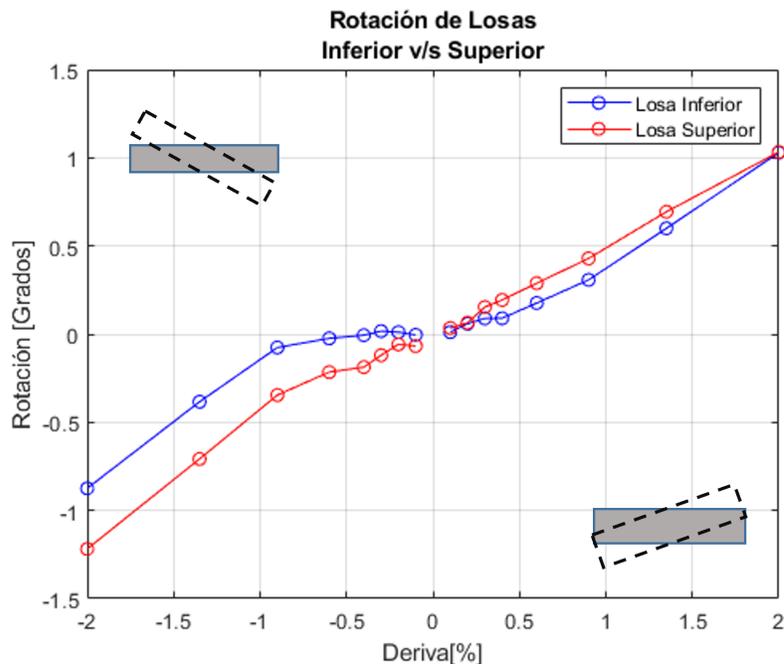


Figura 5.36: Desplazamientos a Corte, primer Piso en Ambos Muros

De acuerdo con lo observado, las grietas a flexión se comienzan a presentar al 0.6% drift en ambas direcciones, específicamente en la zona de acople. En este sentido, la losa superior es la que registra mayor daño, desarrollándose en esta mayor presencia de grietas.

También se pudo observar que la distribución de daño en ambos extremos de la losa es asimétrico, viéndose más afectado el extremo próximo al muro grande (MR1). Lo anterior es consistente con la rotación registrada a través de los inclinómetros dispuestos en cada losa.

Desde el drift del 1.35% se puede observar un mayor registro de daño en el extremo próximo al muro grande, observando mayor presencia de grietas en la losa superior a derivas negativas. Para drifts superiores al 2%, se puede observar un daño alto en ambos extremos de la losa superior.

Finalmente, para los últimos drift's alcanzados en el ensayo (3% y 4%, respectivamente), se puede distinguir la aparición de la rótula plástica en la losa superior, específicamente en el borde contiguo a MR1, lo que se aprecia especialmente en la exposición del refuerzo inferior.

⁴ Se incluyó solo las mediciones hasta el 2% de drift, dado a que las lecturas entregadas por los inclinómetros a drift's superiores sufrieron problemas debido a caídas de voltaje

La evolución del daño en ambas losas en la etapa final del ensayo se observa a continuación:

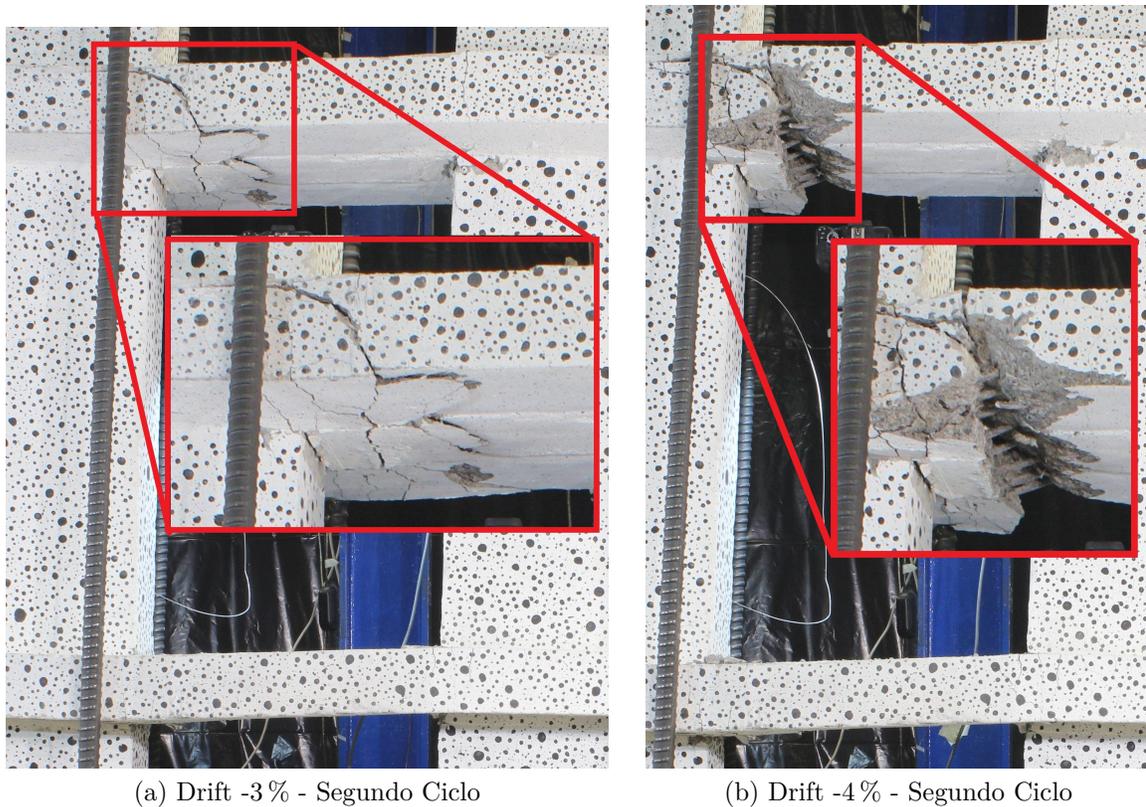


Figura 5.37: Evolución del daño en Losas- Drift

En cuanto al daño registrados en ambas losas, se puede apreciar que la losa superior es la que resulta más dañada en sus extremos, especialmente cerca del muro MR1.

La losa inferior tuvo un comportamiento a compresión, principalmente, registrando fisuras a flexión y desprendimiento de hormigón en ambos extremos.

Lo anterior impacta al comportamiento global de la probeta, pues al desarrollar una falla en la losa superior implicó que esta comenzara a rotar a grandes desplazamientos, oponiendo menor resistencia a desplazamientos positivos.

Para desplazamientos negativos, se puede apreciar que la losa superior es traccionada, lo cual implica un aumento de carga requerida para completar un desplazamiento similar al caso anterior. Este comportamiento se puede apreciar con detalle en la curva de histéresis del muro MR1 5.5.

Capítulo 6

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en el ensayo y posteriormente procesados, se logró obtener información relevante sobre el comportamiento de sistemas de muros acoplados. Además se pudo observar cuales son las ventajas que tiene este sistema en términos de capacidad y desempeño ante cargas cíclicas.

Con la finalidad de estudiar experimentalmente un sistema de muros esbeltos ($\frac{H}{L} > 3$), acoplados con losas, se llevó a cabo el ensayo de un sistema de muros rectangulares acoplados con losas de hormigón armado. El ensayo fue instrumentado con LVDT's y fotogrametría, siendo la primera la abordada en el presente trabajo. Se logró estudiar el comportamiento de ambos muros a nivel local y global.

Al analizar el comportamiento global de la probeta, podemos notar que ésta presentó una falla dúctil y que los desplazamientos máximos alcanzados por ambos muros fueron similares, con leves diferencias, de acuerdo con la dirección de desplazamiento. También se puede notar un buen desempeño, a pesar de estar acoplado a un muro con menores dimensiones.

Al observar la resistencia alcanzada por el muro grande (MR1), se tiene que éste alcanzó mayor resistencia a desplazamientos negativos que a desplazamientos positivos, con una diferencia de resistencia máxima de 5.9 [tonf]. Este efecto en la resistencia del muro se puede apreciar en los últimos drifts, lo cual se debe, principalmente, al efecto del acoplamiento de las losas, en particular a la resistencia aportada por el muro pequeño en tracción, tomando parte de la carga la dirección negativa de desplazamiento.

En cuanto al comportamiento local de ambos muros, se logró apreciar que existe un comportamiento simétrico en cuanto al punto de fluencia en la base respecta, fluyendo en este caso el muro MR1 al 0.3% de drift. También se puede notar en la evolución del daño que el muro MR1 fue el que presentó mayores grietas, además de mayores deformaciones a tracción y compresión. En este sentido la fuerza axial a la cual fue sometido el muro tiene influencia en este comportamiento, desplazando la línea neutra del muro hacia el extremo traccionado, generando un área de mayor compresión.

El daño en altura se presentó principalmente en las zonas de acople, siendo la losa superior la más dañada. En esta zona, contigua a muro MR1 se generó la rótula plástica en la losa, observándose pérdida del recubrimiento y exposición del refuerzo. En la losa inferior no se registró el mismo nivel de daño, presentando grietas a flexión en ambos extremos, con leves pérdidas de hormigón en la parte superior, debido a la apertura y cerrado de grietas. No se pudo concluir si efectivamente se generaron rótulas plásticas en dichos puntos, pues este aspecto no fue medible con la instrumentación. Aún así, es posible observar una concentración de daño en los puntos de acoplamiento, efecto esperado a nivel teórico, observándose mayores deformaciones en estas zonas.

Con respecto a la deformación por corte, se tiene que a pesar que ambos muros cuenta con diferentes dimensiones, el muro que se encuentra comprimido es el que se lleva la mayor contribución por corte, la cual alcanzó una contribución del 20 % del desplazamiento en el primer piso en MR1 y 15 % en MR2. Considerando lo anterior, se puede notar que ambos muros a nivel del primer piso alcanzan niveles de deformación por corte muy similares hasta el 2 % de drift.

Por otra parte, se puede notar que en el desarrollo de rótulas plásticas en ambos muros, se puede notar que los valores obtenidos experimentalmente fueron menores a los alcanzados por expresiones presentadas en la literatura. El valor de l_p depende de múltiples factores, como lo son las dimensiones de los muros, el endurecimiento del acero, carga axial y deriva de techo. En este sentido, los valores obtenidos experimentalmente son aproximadamente un 50-60 % menores a los valores teóricos. Esto se puede dar principalmente por ser expresiones deducidas a partir del comportamiento de muros aislados, y no consideran todos los aspectos previamente mencionado, en particular la variación de la carga axial.

También es posible observar que los valores de l_p varían de acuerdo a si el muro se encuentra en tracción o compresión.

Lo anteriormente expuesto permite establecer que este tipo de sistemas de muros ayuda a obtener mayor resistencia, mejor distribución de daños y un buen comportamiento dúctil en comparación a un muro aislado. Además permite distribuir el daño en dos muros con diferentes dimensiones y cuantías, disminuyendo con ello las deformaciones máximas alcanzadas en cada muro. Junto con esto, se logró observar que se cumple el comportamiento teórico en las zonas donde se esperaba la formación de rótulas plásticas y una reducción de esta variable en muros, en comparación a expresiones presentadas para muros aislados.

Los diversos datos obtenidos en este ensayo permiten sacar mejores conclusiones aplicables a la realidad de la construcción de edificios en altura, que casos estudiados con muros aislados. Este aspecto le da mayor representatividad a este ensayo, pues es una forma mas cercana a la realidad de cómo funcionan estos en conjunto. La ductilidad observada en el sistema es especialmente relevante ya que en países sísmicos como Chile es importante proveer de estas características a las estructuras desde su diseño.

Junto con esto, conocer las áreas de mayor presencia de daños, en este caso bases y puntos de acople, es útil para el reforzamiento de ellas tanto en la concepción como construcción de edificios en el país.

Bibliografía

- [1] Pizarro, C. F. H., “Estudio de la respuesta numérica de losas acopladas con muros rectangulares de hormigón armado,” 2019.
- [2] Chaperon Gamboa, M. M., “Estudio de la respuesta numérica de losas acopladas con muros t de hormigón armado,” 2018.
- [3] Paulay T, P. M., “Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings,” 1992.
- [4] Sherif El-Tawil, Kent A. Harries, P. J. F. B. M. S. y Kurama., Y., “Seismic design of hybrid coupled wall systems: State of the art,” 2008.
- [5] Paulay, T., “The displacement capacity of reinforced concrete coupled walls,” 2002.
- [6] Kent.A.Harries, M., “Ductility and deformability of coupling beams in reinforced concrete coupled walls,” 2001.
- [7] Massone, L. M. y I.Alfaro, J., “Displacement and curvature estimation for the design of reinforced concrete slender walls,” 2016.
- [8] y Wong Yang Chee, A. C., “Design of floor slabs coupling shear walls,” 1983.
- [9] Barrales, F. R., “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,” 2012.
- [10] Aguayo, M. I. V., “Análisis no lineal del sistema de muros rectangulares acoplados frente a cargas cíclicas y diseño de su montaje experimental,” 2022.
- [11] Torres, M. A. S., “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,” 2016.
- [12] Paulay, T. y M.J.N.Priestley, “Stability of ductile structural walls,” 1993.
- [13] Adebar, P. y Bohl, A., “Plastic hinge lengths in high-rise concrete shear walls (2011),” 2011.
- [14] Massone, L. M. y Wallace, J. W., “Load-deformation responses of slender reinforced concrete walls,” 2004.
- [15] Yun-Cheul Choi, Hyun-Ki Choi, C.-S. C., “Behaviour of shearwalls with slabs and openings,” 2016.
- [16] Min-Yuan Cheng, Rijalul Fikri, C.-C. C., “Experimental study of reinforced concrete and hybrid coupled shear wall systems.,” 2014.
- [17] Olivares, S. A. D., “Estudio experimental y modelamiento en elementos finitos de muros esbeltos de hormigón armado con discontinuidades tipo bandera.,” 2016.

- [18] Rojas, I. A. M., “Ensayo de muros bandera de hormigón armado con carga lateral cíclica medido por fotogrametría y comparado con modelo puntal-tensor,” 2016.
- [19] Montenegro, J. A. R., “Construcción y ensayo de probetas de muros de hormigón armado con discontinuidades centrales en la base,” 2016.
- [20] Santibáñez, N. S., “Estudio experimental y numérico de la respuesta de sistemas de muros rectangulares acoplados con losas de hormigón armado [**Tesis de Magíster no Publicada**],” 2023.
- [21] I.N.N, “Hormigón- determinación de la docilidad- método del asentamiento del cono de abrams (nch1019-2009),” 2009.
- [22] de Normalización, I. N., “Hormigón- confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y por hendimiento (nch1017-2009),” 2009.
- [23] Benavides, F. A. M., “Estudio experimental y analítico de muros t de hormigón armado ante cargas cíclicas,” 2018.
- [24] 374, A. C., “Acceptance criteria for moment frames based on structural testing and commentary:an aci standard,” 2005.
- [25] Schaevitz.com, “Schaevitz® lvdt gage head technology,” 2010.
- [26] Benavides, F. M., “Estudio experimental y analítico de muros t de hormigón armado ante cargas cíclicas,” 2018.
- [27] Sensor, S., “Guide accustar electronic clinometer (2012),” 2012.
- [28] W.W.L, C., “The ultimate strength and deformation of plastic hinges in reinforced concrete frameworks,” 1955.
- [29] Sanhueza, G. D., “Estudio de muros rectangulares acoplados con losas de hormigón armado sometidos a cargas cíclicas utilizando fotogrametría [**Tesis de Pregrado no Publicada**],” 2023.

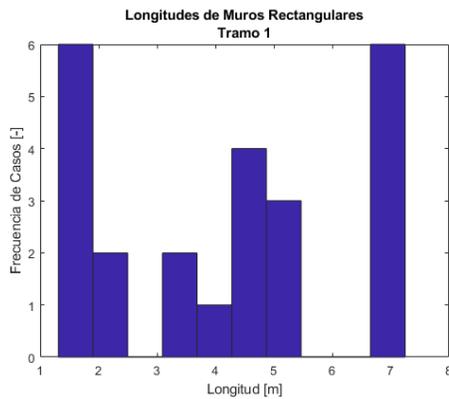
Anexo A

Longitud y Espesor De Muros

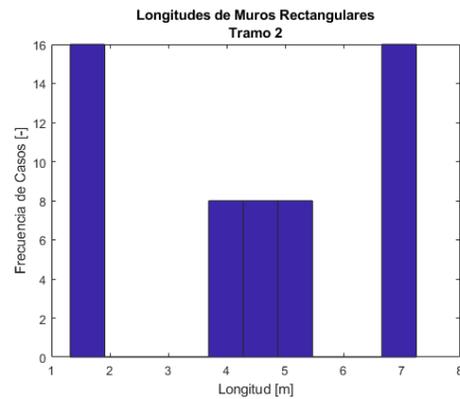
A continuación se presentan los espesores y longitudes de muros estudiados en el capítulo 2, de acuerdo con el tipo de geometría de muros mencionados previamente.

A.1. Muros Rectangulares

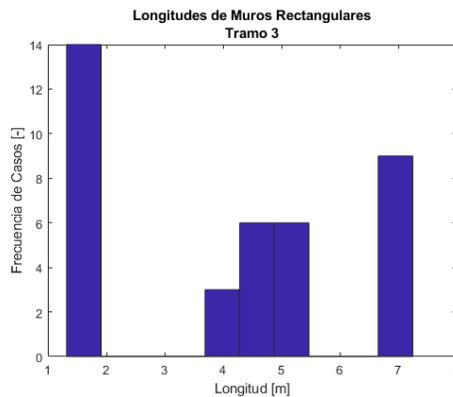
A.1.1. Longitudes por Tramos



(a) Tramo 1.



(b) Tramo 2



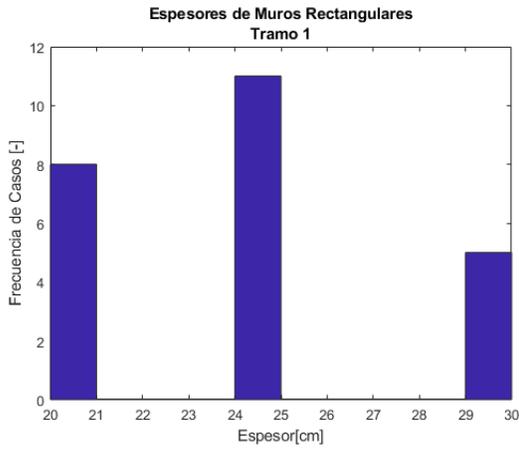
(c) Tramo 3.

Figura A.1: Espesores de Muros Rectangulares por Tramos

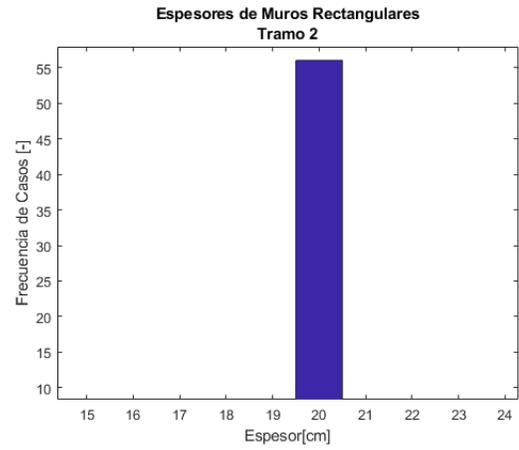
Tabla A.1: Longitudes Promedio por Tramos

Tramos	Longitud Promedio [m]
1	4.104
2	4.363
3	4.205

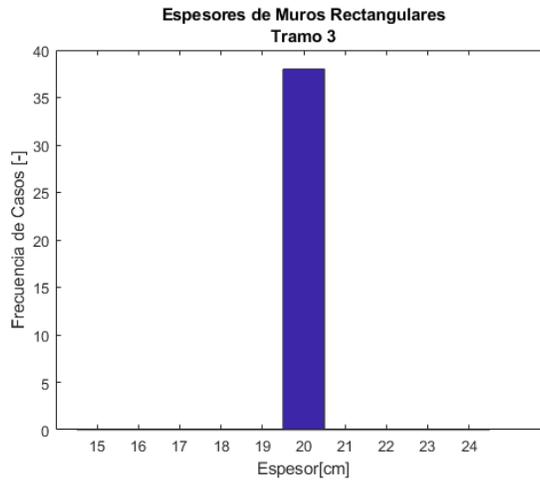
A.1.2. Espesores por Tramos



(a) Tramo 1.



(b) Tramo 2



(c) Tramo 3.

Figura A.2: Espesores de Muros Rectangulares por Tramos

A.2. Muros L

A.2.1. Longitudes por Tramos

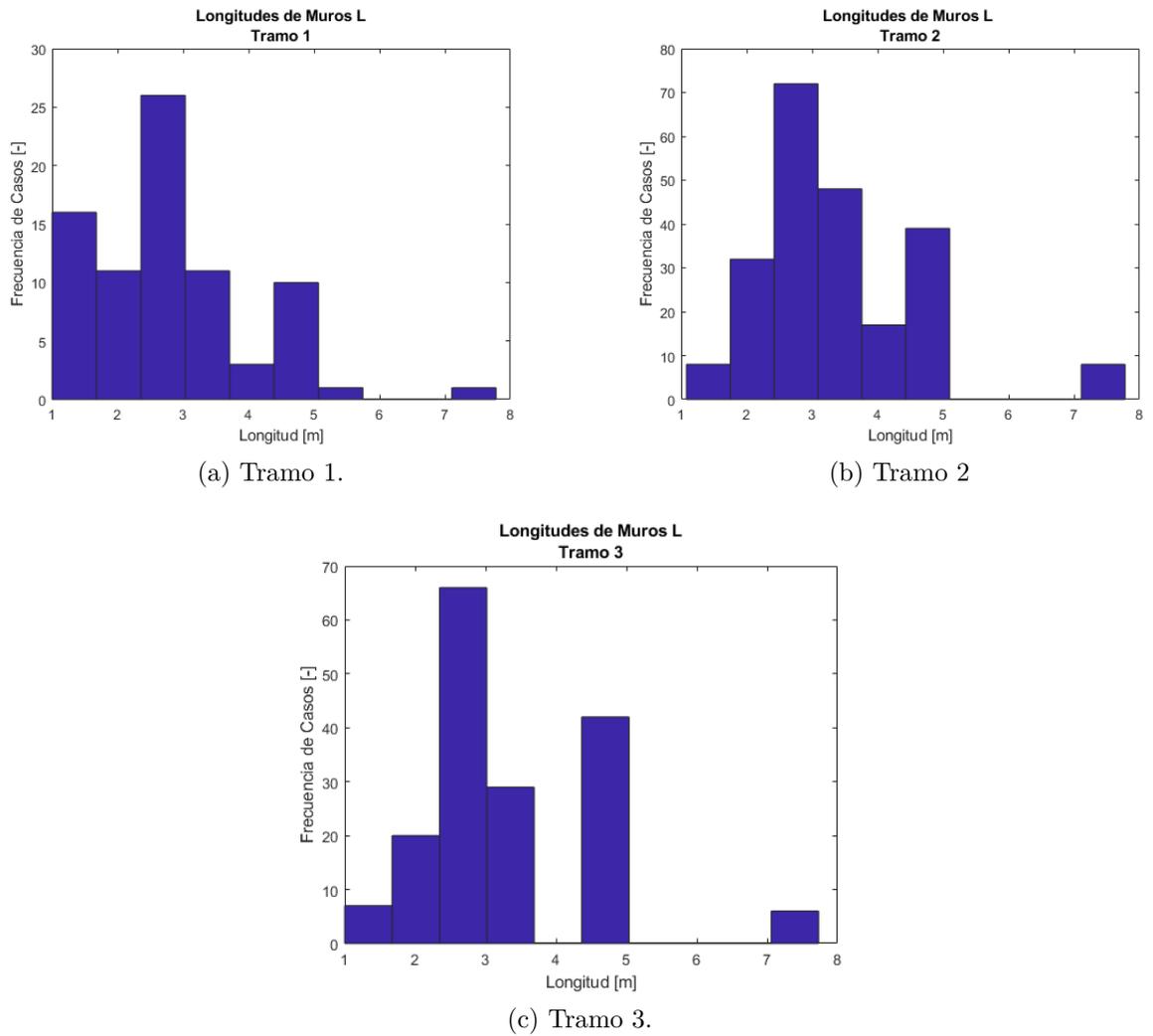


Figura A.3: Longitud de Muros L-Sector Pasiillo por Tramos

Tabla A.2: Longitudes Promedio por Tramos

Tramos	Longitud Promedio [m]
1	2.87
2	3.40
3	3.35

A.2.2. Espesores por Tramos

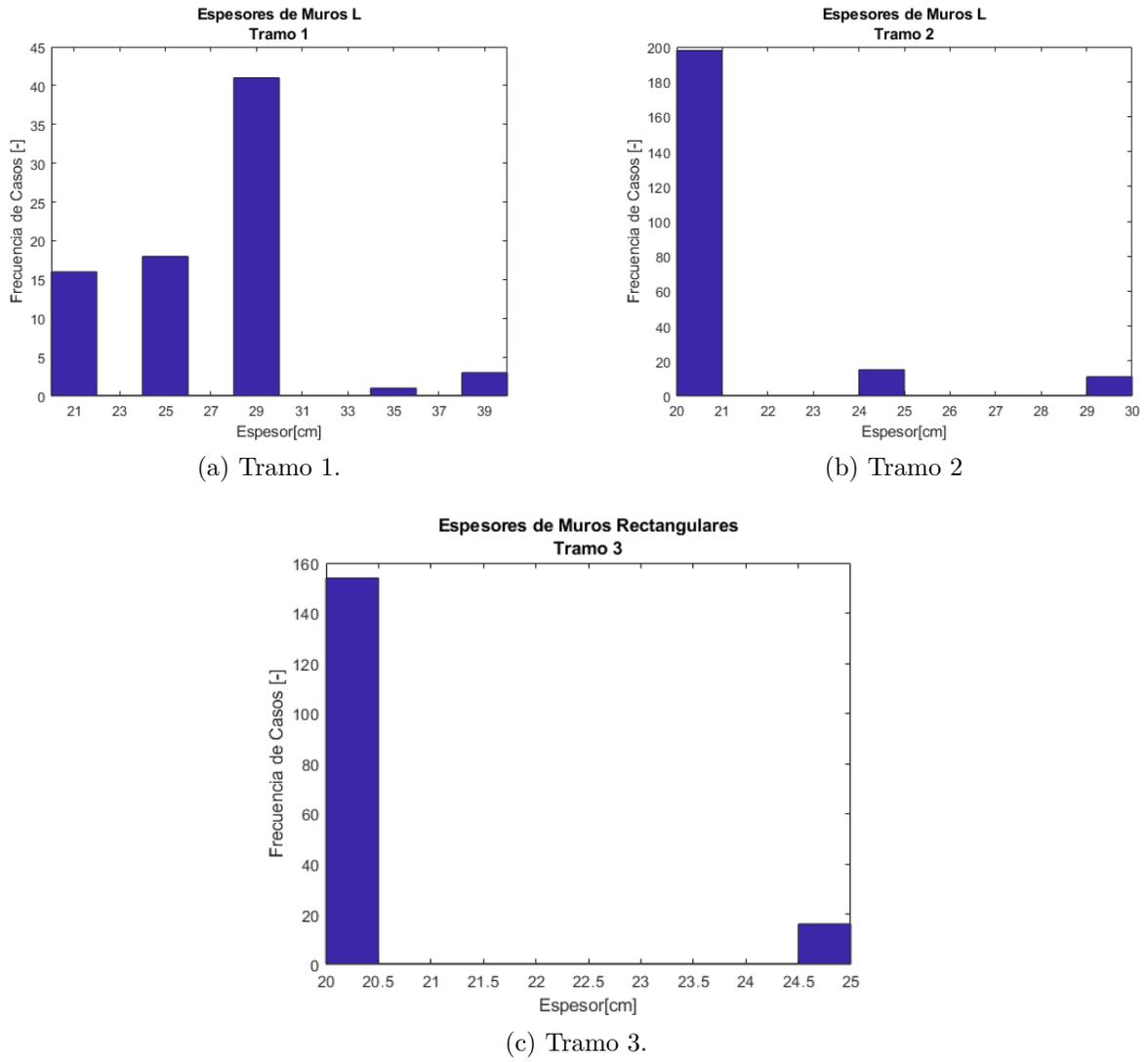


Figura A.4: Espesores de Muros L-Sector Pasillo por Tramos

Tabla A.3: Espesor Promedio por Tramos

Tramos	EspesorPromedio [cm]
1	27.278
2	20.825
3	20.470

A.3. Muros T- Alas

A.3.1. Longitudes por Tramos

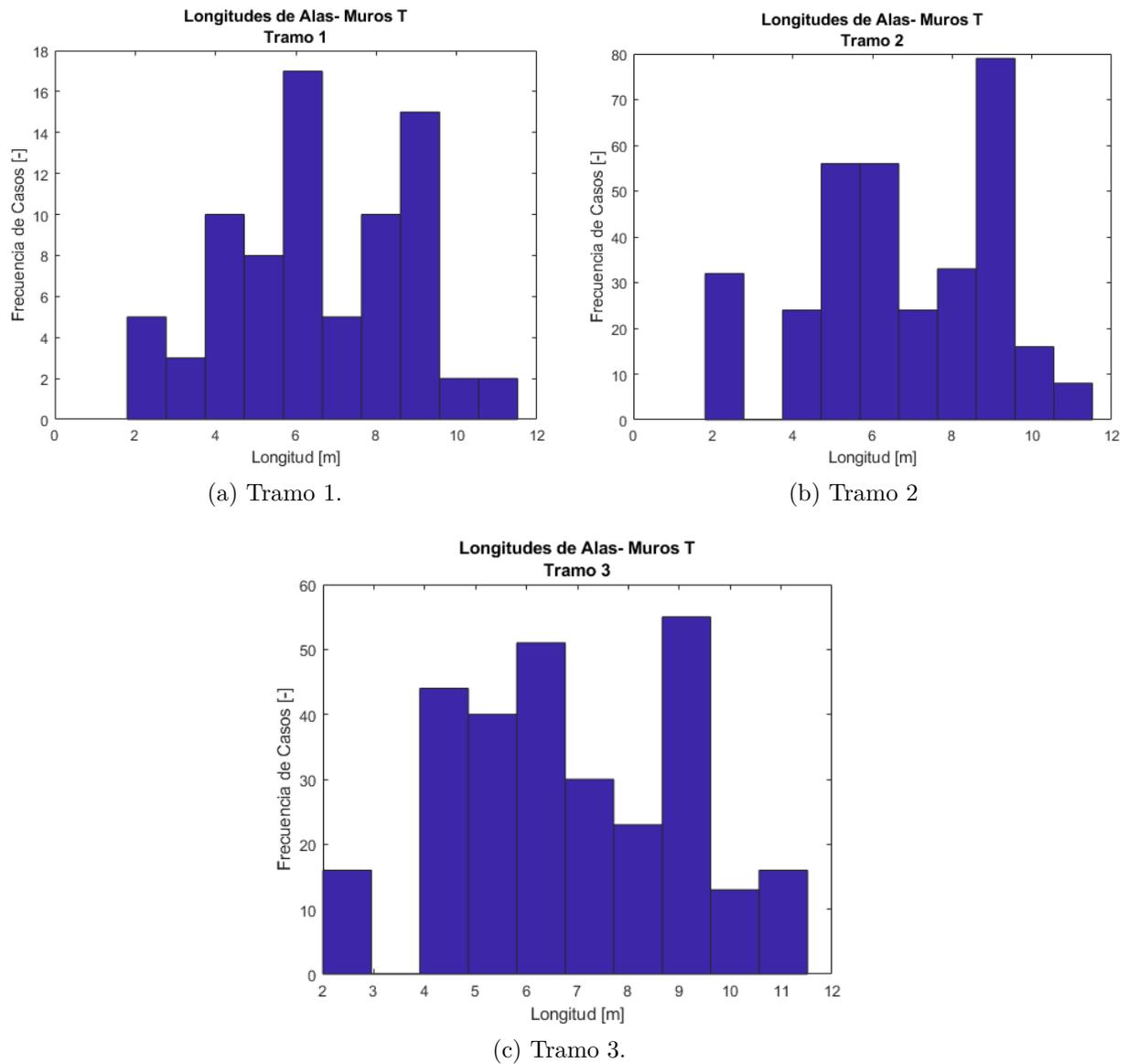
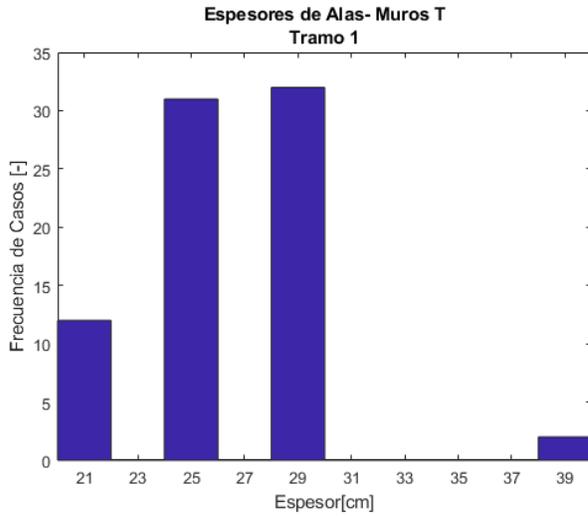


Figura A.5: Espesores de Muros T- Alas

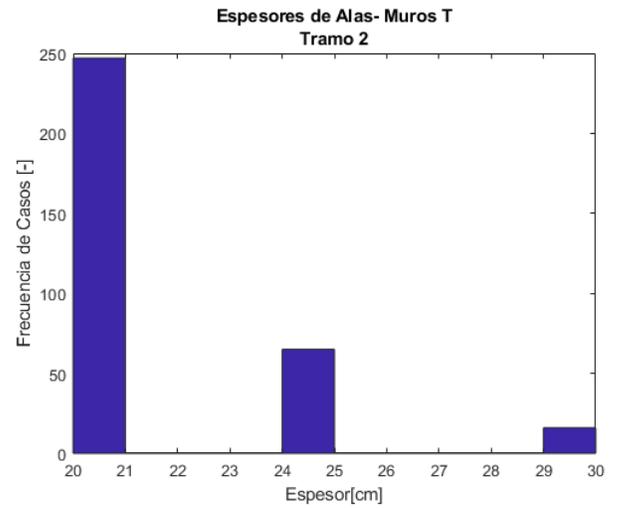
Tabla A.4: Longitudes Promedio por Tramos

Tramos	Longitud Promedio [m]
1	6.605
2	6.754
3	6.953

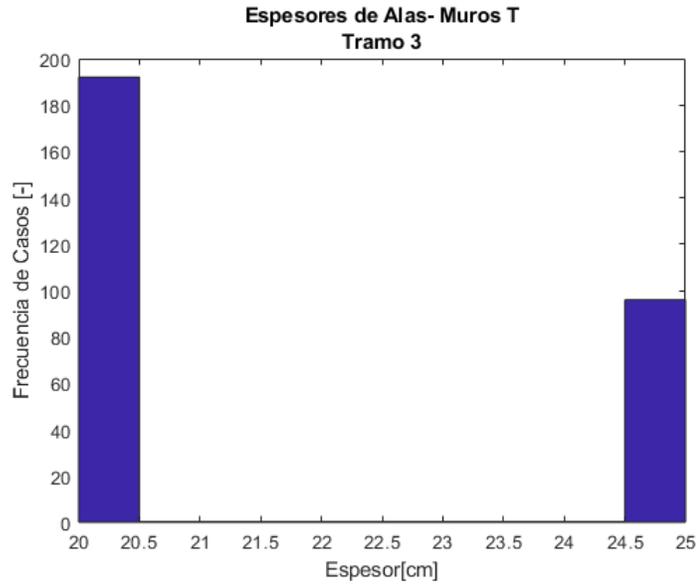
A.3.2. Espesores por Tramos



(a) Tramo 1.



(b) Tramo 2



(c) Tramo 3.

Figura A.6: Espesores de Muros T- Alas

Tabla A.5: Espesor Promedio por Tramos

Tramos	Espesor Promedio [cm]
1	26.688
2	21.478
3	21.667

Anexo B

Cálculo de Cuantías de Acero en Muros

En el presente apartado se explicará el procedimiento realizado para el cálculo de cuantías de acero, en particular en elementos de borde de cada tipo de muro aboradado en el capítulo 2, en donde se entregará una breve explicación de la metodología utilizada para el cálculo de las cuantías de borde y central (transversal y longitudinal) de los muros aboradados en el estudio.

Cabe señalar que el proceso explicado a continuación se repite para los 3 tipos de geometría de muros aboradados en el presente trabajo.

Considerando lo anterior, se utiliza como ejemplo para la estimación de la cuantía de refuerzo longitudinal la siguiente figura presentada a continuación:

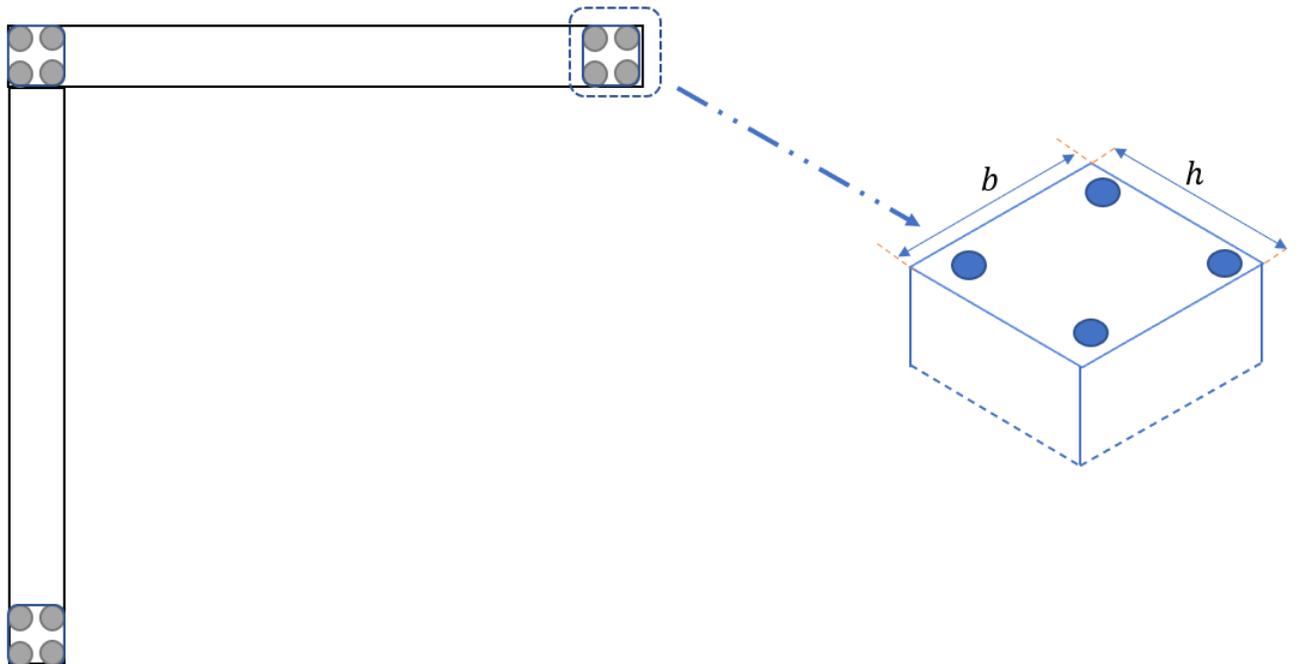


Figura B.1: Ensayo de Tracción para Barras del $\phi 16$

Para el cálculo de refuerzo longitudinal de borde, se consideran las dimensiones indicadas en la figura B.1, considerando las dimensiones del borde, el diámetro de las barras y la cantidad de estas.

La expresión que considera todos los elementos previamente mencionados se presentan a continuación:

$$\rho = \frac{n^{\circ} de Barras \cdot D}{b \cdot h} \quad (B.1)$$

Por otro lado, para realizar el cálculo de cuantía transversal y longitudinal del muro, por metro lineal de muro, es decir se toma una franja de $h=1$ [m] en las diferentes direcciones para realizar el cálculo.

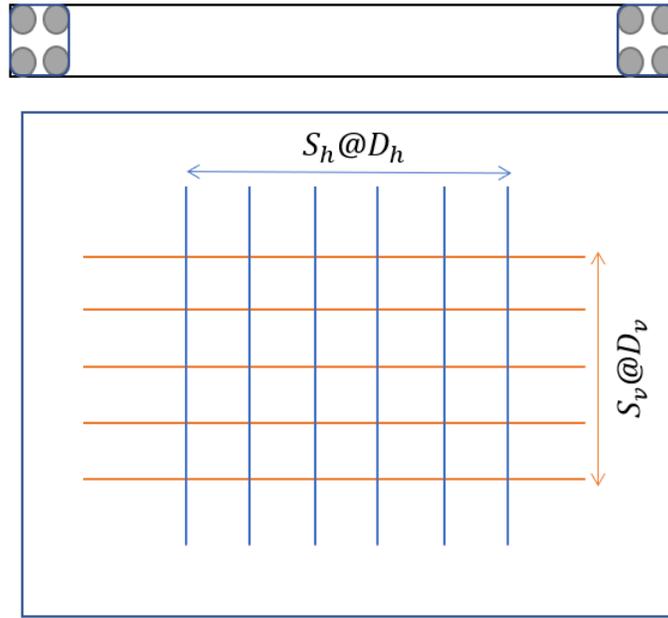


Figura B.2: Ensayo de Tracción para Barras del $\phi 16$

Para la estimación del refuerzo longitudinal, utilizamos la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{n.barras \cdot D_{h,v}}{(b - rec) \cdot h} \quad (B.2)$$

En donde el número de barras por metro lineal de muro ($h = 1[m]$) se puede calcular dividiendo la franja de un metro por el espaciamiento de las barras, es decir $N^{\circ} Barras = \frac{h}{S_{s,v}}$.

En donde $S_{v,h}$ corresponde al espaciamiento vertical/horizontal de las barras.

Anexo C

Planos

A continuación se presentan los planos de todos los elementos que conforman en su conjunto la probeta ensayada.

C.1. Losa de Acoplamiento

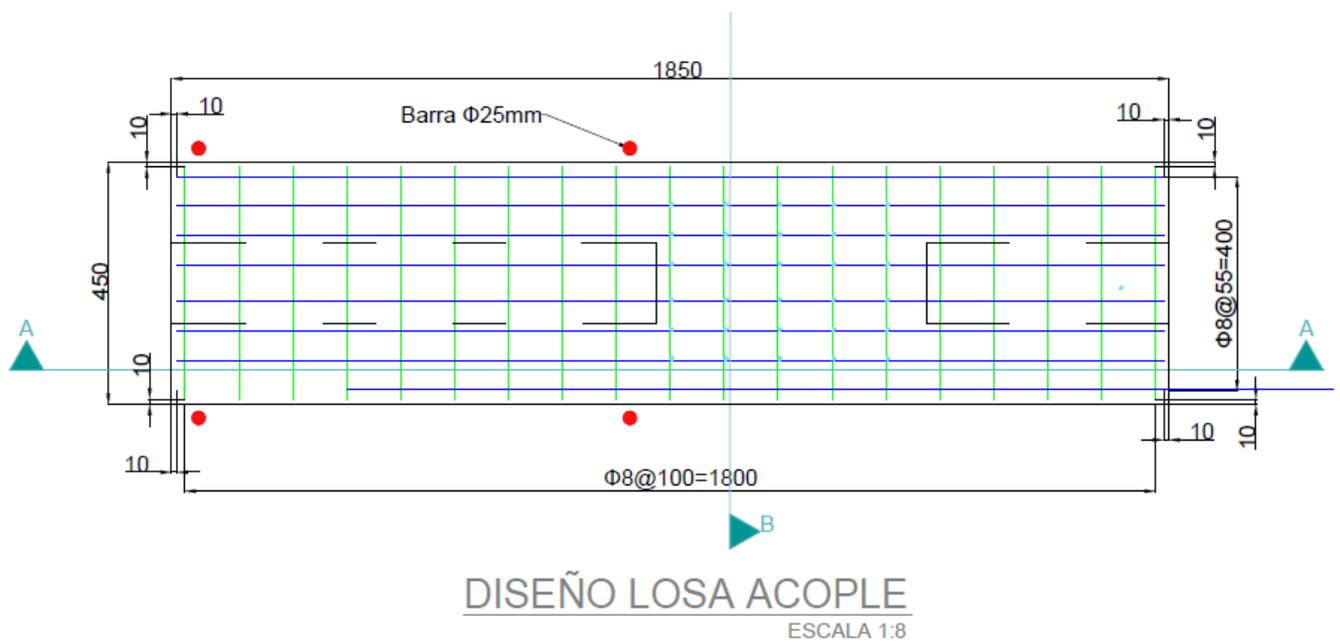
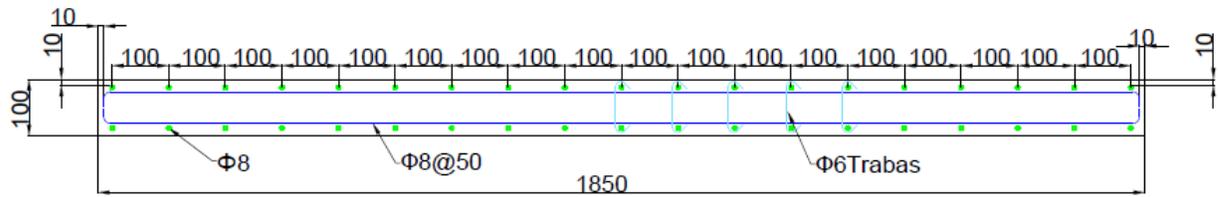


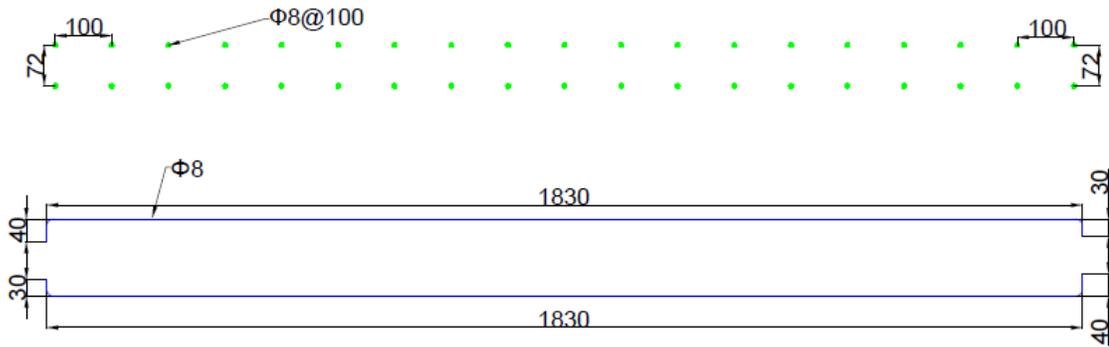
Figura C.1: Vista Lateral de Armadura



CORTE A-A

CORTES LOSA LONGITUDINAL

ESCALA 1:8



DETALLE LOSA LONGITUDINAL

ESCALA 1:8

Figura C.2: Vista Lateral de Armadura

C.2. Pedestal del Muro

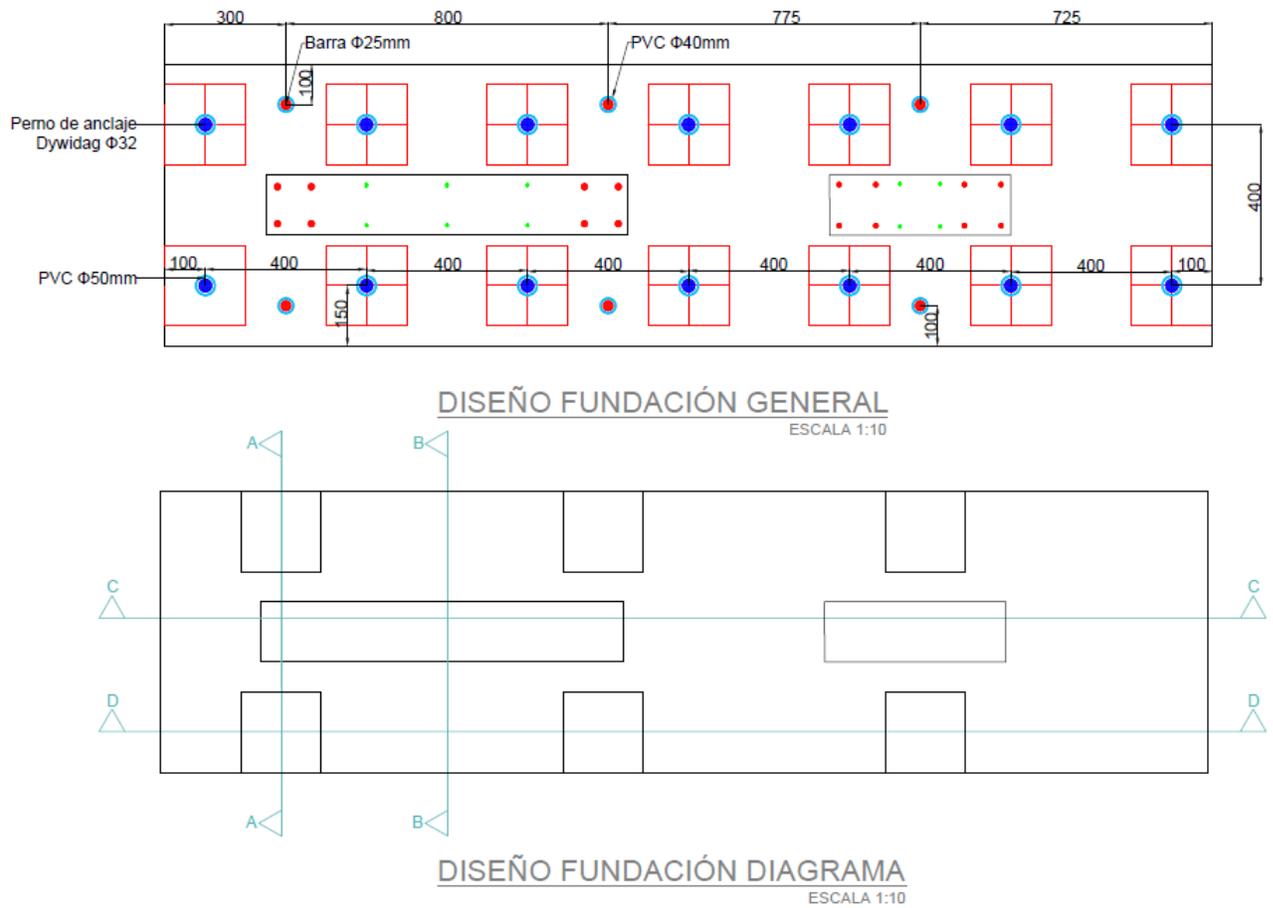
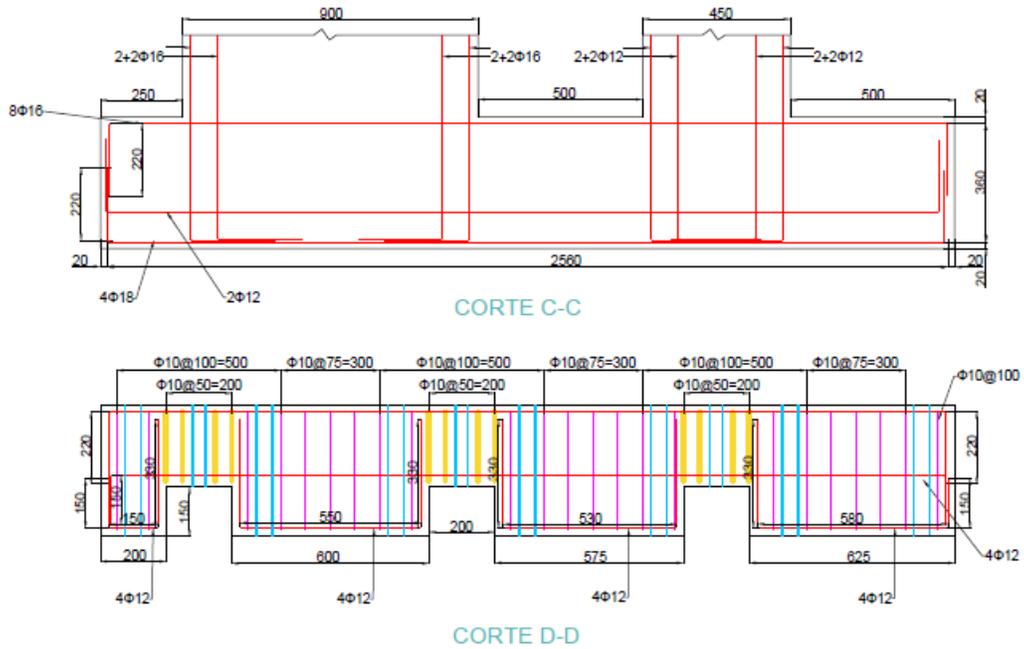


Figura C.4: Vista Lateral de Armadura

DISEÑO FUNDACIÓN DIAGRAMA

ESCALA 1:10



CORTES FUNDACIÓN LONGITUDINAL

ESCALA 1:14

Figura C.5: Vista Lateral de Armadura

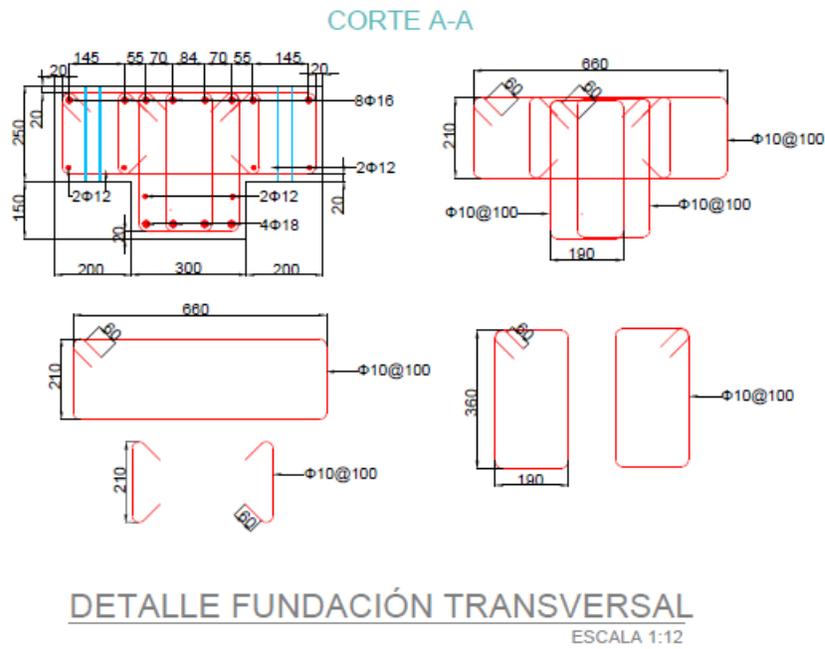


Figura C.6: Vista Lateral de Armadura

Anexo D

Curvas de Tensión vs Deformación -Acero

A continuación se presentan las curvas obtenidas en el ensayo de tracción de las barras de acero utilizadas en la construcción de los muros:

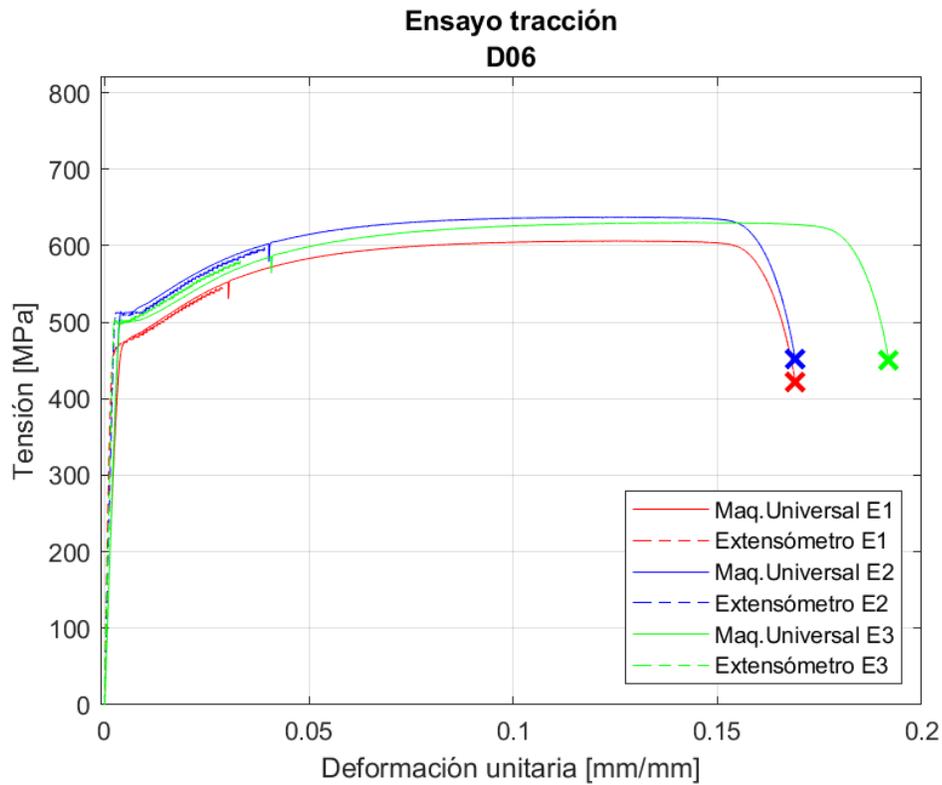


Figura D.1: Ensayo de Tracción para Barras del $\phi 6$

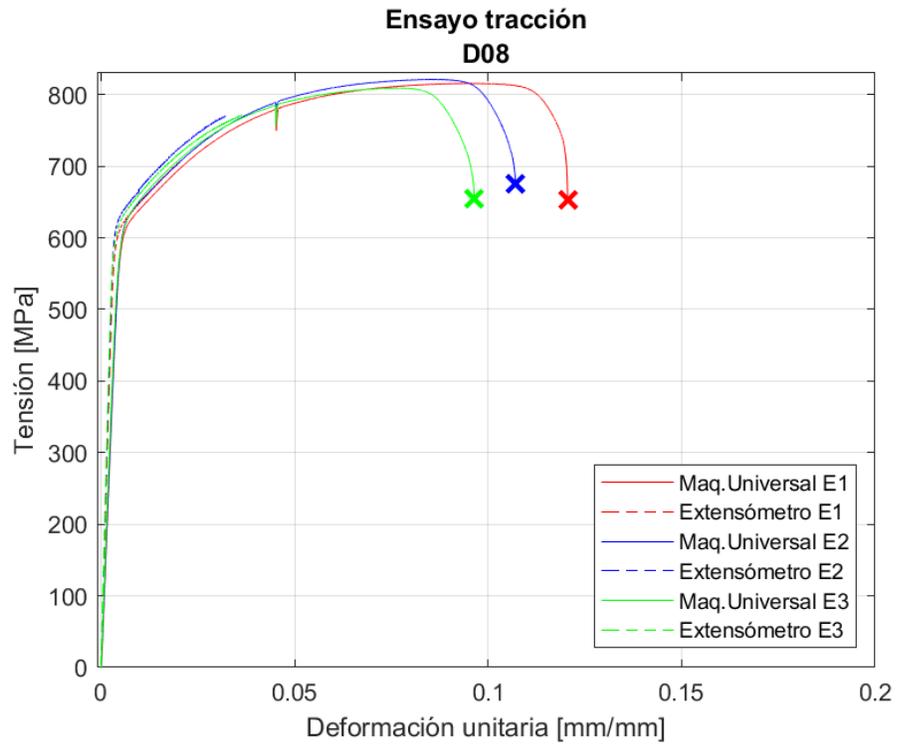


Figura D.2: Ensayo de Tracción para Barras del $\phi 8$

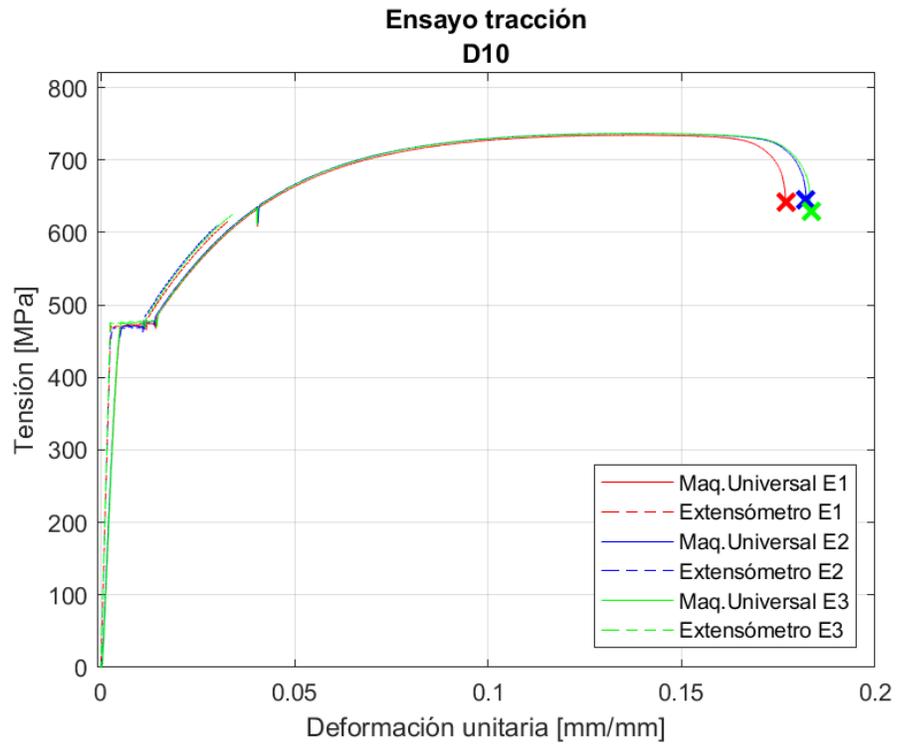


Figura D.3: Ensayo de Tracción para Barras del $\phi 10$

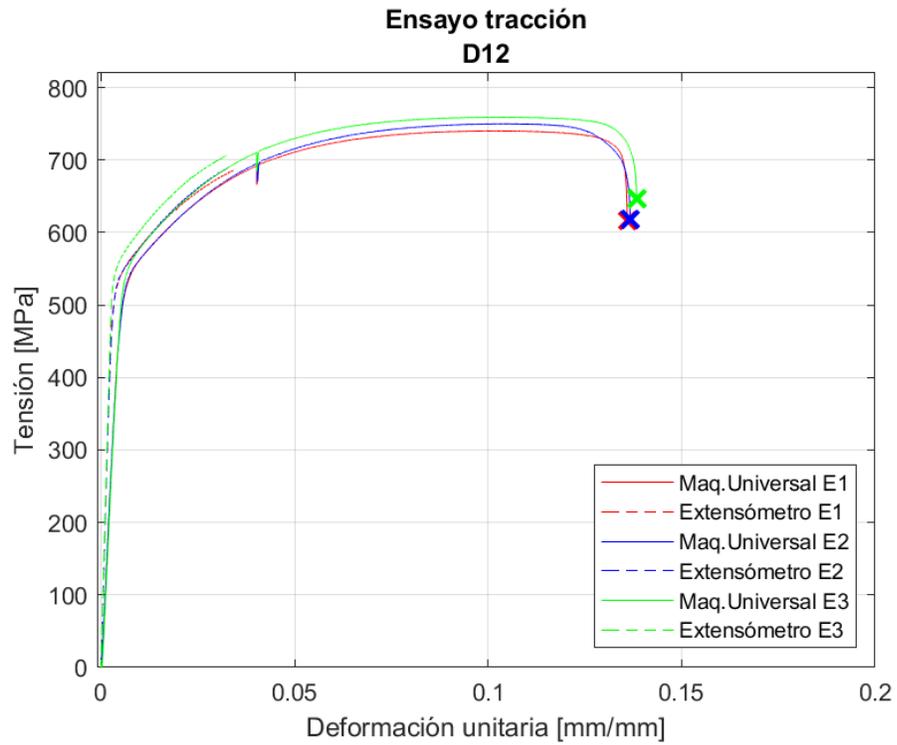


Figura D.4: Ensayo de Tracción para Barras del $\phi 12$

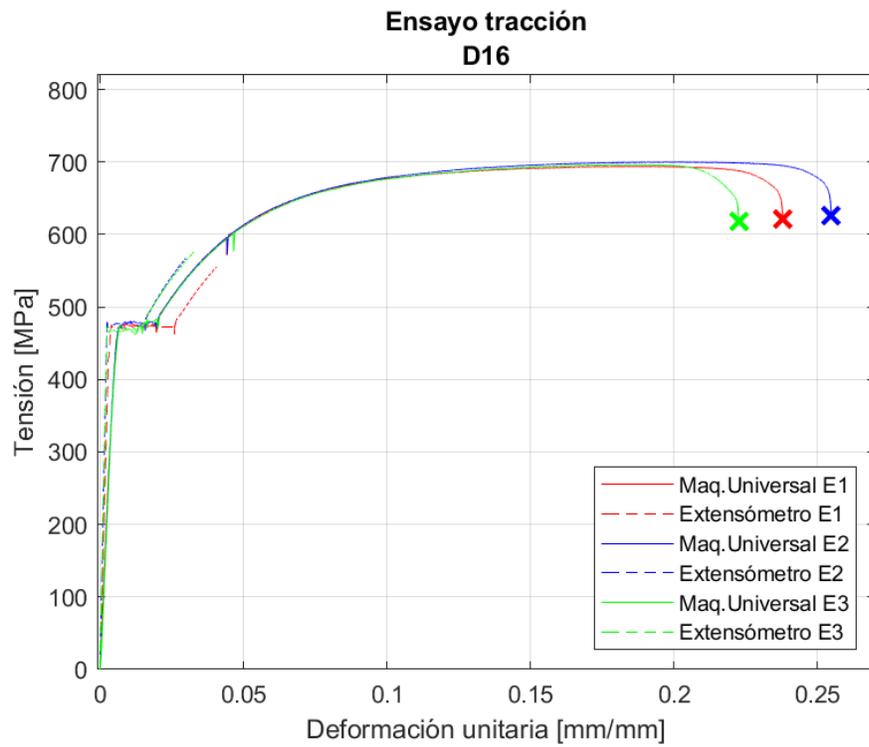


Figura D.5: Ensayo de Tracción para Barras del $\phi 16$

Anexo E

Reparaciones de Muros y Losas

E.1. Reparaciones

Posterior a la etapa de vertido del hormigón, se esperaron de 10 días antes de retirar los moldajes, procurando mantener el proceso de riego en el muro y muestras de probetas cilíndricas, de tal forma de reducir la pérdida de agua que se presenta durante el proceso de endurecimiento del hormigón.

Retirado el moldaje de la probeta, se observaron varios problemas en diversas zonas del muro, principalmente en los bordes de ambos muros, pedestal y losas del segundo piso.

Las reparaciones fueron realizadas con hormigón predosificado TOPEX®, con resistencia a compresión de 25[Mpa] para las zonas centrales del muro, bordes y losas, respectivamente. Para la reparación del pedestal, se utilizó un mortero de nivelación Cave Groutec®, con resistencia mínima al día 7 de 37,2[MPa].



(a) Daño Registrado en el Pedestal



(b) Daño Registrado en la zona Central del Muro Grande (MR1).

Figura E.1: Daños presentados en la zona central del muro y pedestal

En las siguientes figuras se pueden observar los daños en las diversas zonas previamente mencionadas:



(a) Daño Registrado en el Muro Grande (MR1)



(b) Daño Registrado en el Muro Grande (MR2)



(c) Exposición de Armadura de Borde por Problemas de Hormigonado. Muro Grande

Figura E.2: Elementos de borde y losa dañados

El procedimiento para realizar las reparaciones en las zonas previamente señaladas se llevó a cabo de la siguiente forma:

1. Se removieron las zonas con hormigón defectuoso.
2. Se despejaron las zonas picadas del polvo, con ayuda de una sopladora, removiendo posibles resto de hormigón defectuoso.
3. Se confeccionaron diferentes moldes para las diversas zonas a reparar, de tal forma verter y confinar el hormigón utilizado para la reparación.
4. Se retiraron los moldajes a los 7-10 días, procurando realizar esta maniobra con precaución.

Adicionalmente, se hicieron labores de reparación menores al momento del postensado de barras en el pedestal, las cuales fueron menores. Para lo anterior, se utilizó un adhesivo epóxico multipropósito Sikadur®31 HMG. Las zonas afectadas se puede observar en la figura 4.27.a y 4.27.b.

El resultado de las reparaciones de todos los elementos se puede observar a continuación:



(a) Daño Registrado en el Pedestal



(b) Daño Registrado en el Pedestal

Figura E.3: Resultado de las Reparaciones

E.1. Detalles LVDT's Utilizados

Tipo	Nº	S/N	Tamaño ["]	Calibración [mm/V]	Ubicación
Macrosensor	0	86005	10	-29,303	Desplazamiento actuador
	1	6162298	10	-29,010	Desplazamiento MR1
	2	6165466	10	-29,617	Desplazamiento MR2
	3	149107	5	-14,662	Flexión MR1 (2º Piso)
	4	149108	5	-15,901	Flexión MR1 (2º Piso)
	5	6172316	2	-5,393	Corte MR1 (2º Piso)
	6	6172317	2	-5,260	Flexión MR2 (2º Piso)
	7	6172318	2	-5,250	Flexión MR2 (2º Piso)
	8	6165443	1	-3,345	Flexión MR2 (1º piso)
	9	6165444	1	-2,586	Flexión MR1 (1º Piso)
	10	6165445	1	-2,942	Flexión MR1 (1º Piso)
	11	6165446	1	-2,397	Corte MR1 (3º Piso)
	12	6165447	1	-1,882	Flexión MR1 (1º Piso)
	13	6165448	1	-3,177	Corte MR2 (2º Piso)
	14	6165449	1	-2,783	Flexión MR1 (2º Piso)
	15	6165450	1	-3,559	Flexión MR1 (3º Piso)
	16	6165451	1	-2,633	Flexión MR1 (2º Piso)
	17	6165452	1	-2,563	Flexión MR1 (2º Piso)
	18	6165453	1	-2,612	Corte MR1 (3º Piso)
	19	6165454	1	-2,703	Flexión MR2 (1º Piso)
	20	6165455	1	-2,777	Corte MR1 (1º Piso)
	21	6165456	1	-2,608	Flexión MR2 (1º Piso)
	22	6165457	1	-2,618	Flexión MR2 (1º Piso)
	23	6172409	1	-2,664	Flexión MR2 (1º Piso)
	24	6166560	1	-2,580	Flexión MR2 (2º Piso)
	25	6166561	1	-2,589	Corte MR1 (2º Piso)
	26	148460	1	-2,025	Rotación pedestal MR2 este
	27	148461	0,5	-1,369	Rotación pedestal MR2 oeste
	28	148462	0,5	-0,661	Rotación pedestal MR1 este
29	148463	0,5	-1,308	Rotación pedestal MR1 oeste	
Schaevitz	32	J7523	0,5	-5,566	Corte MR2 (2º Piso)
	33	J7524	0,5	-5,117	Flexión MR2 (1º Piso)
	34	J7455	1	-11,506	Corte MR1 (1º Piso)
	35	J7528	1	-10,511	Corte MR2 (1º Piso)
	36	J7529	1	-10,834	Flexión MR1 (1º Piso)
	37	J7530	1	-10,796	Flexión MR1 (1º Piso)
	38	J7531	1	-11,219	Flexión MR2 (1º Piso)
	39	J7532	1	-11,636	Flexión MR2 (1º Piso)
	40	J7573	1	-10,871	Corte MR2 (1º Piso)
	41	J7427	6	-31,902	Flexión MR1 (3º Piso)
	48	J7521	0,5	-5,794	Flexión MR2 (1º Piso)
Omega	49	J7525	0,5	-5,160	Flexión MR2 (2º Piso)
	42	40-02	1	-5,396	Flexión MR1 (1º Piso)
	43	40-07	1	-5,464	Flexión MR2 (2º Piso)
	44	52-02	2	-10,603	Flexión MR2 (2º Piso)
	45	52-04	2	-10,239	Flexión MR1 (1º Piso)
	46	0 201	3	-15,563	Flexión MR1 (2º Piso)
	47	1401	3	-15,317	Disp. horizontal pedestal