



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

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MUROS RECTANGULARES ACOPLADOS
CON VIGA DE HORMIGÓN ARMADO MEDIANTE INSTRUMENTACIÓN
DE LVDT**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JERKO HUMBERTO RAFFO PANIAGUA

PROFESOR GUÍA:
FABIÁN ROJAS BARRALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ
RICARDO HERRERA MARDONES

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

SANTIAGO DE CHILE
2023

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MUROS RECTANGULARES ACOPLADOS CON VIGA DE HORMIGÓN ARMADO MEDIANTE INSTRUMENTACIÓN DE LVDT

En edificaciones residenciales chilenas de elevada altura es muy común la implementación de sistemas estructurales de muros de hormigón armado acoplados tanto por viga para los muros de fachada, como por losa en los interiores para así resistir las cargas laterales que frecuentemente generan los sismos sobre estas estructuras en Chile, disipando energía por medio de estos elementos de acople.

Tras el terremoto de la región del Maule del año 2010, se evidenciaron fallencias en los diseños de muros, en particular debido a la falta de confinamiento en los bordes, provocando pandeo en las barras de refuerzo verticales de dichas zonas en múltiples edificaciones. Por esto último, se impulsaron reformas a las normativas de diseño y se han realizado estudios de diversos sistemas estructurales para comprender la respuesta de estos ante eventos sísmicos, motivación por la cual se lleva a cabo esta investigación.

Para esto se realiza un ensayo experimental tipo pushover controlado por desplazamiento sobre una probeta de dos muros rectangulares esbeltos (MR1 y MR2) de hormigón armado acoplados con vigas, característicos de la tipología chilena de edificios, esta probeta se somete a cargas laterales cíclicas a nivel del techo del muro MR1. El principal objetivo de la investigación es caracterizar el comportamiento de la probeta ante este régimen de desplazamientos impuestos, monitoreando sus deformaciones y desplazamientos por medio de múltiples transductores de desplazamiento lineal variable dispuestos en la probeta, y las cargas por medio de dos celdas de carga. El muro MR1 es de mayor largo, y sobre este se aplica una carga vertical de $0.08f'cA_g$ por medio de gatos hidráulicos, además de la carga horizontal en el techo de este. Sobre el muro MR2 no se aplican cargas.

Los resultados mostraron mayores deformaciones a la altura de la base de ambos muros, predominando el comportamiento por flexión de los muros. Globalmente, se observó mayor resistencia de la probeta en la dirección de las derivas positivas, y una asimetría en los desplazamientos de techo del muro MR2. La fisuración del hormigón se evidenció en el 0.3 % de drift en el muro MR1 y en las vigas. Se pierde recubrimiento en las vigas al alcanzar el 1.35 % de drift, mientras que en los muros se pierde recubrimiento en el lado izquierdo de la base del muro más largo al alcanzar el 2 % de drift. La falla se produce por pandeo local, lo cual se identifica al alcanzar el 3 % de drift por una fractura en las barras de refuerzo verticales del borde izquierdo del muro más largo. El cálculo de desplazamiento por corte de los pisos indica que su valor es mayor en los pisos inferiores. En el caso de las vigas, se observan grietas diagonales en ambas, por lo que su tipo de falla es a corte, presentando mayor daño en la viga superior. Se comparan además resultados experimentales de largos de rótulas plásticas con expresiones calibradas para obtener dicho valor, adquiriendo resultados similares.

*A mi tía Tere,
que en mis primeros años me acompañó
y me recibió con sus almuerzos tan ricos en su
casa, aliñado con buenas risas y cariño.*

Agradecimientos

Quiero agradecer primero que todo a mi familia. A mis padres, Francisca y Jerko, por haberme moldeado en gran parte como soy ahora, y por apoyarme ese año en que nada indicaba que de algo servía hacerlo, gracias por confiar en mí, por moverme, ustedes son personas distintas al resto, son lo máximo. A mis hermanos Felipe y Francisca, por acompañarme también todos los fines de semana que fui a Rancagua, y aportar con risas a todas las leseras que digo. Una familia como ustedes... es fundamental para ser feliz.

A mi tío Miguel, por sus enseñanzas espirituales, enfocarse en el presente y ser agradecido de lo que uno vive y es. A mi tía Macarena por su infinito afecto que me ha dado toda la vida. A mi tata Jerko, por siempre estar al tanto de mí, dándome ánimos y frases históricas e inspiradoras que me recuerdan como enfrentar el día a día. Y a toda mi familia, todos aportan a su manera con sus personalidades en mí, los quiero mucho a todos.

A mis grandes amigos de la vida Manzur y Juan Diego, por esas entretenidas conversas de la vida en las caminatas, y mantener por tanto tiempo nuestras buenas amistades. A mis amigos de la universidad, que compartieron conmigo gran parte de la travesía de estos años, los que estuvieron desde el principio: Watson, Santi, Alondra, Manu, Fortuño, y los que se unieron ya pasados algunos años pero se sintió como si siempre hubieran estado: Giovanni, Matías, Javi, los cabros del tenis, los quiero a todos, gracias por dejarme tan buenos recuerdos y experiencias de este capítulo, y enseñarme implícita y explícitamente sus formas de ver la vida. Y a mi polola Javiera, por acompañarme tan de cerca durante los últimos meses, y regalarme después de salir todo enterrado de largos días de trabajo en el lab o de la oficina, la mejor compañía para mí.

Al team muros, don Nico Segura gracias por tener ese espíritu en el lab cuando ya todos queríamos partir menos tú, y hacíamos una peguita extra antes de irnos que se agradecía al día siguiente, y por el buen ambiente que formamos en la pecera, hombre total. Pancho, gracias por tus memes, tallas y risas, y apoyarme con tus consejos cuando estoy perdido. Señorita Coni, gracias por compartir tantas risas de las tonteras que digo, sin risas no funciona. Betza, gracias por tus consejos, buen sentido del humor y paciencia. Y César, gracias por ayudarme también cuando te lo pedí, y ser buen compañero de trabajo con los sensores. Agradezco haber llegado a un equipo como ustedes, son grandes personas todos a su manera.

Por último, quiero agradecer a mi profesor guía Fabián Rojas, por su buena disposición, responsabilidad y paciencia con sus estudiantes.

Tabla de Contenido

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Motivación | 1 |
| 1.2. Objetivos | 2 |
| 1.2.1. Objetivos Generales | 2 |
| 1.2.2. Objetivos Específicos | 2 |
| 1.3. Organización de la Memoria | 3 |
| 1.3.1. Introducción | 3 |
| 1.3.2. Antecedentes de Estudio | 3 |
| 1.3.3. Descripción de Probeta | 3 |
| 1.3.4. Trabajo Experimental | 3 |
| 1.3.5. Resultados | 3 |
| 1.3.6. Conclusiones | 3 |
| 2. Antecedentes de Estudio | 4 |
| 2.1. Introducción | 4 |
| 2.2. Tipología | 4 |
| 2.2.1. Estructuración Chilena | 4 |
| 2.2.2. Armaduras Vigas de Acople | 5 |
| 2.3. Marco teórico | 6 |
| 2.3.1. Muros Acoplados con Vigas | 6 |
| 2.3.2. Rótula plástica | 8 |
| 3. Descripción de Probeta y Ensayo | 11 |
| 3.1. Descripción de Probeta | 11 |
| 3.1.1. Geometría | 12 |
| 3.2. Ensayo | 14 |
| 3.3. Caracterización de Materiales | 15 |
| 3.3.1. Acero | 15 |
| 3.3.2. Hormigón | 17 |
| 4. Trabajo Experimental | 19 |
| 4.1. Laboratorio de Estructuras | 19 |
| 4.2. Montaje Experimental | 20 |
| 4.2.1. Enfierrado, Transporte y Arreglos | 20 |
| 4.2.2. Moldaje | 21 |
| 4.2.3. Hormigonado | 21 |
| 4.2.4. Postensado de Barras | 23 |
| 4.2.5. Elementos de Ensayo | 24 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.2.5.1. | Actuador | 24 |
| 4.2.5.2. | Gatos Hidráulicos y Celda de Carga | 25 |
| 4.2.5.3. | Carga Axial | 26 |
| 4.2.5.4. | Marco de Acero | 27 |
| 4.2.5.5. | Montaje Completo | 28 |
| 4.3. | Instrumentación | 28 |
| 4.3.1. | LVDT | 28 |
| 4.3.2. | Sistema de Adquisición de Datos | 33 |
| 5. | Resultados | 37 |
| 5.1. | Instrumentación | 37 |
| 5.1.1. | Corrección por Desplazamiento y Rotación | 37 |
| 5.1.2. | Desplazamiento por Corte | 38 |
| 5.2. | Respuesta Global Muros | 40 |
| 5.3. | Perfiles de Deformación Vertical en Altura | 45 |
| 5.4. | Perfiles de Deformación Basal y Curvaturas | 50 |
| 5.5. | Desplazamiento por Corte | 53 |
| 5.6. | Contribución Flexión y Corte | 55 |
| 5.7. | Rótula Plástica | 56 |
| 5.8. | Evolución de Grietas | 58 |
| 6. | Conclusiones | 74 |
| | Bibliografía | 76 |
| | Anexos | 78 |
| A. | Planos | 78 |
| B. | Resultados ensayos de hormigón | 80 |
| C. | Perfiles de deformación vertical en altura | 80 |
| D. | Desplazamientos por corte | 84 |
| E. | Contribución Flexión y Corte | 86 |
| E.1. | Desplazamientos Flexión y Corte MR1 Piso 1 | 87 |
| E.2. | Desplazamientos Flexión y Corte MR1 Piso 3 | 87 |
| E.3. | Desplazamientos Flexión y Corte MR2 Piso 2 | 88 |

Índice de Tablas

| | | |
|------|--|----|
| 3.1. | Dimensiones muros | 12 |
| 3.2. | Cuantías probeta | 14 |
| 3.3. | Protocolo de carga | 14 |
| 3.4. | Resultados ensayos a tracción de barras de acero | 17 |
| 3.5. | Resistencia a la compresión de hormigón promedio por día | 18 |
| 4.1. | Información sensores LVDT | 31 |
| 5.1. | Contribuciones de corte y flexión al desplazamiento horizontal | 55 |
| B.1. | Ensayos resistencia a la compresión hormigón | 80 |
| E.1. | Valores de desplazamiento de flexión y corte MR1 piso 1 | 87 |
| E.2. | Valores de desplazamiento de flexión y corte MR1 piso 3 | 87 |
| E.3. | Valores de desplazamiento de flexión y corte MR2 piso 2 | 88 |

Índice de Ilustraciones

| | | |
|-------|--|----|
| 2.1. | Tipos de estructuraciones chilenas de hormigón armado [1] | 5 |
| 2.2. | Formas de armar vigas de acople. Galano y Vignoli [3] | 6 |
| 2.3. | Esfuerzos en muros acoplados. Sherif [6] | 7 |
| 2.4. | Modos de falla en muros acoplados con viga. Subedi [7] | 8 |
| 2.5. | Diagrama rótula plástica [10] | 9 |
| 3.1. | Distribución de armaduras en probeta | 11 |
| 3.2. | Dimensiones probeta | 12 |
| 3.3. | Planos transversales armadura vertical confinada MR1 y MR2 | 13 |
| 3.4. | Sección transversal armadura vigas de acople | 13 |
| 3.5. | Protocolo de carga | 15 |
| 3.6. | Montaje ensayo a tracción [14] | 16 |
| 3.7. | Ensayo probeta de acero | 16 |
| 3.8. | Procedimiento ensayos a compresión hormigón | 17 |
| 4.1. | Vista en planta Laboratorio de Estructuras | 19 |
| 4.2. | Enfierradura probeta | 20 |
| 4.3. | Enfierradura de probetas en laboratorio | 20 |
| 4.4. | Correcciones enfierradura | 21 |
| 4.5. | Imágenes molde | 21 |
| 4.6. | Camiones hormigonado | 22 |
| 4.7. | Toma de muestras en hormigonado | 22 |
| 4.8. | Ensayo de cono de Abrams | 23 |
| 4.9. | Mecanismo postensado de barras | 23 |
| 4.10. | Actuador | 24 |
| 4.11. | Imágenes actuador | 25 |
| 4.12. | Entrada celda de carga actuador | 25 |
| 4.13. | Bomba hidráulica para gatos | 26 |
| 4.14. | Gato hidráulico y Celda de carga | 26 |
| 4.15. | Carga axial | 27 |
| 4.16. | Marco de acero | 27 |
| 4.17. | Montaje completo ensayo | 28 |
| 4.18. | Sensores utilizados | 29 |
| 4.19. | Cajas LVDT | 29 |
| 4.20. | Hilos sin fin | 30 |
| 4.21. | Vista de probeta para cada instrumentación | 32 |
| 4.22. | Diagrama inicial ubicaciones LVDT | 32 |
| 4.23. | Diagrama ubicaciones LVDT funcionales | 33 |
| 4.24. | Cable DB9 [21] | 34 |
| 4.25. | Fuente de Poder [22] | 34 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.26. | Cajas de conexión | 35 |
| 4.27. | Montaje instrumentación LVDT | 36 |
| 5.1. | LVDT externos | 38 |
| 5.2. | Diagrama deformación por corte [25] | 39 |
| 5.3. | Lectura celda de carga axial | 40 |
| 5.4. | LVDT de control MR1 | 41 |
| 5.5. | Histéresis MR1 | 42 |
| 5.6. | Histéresis MR1 con valores | 43 |
| 5.7. | Histéresis MR2 | 43 |
| 5.8. | Histéresis MR2 con valores | 44 |
| 5.9. | Histéresis MR1 y MR2 | 45 |
| 5.10. | Perfil de deformación en altura MR1 oeste deriva positiva | 46 |
| 5.11. | Perfil de deformación en altura MR1 oeste deriva negativa | 46 |
| 5.12. | Perfil de deformación en altura MR1 este deriva positiva | 47 |
| 5.13. | Perfil de deformación en altura MR1 este deriva negativa | 48 |
| 5.14. | Perfil de deformación en altura MR2 oeste deriva positiva | 48 |
| 5.15. | Perfil de deformación en altura MR2 este deriva positiva | 49 |
| 5.16. | Perfil de deformación en altura MR2 este deriva negativa | 49 |
| 5.17. | Perfil de deformación basal deriva positiva | 50 |
| 5.18. | Perfil de deformación basal deriva negativa | 51 |
| 5.19. | Curvatura MR1 deriva positiva | 51 |
| 5.20. | Curvatura MR1 deriva negativa | 52 |
| 5.21. | Curvatura MR2 deriva positiva | 52 |
| 5.22. | Curvatura MR2 deriva negativa | 53 |
| 5.23. | Comparación de desplazamiento por corte por pisos | 54 |
| 5.24. | Desplazamiento por corte ambas vigas | 55 |
| 5.25. | Longitudes de rótula plástica | 56 |
| 5.26. | Longitudes rótula plástica vs Alfaro MR1 | 57 |
| 5.27. | Longitudes rótula plástica vs Alfaro MR2 | 57 |
| 5.28. | Evolución de grietas MR1 0.3 % drift | 59 |
| 5.29. | Evolución de grietas viga inferior 0.3 % drift | 59 |
| 5.30. | Evolución de grietas viga superior 0.3 % drift | 60 |
| 5.31. | Evolución de grietas MR1 0.4 % drift | 60 |
| 5.32. | Evolución de grietas MR2 0.4 % drift | 61 |
| 5.33. | Evolución de grietas viga inferior 0.4 % drift | 61 |
| 5.34. | Evolución de grietas viga superior 0.4 % drift | 62 |
| 5.35. | Evolución de grietas MR1 0.6 % drift | 62 |
| 5.36. | Evolución de grietas MR2 0.6 % drift | 63 |
| 5.37. | Evolución de grietas viga inferior 0.6 % drift | 63 |
| 5.38. | Evolución de grietas viga superior 0.6 % drift | 63 |
| 5.39. | Evolución de grietas MR1 0.9 % drift | 64 |
| 5.40. | Evolución de grietas MR2 0.9 % drift | 64 |
| 5.41. | Evolución de grietas viga inferior 0.9 % drift | 65 |
| 5.42. | Evolución de grietas viga superior 0.9 % drift | 65 |
| 5.43. | Base izquierda muro MR1 | 66 |
| 5.44. | Evolución de grietas MR1 1.35 % drift | 66 |
| 5.45. | Evolución de grietas MR2 1.35 % drift | 67 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.46. | Evolución de grietas viga inferior 1.35 % drift | 67 |
| 5.47. | Evolución de grietas viga superior 1.35 % drift | 68 |
| 5.48. | Evolución de grietas MR1 2 % drift | 68 |
| 5.49. | Evolución de grietas MR2 2 % drift | 69 |
| 5.50. | Evolución de grietas viga inferior 2 % drift | 69 |
| 5.51. | Evolución de grietas viga superior 2 % drift | 70 |
| 5.52. | Base izquierda muro MR1 2 % drift | 70 |
| 5.53. | Evolución de grietas MR1 3 % drift | 71 |
| 5.54. | Evolución de grietas MR2 3 % drift | 71 |
| 5.55. | Evolución de grietas viga inferior 3 % drift | 72 |
| 5.56. | Evolución de grietas viga superior 3 % drift | 72 |
| 5.57. | Fotos base MR1 3 % drift | 73 |
| A.1. | Detalle muros | 78 |
| A.2. | Detalle viga de acople | 79 |
| A.3. | Detalle viga de acople | 80 |
| C.1. | Perfil de deformación en altura MR1 oeste deriva positiva | 81 |
| C.2. | Perfil de deformación en altura MR1 oeste deriva negativa | 81 |
| C.3. | Perfil de deformación en altura MR1 este deriva positiva | 82 |
| C.4. | Perfil de deformación en altura MR1 este deriva negativa | 82 |
| C.5. | Perfil de deformación en altura MR2 oeste deriva positiva | 83 |
| C.6. | Perfil de deformación en altura MR2 oeste deriva negativa | 83 |
| C.7. | Perfil de deformación en altura MR2 este deriva positiva | 84 |
| C.8. | Perfil de deformación en altura MR2 este deriva negativa | 84 |
| D.1. | Desplazamiento por corte completo ambas vigas | 85 |
| D.2. | Desplazamiento por corte completo muros | 85 |
| D.3. | Elongaciones máximas de sensor diagonal MR1 piso 2 | 86 |
| D.4. | Elongaciones máximas de sensor diagonal MR2 piso 1 | 86 |

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

En el contexto de la elevada cantidad de eventos sísmicos que ocurren en Chile dada su desfavorable ubicación entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana, se hace vital el estudio de distintas configuraciones estructurales que no sólo sean capaces de sobrellevar estos fenómenos, sino que además aseguren la continua seguridad y funcionalidad de las estructuras para las personas.

Hoy en día en edificaciones de gran altura destinadas a vivienda, se emplea por lo general la combinación de los materiales hormigón y acero, o más conocida como hormigón armado, utilizando la resistencia a la compresión del hormigón y la ductilidad y resistencia a la tracción del acero. Tras el terremoto del Maule del año 2010, se evidenciaron fallas en las edificaciones, en general por pandeo de barras verticales longitudinales en la base de muros de hormigón armado, producto de la falta de confinamiento en dichas zonas, lo cual impulsó una reforma en la normativa de construcción chilena y la realización de nuevos estudios sobre esta disciplina.

Los sismos generan cargas laterales en las estructuras, las cuales se diseñan con diversas configuraciones estructurales que se implementan hoy en día para resistir estos eventos. En este estudio se analizará la configuración de muros rectangulares acoplados con viga de hormigón armado, con la finalidad de profundizar en lo que es hasta hoy la literatura referente al comportamiento de este sistema estructural tanto en su rango elástico como en el inelástico. Esto pues existen múltiples ensayos experimentales acerca de muros aislados, sin embargo no se ha profundizado mayormente en el área de los elementos de acople, ya sean vigas o losas, motivo que fundamenta la realización del presente trabajo.

El estudio consiste en llevar a cabo un ensayo de cargas cíclicas laterales controlado por desplazamiento sobre una probeta compuesta de dos muros acoplados con dos vigas de hormigón armado. Se monitorean los desplazamientos y deformaciones en distintos puntos de la probeta mediante transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT) de manera continua a lo largo del ensayo, al igual que las cargas, las cuales se miden mediante celdas de carga.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos Generales

Describir y caracterizar el comportamiento experimental de muros rectangulares acoplados con viga de hormigón armado característicos de la tipología chilena de edificios, monitoreando su respuesta mediante instrumentación con sensores LVDT.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Estudio de las características de sistemas de muros rectangulares acoplados en los edificios en Chile.
- Construcción de probeta de muros rectangulares acoplados con viga.
- Montaje experimental del sistema de muros rectangulares acoplados.
- Ensayo e instrumentación de muros rectangulares acoplados mediante LVDTs.
- Procesamiento y Análisis de los datos obtenidos con LVDTs.

1.3. Organización de la Memoria

En esta sección se detallan los capítulos que componen la memoria.

1.3.1. Introducción

Consiste en una presentación general del presente trabajo, la motivación y dar a conocer los objetivos que se propone resolver con la realización de esta investigación.

1.3.2. Antecedentes de Estudio

Esta sección contiene un resumen general de los principales documentos consultados para adquirir una base teórica, con la cual se busca comprender los fenómenos que se investigan en este trabajo.

1.3.3. Descripción de Probeta

En esta sección se detallan la geometría dimensiones de la probeta, cuantías de refuerzo, elementos principales, se detallan las características resistencias de los materiales que se utilizaron y los ensayos por los cuales se adquirieron dichas propiedades.

1.3.4. Trabajo Experimental

Se describe el espacio del laboratorio utilizado, los artefactos e instrumentación requerida, y la metodología que se siguió para poder montar la probeta y posteriormente llevar el ensayo a cabo.

1.3.5. Resultados

En este capítulo se presenta el comportamiento que presentó la probeta durante y al final del ensayo, destacando las zonas más críticas que la probeta presentó durante el experimento, además de correlaciones en base al ensayo con otros resultados de la literatura.

1.3.6. Conclusiones

Se resumen los principales resultados de la información recopilada y, fundamentando con la teoría, se recalcan los aspectos del experimento que se buscaba comprobar.

Capítulo 2

Antecedentes de Estudio

2.1. Introducción

En este capítulo se busca exponer una síntesis de algunos de los conceptos y estudios revisados para dar un contexto de los contenidos que se abordan en esta investigación.

Primero, se dará a conocer la tipología chilena típica de muros acoplados, y las distintas formas de armar vigas de acople. En la sección siguiente, se detalla el comportamiento de los esfuerzos a través de un sistema de muros acoplados con viga, modos de falla de vigas y el concepto de rótula plástica. Por último, se detalla la metodología para calcular los valores de corrección de movimiento como sólido rígido de la probeta y el cálculo de desplazamiento por corte en cada piso.

2.2. Tipología

2.2.1. Estructuración Chilena

Los edificios en altura de Chile son típicamente estructuras de hormigón armado que pueden clasificarse en residenciales o de oficina. La primera categoría debe tener divisiones, usualmente dispuestas por tabiques que aseguren la privacidad del ocupante, mientras que las oficinas se componen de grandes espacios abiertos. En ambas categorías se hace uso de muros acoplados tanto con losa en las zonas interiores, como por viga en las zonas perimetrales de las estructuras, con estos elementos los sistemas estructurales poseen una gran resistencia y rigidez, con la finalidad de cumplir dos objetivos: resistir fuerzas laterales, producidas principalmente por terremotos, y limitar el exceso de deformaciones.

Los edificios residenciales (plano tipo en Figura 2.1.a)) están compuestos por losas planas de hormigón armado como sistema de suelo, con una luz que varía entre 5 y 8 metros de largo, un espesor que varía entre 14 y 18 centímetros, y se soportan en muros de corte y vigas en el perímetro, sin utilizar vigas en el interior.

Los suelos de las construcciones destinadas a oficina (plano tipo en Figura 2.1.b)) se componen de losas planas postensadas, con una luz de entre 8 y 10 metros, y espesor que varía entre 17 y 20 centímetros, estas se soportan con un muro central y un pórtico resistente a

momento en el perímetro, suelen tener una longitud de pared más corta y grosor de pared mayor que los edificios residenciales [1].

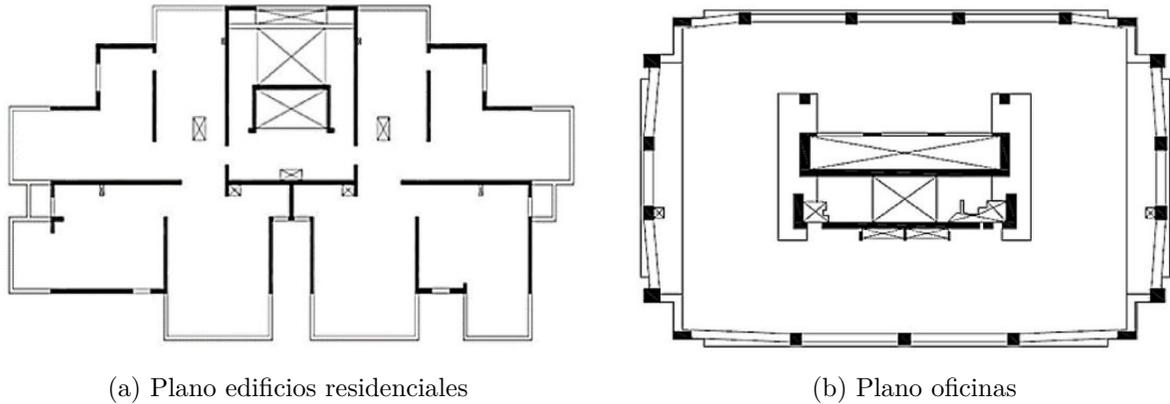


Figura 2.1: Tipos de estructuraciones chilenas de hormigón armado [1]

2.2.2. Armaduras Vigas de Acople

Hay diversas formas de armar la viga de acople, según distintas investigaciones estudiadas por Mohr [2], esta se puede armar según tres categorías:

- Convencional (forma a en Figura 2.2): sólo utiliza grupos de barras horizontales para resistir la flexión y estribos verticales para el corte.
- Diagonal (forma b1 en Figura 2.2): esta forma de armar la viga es mediante barras inclinadas para que resistan tanto el corte como la flexión.
- Doble diagonal (forma b2 en Figura 2.2): Se arma de forma similar a la diagonal, pero además se utilizan estribos en cada par de barras diagonal.

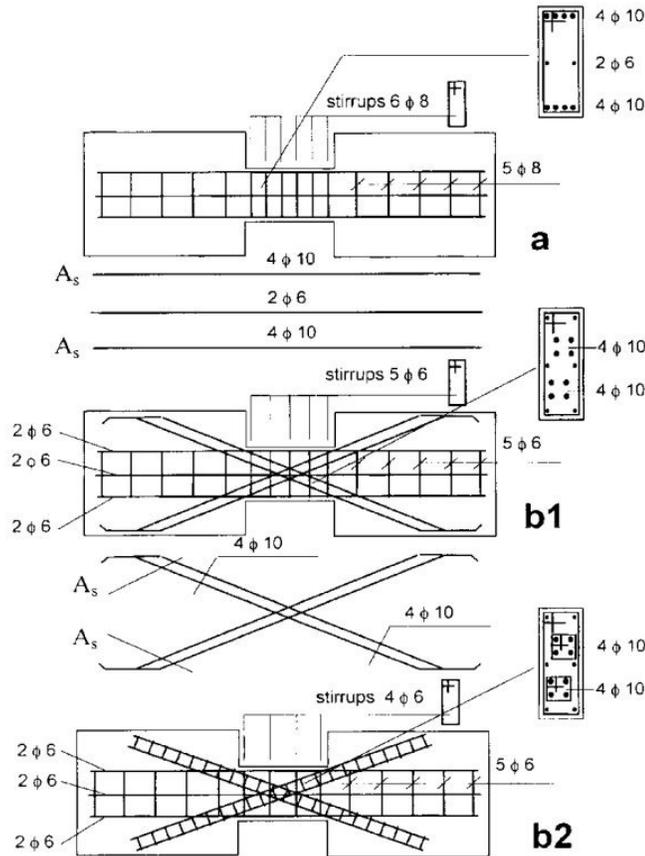


Figura 2.2: Formas de armar vigas de acople. Galano y Vignoli [3]

Según el estudio realizado por Kwan y Zhao [4], en el cual comparan las formas de acople por viga convencional y diagonal, se observó que la forma de acople diagonal tuvo un comportamiento histerético de carga-desplazamiento más estable que la convencional, y una capacidad de disipación de energía considerablemente mejor. Sin embargo, en cuanto a las derivas de techo alcanzadas, estas fueron de un orden similar en ambas metodologías, utilizando vigas con una razón de largo/alto menores a 2.

2.3. Marco teórico

2.3.1. Muros Acoplados con Vigas

En los muros aislados, las cargas laterales generan flexión en la base del muro, esperando de esto una falla dúctil en la base, a diferencia de este comportamiento, en los muros acoplados ocurre de manera similar, se acumula esfuerzo de flexión en la base los muros, pero adicionalmente se transmite corte a través de los elementos de acople. Por esto último, se transmiten esfuerzos hacia el otro muro, aumentando la resistencia de cada uno, y conformando así un sistema estructural más resiliente. La forma en que se transmiten los esfuerzos explicados anteriormente se detalla en la Figura 2.3. Es por esto que mejora el comportamiento al usar un sistema estructural acoplado, por el momento inverso que genera el acoplamiento [5].

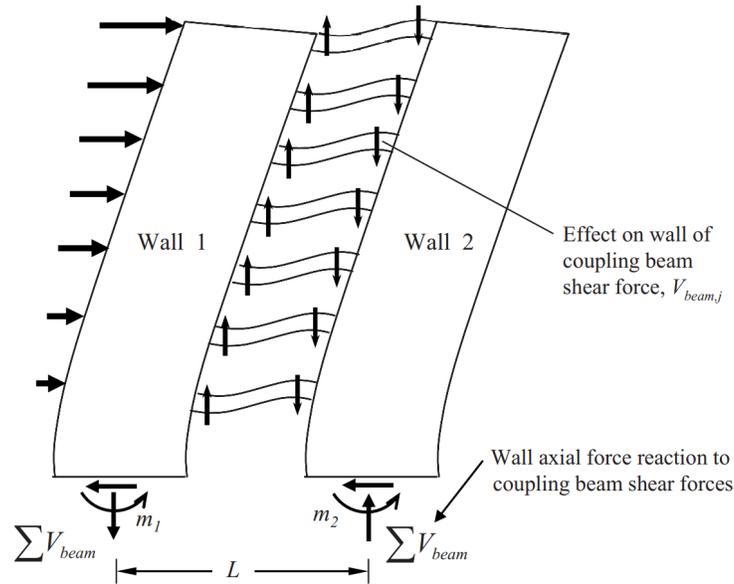


Figura 2.3: Esfuerzos en muros acoplados. Sherif [6]

Las cargas laterales que se aplican sobre una estructura acoplada generan movimientos en los extremos de las vigas, lo cual las somete a esfuerzos de flexión y de corte, la predominancia de uno de estos sobre la viga radica en la resistencia aportada por sus materiales, la forma en que se arma, y su relación de aspecto, o razón entre alto y largo. En el trabajo de Subedi [7], se mencionan 3 posibles formas de falla de muros acoplados con viga que se muestran en la Figura 2.4, y se describen a continuación.

- a) Falla por flexión en las vigas. En este tipo de falla se desarrollan primero fisuras en la base del muro traccionado debido a flexión, luego las vigas más cercanas a esta zona desarrollan fisuras de flexión en las juntas con los muros, aumentando sus largos a medida que la carga lateral incrementa y propagándose a las vigas superiores. Se da en vigas de bajo refuerzo de barras longitudinales.
- b) Falla por corte de las vigas. Inicia de manera similar a la forma a), se generan fisuras de flexión en el muro traccionado, luego las vigas desarrollan pequeñas fisuras en las juntas con los muros, la diferencia es que a medida que la carga aumenta, las fisuras que se observan en las vigas son diagonales, y comienzan cerca del centro de la viga, propagándose después de manera diagonal por el elemento. Se da en vigas más altas y de mayor refuerzo.
- c) Falla por acción rígida de vigas de acople. Esta se caracteriza por presentar un elevado acople entre los muros, y se identifica por el aplastamiento de la base comprimida del muro comprimido, y las vigas no se dañan mayormente, lo cual se debe a que las vigas son muy rígidas y los muros actúan como un muro aislado, además, en el muro traccionado se desarrolla un gran número de fisuras a lo alto de este último, razón por la que finalmente fallará el muro, de manera análoga a como falla una viga simple en voladizo.

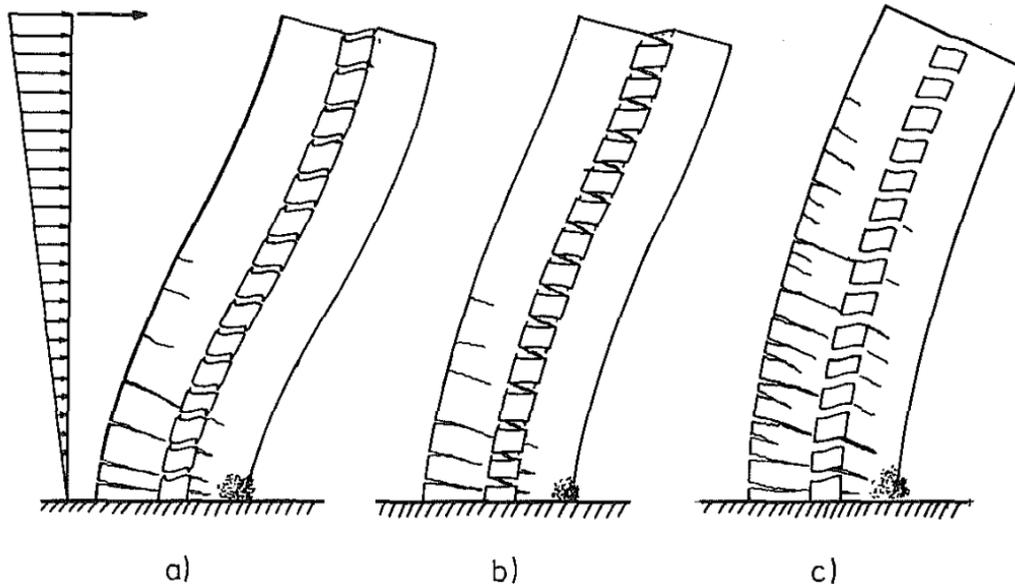


Figura 2.4: Modos de falla en muros acoplados con viga. Subedi [7]

El comportamiento esperado en un sistema de muros acoplados es que los elementos de acople presenten ductilidad y capacidad de disipación de energía, diseñándose para que primero se fisuren y se genere fluencia en los extremos de las vigas por medio de rótulas plásticas, y luego en la base de los muros, manteniendo también el control de deformaciones por medio de la rigidez característica de un muro aislado. En Chile este tipo de vigas o losas de acople se diseñan bajo la normativa ACI 318-08 [8], debiéndose producir fisuración y disipación de energía.

2.3.2. Rótula plástica

El concepto de rótula plástica corresponde a una zona de una estructura en la que se desarrollan deformaciones inelásticas, en general en la parte inferior de los muros, esta zona se define por una longitud, desde la cual se separa la zona de deformaciones inelásticas de la zona de deformaciones elásticas y en general corresponde a la mitad de la distancia desde la base del muro al punto donde se alcanza la fluencia en un extremo del muro.

Al día de hoy se han desarrollado múltiples estudios para obtener expresiones analíticas con las cuales se puede calcular el largo de la rótula plástica, estudios hechos por lo general en muros aislados y en vigas de acople. Estas expresiones se obtienen en base a datos tales como dimensiones del muro, deformación de fluencia, nivel de carga axial, derivas de techo, entre otros parámetros.

El largo de la rótula plástica l_p por lo general se estima como $l_p = 0.5l_p^*$ [9], donde l_p^* corresponde a la distancia desde la base del muro al punto donde se alcanza la deformación de fluencia en la barra de refuerzo sujeta a tracción, esto puede además representarse como se muestra en la Figura 2.5, donde el rectángulo equivalente de curvaturas plásticas(b) es semejante a una distribución lineal de curvatura sobre l_p^* (a), el cual por lo general se define por la primera fluencia, que se busca verticalmente en la barra de refuerzo de la zona extrema

del muro, donde se concentran las deformaciones por tracción.

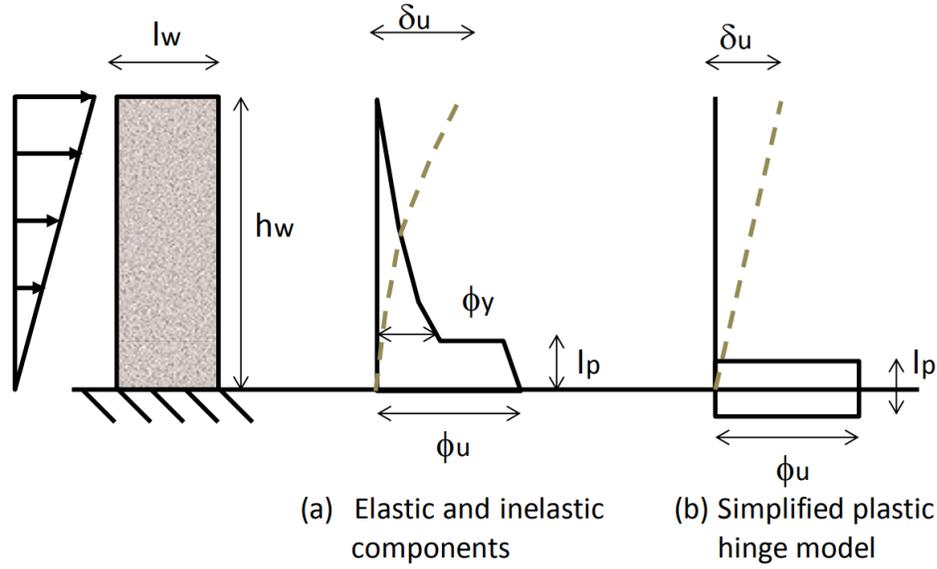


Figura 2.5: Diagrama rótula plástica [10]

Según Bohl [11] como en drifts pequeños no es muy largo el valor de l_p debido a que el muro aún no fluye, las estimaciones de l_p para estos drift no son certeros, por lo que se toman en grandes derivas donde ya ocurrió la fluencia. A la vez, sus perfiles de deformación se vuelven no lineales con el aumento del drift. La expresión que proponen Bohl y Adebar [12] es la ecuación 2.1, donde l_w es el largo del muro, h_w es el alto del muro, P es el valor de la carga axial, f'_c es la resistencia a la compresión del hormigón, y A_g es el área bruta del hormigón (espesor por largo).

$$l_p = (0.2l_w + 0.05h_w) \left(1 - \frac{1.5P}{f'_c A_g} \right) \quad (2.1)$$

En el estudio de Alfaro y Massone [10], se proveen expresiones calibradas para las componentes tanto elásticas como inelásticas de las deformaciones por flexión, usando un modelo de fibra para muros esbeltos, tanto para muros rectangulares como muros T. Por otro lado, para la componente inelástica se estudia en base a un modelo de rótula plástica que el largo de rótula plástica se calcula en función del drift inelástico lateral del muro, entre otros parámetros que se detallan a continuación. El estudio realizado considera distintos valores de carga axial, largo de muro, tres alturas distintas, entre otros parámetros.

La ecuación utilizada para calcular el largo de rótula plástica l_p que proponen Alfaro y Massone [10] es la ecuación 2.2, similar a la ecuación 2.1 de Bohl y Adebar [12] pero le añaden un término asociado al cambio de drift plástico $\Delta_p = \frac{\delta_u - \delta_y}{h_w}$.

$$l_p = (0.2l_w + 0.05h_w) \left(1 - \frac{1.5P}{f'_c A_g} \right) (5.1\Delta_p^{0.3}) \quad (2.2)$$

En base a la ecuación 2.2, se tiene entonces que a medida que aumenta el valor del drift tras sobrepasar la deriva de fluencia, el largo de rótula plástica incrementa de manera logarítmica, lo cual se explica porque el largo de rótula plástica no puede aumentar en proporciones similares con el drift sino que se estabiliza su valor para la expresión calibrada.

Capítulo 3

Descripción de Probeta y Ensayo

El trabajo realizado para la presente memoria contempla la construcción, ensayo y análisis de datos de una probeta de hormigón armado compuesta por dos muros de 3 pisos, acoplados por vigas. Las características geométricas y de refuerzo de la probeta fueron obtenidas a partir de estudios de tipologías de edificaciones chilenas construidas con hormigón armado.

3.1. Descripción de Probeta

En esta sección se detallan las zonas de la armadura de la probeta, diámetros de barras de refuerzo y sus extensiones. El muro MR1 y el MR2 varían en su altura, ancho, y diámetros de barras de refuerzo, sin embargo, la disposición de la armadura es análoga entre ambos, ya que tanto el muro MR1 como el MR2 poseen bordes confinados hasta la altura de la viga superior, y desde la viga superior hasta la viga de carga se encuentran los bordes no confinados (ver Figura 3.1).

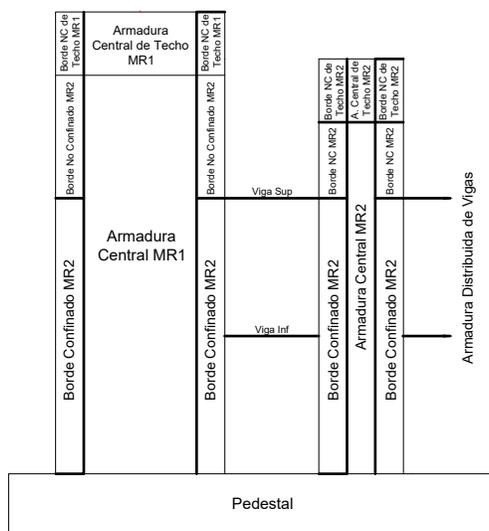


Figura 3.1: Distribución de armaduras en probeta

3.1.1. Geometría

La probeta a ensayar fue diseñada por Valdivia [13] y modificada por Segura [14] en base a la tipología típica de muros acoplados en Chile. Está compuesta de dos muros rectangulares de hormigón armado de 3 pisos, estos se diferencian por su altura del tercer piso y largo, estos muros están unidos por dos vigas de acople que separan los pisos 1 del 2 y 2 del 3, y están empotrados en un pedestal.

Los muros son nombrados como MR1 y MR2, ya que se deben diferenciar porque el muro MR1 es de mayores dimensiones y tiene diámetros de fierro distintos en su armadura que el MR2. Las dimensiones de cada muro se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Dimensiones muros

| Muro | Espesor [mm] | Largo [mm] | Altura Piso 1 [mm] | Altura Piso 2 [mm] | Altura Piso 3 [mm] |
|------|--------------|------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| MR1 | 150 | 900 | 730 | 630 | 690 |
| MR2 | 150 | 450 | 730 | 630 | 390 |

En el caso de las dos vigas de acople, éstas tienen dimensiones idénticas: 150 [mm] de espesor, 500 [mm] de largo, y 300 [mm] de alto.

El pedestal sobre el cual están los muros es de 40 [cms] de alto, 260 [cms] de largo y 70 [cms] de ancho.

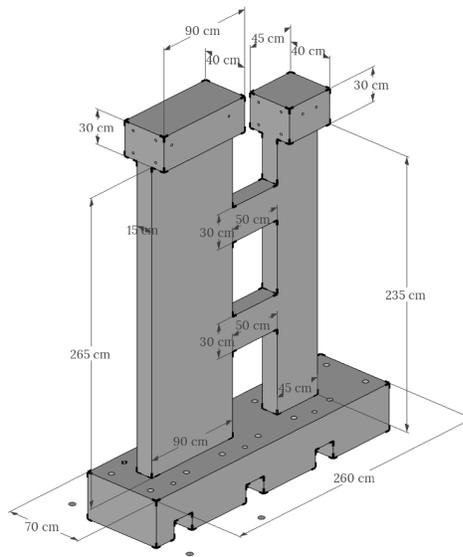


Figura 3.2: Dimensiones probeta

Las 8 barras longitudinales verticales (4 por lado) del borde confinado del muro MR1 corresponden a barras $\phi 16$, mientras que para el muro MR2 la disposición es análoga y sus 8 barras verticales son $\phi 12$. Para ambos muros el confinamiento se materializa mediante estribos $\phi 6$, separados verticalmente cada 70 [cms] para el muro MR1, y cada 100 [cms] para el MR2. Esto se observa en la Figura 3.3.a para el muro MR1, y para el MR2 en la Figura 3.3.b.

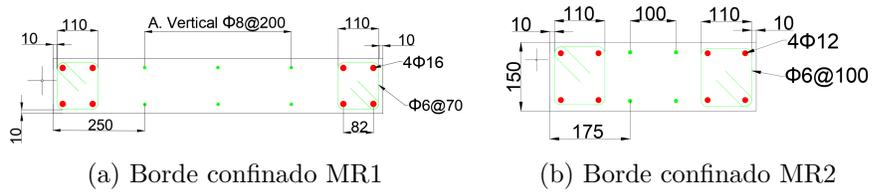


Figura 3.3: Planos transversales armadura vertical confinada MR1 y MR2

La armadura de las vigas corresponde a armadura de tipo convencional para estos elementos de acople, compuesta de 4 barras longitudinales $\phi 12$ en los extremos (círculos rojos de Figura 3.4), 4 barras $\phi 8$ en la zona intermedia de las 4 barras extremas (círculos azules de Figura 3.4), y estribos (rectángulo verde en la Figura 3.4) $\phi 8$ equiespaciados cada 6 cms a lo largo de la viga.

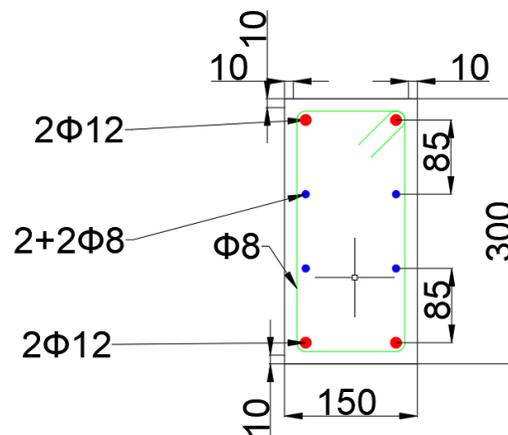


Figura 3.4: Sección transversal armadura vigas de acople

El resumen de las cuantías se encuentra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Cuantías probeta

| Sección | Refuerzo | Dirección | Armadura utilizada | rho [%] |
|-----------------|----------------------|--------------|---------------------------|---------|
| MR1 | Armadura Central | Longitudinal | 6 ϕ 8 | 0,32 |
| | | Transversal | DM ϕ 8@200[mm] | 0,34 |
| | Borde Confinado | Longitudinal | 4 ϕ 16 | 3,97 |
| | | Transversal | E ϕ 6@70[mm] | 0,87 |
| | Borde No Confinado | Longitudinal | 4 ϕ 16 | 3,97 |
| | | Transversal | DM ϕ 8@200[mm] | 0,34 |
| Viga MR1 | Armadura Central | Longitudinal | 14 ϕ 8 + 28 ϕ 8 | 0,84 |
| | | Transversal | 14 ϕ 8 | 0,59 |
| | Borde No Confinado | Longitudinal | 4 ϕ 16 + 4 ϕ 8 | 1,86 |
| | | Transversal | 14 ϕ 8 | 0,59 |
| MR2 | Armadura Central | Longitudinal | 4 ϕ 8 | 0,71 |
| | | Transversal | DM ϕ 8@100[mm] | 0,67 |
| | Borde Confinado | Longitudinal | 4 ϕ 12 | 2,32 |
| | | Transversal | E ϕ 6@100[mm] | 1,05 |
| | Borde No Confinado | Longitudinal | 4 ϕ 12 | 2,32 |
| | | Transversal | DM ϕ 8@100[mm] | 0,67 |
| Viga MR2 | Armadura Central | Longitudinal | 4 ϕ 8 + 4 ϕ 8 | 0,53 |
| | | Transversal | 14 ϕ 8 | 0,59 |
| | Borde No Confinado | Longitudinal | 4 ϕ 16 + 8 ϕ 8 | 2,32 |
| | | Transversal | 14 ϕ 8 | 0,59 |
| Vigas de acople | Armadura distribuida | Longitudinal | 4 ϕ 12 + 4 ϕ 8 | 1,45 |
| | Armadura distribuida | Transversal | 8@60[mm] | 1,12 |

Los planos se encuentran en la sección anexos A.1.

3.2. Ensayo

El ensayo de la probeta corresponde a un ensayo cíclico tipo *pushover*, controlado por desplazamiento, lo cual quiere decir que se impone un listado de desplazamientos de techo para el ensayo definidos por las derivas que se disponen en la tabla 3.3, los cuales tienen cada uno una carga asociada para ser alcanzados que se debe identificar en el transcurso del ensayo. Este listado de desplazamientos se definen acorde a sus derivas, que las impone la ACI-T1.1-01 [15].

Tabla 3.3: Protocolo de carga

| | | | | | | | | | |
|------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|----|----|
| Deriva [%] | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,6 | 0,9 | 1,35 | 2 | 3 |
| Desp. [mm] | 2,8 | 5,6 | 8,4 | 11,2 | 16,8 | 25,2 | 37,8 | 56 | 84 |

Como se dijo anteriormente, el ensayo es de carácter cíclico, lo que significa que se debe

someter la probeta a cada uno de los drift más de una vez, para este caso son 3 veces tanto en la dirección positiva como negativa. Dicho esto, el desarrollo que debe llevar el ensayo se muestra en la Figura 3.5.

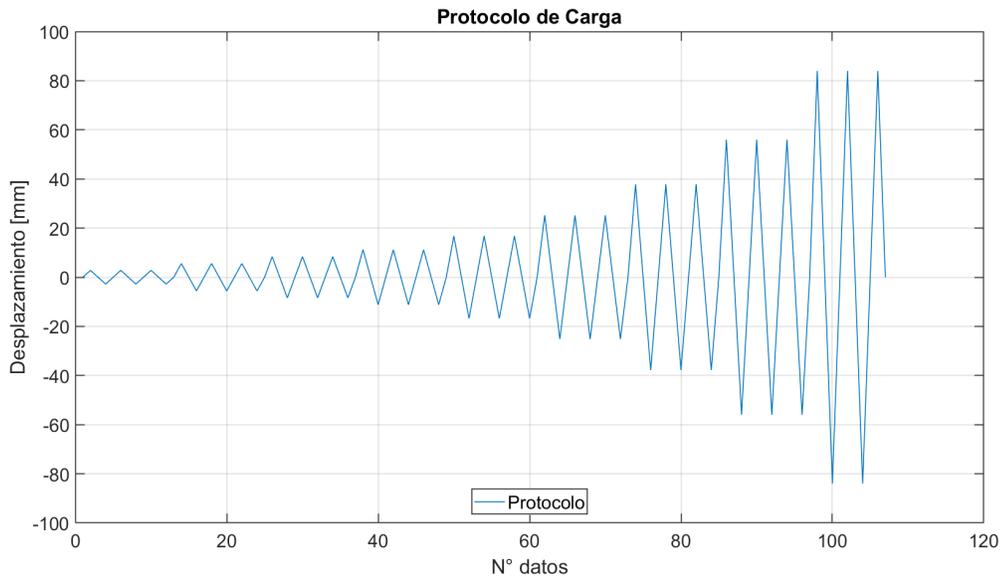


Figura 3.5: Protocolo de carga

3.3. Caracterización de Materiales

Los materiales estructurales que componen la probeta son el hormigón y el acero, por lo que se hace necesario obtener los parámetros resistentes de estos materiales: la resistencia máxima a la compresión,

3.3.1. Acero

Las barras de acero utilizadas fueron compradas a la compañía de aceros CAP, y corresponden a acero A630-420H. Para obtener sus parámetros mecánicos se realizaron ensayos a tracción sobre barras de acero que sobraron del armado de la enfierradura.

Para caracterizar el comportamiento del acero se realizan ensayos de capacidad a tracción controlados por desplazamiento en una máquina de ensayo hidráulica INSTRON-modelo 600LX en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Los ensayos que se realizaron fueron 3 para cada una de las barras utilizadas: $\phi 6$, $\phi 8$, $\phi 10$, $\phi 12$ y $\phi 16$.

Para el ensayo, se implementó una tasa de deformación de 3[mm/min] en probetas de 20[cm] de largo, y el desplazamiento y carga durante el ensayo fueron monitoreados mediante la máquina universal y mediante el extensómetro Epsilon-modelo 3542.

El extensómetro se utiliza para poder medir en el rango lineal de deformación de la probeta, ya que, debido al acomodamiento que experimenta la probeta durante el ensayo en este rango, se produce un deslizamiento de la probeta en las mordazas. Así con estos datos, se

puede obtener el valor del módulo de Young. Tras exceder este rango, se retira el extensómetro ya que no resiste las deformaciones posteriores.

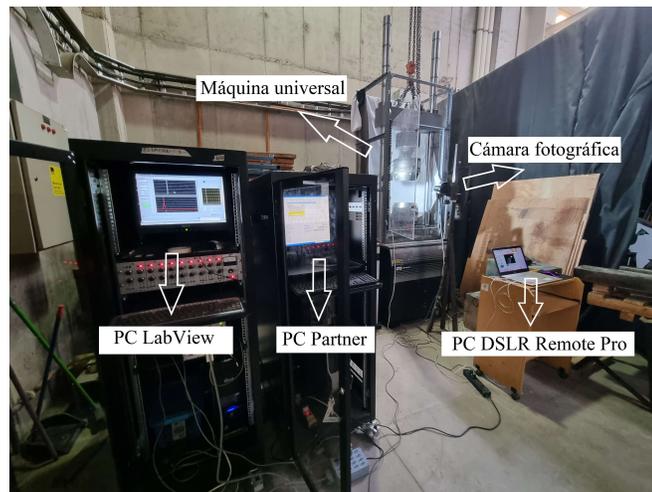


Figura 3.6: Montaje ensayo a tracción [14]

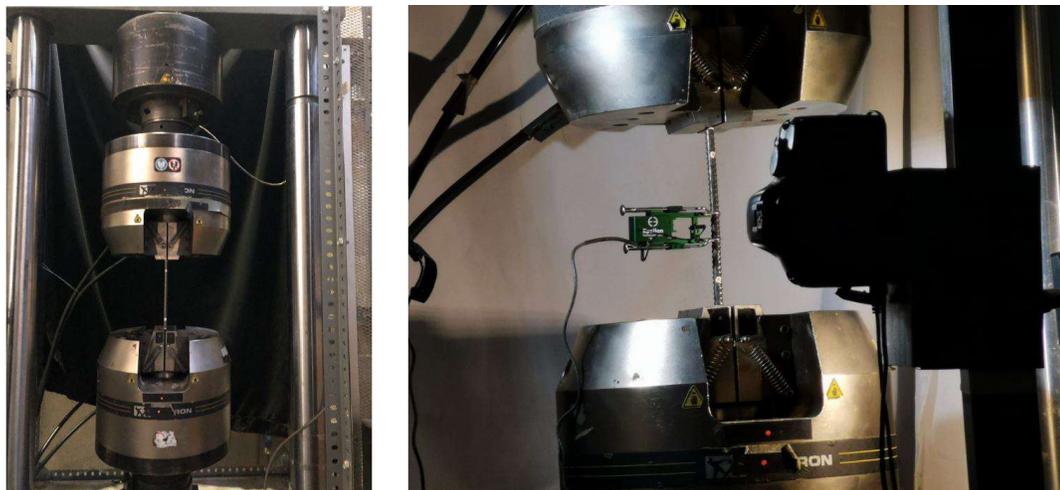


Figura 3.7: Ensayo probeta de acero

En la tabla 3.4 se presentan los resultados de los ensayos a tracción de las barras, es importante mencionar que las barras $\phi 6$ tienen rigidez variable pues estas provienen de rollo, también se utilizaron barras $\phi 18$, pero dado que estas se utilizaron en el pedestal, no se realizan ensayos de estas.

Tabla 3.4: Resultados ensayos a tracción de barras de acero

| Diámetro | E [Gpa] | fy [Mpa] | fu [Mpa] | fu/fy [-] | ey [-] | eu [-] | eu/ey [-] |
|----------|---------|----------|----------|-----------|--------|--------|-----------|
| Φ6 | 230,5 | 471 | 625 | 1,33 | 0,20 | 15,67 | 82 |
| Φ8 | 204,2 | 491 | 815 | 1,66 | 0,23 | 14,00 | 36 |
| Φ10 | 201,0 | 466 | 736 | 1,58 | 0,24 | 12,03 | 63 |
| Φ12 | 194,3 | 489 | 750 | 1,54 | 0,25 | 9,07 | 47 |
| Φ16 | 195,8 | 472 | 697 | 1,47 | 0,24 | 10,43 | 81 |

3.3.2. Hormigón

El hormigón de la probeta fue suministrado por la empresa Melón, y corresponde a un hormigón H25 de resistencia nominal de 25[MPa], y tamaño de árido máximo de 13[mm].

Durante el hormigonado se realiza el ensayo del cono de Abrams, lo cual será detallado en el capítulo 4. Para obtener las características resistentes del hormigón se confeccionaron 25 probetas cilíndricas el día del hormigonado, para lo cual se recogen muestras de hormigón del camión según la norma NCh 171-2008 [16] durante el hormigonado de la probeta, y se confeccionan según la norma NCh1017-Of2009 [17]. En particular, se busca la resistencia máxima a la compresión del material a los 7, 14 y 28 días posteriores al hormigonado, además del día del ensayo.

El ensayo se realiza a una tasa de deformación de 3[mm/min], colocando la probeta cilíndrica en un anillo de compresión, y se monitorea la deformación de la probeta mediante dos LVDT.

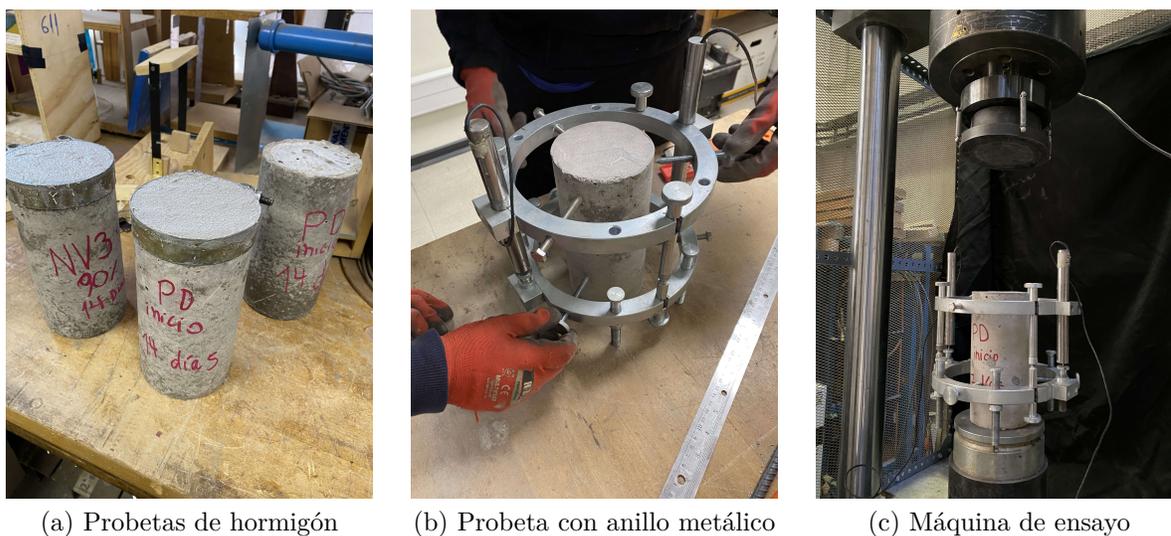


Figura 3.8: Procedimiento ensayos a compresión hormigón

En la tabla 3.5, se tienen los valores de resistencia a la compresión para los días mencionados anteriormente y para el día del ensayo. Estos valores se obtienen promediando las resistencias a la compresión de los ensayos realizados para cada día. Estos valores se encuentran en Anexos B.1

Tabla 3.5: Resistencia a la compresión de hormigón promedio por día

| Día | σ [Mpa] |
|-----------------|----------------|
| 7 | 26.88 |
| 14 | 32.25 |
| 28 | 31.1 |
| Test day | 35.76 |

Capítulo 4

Trabajo Experimental

4.1. Laboratorio de Estructuras

En la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile se cuenta con un laboratorio en el cual se pueden realizar ensayos como el requerido para este trabajo, en este caso corresponde al Laboratorio de Estructuras Arturo Arias del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

El laboratorio dispone de una losa de reacción con agujeros equiespaciados cada 40 cms por los cuales se pueden atravesar barras de acero con las cuales se ancla la probeta al suelo, hay algunas zonas donde no hay agujeros pues por debajo de estos hay muros o vigas que componen la estructura del piso inferior al laboratorio. Además de la losa está también el muro de reacción, que cuenta con un espesor suficiente para soportar las elevadas cargas a las que se somete la probeta.

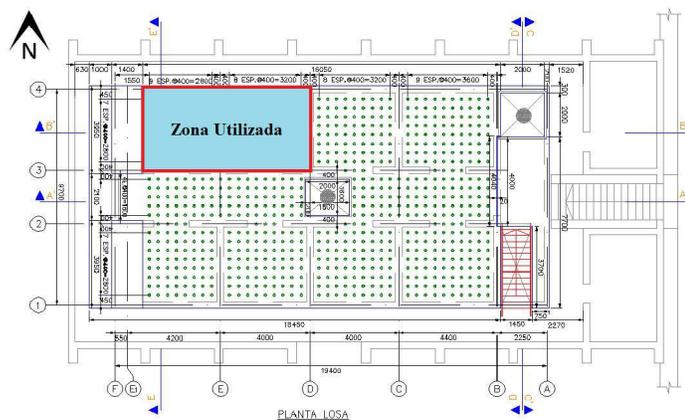


Figura 4.1: Vista en planta Laboratorio de Estructuras

4.2. Montaje Experimental

4.2.1. Enfierrado, Transporte y Arreglos

La enfierradura de la probeta se confecciona en la sede de Cerrillos de IDIEM, una vez finalizada la construcción de estas, se trasladan al Laboratorio de Estructuras.



Figura 4.2: Enfierradura probeta



Figura 4.3: Enfierradura de probetas en laboratorio

Una vez llegan las enfierraduras al laboratorio se procede a comparar los planos de construcción con las enfierraduras entregadas, se observan algunas discrepancias entre lo planificado y lo construido. Por esto se deben cortar algunos de los alambres que amarran las barras para reposicionarlas como se especifica en los planos. Además, se limpia el óxido de las barras producto de la exposición a la intemperie en Cerrillos.

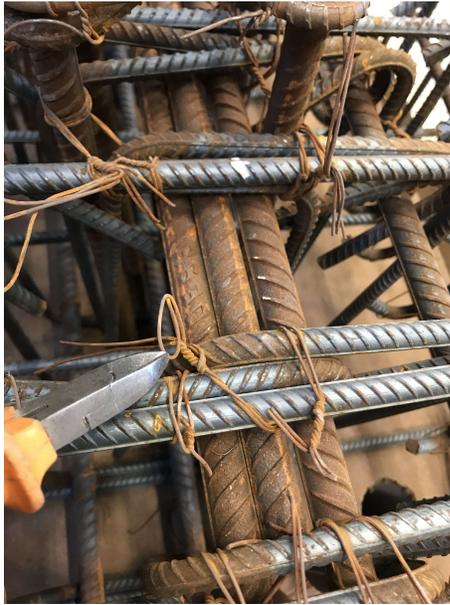


Figura 4.4: Correcciones enfierradura

4.2.2. Moldaje

Para el moldaje se tuvo especial precaución de dejar espacio libre para el paso de tubos de PVC en el pedestal, por los cuales posteriormente se proyecta posicionar las barras de acero que anclan el pedestal del muro a la losa de reacción tras ser postensadas, y también las barras que fijan la carga axial al pedestal de la probeta, dichos anclajes se especificarán posteriormente.



(a) Tubos PVC en pedestal



(b) Moldajes instalados

Figura 4.5: Imágenes moldaje

4.2.3. Hormigonado

El hormigonado se llevó a cabo por medio de la empresa externa Melón, para lo cual la empresa dispuso de un camión de hormigonado y otro camión bomba, que por medio de mangueras distribuyeron hormigón a la probeta, posicionando la manguera sobre la viga de

carga de ambos muros, hormigonando así desde arriba de la probeta.



Figura 4.6: Camiones hormigonado

Durante el hormigonado se dispuso una zona aparte en la parte exterior del laboratorio, en esta zona se dejaron cilindros de PVC para rellenarlas con hormigón y confeccionar probetas cilíndricas de hormigón, las cuales posteriormente se ensayan y de estas se obtiene la resistencia máxima a la compresión del material. En esta zona también se llevó a cabo el ensayo del cono de Abrams, con el cual se puede obtener la consistencia del hormigón durante el hormigonado según la norma NCh 1019.Of2009. obteniendo un asentamiento de cono de 16[cm].



(a) Zona toma de muestras



(b) Instrumentos Cono de Abrams

Figura 4.7: Toma de muestras en hormigonado



(a) Apisonado cono Abrams



(b) Cono Abrams

Figura 4.8: Ensayo de cono de Abrams

4.2.4. Postensado de Barras

El postensado de barras se lleva a cabo para anclar el muro a la losa de reacción del laboratorio de estructuras, buscando evitar deslizamiento y/o levantamiento de la probeta. Este proceso se realiza con una silla de acero, un gato hidráulico conectado a bomba hidráulica, una celda de carga, dos tuercas, una placa para colocar sobre el pedestal, y múltiples placas que se colocan a nivel del suelo del laboratorio para apoyar la silla y evitar así daños en el pedestal debido a las fuertes tensiones a las que se somete la barra y que comprimen el pedestal a través de la silla de acero. El postensado se realiza hasta alcanzar un valor aproximado de 15 [ton].



Figura 4.9: Mecanismo postensado de barras

4.2.5. Elementos de Ensayo

En la siguiente sección se presentan y detallan de manera individual los elementos que se utilizaron para las distintas tareas que se llevan a cabo previo a realizar el ensayo, así como también las que se usan durante el ensayo.

4.2.5.1. Actuador

El actuador corresponde a un gato hidráulico de grandes dimensiones, con el cual se le aplica la carga lateral al muro en el centro de la viga de carga sobre el muro MR1. El actuador se acciona por medio de una bomba hidráulica que le provee o le remueve aceite, ejerciendo así la presión deseada, dependiendo de si se busca empujar o tirar de la probeta, el pistón se expande hasta 600 [mm] y se contrae como mínimo a 130[mm]. El actuador cuenta con una celda de carga en su interior, con la cual se puede monitorear durante el ensayo la carga que el actuador está ejerciendo sobre el muro, mientras que el desplazamiento se puede medir paralelamente por medio de un LVDT de control que se instala externamente en el actuador.



Figura 4.10: Actuador



(a) Bomba hidráulica de actuador



(b) Actuador montado

Figura 4.11: Imágenes actuador



Figura 4.12: Entrada celda de carga actuador

4.2.5.2. Gatos Hidráulicos y Celda de Carga

Se dispone de 4 gatos hidráulicos que cumplen la función de tensar tanto las barras de acero que se utilizan en la carga axial, como las que se usan en el postensado de barras del pedestal a la losa de reacción. Estos se accionan por medio de mangueras conectadas a una bomba hidráulica, viendo la carga a la que está sometida el gato por medio de la celda de carga, instrumento que se detalla en el siguiente párrafo.

La celda de carga corresponde a un instrumento de medición de forma cilíndrica con un hueco cilíndrico en medio, se conecta mediante un cable a la bomba hidráulica, donde se dispone el valor de la carga. Con esta se mide la carga a la que están sometidas las barras utilizadas durante el postensado de barras y también durante el ensayo en la carga axial, en este último caso se coloca sobre la carga axial en uno de los 4 gatos hidráulicos. La lectura de la celda entrega datos en voltaje, los cuales se deben transformar a carga mediante la fórmula

$$1[\text{kgf}] = 18966 \cdot (\text{lectura actuador}) - 1.8334.$$



Figura 4.13: Bomba hidráulica para gatos



(a) Gato hidráulico



(b) Celda de carga

Figura 4.14: Gato hidráulico y Celda de carga

4.2.5.3. Carga Axial

El sistema de carga axial está compuesto por un conjunto de perfiles de acero que permiten el paso de 4 barras de acero desde el techo del muro MR1 hasta el nivel del suelo atravesando estas el pedestal, donde se dejan fijas a este último por medio de una tuerca y una placa en cada barra. Además se utiliza para apoyar las barras de restricción lateral que provee el marco de acero. Su función durante el ensayo es proveer una mayor capacidad a flexión al muro, lo cual se logra manteniendo el muro MR1 bajo una carga vertical constante de 40 [tonf], esto se corrobora mediante la celda de carga, que se coloca en una de las 4 barras, debiendo esta marcar 10 [tonf].



(a) Carga axial

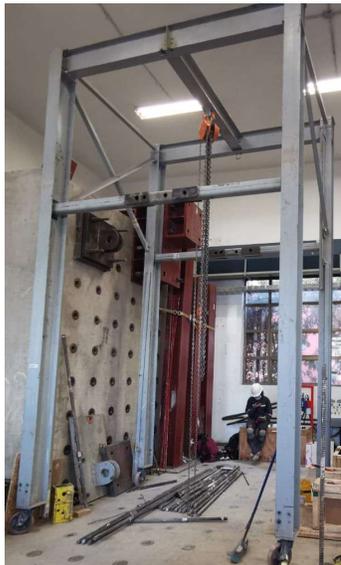


(b) Carga axial sobre MR1

Figura 4.15: Carga axial

4.2.5.4. Marco de Acero

El marco de acero tiene dimensiones de 2.7 [m] de largo por 2.0 [m] de ancho y 4.87 [m] de alto. Este cumple múltiples funciones, tanto previo al ensayo como en el ensayo mismo. Previo al ensayo se utiliza para movilizar objetos de elevado peso, posicionando un tecele en el centro de este, durante el ensayo se posiciona alrededor del muro y, colocando unas barras de manera horizontal se restringe el movimiento fuera del plano de la probeta, específicamente del muro MR1, pues en este se coloca la restricción.



(a) Marco de acero



(b) Subiendo actuador con tecele en marco de acero

Figura 4.16: Marco de acero

4.2.5.5. Montaje Completo

Finalmente, el montaje completo luce como se observa en la figura 4.17.



Figura 4.17: Montaje completo ensayo

4.3. Instrumentación

El comportamiento de la probeta fue monitoreado por dos técnicas de instrumentación: sensores LVDT y fotogrametría, en particular este trabajo se centra en la información obtenida a partir de LVDT, pero de todas formas se utilizan algunos datos de fotogrametría provistos por Bustos F. para obtener algunos resultados.

4.3.1. LVDT

Los transformadores diferenciales de variación lineal o LVDT (linear variable differential transformer) corresponden a instrumentos de medición de desplazamiento lineal, que funcionan por medio de cambios de potencial eléctrico al desplazarse un cilindro macizo al interior de un cascarón cilíndrico, luego, por medio de un factor de calibración que transforma variaciones de potencial eléctrico en variaciones de desplazamiento lineal, se pueden obtener los desplazamientos a lo largo del tiempo en los puntos de interés, donde son colocados estos sensores. Los sensores utilizados con sus varillas respectivas se observan en la Figura 4.18.

Para la instalación de estos instrumentos se utilizaron cajas de madera (ver Figura 4.19) con forma de paralelepípedo con perforaciones circulares de diámetro igual al del sensor, de tal forma que el sensor quedara fijo al ser atravesado por esta. Estas cajas se atravesaron también por medio de unos tornillos llamados hilos sin fin que tienen la finalidad de anclar las

cajas al muro, los hilos sin fin se posicionan en los moldajes del muro, previo al hormigonado, como se observa en la Figura 4.20.

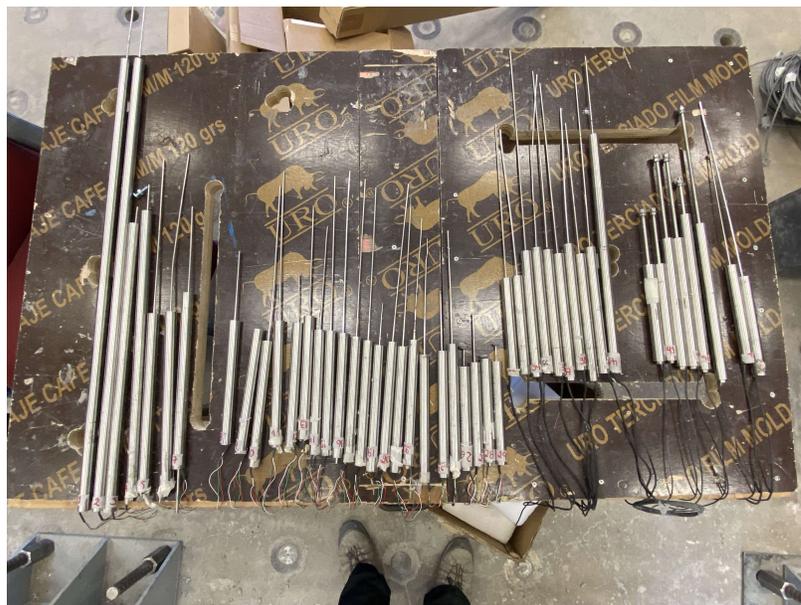


Figura 4.18: Sensores utilizados



Figura 4.19: Cajas LVDT

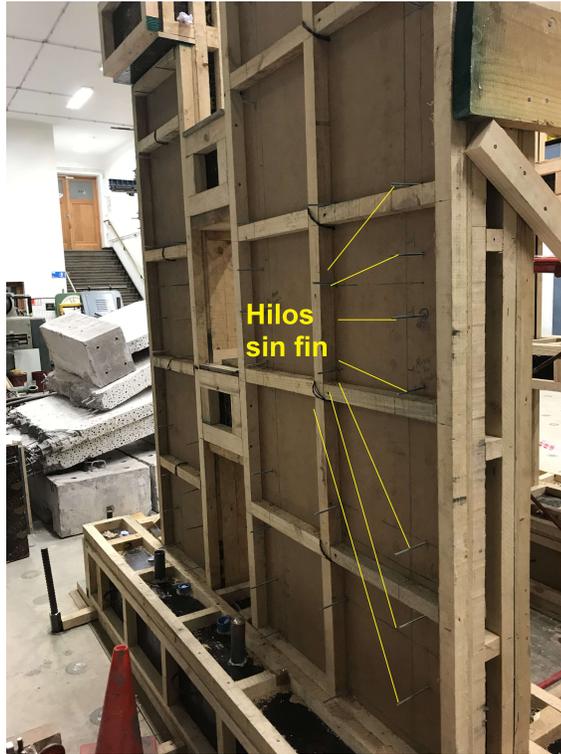


Figura 4.20: Hilos sin fin

Los sensores utilizados corresponden a 3 marcas: *Macrosensor*[®][18], *Schaevitz*[®][19], *Omega*[®][20]. Para contar con un orden más eficiente a la hora de manipular los sensores LVDT y los resultados, estos se enumeraron, anotando también su número de serie y factor de calibración, esta información se encuentra disponible en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Información sensores LVDT

| 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 y 3º Piso) |
| | 4 | 149108 | 5 | -15,901 | Flexión MR1 (2º y 3º Piso) |
| | 5 | 6172316 | 2 | -5,393 | Corte MR1 (2º Piso) |
| | 6 | 6172317 | 2 | -5,260 | Flexión MR2 (2º y 3º Piso) |
| | 7 | 6172318 | 2 | -5,250 | Flexión MR2 (2º y 3º Piso) |
| | 8 | 6165443 | 1 | -3,345 | Flexión MR2 (1º y 2º piso) |
| | 9 | 6165444 | 1 | -2,586 | Flexión MR1 (1º Piso) |
| | 10 | 6165445 | 1 | -2,942 | Flexión MR2 (2º 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 (1º y 2º Piso) |
| | 15 | 6165450 | 1 | -3,559 | Flexión MR1 (3º Piso) |
| | 16 | 6165451 | 1 | -2,633 | Flexión MR1 (1º y 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 MR1 (2º Piso) |
| | 22 | 6165457 | 1 | -2,618 | Flexión MR2 (1º Piso) |
| | 23 | 6172409 | 1 | -2,664 | Corte viga inferior |
| | 24 | 6166560 | 1 | -2,580 | Corte viga inferior |
| | 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 y 2º 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 | Corte viga superior |
| 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 (1º Piso) |
| | 44 | 52-02 | 2 | -10,603 | Flexión MR2 (1º Piso) |
| | 45 | 52-04 | 2 | -10,239 | Flexión MR1 (1º Piso) |
| | 46 | 0 201 | 3 | -15,563 | Corte viga superior |
| | 47 | 1401 | 3 | -15,317 | Disp. horizontal pedestal |

Las ubicaciones de los sensores dispuestos en la tabla anterior se presentan en la Figura 4.23. Para cada instrumentación se usó un lado del muro, el lado norte fue usado para LVDT y el sur para fotogrametría. La convención general que se toma para el informe es la del lado de fotogrametría: a la izquierda el muro MR1 y a la derecha el muro MR2, sin embargo dado que resultó más práctico para instalar los sensores utilizar la vista inversa (MR1 a la derecha y MR2 a la izquierda), el diagrama que se presenta con su disposición está al revés de como se presentan posteriormente los resultados, con MR1 al lado izquierdo y MR2 al lado derecho.

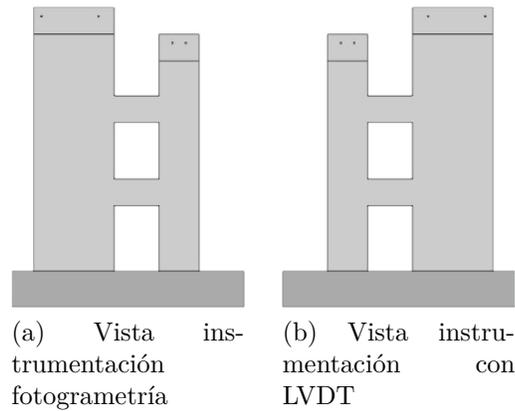


Figura 4.21: Vista de probeta para cada instrumentación

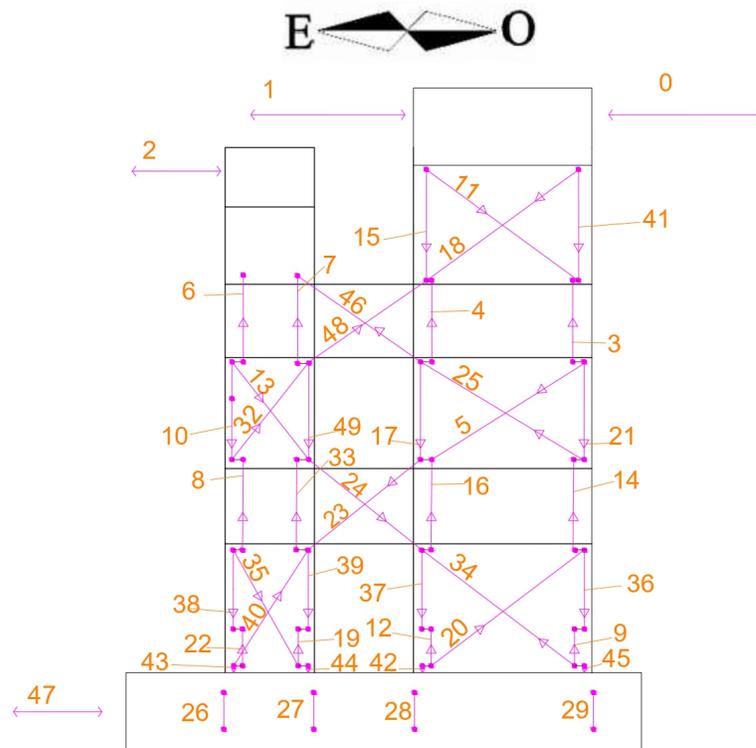


Figura 4.22: Diagrama inicial ubicaciones LVDT

Tras revisar las lecturas de cada sensor, se llegó a la resolución de que los sensores 4, 9, 12, 25 y 40 no leyeron correctamente durante el ensayo, por lo que no se consideran sus mediciones en los resultados. Por lo tanto, los resultados que se muestran en el capítulo siguiente corresponden a los obtenidos de la siguiente disposición de sensores.

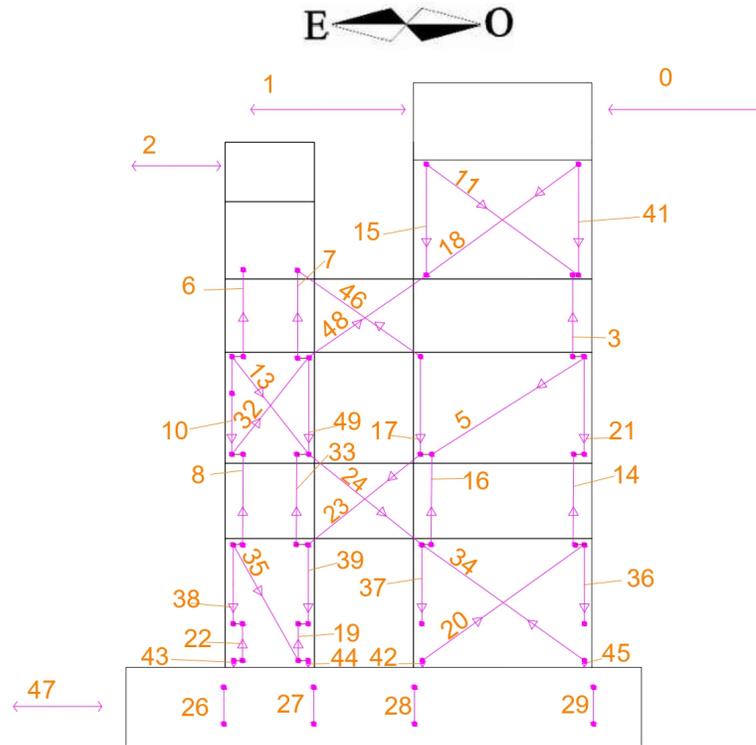


Figura 4.23: Diagrama ubicaciones LVDT funcionales

4.3.2. Sistema de Adquisición de Datos

La información proveniente de las lecturas de los LVDT se almacenan conectando los sensores mediante una entrada a cable DB9 a tres cajas de conexión, las cuales a su vez están conectadas a una tarjeta de adquisición que transmite la información mediante un cable LAN a un computador, donde los valores de voltajes de cada sensor se almacenan en un archivo txt. Además, los valores de la carga que ejercen las bombas hidráulicas por medio del actuador y de los gatos hidráulicos de la carga axial se almacenan también en este sistema.

Los sensores cuentan con una salida macho de cable DB9, la cual se conecta a la entrada hembra de las cajas de conexiones.



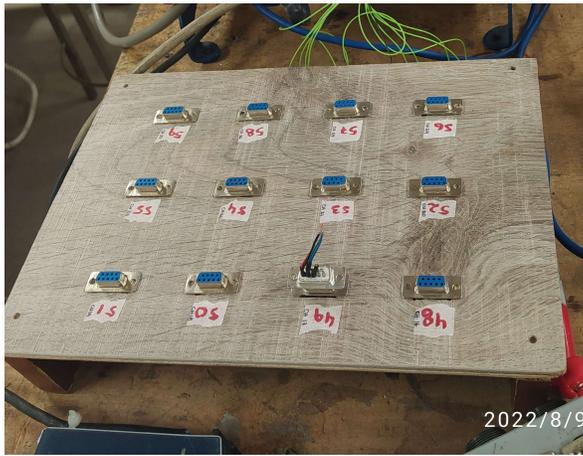
Figura 4.24: Cable DB9 [21]

La fuente de poder (Figura 4.25) cumple el rol de suministrar corriente a todos los instrumentos, pues posee dos canales de salida de voltaje, con lo cual puede generar bipolaridad para conectarse a los terminales de las cajas de conexión.

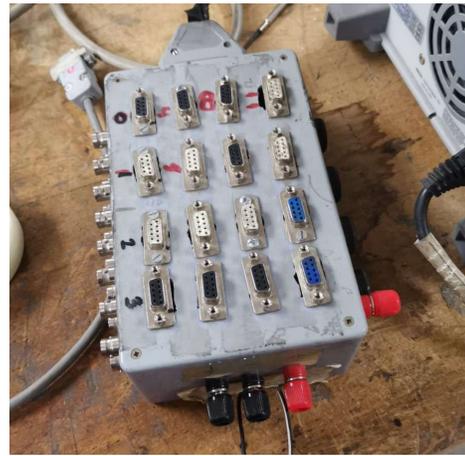


Figura 4.25: Fuente de Poder [22]

Las cajas de conexión utilizadas son las dispuestas en las imágenes de la Figura 4.26, donde la caja c) es la utilizada para los *Macrosensor*, mientras que los *Schaevitz* y los *Omega* se conectan en las cajas a) y b). En la imagen d) se observan las cajas con todos los sensores conectados durante el ensayo.



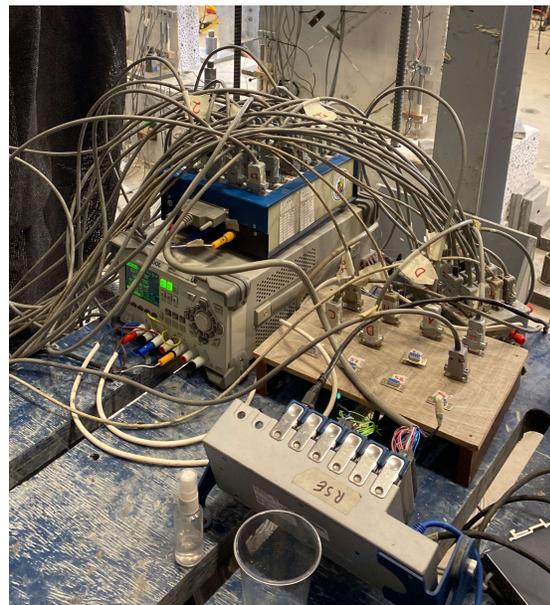
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.26: Cajas de conexión

La información provista por los LVDT se almacena en un computador mediante el software LabVIEW, donde el registro se guarda en archivos de texto(.txt). Finalmente, en la Figura 4.27, se observa el montaje general de todos los artefactos conectados.

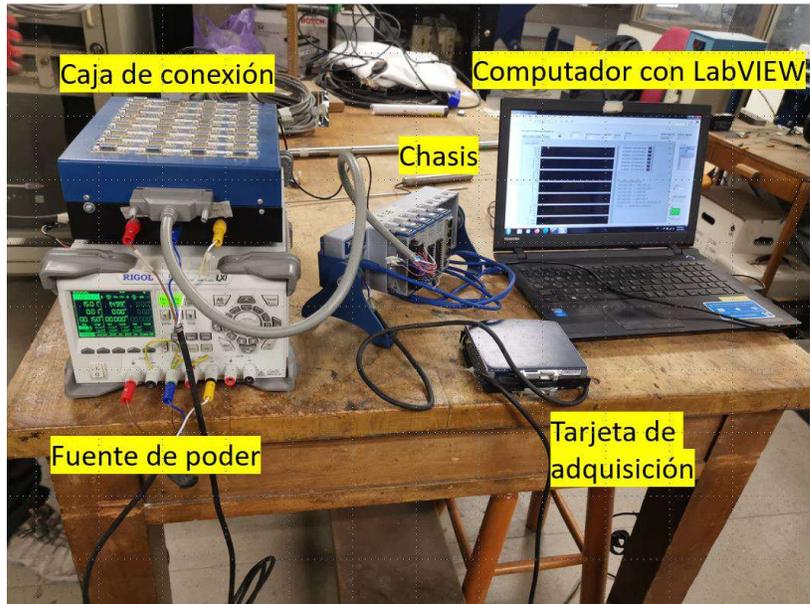


Figura 4.27: Montaje instrumentación LVDT

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se aborda lo que es el procesamiento de la información obtenida de los LVDT durante el ensayo. Estos datos fueron procesados en MATLAB [23].

Es importante considerar que las mediciones de los sensores no se consideran tras sobrepasar el 2% de deriva, ya que desde este punto en adelante las lecturas pueden ser erróneas ya sea debido a movimiento de los sensores, o por posibles desprendimientos de material que golpean los instrumentos.

5.1. Instrumentación

En esta sección, se detallan metodologías en base a estudios previos para el uso de sensores LVDT en ensayos experimentales. En particular, se detalla primeramente la corrección por movimientos como sólido rígido que pueden desarrollarse durante el ensayo, rotación de la probeta o desplazamiento horizontal de esta, y en segundo lugar también se explica el cálculo de curvaturas y de desplazamientos por corte en los distintos niveles que componen los muros, distribuyendo debidamente los sensores por la probeta.

5.1.1. Corrección por Desplazamiento y Rotación

A pesar de todas las medidas que se toman para que la probeta quede totalmente anclada al suelo e inmóvil durante el transcurso del ensayo, es esperable que al someterla a las elevadas cargas que contempla el ensayo esta realice movimientos como sólido rígido. Es por esto que es necesario hacer una corrección de los datos obtenidos para el desplazamiento de techo de ambos muros de la probeta, este ajuste contempla tanto el desplazamiento horizontal como rotación de la probeta. Esta corrección fue implementada por Sebastián Díaz [24].

La corrección se lleva a cabo para cada muro individualmente, por medio de 7 sensores externos, de los cuales 2 se ubican cada uno horizontalmente a la altura del techo de cada muro, estos se encargan de medir el desplazamiento de techo de cada muro, un tercer sensor se ubica horizontalmente en el pedestal, y monitorea el desplazamiento horizontal de la probeta, por último los 4 sensores restantes se ubican verticalmente en el pedestal, apoyados contra el suelo, estos se ubican de a pares (2 por muro), y se encargan de medir la rotación de cada muro. Con esto y utilizando la fórmula que se dispone a continuación, se obtiene el desplazamiento de techo corregido de cada muro.

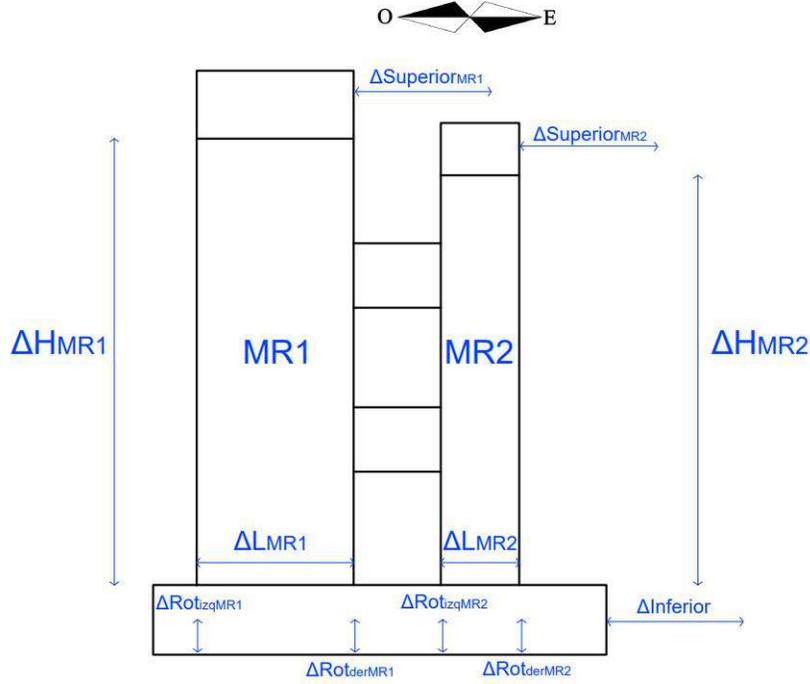


Figura 5.1: LVDT externos

La fórmula para corregir cada muro es la siguiente:

$$\Delta_{corregido} = \Delta_{superior} - \Delta_{inferior} - \frac{(\Delta_{rotacion_{der}} - \Delta_{rotacion_{izq}}) \cdot \Delta H}{\Delta L} \quad (5.1)$$

5.1.2. Desplazamiento por Corte

Al realizar el ensayo, la probeta sufre deformaciones y desplazamientos que son consecuencia de esfuerzos axiales, esfuerzos de corte y esfuerzos de flexión, predominando estos últimos al estar la probeta conformada por muros esbeltos. En particular, para estos dos últimos se puede calcular la contribución de cada uno a los desplazamientos mediante la metodología que se explica en la siguiente sección. La información corresponde al estudio realizado por Massone y Wallace [25].

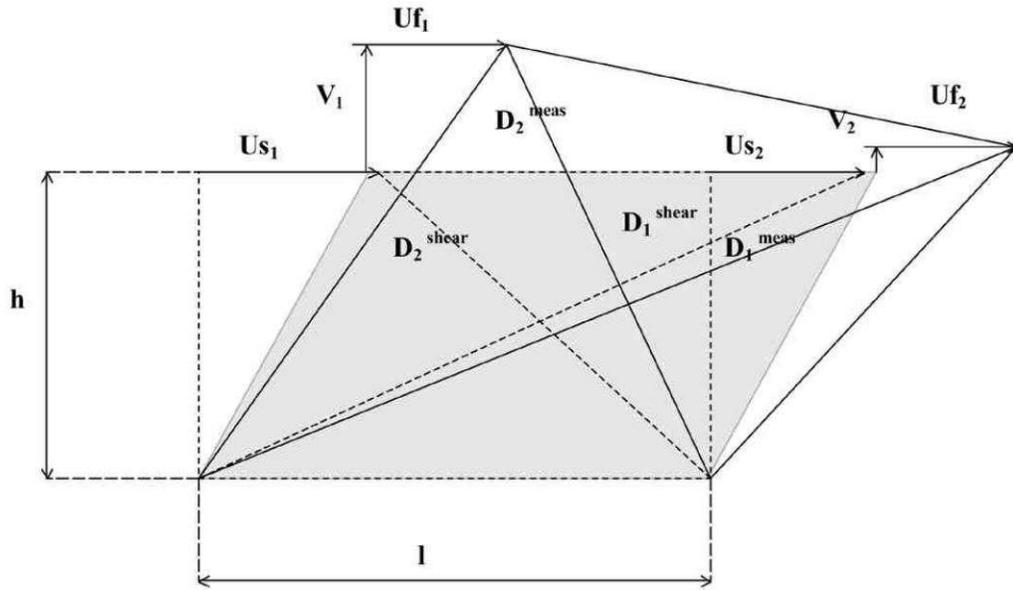


Figura 5.2: Diagrama deformación por corte [25]

En la Figura 5.2, la configuración no deformada se muestra como un rectángulo en líneas punteadas. Los términos que aparecen en la figura se detallan en el siguiente listado. Los hilos que se mencionan en el listado corresponden a pernos que se instalan en la probeta, sobre los cuales posteriormente se pueden montar los sensores LVDT, con los cuales se monitorean las deformaciones y desplazamientos de la probeta.

- h es la separación vertical entre los hilos del piso sin estar deformado el piso.
- l es la separación horizontal entre los hilos del piso sin estar deformado el piso.
- V_1 y V_2 son los desplazamientos verticales de los lados del piso.
- U_{f1} y U_{f2} son valores para corregir el valor del desplazamiento lateral por corte producto de los desplazamientos laterales por flexión.
- U_{s1} y U_{s2} son los desplazamientos laterales por corte.
- D_1^{meas} y D_2^{meas} son los largos de diagonales deformadas.

El valor de U_f para este estudio se obtiene de $U_f = \alpha \cdot \theta \cdot h_1$, donde α en general se usa como 0.67 (2/3, centro de gravedad de carga triangular), h_1 es la altura del piso y θ corresponde a la rotación del primer piso. Sin embargo, para este estudio no es necesario ni conveniente calcular el valor de U_f , pues su aporte es significativo en muros que fallan por corte, lo cual no es el caso para este estudio, pues los muros esbeltos fallan a flexión, y se puede incurrir también en errores en el cálculo debido a que el valor de α no se puede asumir directamente como 0.67, por esto, el procedimiento a seguir para obtener el valor de desplazamiento por flexión es obtener el valor de desplazamiento total horizontal de la instrumentación con fotogrametría realizada por Bustos [26] y a este restarle el valor de desplazamiento por corte

que se calcula utilizando este método.

El valor del giro θ se obtiene mediante la fórmula 5.2

$$\theta = \frac{V_1 - V_2}{l} \quad (5.2)$$

Por otro lado, para obtener la componente de desplazamiento por corte, el estudio propone la fórmula 5.3.

$$U_s = \frac{\sqrt{D_1^{meas^2} - h^2} - \sqrt{D_2^{meas^2} - h^2}}{2} \quad (5.3)$$

5.2. Respuesta Global Muros

En esta sección se presenta el comportamiento global tanto del muro MR1 como MR2, lecturas de celdas de carga, perfiles de deformación vertical en altura para las bandas este y oeste de cada muro, entre otros resultados.

La carga axial vertical que se impuso sobre el muro MR1 fue de $0,08f'cA_g$, correspondiente a 40[tonf], con la finalidad de aumentar la capacidad a flexión del muro MR1 y simular el comportamiento de un piso que cuenta con otros pisos sobre él en un edificio. La celda de carga se colocó en una de las 4 barras que se anclan al pedestal desde el sistema de perfiles de acero de la carga axial, por lo que, al estar en una de las 4 barras, la lectura esperada es de 10 [tonf], lo cual se observa en la Figura 5.3, se mantuvo considerablemente constante durante el ensayo, con un error de no más de 0,25 [tonf]. Los valores que parecen llegar a 12 [tonf] son producto de inestabilidades eléctricas en el sistema de medición.

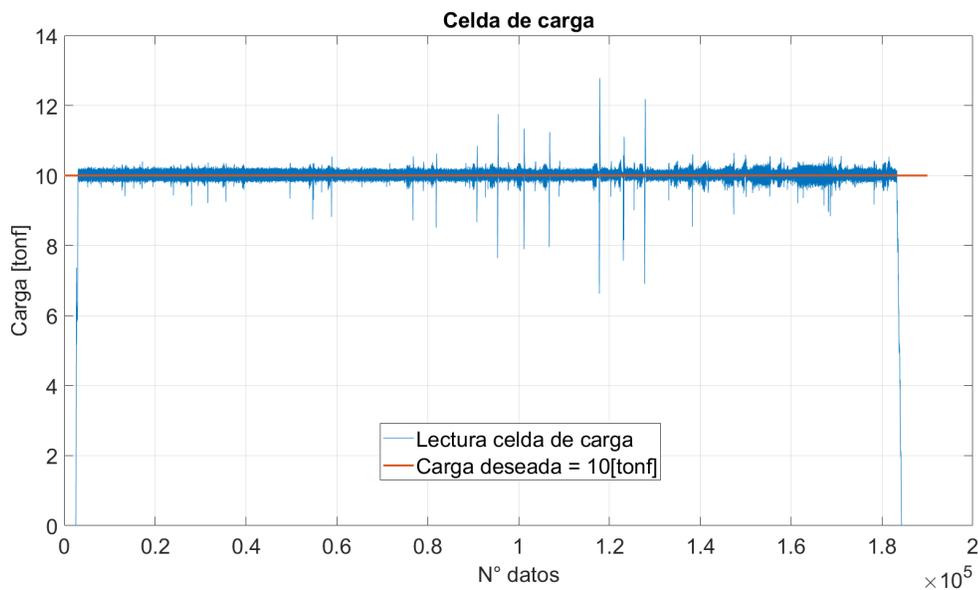


Figura 5.3: Lectura celda de carga axial

En la Figura 5.4, se dispone los valores de desplazamientos de techo que se alcanzaron

durante el desarrollo del ensayo, comparado con los valores de desplazamiento que debían alcanzarse en base al protocolo de carga. Se observa que la línea de color azul que representa al protocolo de carga prácticamente no se divide, lo cual se debe a que los valores de desplazamientos reales fueron bastante cercanos a los que impone el protocolo.

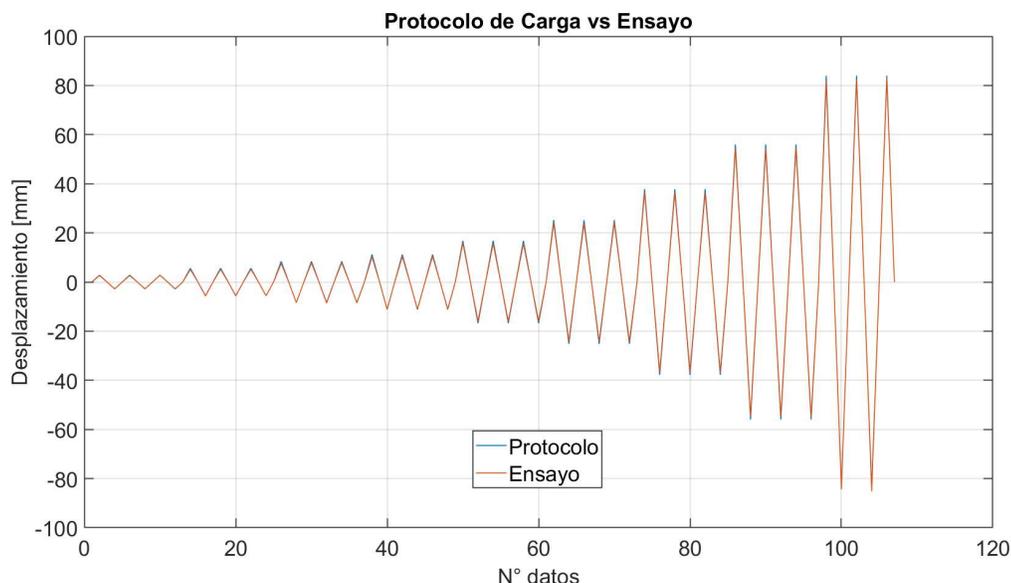


Figura 5.4: LVDT de control MR1

Se observa en la histéresis del muro MR1 en la Figura 5.5, que se alcanza una carga máxima de 43,9 [tonf] para el caso de las derivas positivas, mientras que el desplazamiento de techo máximo fue de 83 [mm]. Por otro lado, para las derivas negativas la carga máxima fue de 40 [tonf], y el desplazamiento de techo máximo fue de 85 [mm]. Sin embargo, la carga máxima de las derivas negativas se da en el primer ciclo del -2 % de drift, mientras que para las derivas positivas las cargas del primer ciclo para alcanzar el 2 % y 3 % de drift son prácticamente iguales. Esto último se explica porque en el primer ciclo del -3 % de drift se fractura una de las barras verticales de la base del muro MR1.

En las primeras derivas se mantiene la rigidez del muro MR1 ante los ciclos a los que es sometida la probeta, manteniendo, para los 3 ciclos que contempla cada deriva, una carga requerida bastante similar en los 3 ciclos para alcanzar el desplazamiento de techo impuesto. Se observa en cambio, que a partir de la deriva del primer ciclo del 0.9 % de drift, a un desplazamiento de techo de 24 [mm] y una carga de 39 [tonf], para alcanzar un mismo desplazamiento el actuador debe ejercer una menor carga en el segundo y tercer ciclo, lo cual se explica por la pérdida de rigidez del material al superar la barrera de la zona elástica, sufriendo así deformaciones de carácter plástico al superar el 0.9 % de drift.

Durante la transición del primer al segundo ciclo de la última deriva de 3 % de drift, se evidencia rotura de una de las barras de la armadura vertical en la base izquierda del muro MR1 (lado del actuador) por pandeo local en aproximadamente una deriva de 2.5 %, lo que genera una pérdida de capacidad a flexión y explica la abrupta caída de la curva en la zona inferior izquierda. Posteriormente en el desarrollo del segundo ciclo de este mismo drift se

fracturan nuevamente en la misma zona las barras verticales, observándose una considerable caída de carga al llegar al tercer ciclo de la deriva positiva, tras esto se detiene el ensayo y no se completa totalmente el tercer ciclo de 3% de drift.

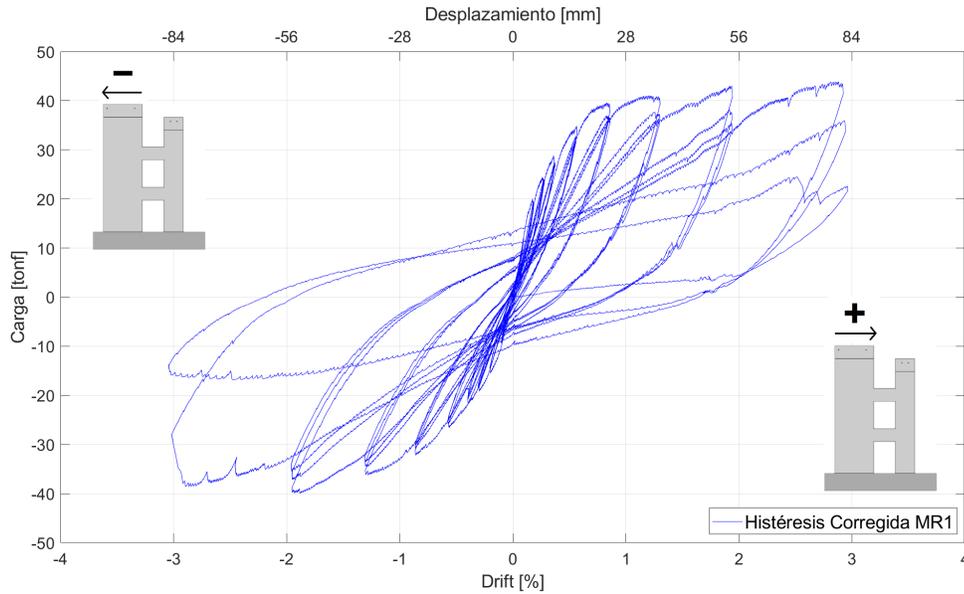


Figura 5.5: Histéresis MR1

En la Figura 5.6 se observan las cargas requeridas para alcanzar cada valor de drift deseado en el eje Y (en la figura la carga es el valor asociado a la letra Y en cada recuadro), observándose que para el lado de las derivas positivas es mayor la carga requerida en cada drift que para las negativas. Con esta información, es importante notar que el gráfico es medianamente simétrico respecto a los valores de desplazamientos, lo cual es evidente dado que el ensayo se rige por desplazamientos en este muro, mientras que respecto al eje horizontal la diferencia de cargas deja de manifiesto que el comportamiento de las cargas no es igual para ambas direcciones de aplicación, lo cual indica que el muro presenta mayor resistencia hacia el lado de las derivas positivas.

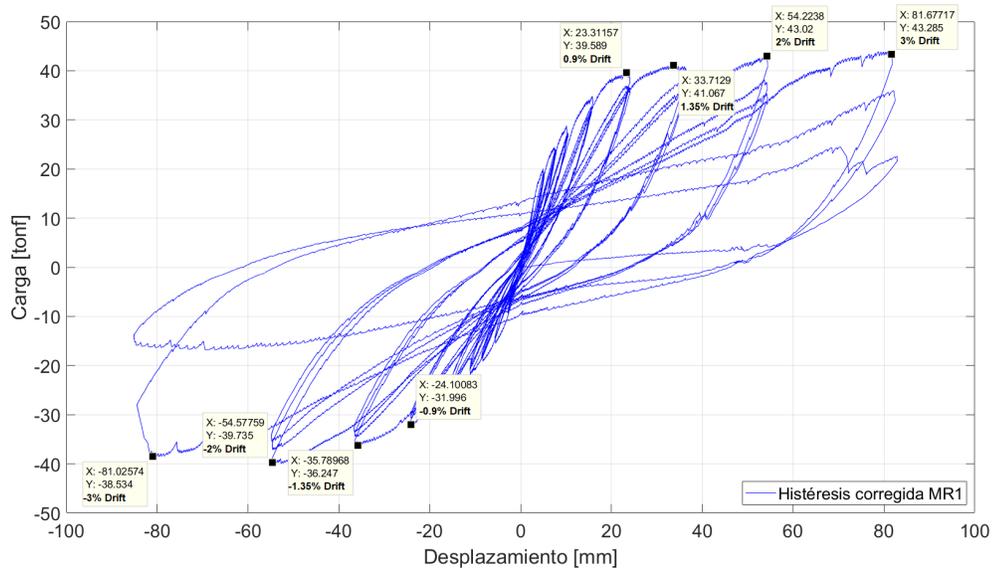


Figura 5.6: Histéresis MR1 con valores

En la Figura 5.7 se observa la curva de carga-desplazamiento del muro MR2 a lo largo del ensayo, a diferencia del muro MR1, este presenta desplazamientos de techo menores para derivas tanto positivas como negativas, lo cual se debe a que el protocolo de carga impone valores de drift sobre el muro MR1, y dada la menor altura del muro MR2, para alcanzar un mismo valor de drift que el MR1 requiere menores valores de desplazamiento de techo, pues el drift se calcula como el desplazamiento de techo dividido por el alto del muro. Además, dado su menor largo se espera que tenga un comportamiento más dúctil que el MR1.

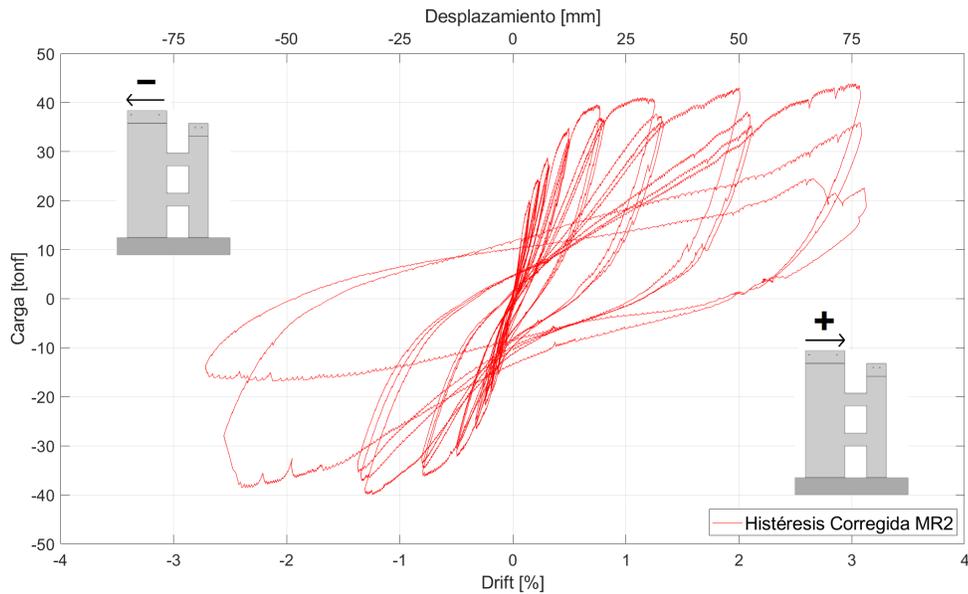


Figura 5.7: Histéresis MR2

Los desplazamientos de techo máximos a los que llegó este muro fueron 78 [mm] para

derivas positivas, y 68 [mm] para derivas negativas, lo cual indica además que, a diferencia del muro MR1, el MR2 no presenta la misma simetría respecto a sus desplazamientos, sino que para derivas positivas alcanza valores de desplazamiento mayores que para las derivas negativas. Esto se observa en los valores que se muestran en la Figura 5.8, en los valores asociados a X.

Además, para el segundo y tercer ciclo se observa que los desplazamientos de techo que alcanza son mayores que para el primero, a diferencia del muro MR1 que para cada drift en general el desplazamiento no se desvía por más de 1 [mm] entre los distintos ciclos. Esto puede deberse a la mayor carga que se ejerce para el lado positivo en el MR1 para derivas positivas.

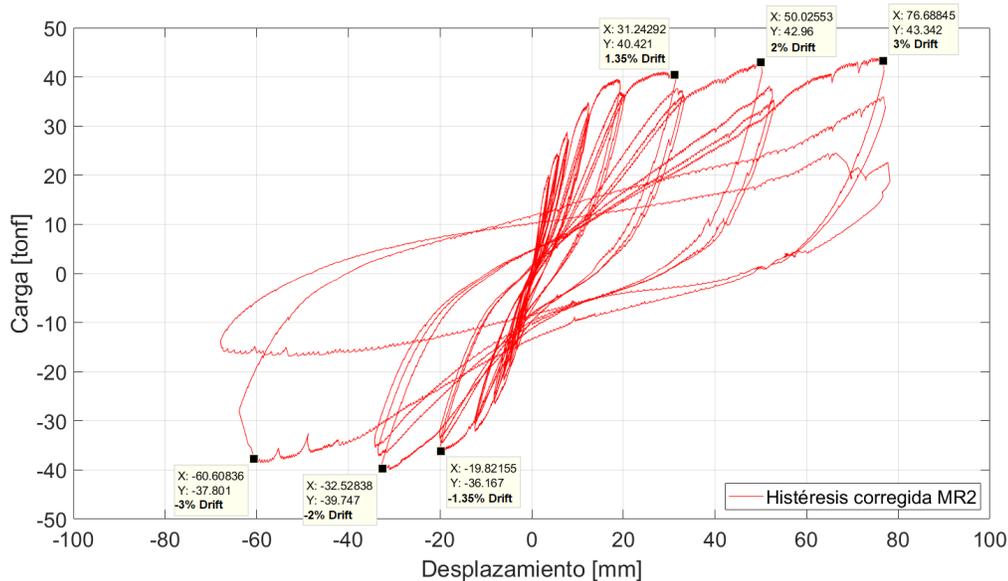


Figura 5.8: Histéresis MR2 con valores

Por último, en la Figura 5.9 se grafica la histéresis de ambos muros en función de sus desplazamientos de techo, los valores de drift no se incluyen puesto que la altura de ambos muros es distinta y no coinciden los ejes de desplazamiento y de drift. Se observa una diferencia de desplazamiento de techo mayor hacia el lado de las derivas positivas, lo cual probablemente se debe al elevado daño que recibe el muro MR1 producto de la flexión en comparación con el MR2, lo cual provoca que a menor carga el desplazamiento de techo sea mayor.

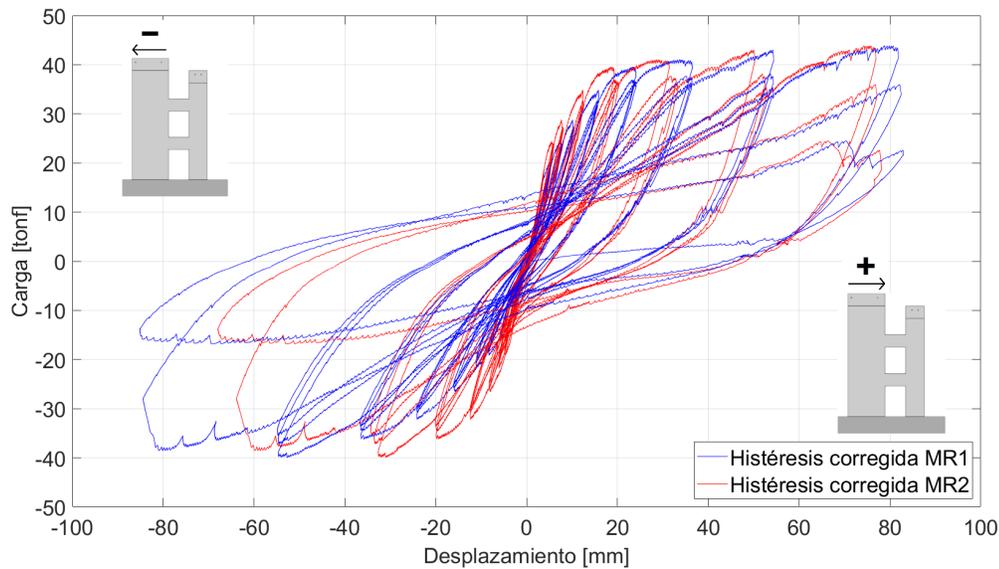


Figura 5.9: Histéresis MR1 y MR2

5.3. Perfiles de Deformación Vertical en Altura

En la siguiente sección se disponen los perfiles de deformación en altura de las 2 franjas laterales del muro MR1 y del muro MR2 a alturas de 5, 19, 49, 88, 131 y 175 [cms] para el muro MR2, y para el MR1 se añade además para el tercer piso la altura de 221 [cms]. Se muestran mediciones sólo hasta 2% de drift, ya que a derivas mayores los datos no son concordantes por posibles golpes de los sensores con material u otro tipo de incidente durante el ensayo. Los valores positivos de deformación unitaria corresponden a tracción, y los negativos a compresión.

Para los gráficos correspondientes, se trazó la línea de la deformación de fluencia de las barras de acero (0.0023).

Se observa de los gráficos un comportamiento general en que las mayores deformaciones por tracción y compresión se concentran en las zonas inferiores del muro, mostrándose mayores valores de tracción que de compresión, debido a las propiedades resistentes del hormigón. Además, los gráficos indican que, al encontrarse en derivas positivas, las franjas oeste de ambos muros sufren deformaciones por tracción, mientras que las del perfil del lado este se comprimen, por el contrario, cuando se está en derivas negativas, las franjas del lado oeste se comprimen y las del lado este se traccionan, este comportamiento se explica por el acople que ejerce la viga en el sistema, transmitiendo los esfuerzos que se observan en estos gráficos de manera análoga para los dos muros.

La zona oeste del muro MR1 (Figura 5.10 es la que presenta los mayores valores de deformación por tracción en el muro MR1, lo cual es esperable dado que es la zona que se encuentra directamente debajo del actuador, y es, por lo tanto la sección con mayor flexión que se transmite a la base del muro por la carga horizontal.

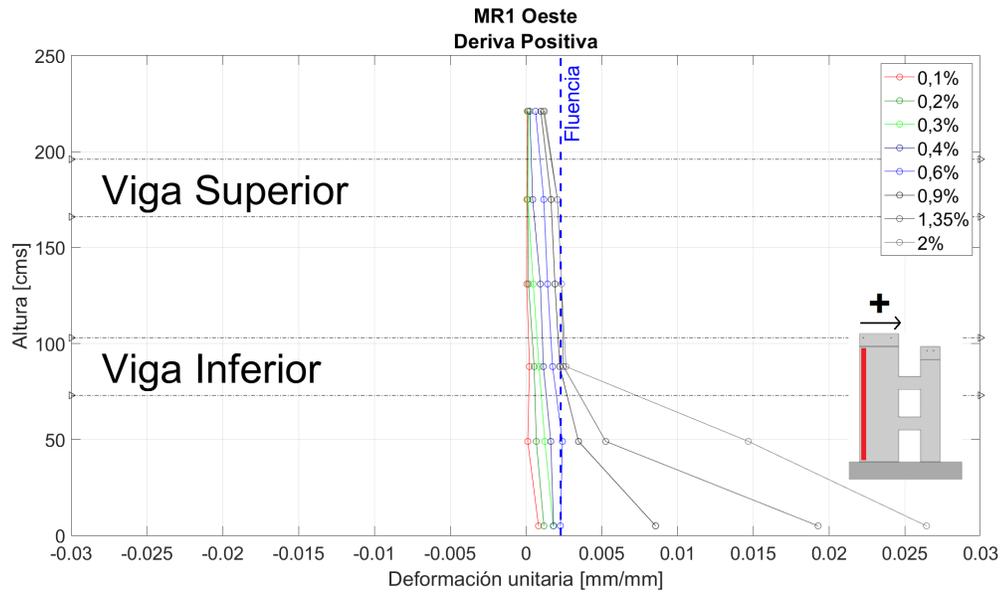


Figura 5.10: Perfil de deformación en altura MR1 oeste deriva positiva

En las derivas negativas, la zona oeste del muro MR1 (Figura 5.11) es la que cuenta con los mayores valores de deformación por compresión, lo cual nuevamente se explica por estar en la zona donde la flexión tiene mayor efecto al ser un muro con una esbeltez considerable.

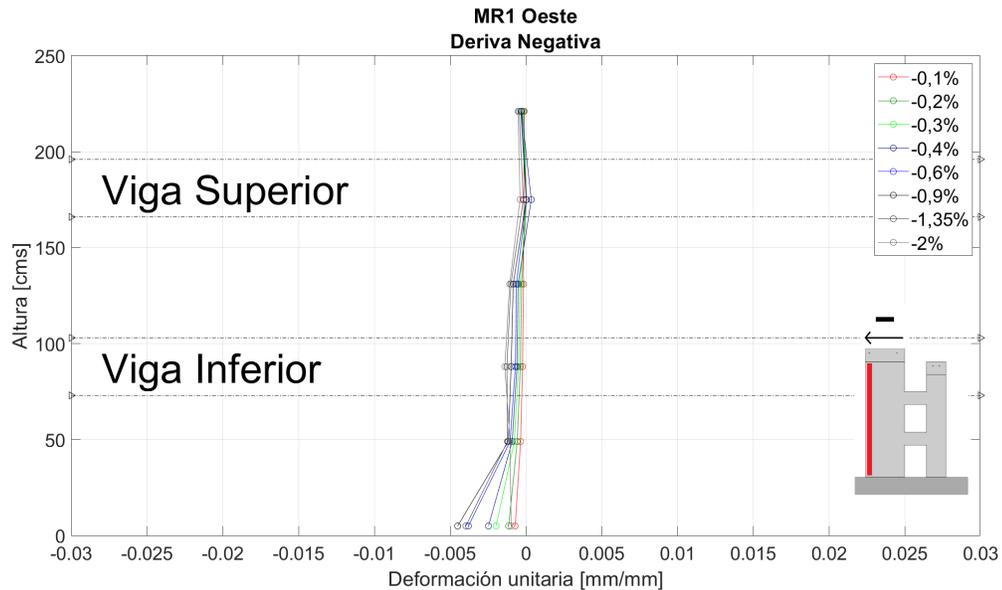


Figura 5.11: Perfil de deformación en altura MR1 oeste deriva negativa

El muro MR1 este en derivas positivas (Figura 5.12) muestra que el comportamiento de sus deformaciones es inverso al de la zona oeste, mostrando tracciones para las derivas negativas. Sus valores de deformación por tracción se encuentran ligeramente por debajo de la zona oeste debido a que el actuador no ejerce una carga igual para ambas direcciones de las derivas producto de su sistema de anclaje, y además puede explicarse porque está debajo de las vigas de acople, que generan una variación de la carga vertical que se aplica sobre esta

zona al transmitir parte de ésta al muro MR2.

Las deformaciones por compresión que se observan en la zona este del muro MR1 (Figura 5.12) al someter la probeta a derivas positivas, se encuentran por debajo de las de la zona oeste, de igual forma que para el caso de las deformaciones por tracción.

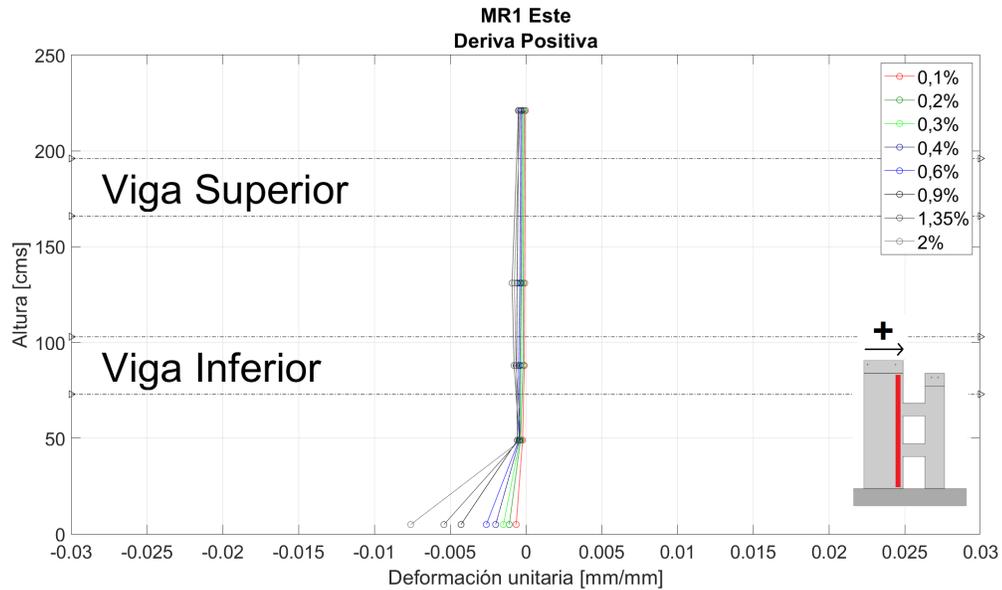


Figura 5.12: Perfil de deformación en altura MR1 este deriva positiva

Como se mencionó anteriormente, la zona este del muro MR1 en derivas negativas (en Figura 5.13) presenta deformaciones de tracción ligeramente menores que la oeste en derivas positivas, lo cual puede explicarse por el efecto de la viga de acople sobre la carga vertical y, además, porque el sistema de anclaje del actuador sobre el muro MR1 no es capaz de transmitir las cargas positivas de igual forma que las negativas, se observó que ejerce mayores cargas en la dirección positiva.

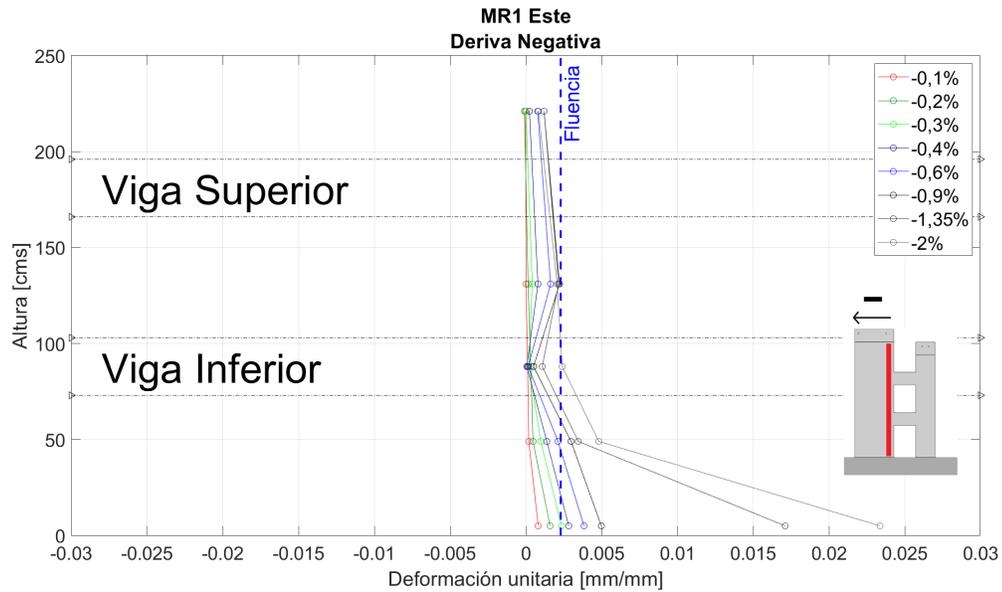


Figura 5.13: Perfil de deformación en altura MR1 este deriva negativa

Las deformaciones por tracción en el lado oeste del muro MR2 (ver Figura 5.14) son de un orden similar a las del MR1 para los primeros ciclos, y al alcanzar la deriva del 2% se observa que es considerablemente mayor. En contraste con el lado este del muro MR2, el lado oeste muestra deformaciones por tracción considerablemente mayores.

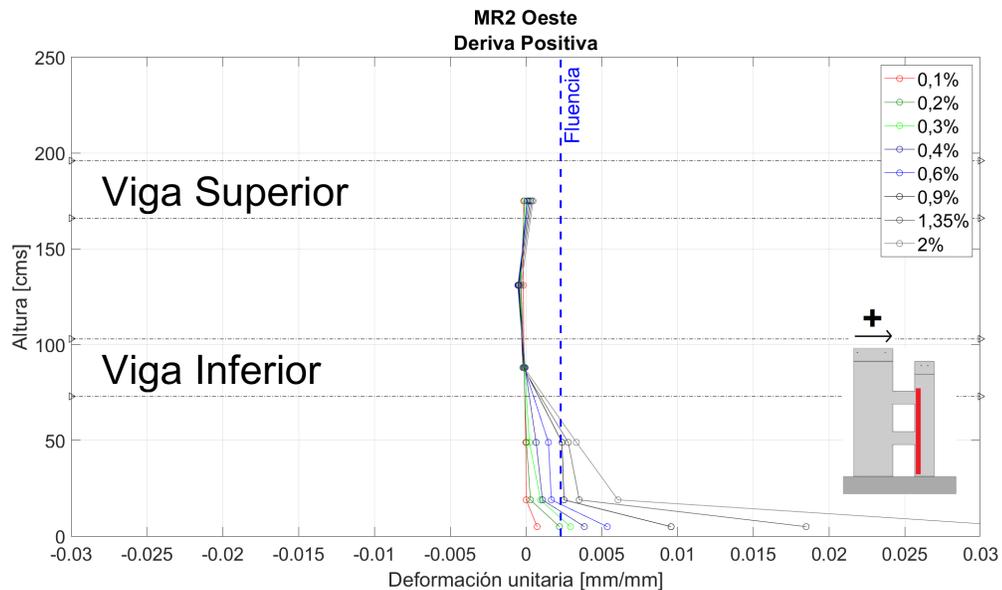


Figura 5.14: Perfil de deformación en altura MR2 oeste deriva positiva

El lado este del muro MR2 (Figura 5.15) presenta en general un comportamiento similar a las otras franjas comprimidas, sin embargo desde la altura de 88 [cms] se observa un cambio de signo de las deformaciones, lo cual se le puede atribuir al largo inferior del muro MR2, que produce que este muro funcione de manera más dúctil que el MR1 y, en consecuencia,

puede presentar dos curvaturas en diferentes alturas.

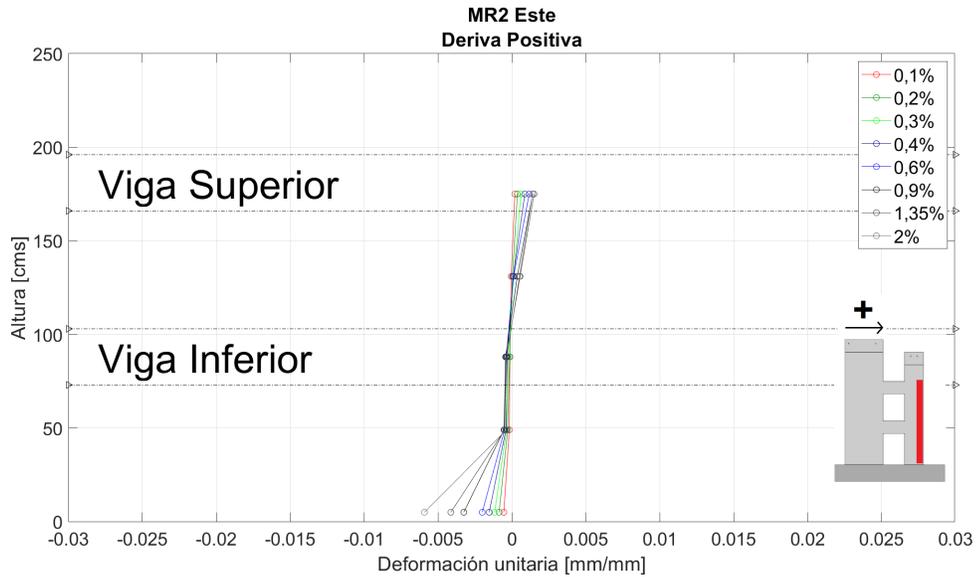


Figura 5.15: Perfil de deformación en altura MR2 este deriva positiva

Por último, el lado traccionado del muro MR2 en derivas negativas (en Figura 5.16) presenta un comportamiento estándar con las franjas vistas anteriormente, concentrando sus mayores deformaciones en la base del muro.

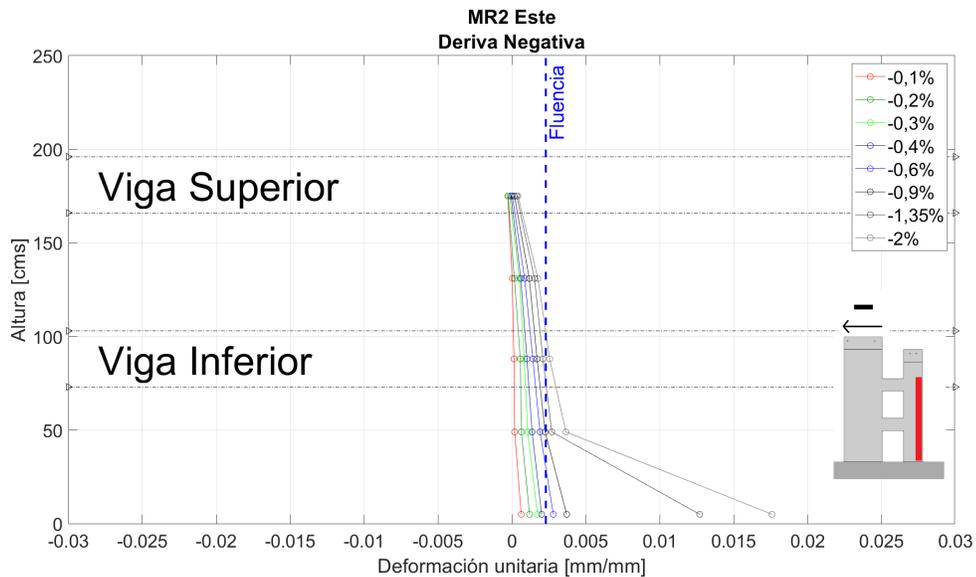


Figura 5.16: Perfil de deformación en altura MR2 este deriva negativa

Correspondientemente, en ambos muros ocurre que el lado oeste presenta mayores deformaciones por tracción que el lado este, lo cual se debe posiblemente a que el actuador ejerce mayor carga hacia el lado de las derivas positivas que las negativas.

5.4. Perfiles de Deformación Basal y Curvaturas

Se presenta en la Figura 5.17 las deformaciones unitarias a nivel de la base para la deriva positiva, y en la Figura 5.18 las deformaciones unitarias basales para derivas negativas a lo largo de la probeta. Los valores positivos corresponden a tracción, y los negativos compresión. Se demarca la línea de deformación unitaria igual a 0.0023, valor en el que comienza la fluencia del acero según los ensayos realizados para la investigación.

El comportamiento observado indica que a medida que aumenta el nivel de deriva del techo del muro MR1 aumentan, correspondientemente, tanto las tracciones como compresiones en ambos muros, lo cual se explica por el elevado acople que aportan las vigas al sistema de muros. Es importante notar también que los valores de deformación a tracción aumentan en mayor medida que las deformaciones a compresión, lo cual se explica por el comportamiento mecánico del hormigón, resistente a la compresión pero con baja capacidad a tracción, esfuerzo que es resistido por las barras de acero.

Se observa además que la fluencia ocurre después en los lados externos del muro, es decir lado izquierdo del MR1 y lado derecho del MR2, fluyendo a un 0.6% de drift, mientras que para los lados internos fluyen a un drift de 0.3%.

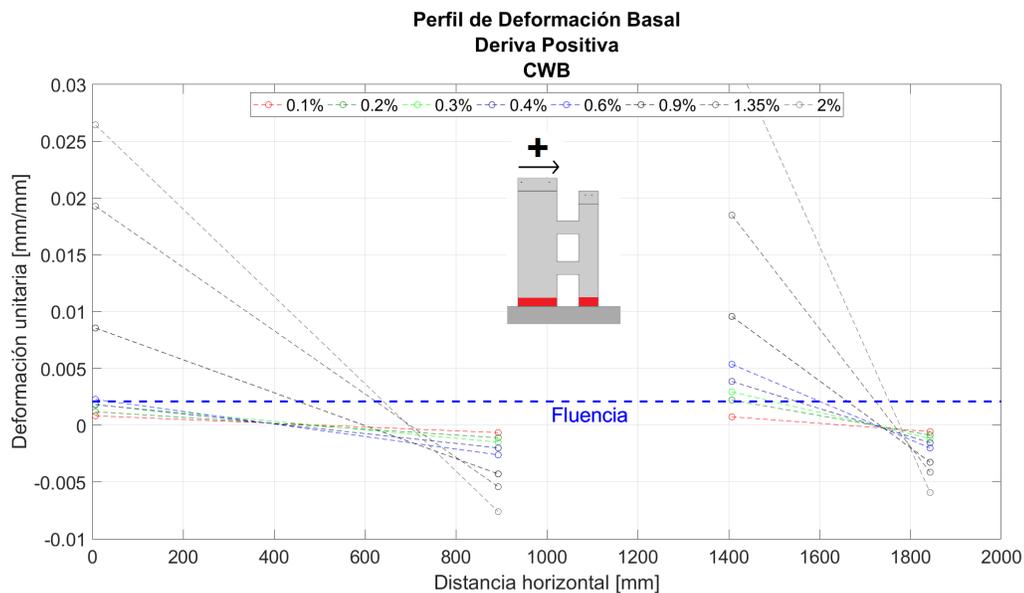


Figura 5.17: Perfil de deformación basal deriva positiva

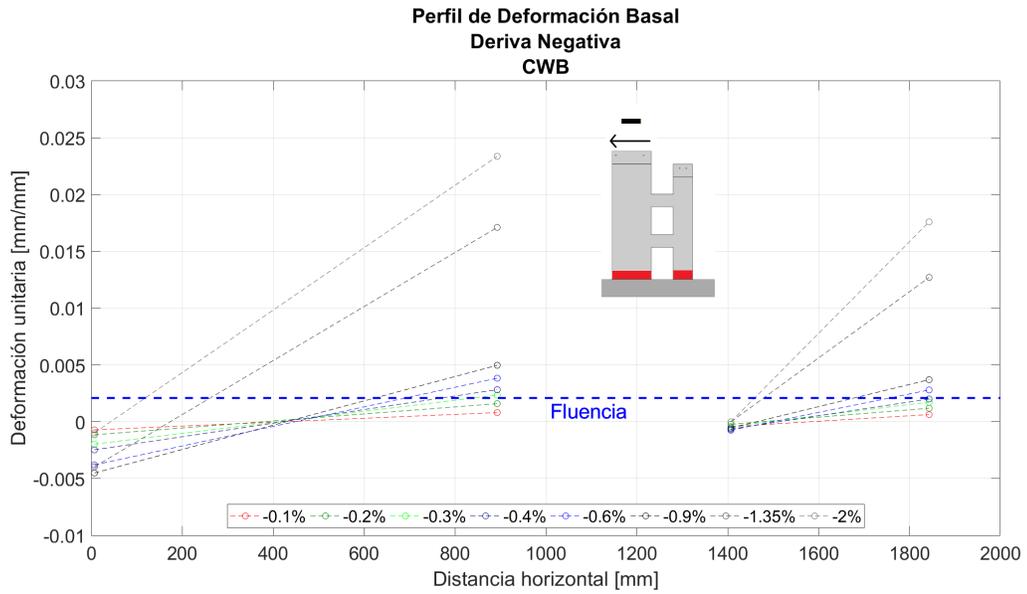


Figura 5.18: Perfil de deformación basal deriva negativa

Los perfiles de curvatura en altura muestran un comportamiento análogo al mostrado por los perfiles basales y por los perfiles de deformación vertical.

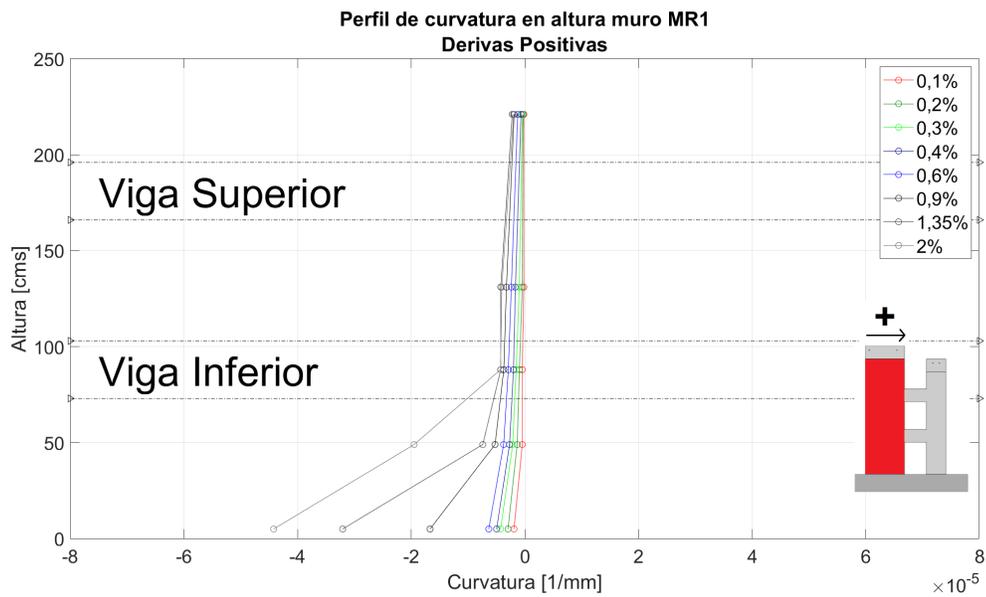


Figura 5.19: Curvatura MR1 deriva positiva

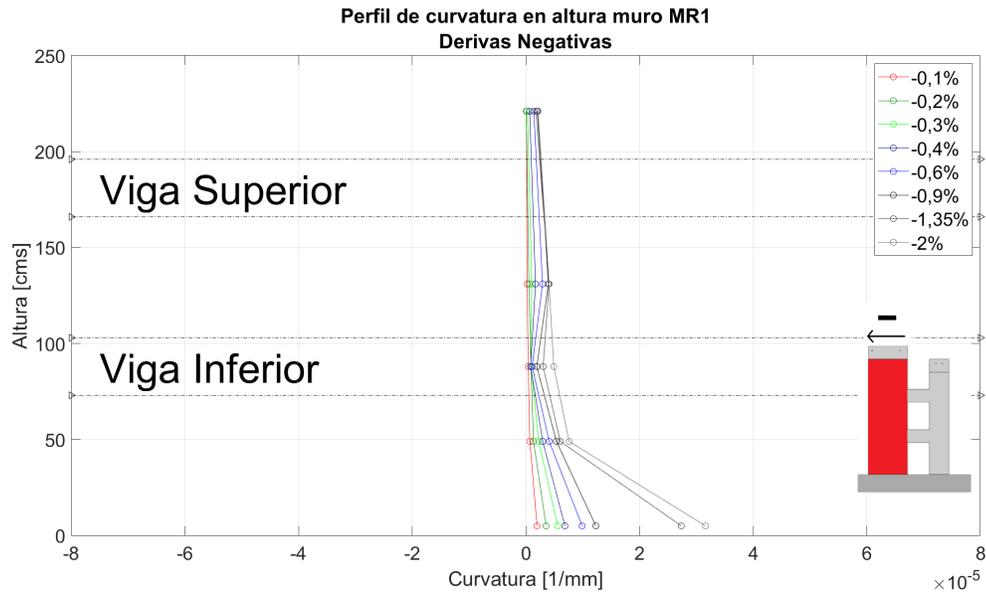


Figura 5.20: Curvatura MR1 deriva negativa

En particular, se observa el cambio de curvatura mencionado anteriormente en la sección de perfiles de deformación vertical, a alturas superiores a la viga inferior del muro MR2 en la Figura 5.21. En el muro MR1 se mantienen bastante constantes para alturas superiores a la viga inferior.

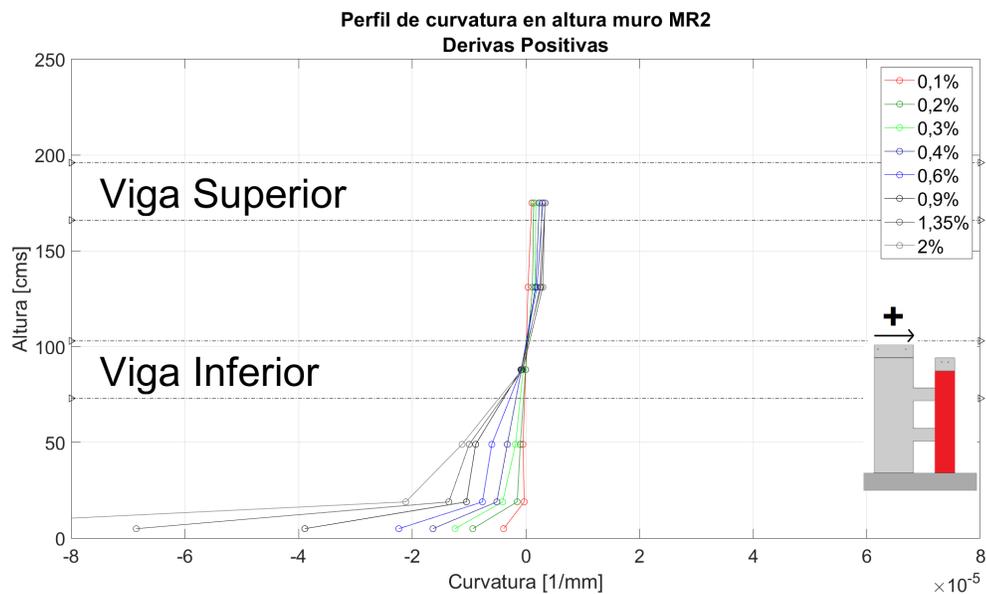


Figura 5.21: Curvatura MR2 deriva positiva

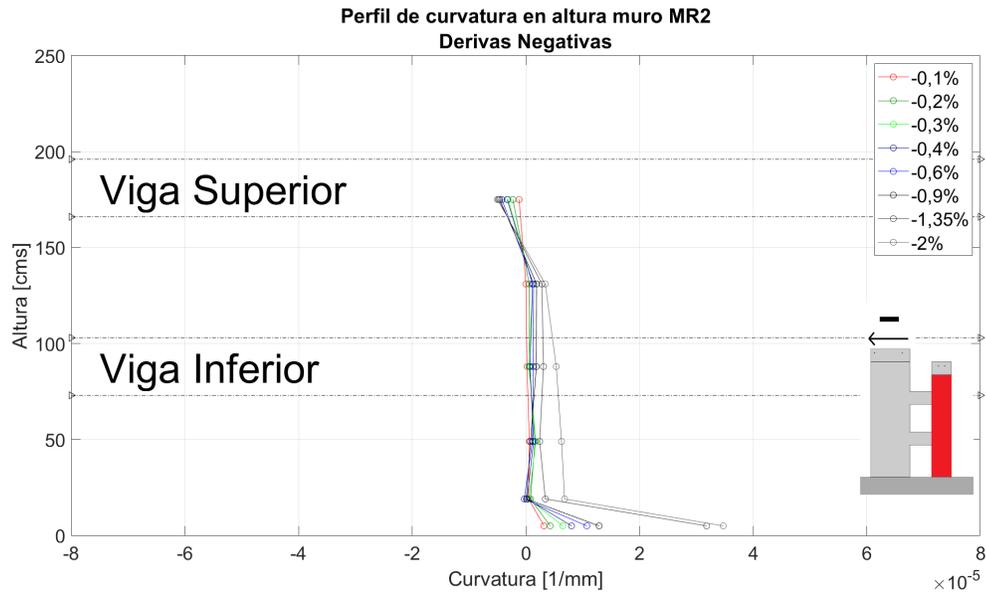


Figura 5.22: Curvatura MR2 deriva negativa

5.5. Desplazamiento por Corte

El cálculo del desplazamiento por corte de cada piso se obtiene como se detalla en la sección 5.1.2.

En las figuras siguientes se muestra el comportamiento del desplazamiento por corte en los pisos 1 y 3 del muro MR1, en el piso 2 del muro MR2, y en las dos vigas de acople. Los otros pisos no pudieron ser dispuestos pues en cada uno de estos falló uno de los sensores diagonales, presentando mediciones sin sentido, sin embargo se dispone en la sección anexos D.3 el gráfico del sensor diagonal de cada uno de estos dos pisos que sí funcionó.

Se espera que el piso 1 del MR1 al encontrarse a baja altura sea una de las zonas con mayor desplazamiento horizontal por corte, por otro lado, en el tercer piso del muro MR1 y en el segundo piso del MR2 no se espera tener mayor desplazamiento corte, pues al estar a tan elevada altura, es la flexión el esfuerzo que prevalece sobre estas zonas.

En la Figura 5.23 se grafican las 3 curvas de desplazamiento por corte para las zonas mencionadas, se observa en este cómo prevalece el comportamiento esperado de mayor desplazamiento del piso 1 del muro MR1 por sobre los otros dos.

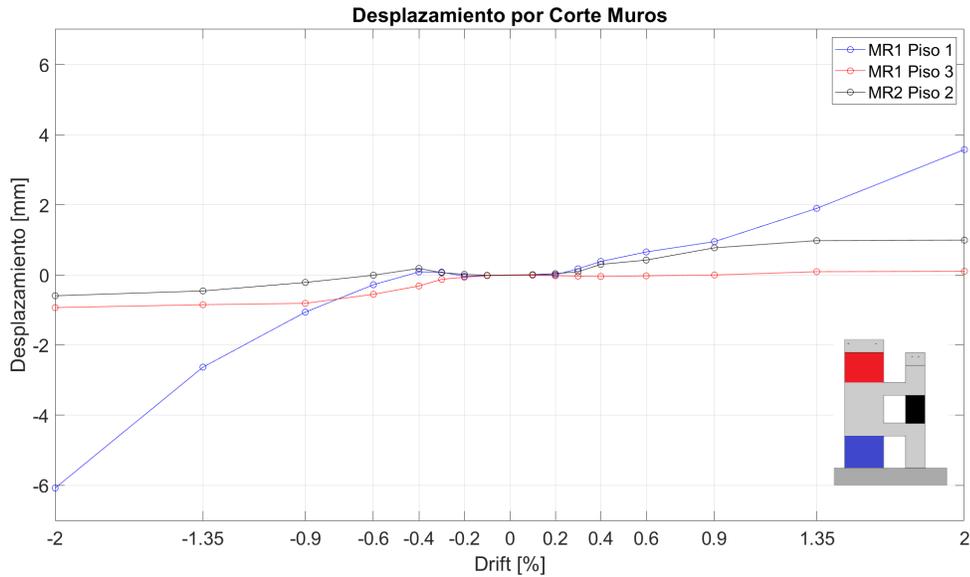


Figura 5.23: Comparación de desplazamiento por corte por pisos

Se observa que el comportamiento que tuvieron todas las zonas sometidas a corte en las figuras es similar, al encontrarse en derivas negativas los desplazamientos tienden a ser negativos, y de igual forma al estar en derivas positivas los desplazamientos son positivos también, lo cual indica que el comportamiento detallado en la Figura 2.3 se ve reflejado en los resultados que presenta el ensayo.

Durante el ensayo se observó que los elementos que sufrieron mayores deformaciones por corte fueron las vigas, pues grietas diagonales se distribuyeron por todo el área de estos elementos, lo cual se corrobora en la Figura 5.24, y los valores de desplazamiento por corte calculados son considerablemente mayores que los que tienen los pisos de los muros, superando los 15 [mm] en deriva positiva la viga superior.

La diferencia de desplazamientos que se observa entre ambas vigas se debe a la altura de estas, la viga superior al encontrarse directamente sometida a la carga vertical sufre un mayor esfuerzo de corte que la viga inferior, la cual recibe en menor grado el efecto de la carga axial.

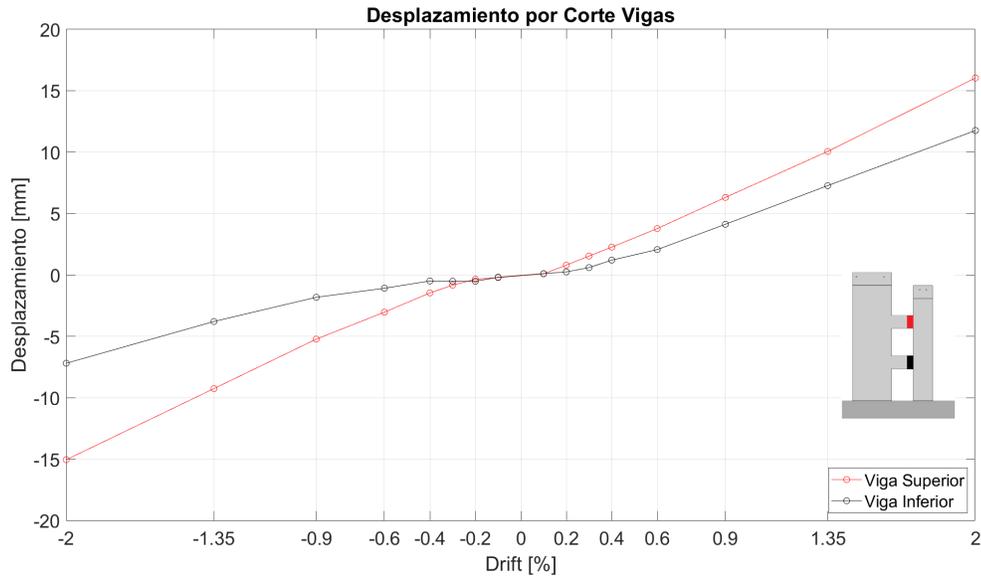


Figura 5.24: Desplazamiento por corte ambas vigas

5.6. Contribución Flexión y Corte

A partir de los valores del capítulo anterior, y utilizando los desplazamientos horizontales totales de cada piso adquiridos del trabajo por fotogrametría realizado por Bustos [26], se obtiene entonces el valor del desplazamiento por flexión, ya que el desplazamiento horizontal está compuesto por una componente de flexión y una de corte, al restarle el desplazamiento por corte al desplazamiento total, se obtiene entonces el desplazamiento por flexión. Los valores para cada drift se encuentran en anexos E.1, y el porcentaje de contribución final que se muestra en la tabla 5.1 corresponde a un promedio de los porcentajes por drift.

Tabla 5.1: Contribuciones de corte y flexión al desplazamiento horizontal

| Zona | Contribución Corte [%] | Contribución Flexión [%] |
|------------|------------------------|--------------------------|
| MR1 Piso 1 | 18 % | 82 % |
| MR1 Piso 3 | 3 % | 97 % |
| MR2 Piso 2 | 4 % | 96 % |

Es importante mencionar que un paso previo para calcular la contribución para cada piso que no sea el piso 1, es restarle al desplazamiento total entregado por fotogrametría el desplazamiento total del piso inferior, y a este valor restarle también la componente de desplazamiento por movimiento de sólido rígido, la cual se calcula como la curvatura en la zona inferior del piso que se está estudiando multiplicado por la altura de este.

5.7. Rótula Plástica

Las longitudes de rótula plástica l_p se obtienen de manera tanto experimental como analítica, con la finalidad de comparar las expresiones calibradas con lo observado en el ensayo. Para obtener l_p experimentalmente se utilizan los perfiles de deformación vertical en altura, buscando la altura correspondiente a la deformación de fluencia, obteniendo así l_p^* , luego el largo de rótula plástica $l_p = 0.5l_p^*$. Se debe considerar además la variación de la carga axial sobre ambos muros durante el transcurso del ensayo, lo cual se obtiene de modelos numéricos del trabajo de [26]. La expresión analítica que se emplea es la ecuación 2.2 de Alfaro y Massone [10].

Las longitudes de rótula plástica experimentales se tienen en la Figura 5.25. A pesar de que en los 4 bordes no comenzó a fluir en la misma deriva, se asume para todos la fluencia en el drift de 0.4%. Se observa que todas se encuentran por debajo del nivel de la viga inferior, lo cual es esperable dada la rigidización que genera este elemento.

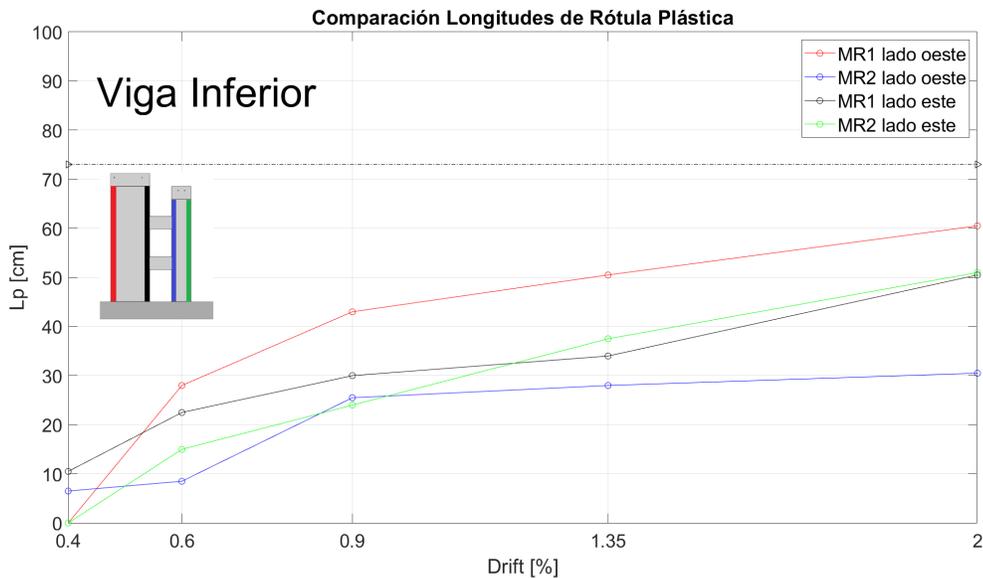


Figura 5.25: Longitudes de rótula plástica

Comparando estos valores con la literatura, se tiene para el muro MR1 utilizando la ecuación 2.2 los resultados de la Figura 5.26. Se observa que la curva de la ecuación se asemeja bastante a los l_p tanto del lado oeste como este del muro MR1, presentando una diferencia no mayor a 5 [cms] para el lado oeste, y no mayor a 6,5 [cms] para el lado este, lo cual dice que los valores se encuentran dentro de un orden aceptable. El principal factor que provoca que los gráficos discrepen es el aumento de pendiente de la franja este del muro a partir del 1.35% de deriva.

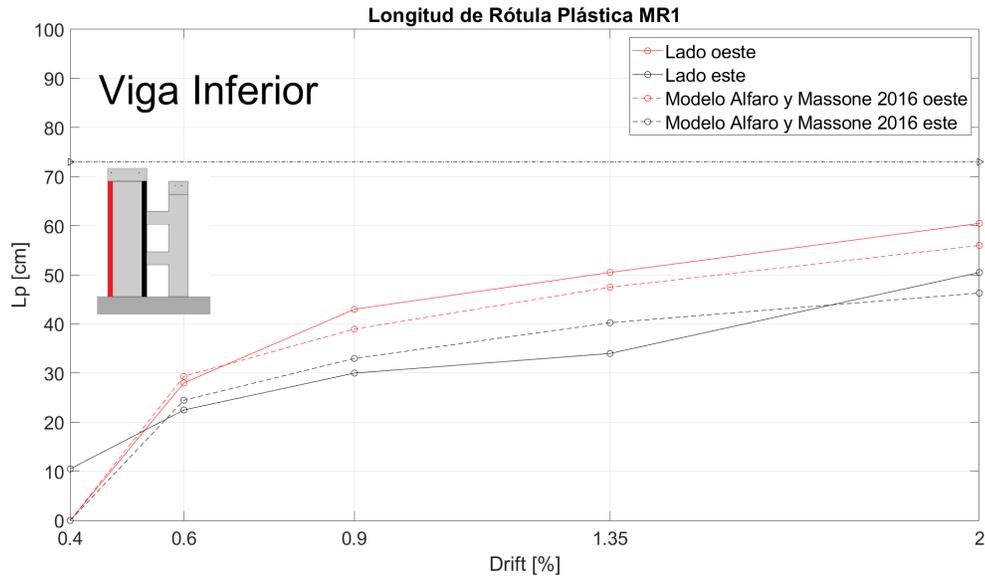


Figura 5.26: Longitudes rótula plástica vs Alfaro MR1

Similar es el caso para el lado oeste del muro MR2 en la Figura 5.27, donde se observa que los valores experimentales y teóricos no presentan diferencias mayores a 8 [cms], mientras que el lado este (o lado derecho) presenta diferencias cada vez mayores a medida que aumenta el drift, con un máximo de alrededor de 25 [cms]. Este comportamiento puede explicarse porque la transmisión de carga axial hacia el muro MR2 es a través de las vigas, y es el lado oeste donde recae con mayor impacto su aporte dado que este es el lado donde las vigas se acoplan al muro MR2.

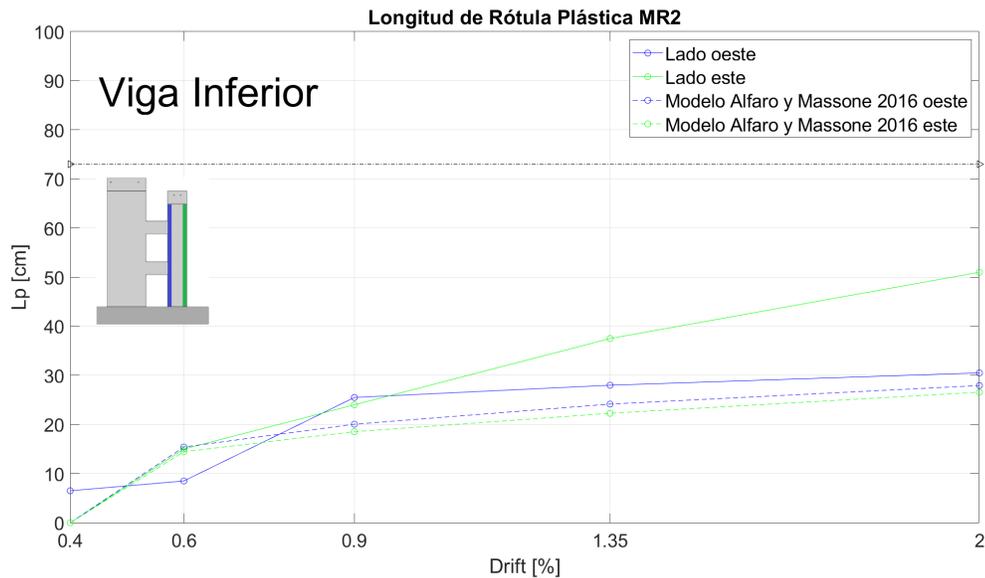


Figura 5.27: Longitudes rótula plástica vs Alfaro MR2

En general, las curvas de largo de rótula plástica tienen un comportamiento similar, mostrando una pendiente mayor en el drift en que comienza la fluencia, y disminuyendo su

pendiente a medida que sigue aumentando el drift, lo cual también ocurre con la expresión calibrada de Alfaro y Massone (Ecuación 2.2). Es sólo el lado este del MR2 el que presenta una diferencia sustancial entre los valores teóricos y los experimentales para drifts mayores.

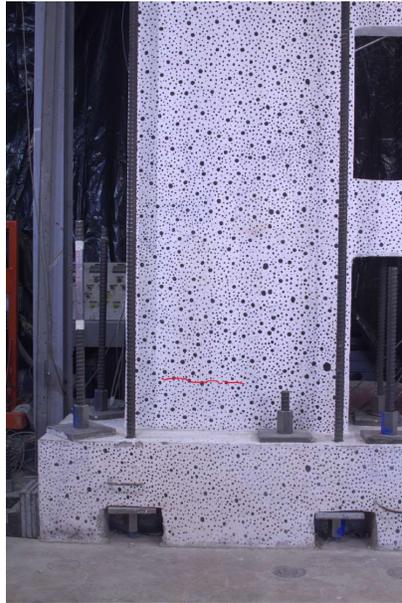
5.8. Evolución de Grietas

En la siguiente sección se presenta la propagación de las grietas por los muros MR1 y MR2 asociadas a cada deriva obtenidos de la instrumentación con fotogrametría, trabajo realizado por Bustos [26]. La gran mayoría de estas grietas se observan en el primer piso, dado que en esta zona se concentran los mayores esfuerzos debido a la flexión de los muros. En las fotos las grietas rojas corresponden a fisuras nuevas producto de aumentar el desplazamiento de techo, mientras que las azules son grietas que ya se encontraban en derivas menores.

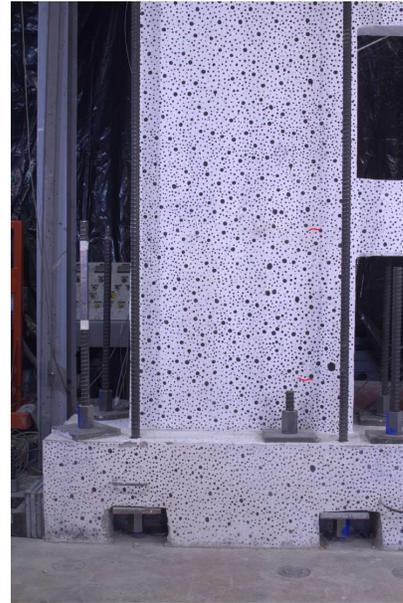
A pesar de que se observan múltiples grietas diagonales en los muros durante el desarrollo del ensayo, no se reporta que alguna de estas sea por corte, debido a que no se generan desde el centro del muro, sino que desde los bordes, lo cual indica que estas son producto de esfuerzos de flexión. A diferencia de las grietas observadas en las vigas, que sí demuestran este comportamiento.

Se comienza el análisis desde la deriva de 0.3%, pues en esta deriva se logran identificar grietas en el muro MR1 y en las vigas, a diferencia del muro MR2, donde se logran evidenciar las primeras grietas en el drift de 0.4%. En los comentarios de las imágenes se considera la derecha y la izquierda hacia las mismas direcciones que el lector ve.

En el drift de 0.3% (Figura 5.28) se identifican las primeras grietas en ambas direcciones de aplicación de la carga de techo en el muro MR1, viéndose que estas son horizontales, por lo que se espera que sean producto de la flexión de los muros. En el muro MR2 no se logra divisar daño.



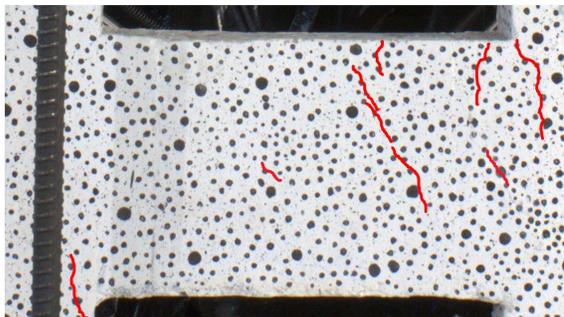
(a) MR1 0.3 % drift



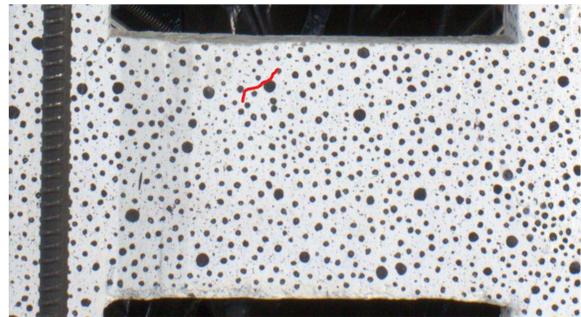
(b) MR1 -0.3 % drift

Figura 5.28: Evolución de grietas MR1 0.3 % drift

En la viga inferior (Figura 5.29) y superior (Figura 5.30) se observan las primeras grietas al estar en 0.3 % de drift, en la zona central de estos elementos se observan grietas diagonales, y en las juntas con los muros también para ambas derivas, estas grietas en las juntas con los muros se lograron divisar desde que se aplicó la carga vertical sobre el muro MR1.

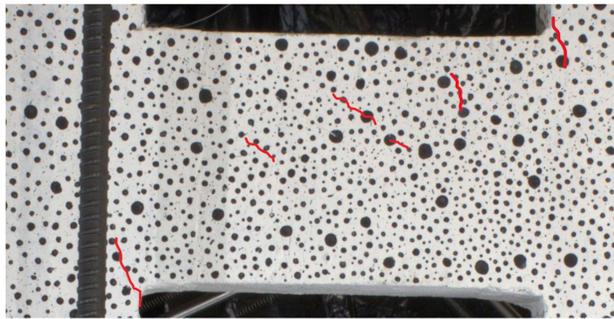


(a) Viga inferior 0.3 % drift

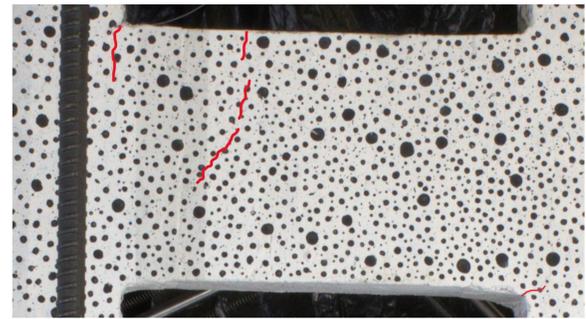


(b) Viga inferior -0.3 % drift

Figura 5.29: Evolución de grietas viga inferior 0.3 % drift



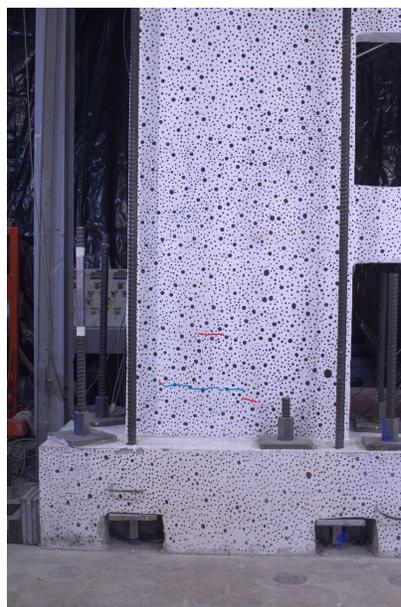
(a) Viga superior 0.3% drift



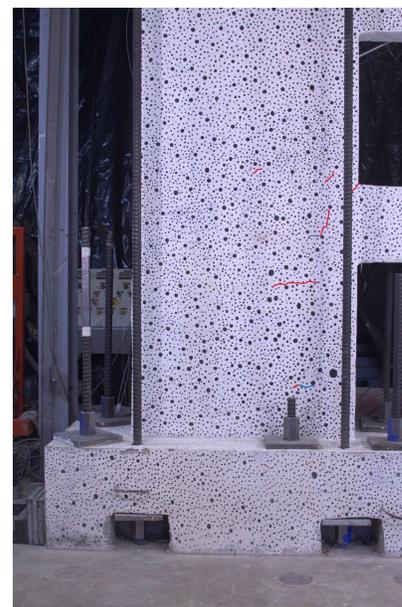
(b) Viga superior -0.3% drift

Figura 5.30: Evolución de grietas viga superior 0.3% drift

Al 0.4% de drift (ver Figura 5.31), se observa en el muro MR1 una extensión de las grietas de flexión tanto para las derivas positivas como negativas, además de las que presenta la viga de acople en la junta con el muro MR1.



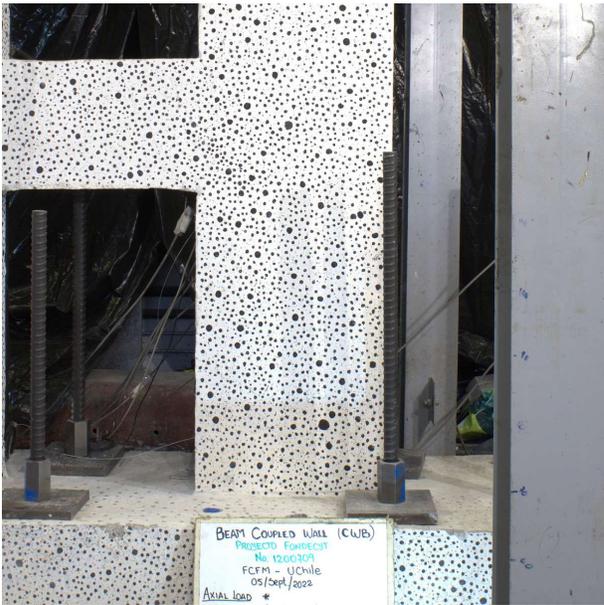
(a) MR1 0.4% drift



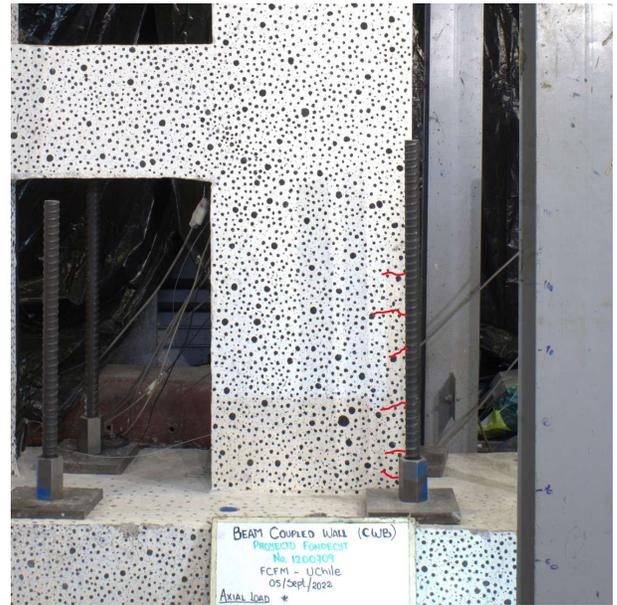
(b) MR1 -0.4% drift

Figura 5.31: Evolución de grietas MR1 0.4% drift

Para el muro MR2 (Figura 5.32) se identifican sólo para la deriva negativa fisuras de flexión en el borde derecho del muro, mientras que en deriva positiva al 0.4% no se observaron fisuras en la foto.



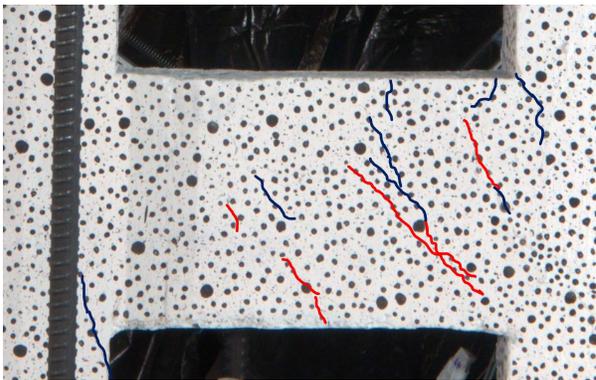
(a) MR2 0.4 % drift



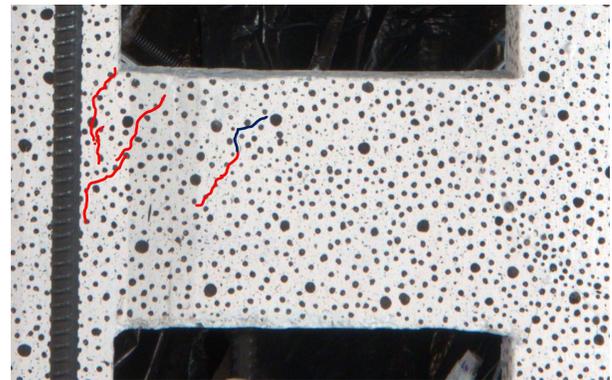
(b) MR2 -0.4 % drift

Figura 5.32: Evolución de grietas MR2 0.4 % drift

La Figura 5.33 y Figura 5.34 muestran, respectivamente, que en la viga inferior y superior se extienden las grietas vistas anteriormente, así como también se generan nuevas en su mayoría diagonales en el centro de estos elementos para ambas derivas. El que sean diagonales estas grietas indica que probablemente el corte sea el esfuerzo que prevalece en estos elementos.

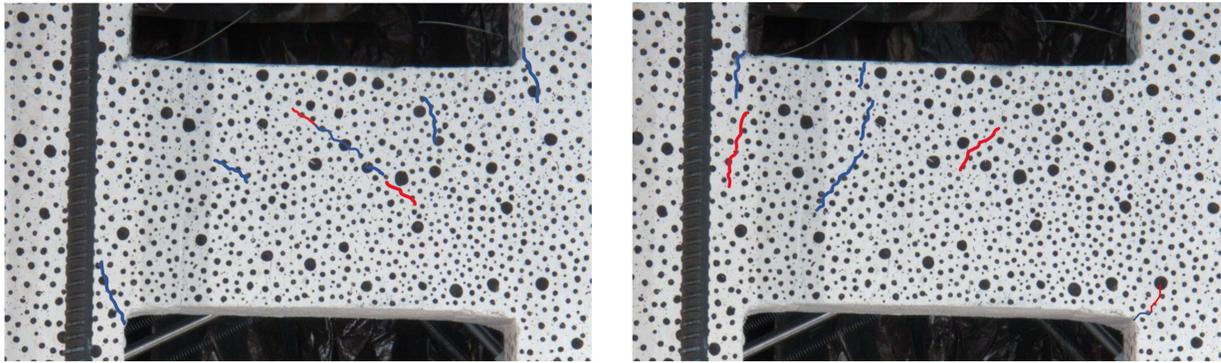


(a) Viga inferior 0.4 % drift



(b) Viga inferior -0.4 % drift

Figura 5.33: Evolución de grietas viga inferior 0.4 % drift

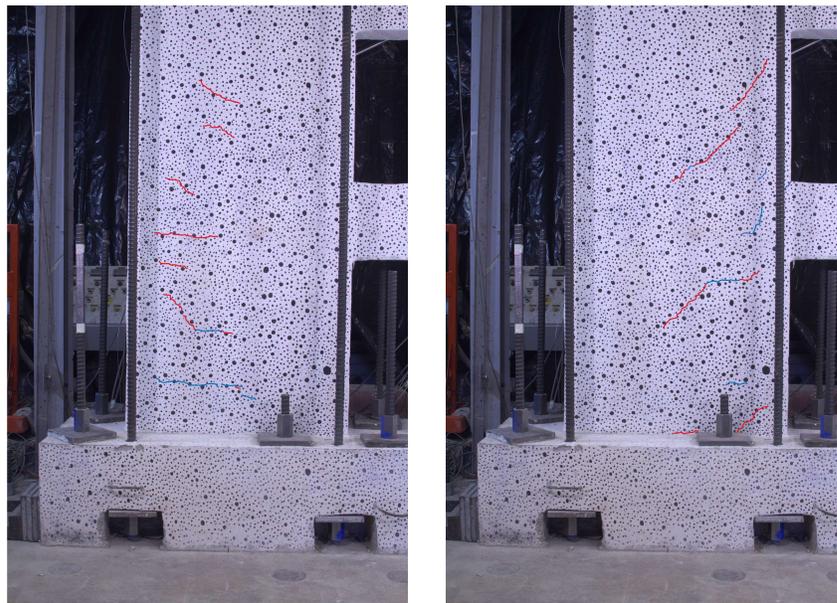


(a) Viga superior 0.4 % drift

(b) Viga superior -0.4 % drift

Figura 5.34: Evolución de grietas viga superior 0.4 % drift

Al alcanzar el nivel de deriva de 0.6 %, en el muro MR1 se aprecia en la Figura 5.35 la ampliación de las grietas preexistentes en las derivas positiva y negativa, de manera tanto horizontal como diagonal para las grietas producto de flexión.

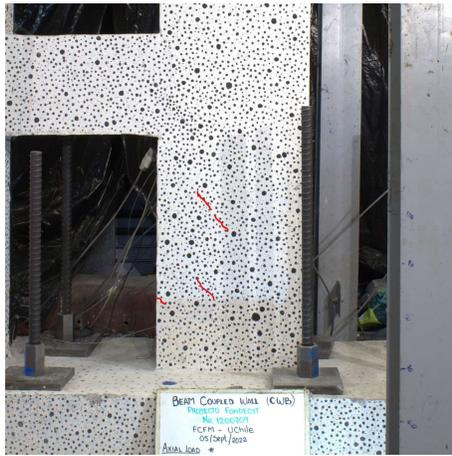


(a) MR1 0.6 % drift

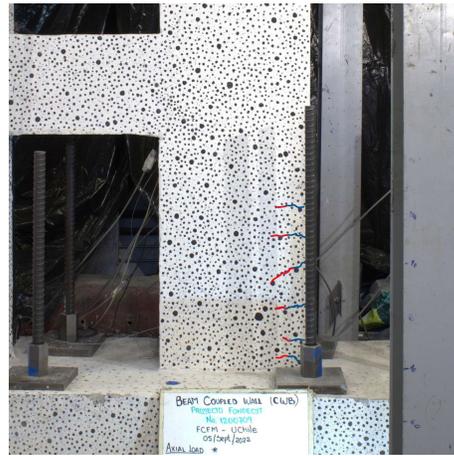
(b) MR1 -0.6 % drift

Figura 5.35: Evolución de grietas MR1 0.6 % drift

En la Figura 5.36, se observa que para el muro MR2 en la deriva de 0.6 %, aparecen las primeras grietas diagonales en la deriva positiva debidas a flexión pues provienen de una horizontal, o no se producen en el centro del muro, mientras que para la deriva negativa se extienden las grietas de flexión anteriores.



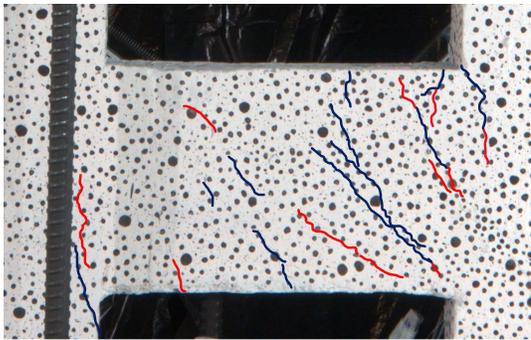
(a) MR2 0.6 % drift



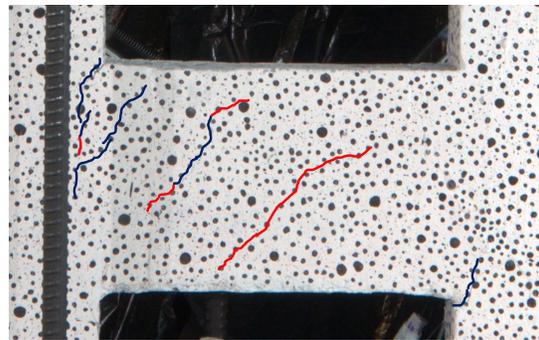
(b) MR2 -0.6 % drift

Figura 5.36: Evolución de grietas MR2 0.6 % drift

En la Figura 5.37 y Figura 5.38 se observa que siguen generándose grietas diagonales tanto en la viga inferior como superior de la probeta, y un par de grietas a flexión en el borde superior derecho de ambas vigas, además de prolongarse las grietas ya existentes .

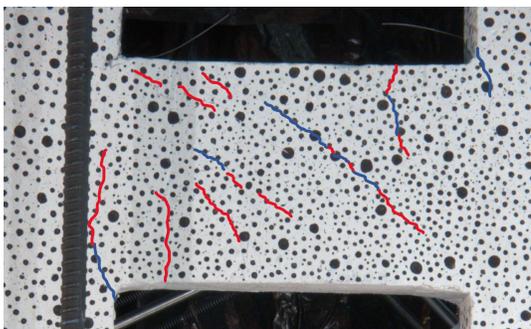


(a) Viga inferior 0.6 % drift

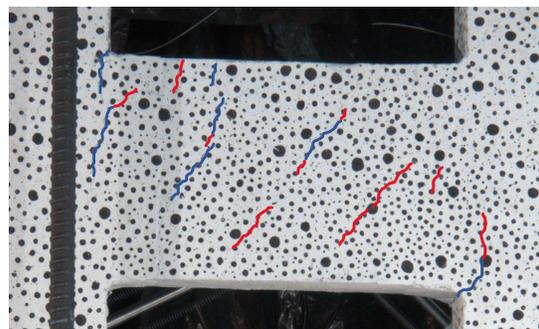


(b) Viga inferior -0.6 % drift

Figura 5.37: Evolución de grietas viga inferior 0.6 % drift



(a) Viga superior 0.6 % drift



(b) Viga superior -0.6 % drift

Figura 5.38: Evolución de grietas viga superior 0.6 % drift

Alcanzado el 0.9% de deriva, punto en el cual se alcanza la fluencia de las barras de la base, se observa en la Figura 5.39 que el muro MR1 presenta una gran propagación de las grietas pre existentes, junto con la aparición de nuevas grietas de flexión para ambas derivas, predominando la aparición de las diagonales por sobre las horizontales, abarcando ya prácticamente la mitad del largo del muro.

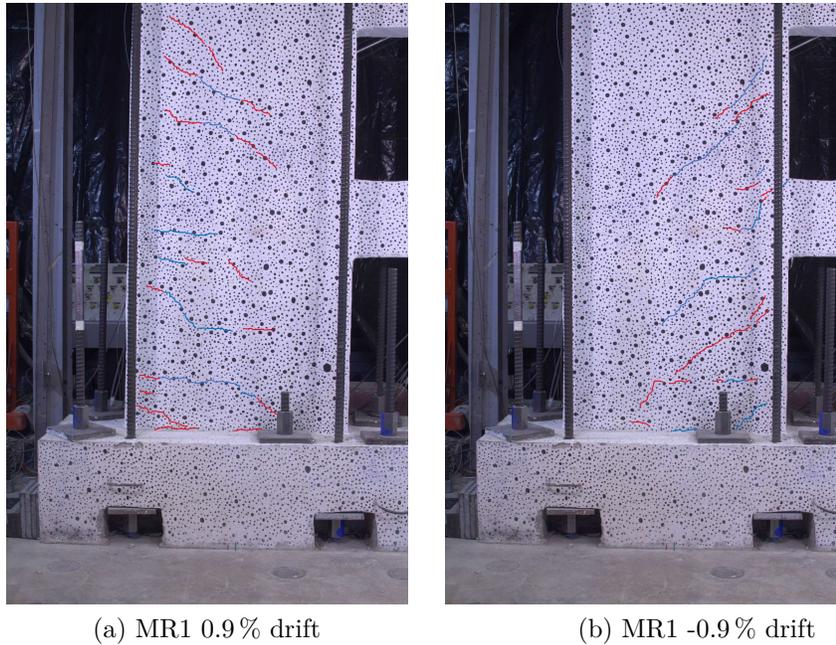


Figura 5.39: Evolución de grietas MR1 0.9% drift

En el muro MR2 para ambas derivas se observan extensiones de las grietas anteriores, y la aparición de otras nuevas, en particular, se desarrolla una gran grieta para el caso del drift negativo en el centro del muro, mientras que en el positivo, aparecen nuevas grietas de flexión cerca de la base del muro. Esto se observa en la Figura 5.40.

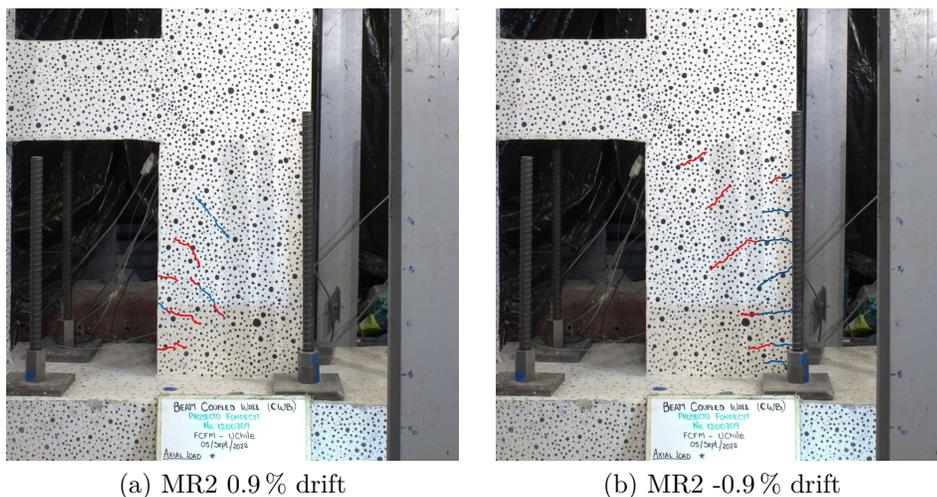
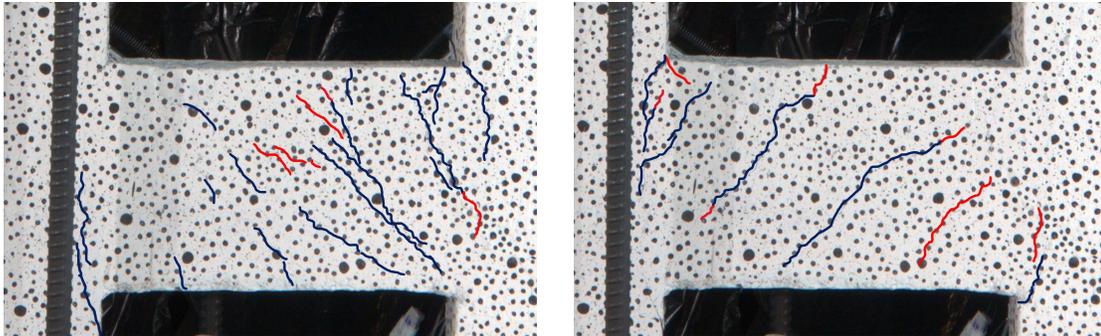


Figura 5.40: Evolución de grietas MR2 0.9% drift

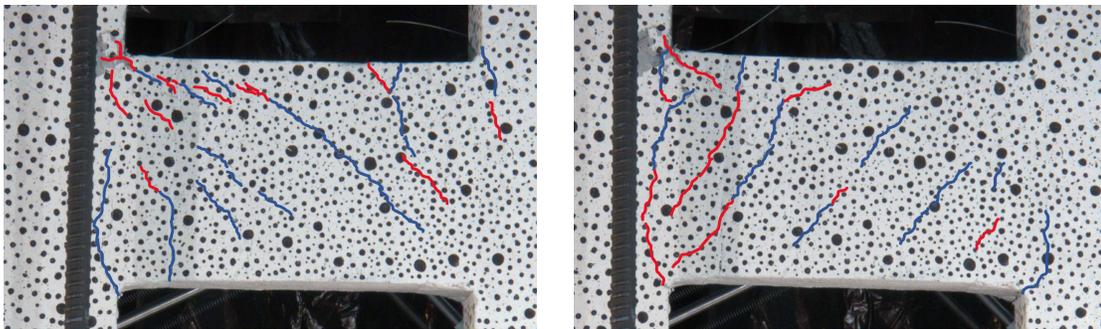
Se muestra en las imágenes de la Figura 5.41 la evolución del daño en la viga inferior, y en la Figura 5.42 la de la viga superior. Se observa que las vigas una vez alcanzado el 0.9% de deriva presentan un mayor número de grietas diagonales que en la deriva anterior, y que las grietas ya existentes se prolongan debido al aumento de desplazamiento de techo.



(a) Viga inferior 0.9% drift

(b) Viga inferior -0.9% drift

Figura 5.41: Evolución de grietas viga inferior 0.9% drift



(a) Viga superior 0.9% drift

(b) Viga superior -0.9% drift

Figura 5.42: Evolución de grietas viga superior 0.9% drift

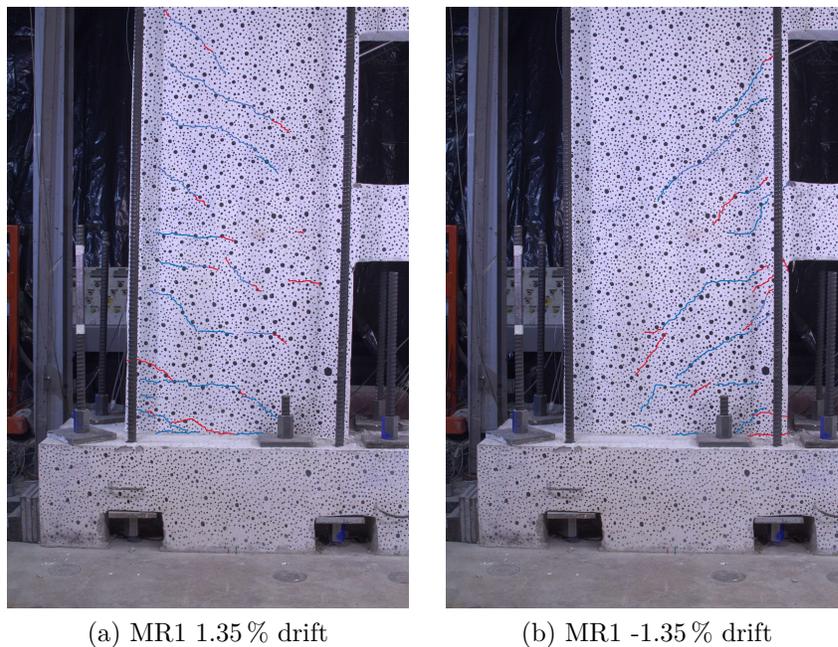
En la base izquierda del muro MR1 se observa algo del daño provocado por la flexión del muro (ver Figura 5.43).



Figura 5.43: Base izquierda muro MR1

Tras alcanzar el 1.35 % de deriva, la probeta comienza a mostrar un comportamiento más plástico que en las derivas anteriores, producto de la pérdida de rigidez del material al alcanzar deformaciones unitarias mayores a 0,0023, mostrando comportamiento plástico.

El muro MR1 (Figura 5.44) muestra en general extensiones de las grietas ya existentes, abarcando casi todo el largo del muro algunas de ellas, y en menor cantidad la aparición de algunas grietas nuevas de flexión para derivas positivas y negativas. Se observa ya a estas alturas, que las grietas que dominan son las que son producto de la flexión, siendo este el esfuerzo que se esperaba que domine, debido a la esbeltez del muro.



(a) MR1 1.35 % drift

(b) MR1 -1.35 % drift

Figura 5.44: Evolución de grietas MR1 1.35 % drift

En la Figura 5.45 se tiene que para el muro MR2 se extienden las grietas pasadas para las derivas positiva y negativa, y también aparece una nueva grieta de flexión diagonal para la

deriva negativa.

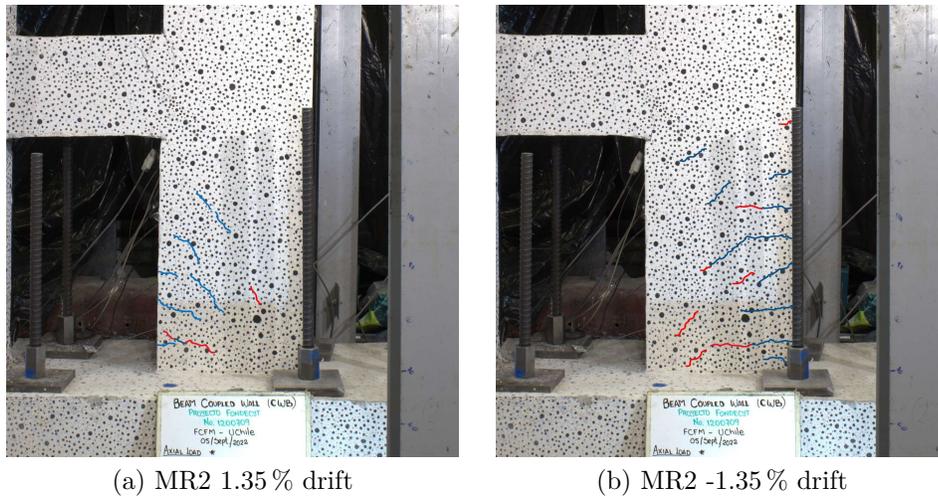


Figura 5.45: Evolución de grietas MR2 1.35 % drift

En las siguientes imágenes de la Figura 5.46 y Figura 5.47 se muestran las vigas en el nivel de deriva de 1.35 %. Se observa la propagación del daño, en particular, se evidencia pérdida de recubrimiento en la zona superior izquierda de ambas vigas, la cual es mayor en la viga superior, además, se pueden ver nuevas grietas y extensión de las grietas anteriores en ambas vigas.

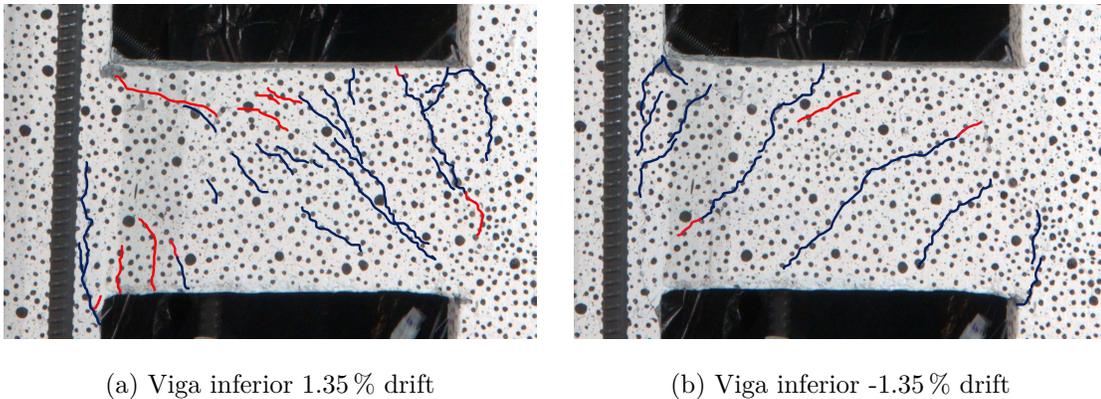
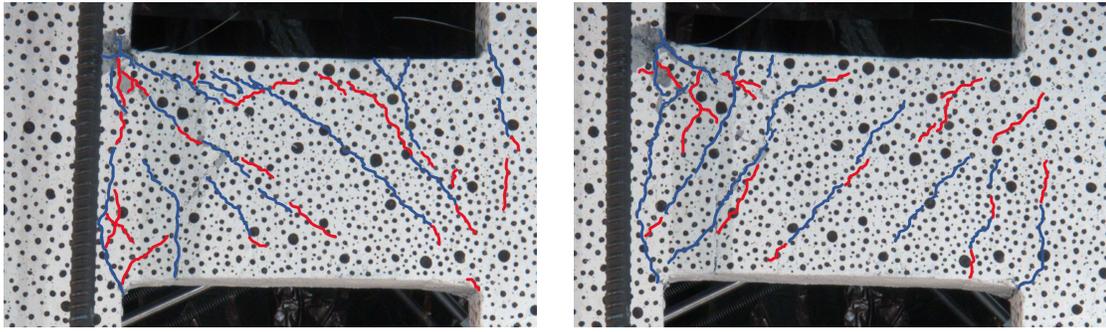


Figura 5.46: Evolución de grietas viga inferior 1.35 % drift

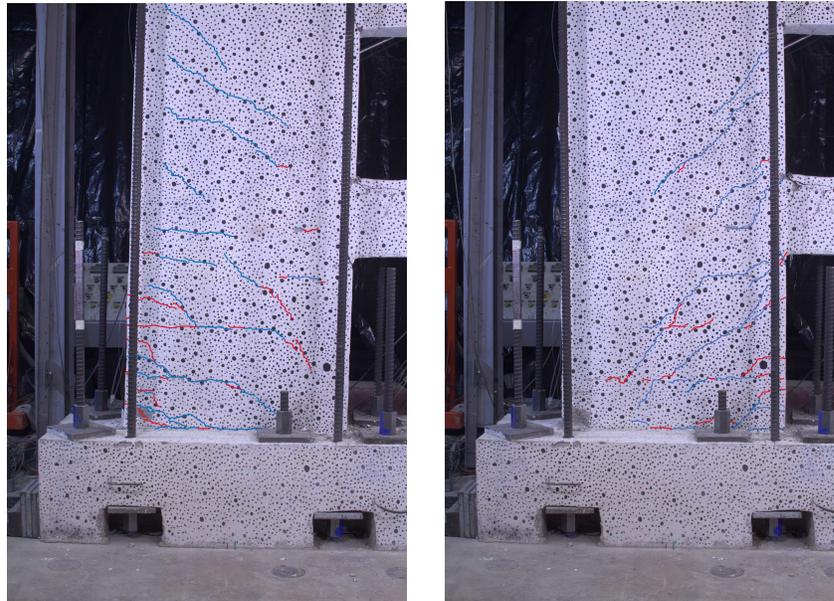


(a) Viga superior 1.35 % drift

(b) Viga superior -1.35 % drift

Figura 5.47: Evolución de grietas viga superior 1.35 % drift

Al llegar al nivel de deriva de 2 %, se observa en la Figura 5.48 que prácticamente no aparecen grietas nuevas en el muro MR1, sino que hay una gran propagación de las grietas anteriores a lo largo del muro, particularmente en la zona del primer piso, para ambas derivas, además en el lado izquierdo de la base del muro MR1 se comienza a perder recubrimiento.

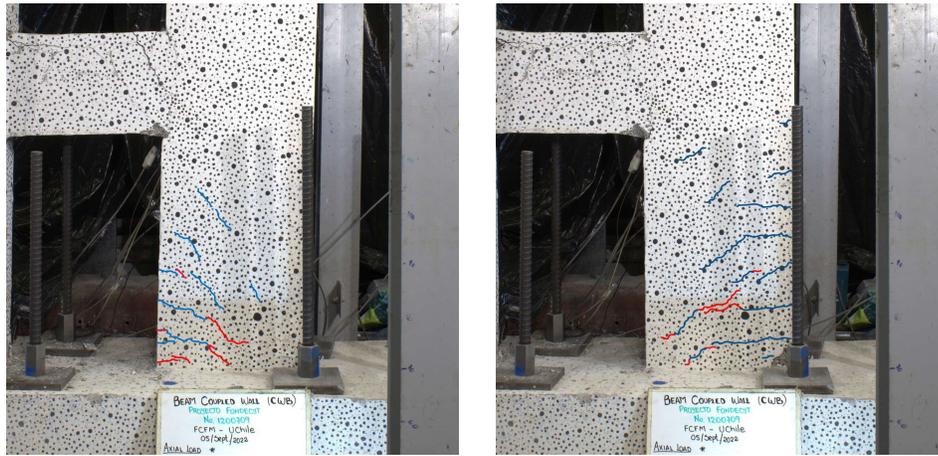


(a) MR1 2 % drift

(b) MR1 -2 % drift

Figura 5.48: Evolución de grietas MR1 2 % drift

De manera análoga al muro MR1, la Figura 5.49 muestra que el muro MR2 presenta mayormente sólo propagación de sus grietas previas para las dos derivas, ya abarcando casi todo el largo del muro. Se observa también el desarrollo de una nueva grieta de flexión para la deriva positiva en un punto muy cercano al pedestal, a una altura de aproximadamente 5 [cms].

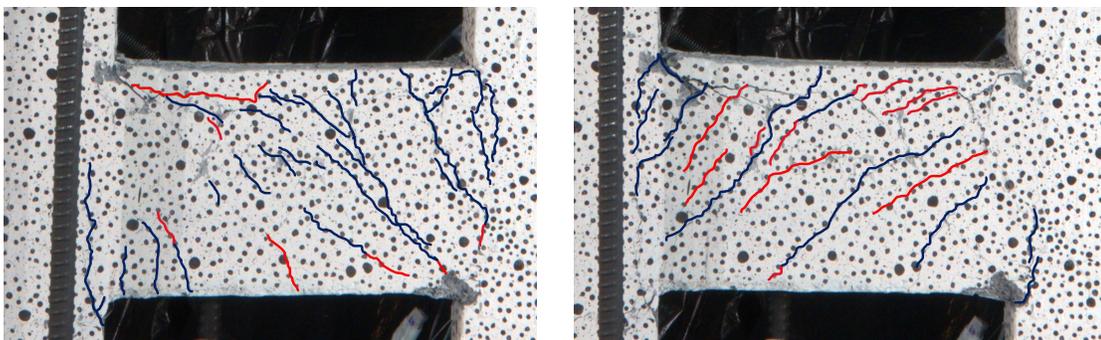


(a) MR2 2% drift

(b) MR2 -2% drift

Figura 5.49: Evolución de grietas MR2 2% drift

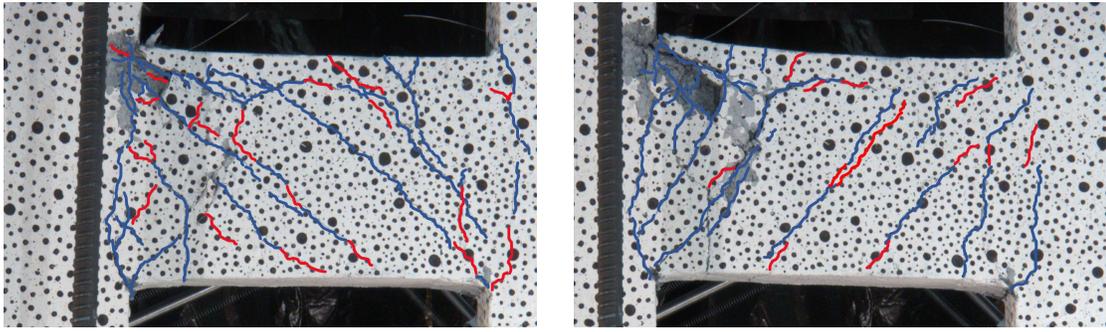
En cuanto a la evolución del daño de las viga inferior que se observa en las imágenes de la Figura 5.50 y de la viga superior que muestra la Figura 5.51, se evidencia que hay grietas diagonales prácticamente en toda la extensión de ambas vigas y una mayor pérdida de recubrimiento en la zona superior izquierda de ambas vigas, con lo cual se deduce que a este nivel de deriva el acero es el material que está encargado de resistir los esfuerzos en las vigas, y dada la enorme propagación de grietas de forma diagonal en estos elementos, son definitivamente esfuerzos de corte los que dominan el modo de falla de las vigas.



(a) Viga inferior 2% drift

(b) Viga inferior -2% drift

Figura 5.50: Evolución de grietas viga inferior 2% drift



(a) Viga superior 2 % drift

(b) Viga superior -2 % drift

Figura 5.51: Evolución de grietas viga superior 2 % drift

La base izquierda del muro MR1 comienza a perder recubrimiento producto de la tracción que se genera en esta zona al someter la probeta a derivas positivas, tal como se mencionó anteriormente.



Figura 5.52: Base izquierda muro MR1 2 % drift

Finalmente, se alcanza la última deriva de 3 %. El muro MR1 (ver Figura 5.53) presenta, al igual que para el cambio de deriva anterior, una elevada propagación de sus grietas preexistentes, abarcando ya la totalidad del largo del muro en algunos casos para ambas derivas, es importante mencionar que dado que estas grietas no se generaron desde el centro del muro, entonces es la flexión el esfuerzo que provoca la aparición de estas. Ambos lados de la base presentan una gran pérdida de material y se puede observar la enfierradura descubierta, se produce rotura de las 4 barras verticales del extremo izquierdo del muro MR1, presentando así una falla dúctil por pandeo local en la armadura vertical a la altura de la base izquierda durante el segundo ciclo del 3 % de drift.

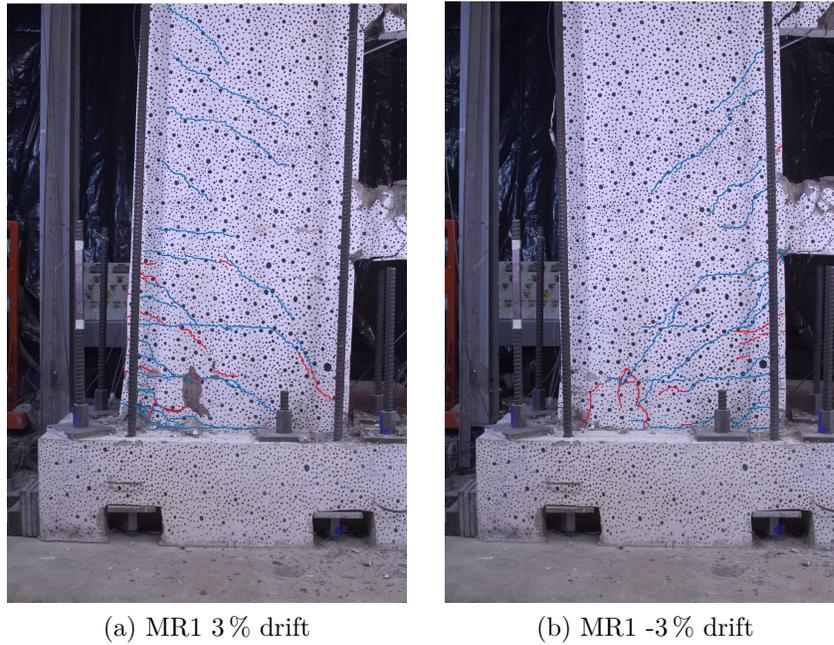


Figura 5.53: Evolución de grietas MR1 3 % drift

De manera análoga al muro MR1, el muro MR2 (ver Figura 5.54) presentó altas pérdidas de recubrimiento en el lado derecho de su base, y las grietas de flexión abarcan casi todo el largo de las cercanías de la base producto de la tracción que se produce en cada lado para su deriva respectiva.

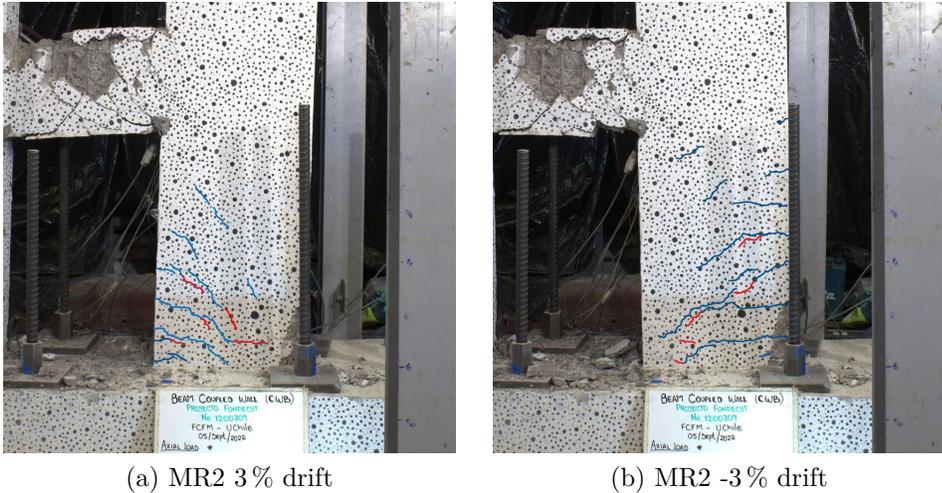
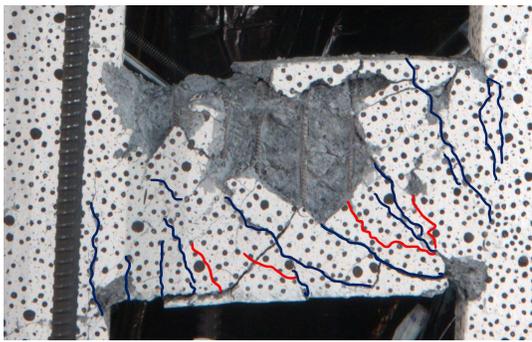
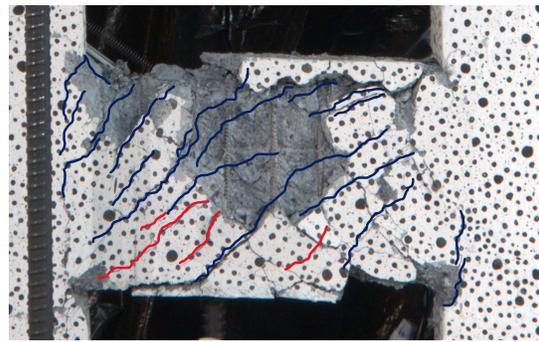


Figura 5.54: Evolución de grietas MR2 3 % drift

En la Figura 5.55 y Figura 5.56 se observa que las vigas tanto inferior como superior se encuentran con una enorme pérdida de hormigón al alcanzar el 3 % de deriva en la zona superior izquierda. Y dada la marcada diagonal de pérdida de recubrimiento que recorre el centro de las vigas, se confirma entonces que la falla es por los esfuerzos de corte que predominan en estos elementos.

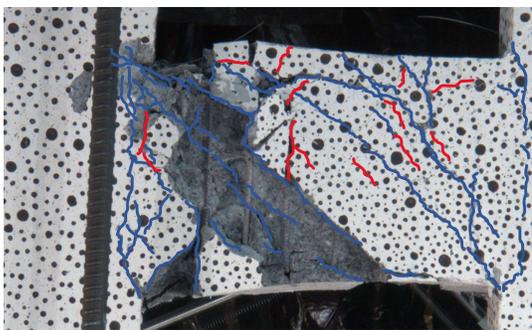


(a) Viga inferior 3% drift

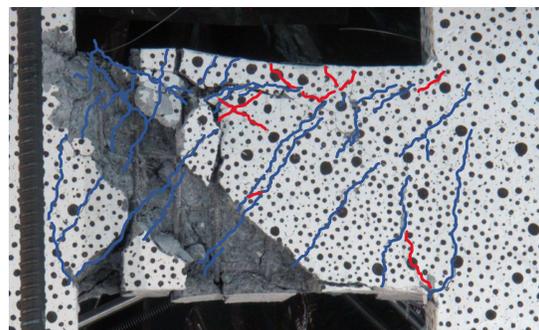


(b) Viga inferior -3% drift

Figura 5.55: Evolución de grietas viga inferior 3% drift



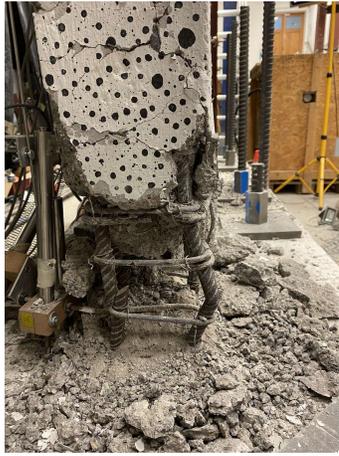
(a) Viga superior 3% drift



(b) Viga superior -3% drift

Figura 5.56: Evolución de grietas viga superior 3% drift

En las imágenes de la Figura 5.57 se tiene la causa de la falla final de la probeta en la base izquierda del muro MR1. Se observan las barras verticales pandeadas en la imagen a), previo a que estas se cortaran, lo cual se observa en la imagen b), las 4 barras verticales del lado izquierdo del Muro MR1 se cortaron durante los ciclos de la deriva del 3%. Con lo cual se tiene que el modo de falla de la probeta es por pandeo local en la base izquierda del muro MR1.



(a) Base izquierda muro MR1



(b) Barras cortadas

Figura 5.57: Fotos base MR1 3% drift

Capítulo 6

Conclusiones

Se construye una probeta compuesta de dos muros rectangulares de hormigón armado acoplados por dos vigas de dimensiones características de la tipología chilena de construcción. Se realiza un ensayo de carga cíclica controlado por desplazamiento en la probeta, para estudiar el comportamiento de su respuesta por medio de sensores de desplazamiento lineal LVDT. Como comentarios del ensayo, sólo el muro MR1 fue cargado verticalmente a una carga de 40 [tonf], correspondiente a $0,08f'_cA_g$, y las mediciones de los sensores presentadas sólo abordan hasta el 2% de drift del protocolo de desplazamientos.

El daño comienza concentrándose en las juntas de las vigas con el muro MR1 en derivas inferiores al 0.4%, luego se propaga hacia los muros MR1 y MR2 producto de esfuerzos de flexión. Los lados de las bases de los muros fluyen en distintas derivas, los lados externos fluyen al 0.6% de drift, mientras que los internos en 0.3%. Se evidencia pérdida de recubrimiento en las vigas al alcanzar un 1.35% de drift, mientras que en los muros esto inicia a un nivel de drift de 2%, en el borde izquierdo del muro MR1. Tras alcanzar un 3% de drift, se produce fractura de barras por pandeo local en la zona basal izquierda del MR1. Finalmente, la probeta falla de manera dúctil por pandeo local. El análisis de la evolución de grietas en las vigas indica que, dado que predomina el agrietamiento diagonal de estos elementos, las vigas fallan producto de esfuerzos de corte.

Los desplazamientos de techo del muro MR2 son de carácter asimétrico, pues son mayores para el lado de los drifts positivos que de los negativos, mostrando una diferencia de hasta 18 [mm] aproximadamente comparando el primer ciclo del 2% de drift contra el primero del -2% de drift, en el muro MR1 no presentan mayores diferencias, debido a que este muro es el de control. Con respecto a las cargas del MR1, se observaron mayores valores de estas hacia el lado de los drifts positivos que de los negativos correspondientemente para cada drift, concluyendo que posee mayor resistencia hacia el lado de las derivas positivas.

Los resultados de los perfiles de deformación vertical en altura muestran un comportamiento concordante con los de las curvaturas y perfiles de deformación basal obtenidos para ambos muros. Los desplazamientos por corte mostraron ser mayores en los pisos inferiores de la probeta. Se esperaba un comportamiento dominado por la flexión de los muros, lo cual se corrobora con los valores de contribución de desplazamiento por corte, que son de un 3% en el piso 3 del MR1 y un 4% en el piso 2 del MR2, mientras que para el primer piso del muro MR1 se tiene un 18% de contribución del corte.

Los largos de rótula plástica observados experimentalmente se encuentran todos por debajo de la altura de la viga inferior, mostrando además ser mayores conforme aumenta el valor de deriva al que se encuentra la probeta. Además, en ambos muros se observa que el largo de rótula plástica es menor en los lados en que se encuentran las vigas (MR1 este y MR2 oeste), debido a la variación de carga vertical que se genera por la presencia de estos elementos sobre los lados internos de los muros. Comparando con la expresión de la literatura, resultan valores que se encuentran dentro de un orden aceptable para 3 de los 4 lados de los muros, siendo el lado este del MR2 el que presenta mayores diferencias, lo cual puede explicarse porque la carga axial de este muro se transmite por las vigas, y por lo tanto impacta mayormente en el lado oeste del MR2. En resumen, el comportamiento experimental de la probeta es representado satisfactoriamente por la expresión de Alfaro y Massone[10].

A modo de conclusión, la respuesta experimental de la probeta concuerda en gran medida con lo esperado en base a lo estudiado de la literatura.

Bibliografía

- [1] Lagos, R., Lafontaine, M., Bonelli, P., Boroschek, R., Guendelman, T., Massone, L., Saragoni, R., Rojas, F., y Ez, F., “The quest for resilience: The Chilean practice of seismic design for reinforced concrete buildings,” *Earthquake Spectra*, vol. 37, 2020.
- [2] Mohr, D. S., “Nonlinear analysis and performance based design methods for reinforced concrete coupled shear walls,” *Master of Science in Civil Engineering - University of Washington*, 2007.
- [3] Galano, L. y Vignoli, A., “Seismic behavior of short coupling beams with different reinforcement layouts,” *ACI Structural Journal*, vol. 97, pp. 876–885, 2000.
- [4] Kwan y Zhao, Z., “Cyclic behaviour of deep reinforced concrete coupling,” *Proceedings of The Institution of Civil Engineers-structures and Buildings - PROC INST CIVIL ENG-STRUCT B*, vol. 152, pp. 283–293, 2002.
- [5] Santos, H., “Estudio numerico de la respuesta de sistemas de muros de hormigon armado acoplados y disenyo experimental para su validacion,” *Tesis (magister en ciencias de la ingenieria, mencion ingenieria sismica)-Universidad de Chile*, 2018.
- [6] El-Tawil, S., Harries, K., Fortney, P., Shahrooz, B., y Kurama, Y., “Seismic design of hybrid coupled wall systems — state-of-the-art,” *Journal of Structural Engineering-asce - J STRUCT ENG-ASCE*, vol. 136, 2010.
- [7] Subedi, N. K., “Rc coupled shear wall structures. ii: Ultimate strength calculations,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 117, no. 3, pp. 681–698, 1991.
- [8] ACI318-08, “Building code requirements for structural plain concrete,” *American Concrete Institute*, 2008.
- [9] L. M. Massone, F. Rojas, J. I. A. M. A. y Hernandez, A., “Analytical considerations for the design of reinforced concrete walls in Chile,” *16WCEE*, 2017.
- [10] Massone, L. M. y Alfaro, J. I., “Displacement and curvature estimation for the design of reinforced concrete slender walls,” *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 25, no. 16, pp. 823–841, 2016.
- [11] Bohl, A., “Plastic hinge length in high-rise concrete shear walls,” 2003.
- [12] Bohl, A. y Adebar, P., “Plastic hinge lengths in high-rise concrete shear walls,” *ACI Structural Journal*, vol. 108, pp. 148–157, 2011.
- [13] Valdivia Aguayo, M., “Análisis no lineal del sistema de muros rectangulares acoplados frente a cargas cíclicas y diseño de su montaje experimental,” *Tesis (magister en ciencias de la ingenieria, mencion ingenieria sismica)-Universidad de Chile*, 2023.
- [14] Segura, N., “Estudio experimental y numérico de la respuesta de sistemas de muros

- rectangulares acoplados con losas de hormigón armado,” Tesis (magister en ciencias de la ingeniería, mención ingeniería sísmica)-Universidad de Chile, 2023.
- [15] ACI-T1.1-01, “Acceptance criteria for moment frames based on structural testing and commentary,” American Concrete Institute, 2014.
- [16] NCh171-Of2008, “Hormigón - extracción de muestras del hormigón fresco,” Norma chilena, 2008.
- [17] NCh1017-Of2009, “Hormigón - confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y por hendimiento,” Norma chilena, 2009.
- [18] “Sensores macrosensor, te connectivity.”
- [19] “Sensores schaevitz, harold schaevitz industries ®.”
- [20] “Sensores omega, omega engineering®.”
- [21] “Cable db9.”, <https://media.startech.com/cms/products/main/scnm9fmxmbk.main.jpg>.
- [22] “Fuente de poder.”, <https://www.batronix.com/images/generated/dp832-oblique2-1200x735-White-b.jpg>.
- [23] MATLAB®, 9.4.0. (R2018a). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2018.
- [24] Diaz Olivares, Massone Sanchez, L., “Estudio experimental y modelamiento en elementos finitos de muros esbeltos de hormigón armado con discontinuidades tipo bandera,” Tesis (magister en ciencias de la ingeniería, mención ingeniería sísmica)-Universidad de Chile, 2016.
- [25] Massone, L. y Wallace, J., “Load-deformation responses of slender reinforced concrete walls,” *Aci Structural Journal*, vol. 101, pp. 103–113, 2004.
- [26] Bustos, F., “Estudio experimental y analítico de la respuesta de sistemas de muros rectangulares de hormigón armado acoplados con vigas,” Tesis (magister en ciencias de la ingeniería, mención ingeniería sísmica)-Universidad de Chile, 2023.

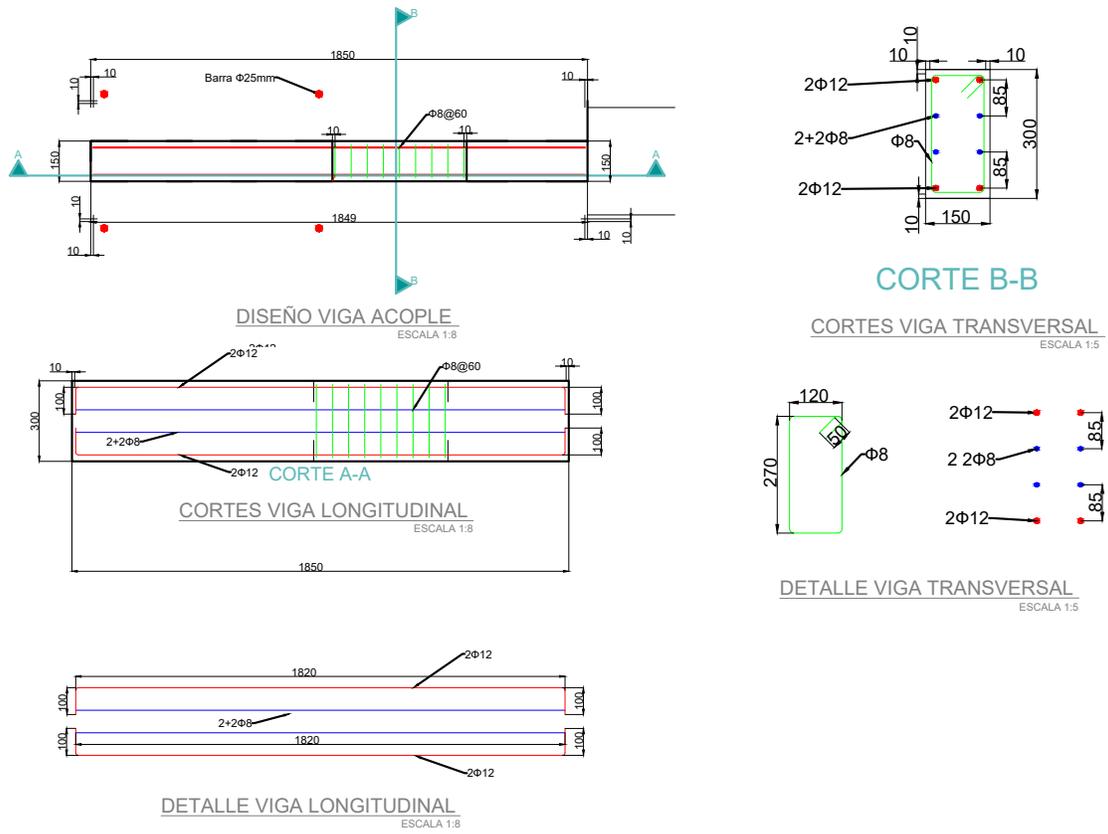


Figura A.2: Detalle viga de acople

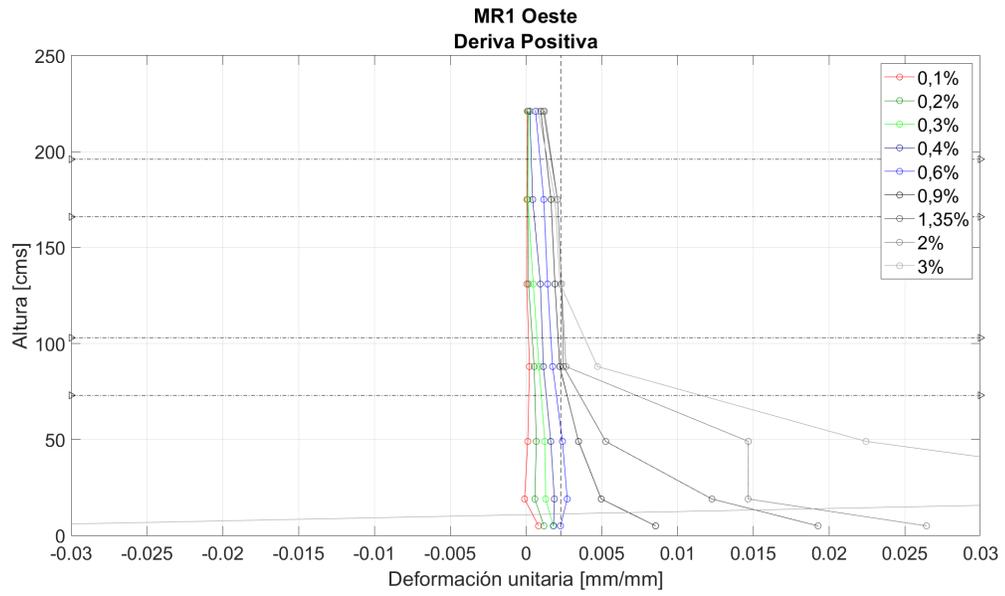


Figura C.1: Perfil de deformación en altura MR1 oeste deriva positiva

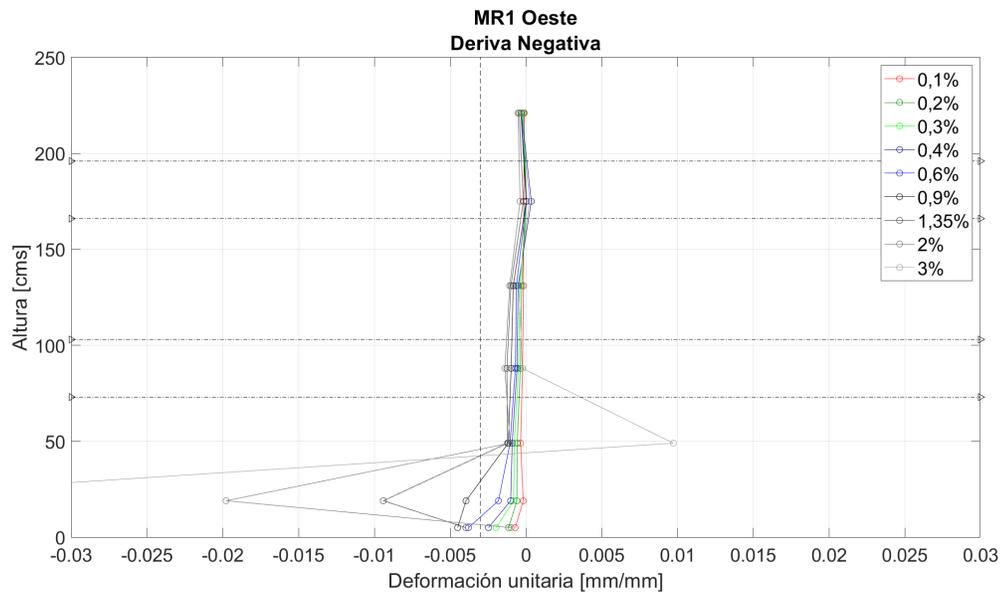


Figura C.2: Perfil de deformación en altura MR1 oeste deriva negativa

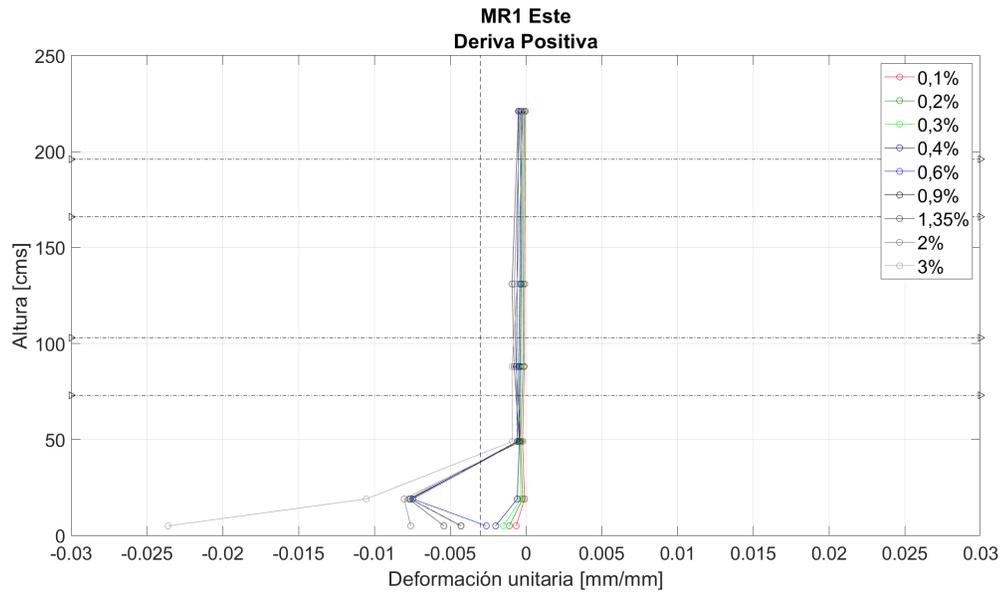


Figura C.3: Perfil de deformación en altura MR1 este deriva positiva

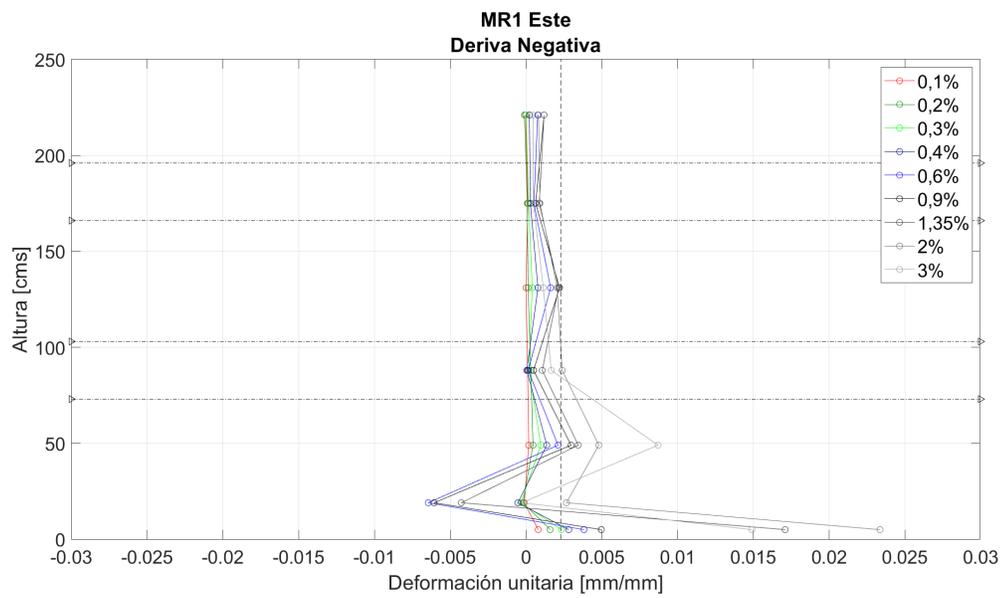


Figura C.4: Perfil de deformación en altura MR1 este deriva negativa

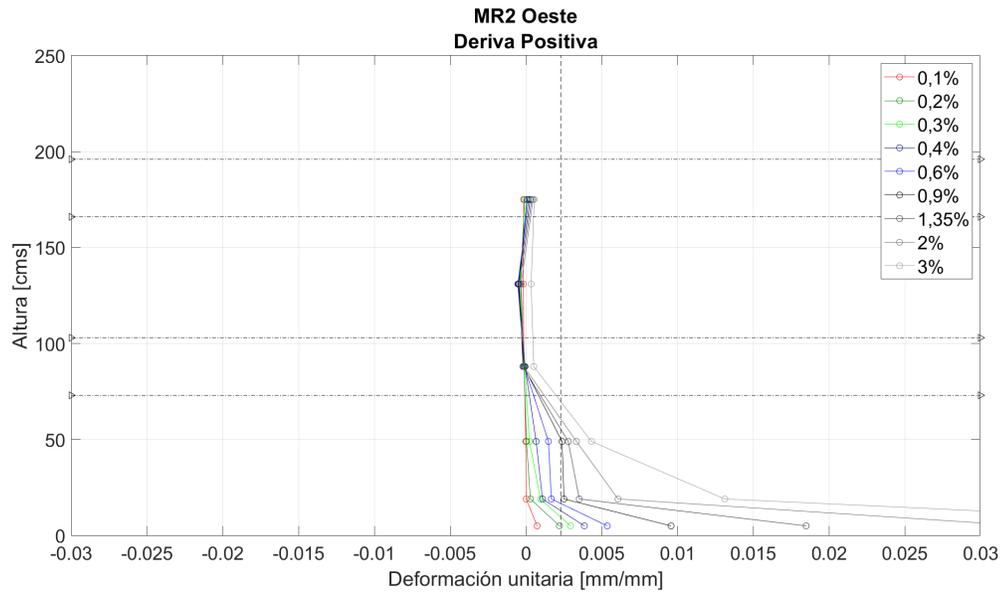


Figura C.5: Perfil de deformación en altura MR2 oeste deriva positiva

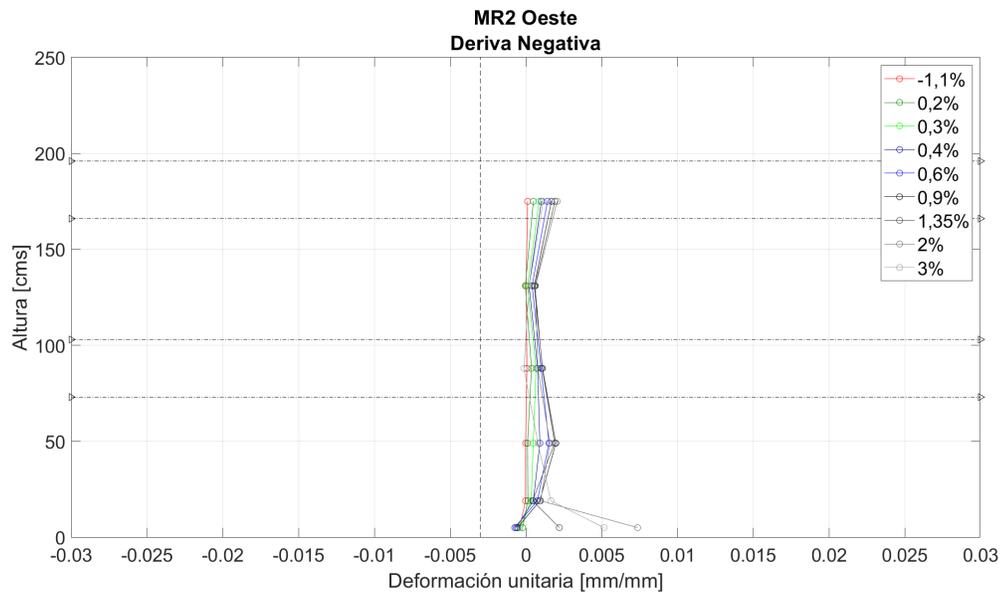


Figura C.6: Perfil de deformación en altura MR2 oeste deriva negativa

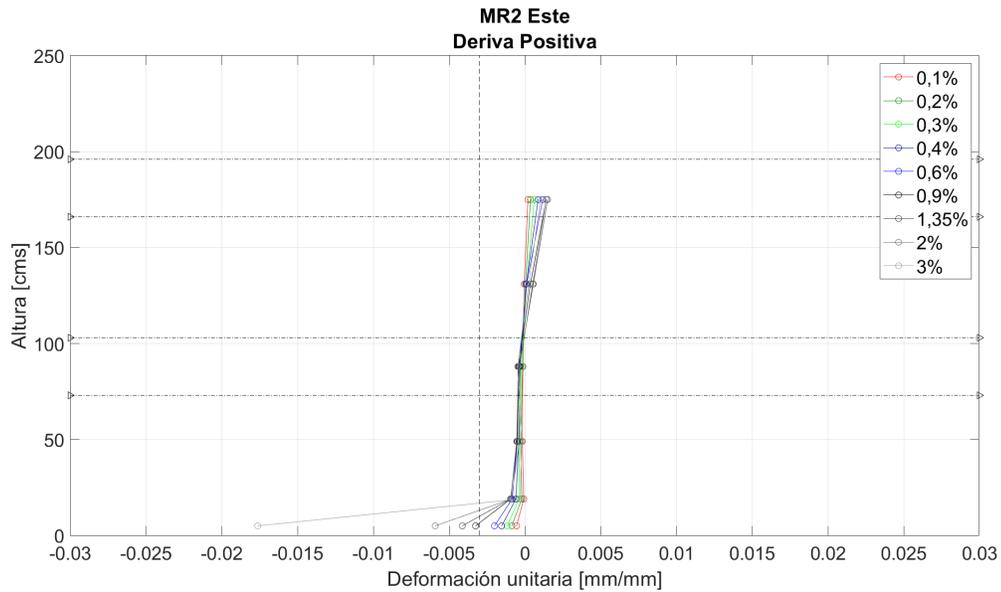


Figura C.7: Perfil de deformación en altura MR2 este deriva positiva

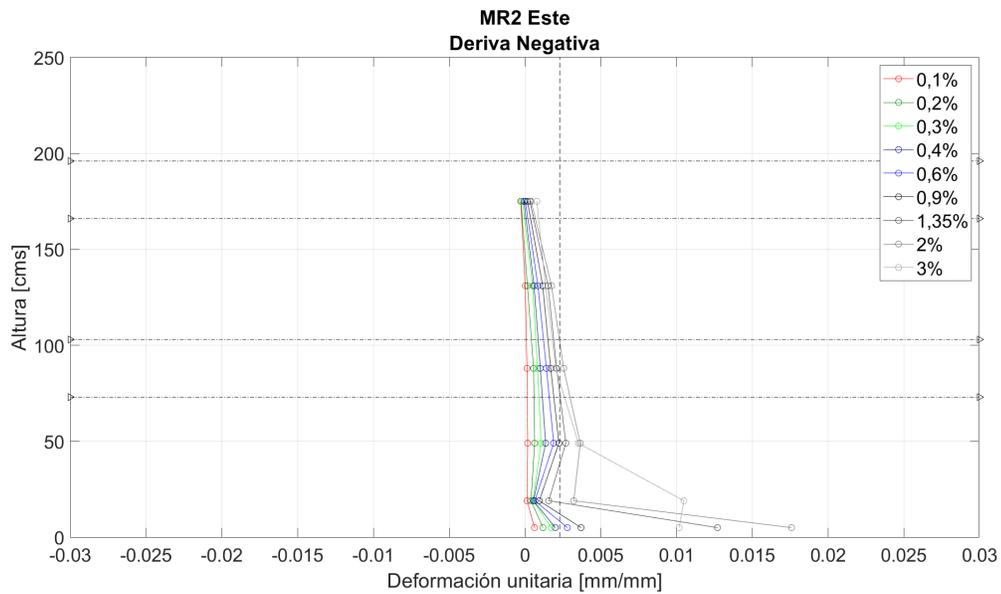


Figura C.8: Perfil de deformación en altura MR2 este deriva negativa

Anexo D. Desplazamientos por corte

En la siguiente sección se presentan los gráficos de desplazamiento por corte incluyendo la deriva del 3% y, además, las elongaciones máximas de los sensores diagonales cuyo otro sensor cruzado no funcionó, lo cual no permitió calcular el desplazamiento por corte de su piso.

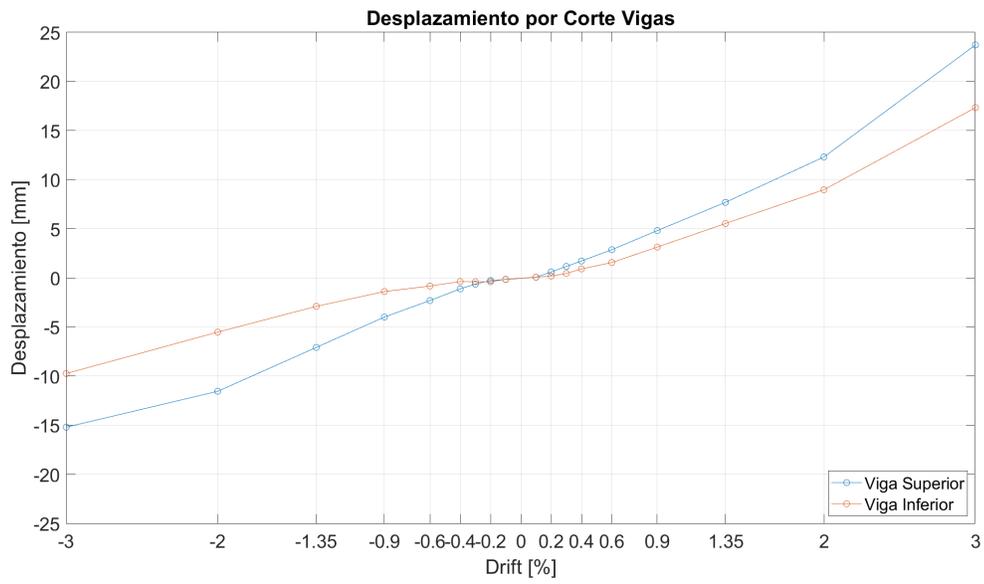


Figura D.1: Desplazamiento por corte completo ambas vigas

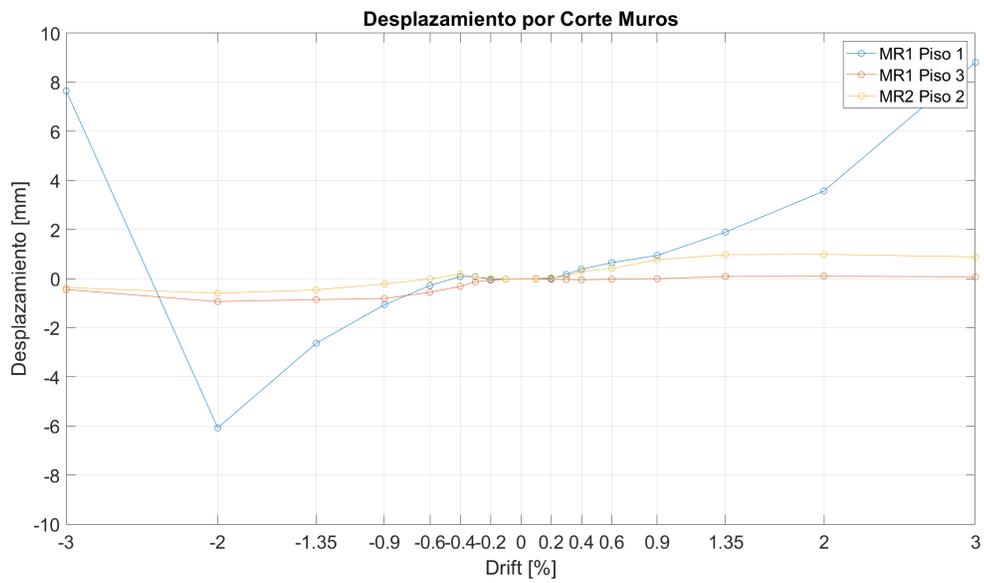


Figura D.2: Desplazamiento por corte completo muros

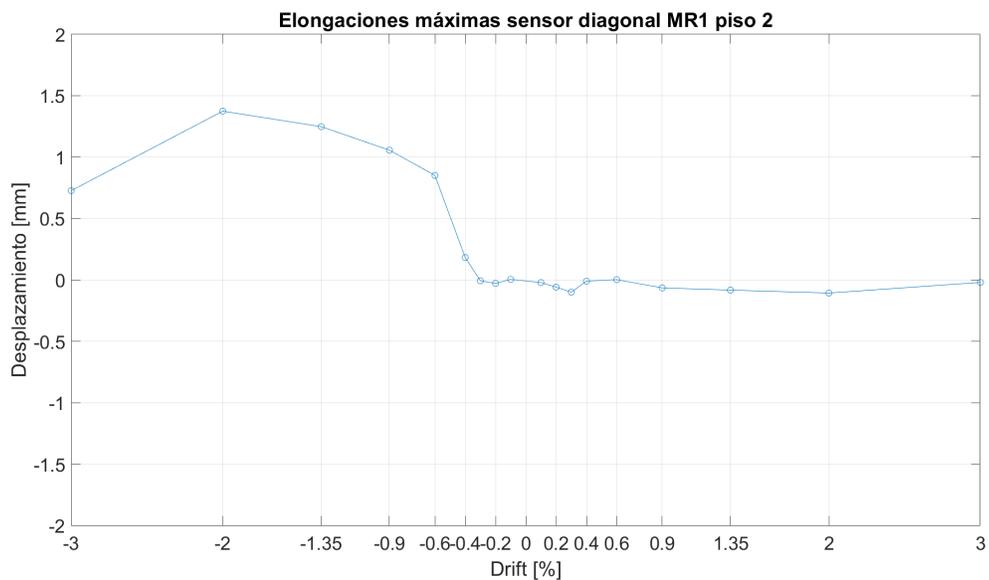


Figura D.3: Elongaciones máximas de sensor diagonal MR1 piso 2

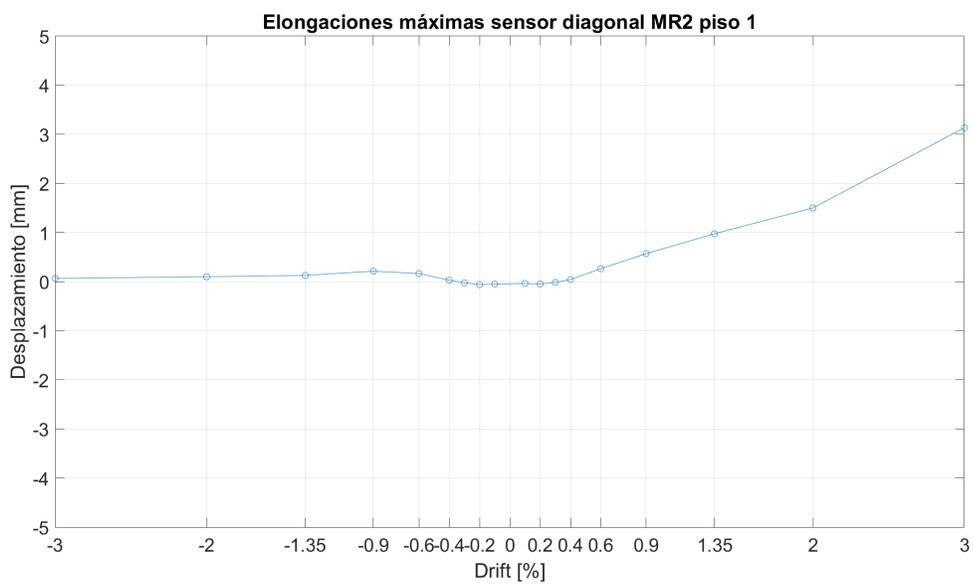


Figura D.4: Elongaciones máximas de sensor diagonal MR2 piso 1

Anexo E. Contribución Flexión y Corte

E.1. Desplazamientos Flexión y Corte MR1 Piso 1

Tabla E.1: Valores de desplazamiento de flexión y corte MR1 piso 1

| Drift [%] | Desp total piso 1 [mm] | Desp por corte [mm] | Desp por flexión [mm] | %Corte | %Flexión |
|-----------|------------------------|---------------------|-----------------------|--------|----------|
| -2 | 16,3 | -6,1 | 10,2 | 37 % | 63 % |
| -1,35 | 10,9 | -2,6 | 8,3 | 24 % | 76 % |
| -0,9 | 7,3 | -1,1 | 6,3 | 14 % | 86 % |
| -0,6 | 5,0 | -0,3 | 4,7 | 6 % | 94 % |
| -0,4 | 3,4 | 0,1 | 3,3 | 2 % | 98 % |
| -0,3 | 2,5 | 0,1 | 2,4 | 3 % | 97 % |
| -0,2 | 1,6 | 0,0 | 1,5 | 2 % | 98 % |
| -0,1 | 0,8 | 0,0 | 0,8 | 2 % | 98 % |
| 0,1 | 0,2 | 0,0 | 0,2 | 3 % | 97 % |
| 0,2 | 0,7 | 0,0 | 0,7 | 0 % | 100 % |
| 0,3 | 1,1 | 0,2 | 0,9 | 16 % | 84 % |
| 0,4 | 1,3 | 0,4 | 0,9 | 29 % | 71 % |
| 0,6 | 1,9 | 0,7 | 1,2 | 35 % | 65 % |
| 0,9 | 3,0 | 0,9 | 2,1 | 31 % | 69 % |
| 1,35 | 5,2 | 1,9 | 3,3 | 37 % | 63 % |
| 2 | 9,1 | 3,6 | 5,5 | 39 % | 61 % |

E.2. Desplazamientos Flexión y Corte MR1 Piso 3

Tabla E.2: Valores de desplazamiento de flexión y corte MR1 piso 3

| Drift [%] | Desp total piso 3 [mm] | Desp por corte [mm] | Desp por flexión [mm] | %Corte | %Flexión |
|-----------|------------------------|---------------------|-----------------------|--------|----------|
| -2 | 19,5 | -0,9 | 18,6 | 5 % | 95 % |
| -1,35 | 13,9 | -0,8 | 13,0 | 6 % | 94 % |
| -0,9 | 9,8 | -0,8 | 8,9 | 8 % | 92 % |
| -0,6 | 6,6 | -0,6 | 6,0 | 8 % | 92 % |
| -0,4 | 4,2 | -0,3 | 3,9 | 7 % | 93 % |
| -0,3 | 3,2 | -0,1 | 3,0 | 4 % | 96 % |
| -0,2 | 2,0 | -0,1 | 1,9 | 3 % | 97 % |
| -0,1 | 0,9 | 0,0 | 0,9 | 2 % | 98 % |
| 0,1 | 1,2 | 0,0 | 1,2 | 1 % | 99 % |
| 0,2 | 2,5 | 0,0 | 2,5 | 1 % | 99 % |
| 0,3 | 3,7 | 0,0 | 3,6 | 1 % | 99 % |
| 0,4 | 4,9 | 0,0 | 4,9 | 1 % | 99 % |
| 0,6 | 7,2 | 0,0 | 7,1 | 0 % | 100 % |
| 0,9 | 10,5 | 0,0 | 10,5 | 0 % | 100 % |
| 1,35 | 14,7 | 0,1 | 14,6 | 1 % | 99 % |
| 2 | 20,3 | 0,1 | 20,2 | 1 % | 99 % |

E.3. Desplazamientos Flexión y Corte MR2 Piso 2

Tabla E.3: Valores de desplazamiento de flexión y corte MR2 piso 2

| Drift [%] | Desp total piso 2[mm] | Desp por corte [mm] | Desp por flexión [mm] | %Corte | %Flexión |
|-----------|-----------------------|---------------------|-----------------------|--------|----------|
| -2 | 15,6 | -0,6 | 15,0 | 4 % | 96 % |
| -1,35 | 9,9 | -0,5 | 9,4 | 5 % | 95 % |
| -0,9 | 6,6 | -0,2 | 6,4 | 3 % | 97 % |
| -0,6 | 4,6 | 0,0 | 4,6 | 0 % | 100 % |
| -0,4 | 3,1 | 0,2 | 2,9 | 6 % | 94 % |
| -0,3 | 2,6 | 0,1 | 2,5 | 2 % | 98 % |
| -0,2 | 1,7 | 0,0 | 1,6 | 1 % | 99 % |
| -0,1 | 0,8 | 0,0 | 0,8 | 2 % | 98 % |
| 0,1 | 0,9 | 0,0 | 0,9 | 1 % | 99 % |
| 0,2 | 2,0 | 0,0 | 2,0 | 2 % | 98 % |
| 0,3 | 3,2 | 0,1 | 3,1 | 3 % | 97 % |
| 0,4 | 4,3 | 0,3 | 4,0 | 7 % | 93 % |
| 0,6 | 6,2 | 0,4 | 5,7 | 7 % | 93 % |
| 0,9 | 9,4 | 0,8 | 8,6 | 8 % | 92 % |
| 1,35 | 14,0 | 1,0 | 13,1 | 7 % | 93 % |
| 2 | 21,0 | 1,0 | 20,0 | 5 % | 95 % |