



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

COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES ENTRE MUROS DE
HORMIGÓN ARMADO CON MALLA CENTRAL PREPARADA Y ELECTROSOLDADA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

NICOLE CONSTANZA AHUMADA VILCHES

PROFESOR GUÍA:
FABÍAN ROJAS BARRALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEONARDO MASSONE SANCHEZ
ERNESTO INZUNZA ARAYA

SANTIAGO DE CHILE

2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
POR: NICOLE CONSTANZA AHUMADA VILCHES
FECHA: DICIEMBRE 2019
PROFESOR GUÍA: FABIÁN ROJAS BARRALES

COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES ENTRE MUROS DE
HORMIGÓN ARMADO CON MALLA CENTRAL PREPARADA Y ELECTROSOLDADA

La industria de la construcción está apostando por utilizar soluciones constructivas que minoren los tiempos de construcción, pero sin descuidar la calidad de los materiales y estructuras, es por esto, que los elementos prefabricados vienen a revolucionar la forma en que se ha construido tradicionalmente. Estos avances deben tomar en cuenta que Chile es un país sísmico y los elementos estructurales están sometidos a cargas tanto estáticas como cíclicas. La empresa ACMA propone reemplazar las mallas tradicionales, las cuales son amarradas con alambre por mallas electrosoldadas dúctiles. El objetivo es comparar el comportamiento de muros de hormigón armado con mallas tradicionales y mallas electrosoldadas A630S. Para alcanzar dicho objetivo se analizan 8 muros de hormigón armado mediante el uso de sensores LVDT's, fotogrametría y modelos numéricos de elementos finitos que puedan predecir el comportamiento de los muros de interés.

Las probetas se dividen en dos grupos principales las M3 y M4, las cuales están constituidas por una fundación, un muro y una viga de coronamiento. Las probetas M3 y M4 tienen las mismas medidas de muro: 140 [cm] de alto, 140 [cm] de ancho y 12 [cm] de espesor. Sin embargo, la cuantía de las probetas M4 es mayor.

El ensayo al cual son sometidos los muros consiste en la aplicación de un desplazamiento controlado en la viga de coronamiento por medio de un gato hidráulico, para cada nivel de desplazamiento se aplican tres ciclos. Los materiales de los cuales están constituidas las probetas son de hormigón H25, las mallas tradicionales están constituidas de acero A630 y las mallas electrosoldadas de acero A630S.

Los resultados arrojan que las probetas construidas con mallas electrosoldadas desarrollan un 20% menos de capacidad de desplazamiento. La distribución de fisuras arroja que en los muros con mallas electrosoldadas tienen una concentración de fisuras en la base del muro y presentan una grieta diagonal predominante, esto conlleva a que tengan una menor capacidad de desplazamiento, pero igual resistencia en fuerza. En cuanto al modelo de elementos finitos tiene un error del 4% para desplazamientos en la viga de coronamiento mayores al 5 [mm], pero para desplazamientos menores, el modelo numérico predice que la carga necesaria para alcanzar dichos desplazamientos es mayor a lo que experimenta el muro realmente, esto se puede deber a posibles reducciones en la capacidad debido a la manipulación de las probetas.

A mis padres

Tabla de contenido

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introducción | 1 |
| 1.1 | Objetivos..... | 2 |
| 1.1.1 | Objetivo general..... | 2 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 2 |
| 1.2 | Metodología | 2 |
| 1.3 | Organización de la memoria..... | 3 |
| 2 | Revisión bibliográfica | 5 |
| 2.1 | Ensayos en muros de hormigón armado | 5 |
| 2.2 | Mallas electrosoldadas..... | 9 |
| 2.3 | Fotogrametría..... | 12 |
| 2.4 | Modelación..... | 15 |
| 3 | Antecedentes de los muros ensayados | 17 |
| 3.1 | Caracterización de probetas | 17 |
| 3.2 | Construcción de probetas..... | 19 |
| 3.3 | Materiales de las probetas ensayadas | 22 |
| 3.4 | Soldadura en mallas..... | 23 |
| 3.5 | Ejecución de ensayos..... | 24 |
| 4 | Antecedentes para el análisis de los muros ensayados por fotogrametría y modelación numérica | 29 |
| 4.1 | Fotogrametría..... | 29 |
| 4.1.1 | Selección de fotografías | 29 |
| 4.1.2 | Manual Ncorr..... | 30 |
| 4.1.3 | Estructura de datos optimizada | 37 |
| 4.1.4 | Precisión de resultados medidos con fotogrametría..... | 39 |
| 4.2 | Modelación numérica | 41 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2.1 | Modelos constitutivos de los materiales..... | 41 |
| 5 | Resultados experimentales..... | 50 |
| 5.1 | Ciclo de histéresis..... | 50 |
| 5.2 | Validación entre fotogrametría y sensores LVDT's..... | 54 |
| 5.3 | Fotogrametría..... | 56 |
| 5.3.1 | Desplazamiento horizontal..... | 56 |
| 5.3.2 | Aporte del corte..... | 61 |
| 5.3.3 | Deformación vertical..... | 65 |
| 5.3.4 | Avance del agrietamiento..... | 68 |
| 5.3.5 | Fisuras..... | 73 |
| 6 | Resultados analíticos..... | 77 |
| 6.1 | Modelamiento..... | 77 |
| 6.2 | Respuesta global..... | 80 |
| 6.3 | Estudio de deformaciones unitarias..... | 81 |
| 6.3.1 | Deformación vertical..... | 83 |
| 7 | Conclusiones..... | 85 |
| | Bibliografía..... | 87 |
| | Anexos..... | 89 |
| | Anexo A: Planos..... | 89 |
| | Muro M3..... | 89 |
| | Muro M4..... | 96 |

Índices de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1: Esquema geometría muros ensayados, Muñoz (2017). | 6 |
| Figura 2.2: Respuesta carga-desplazamiento MR1..... | 8 |
| Figura 2.3: Respuesta carga-desplazamiento MR2..... | 8 |
| Figura 2.4: Respuesta carga-desplazamiento MR3..... | 8 |
| Figura 2.5: Respuesta carga-desplazamiento MR4..... | 8 |
| Figura 2.6: Esquema muros ensayados por (Rodríguez, 2011). | 10 |
| Figura 2.7: Plano de instrumentación para ensayos de muro, donde Di corresponde al sensor de desplazamiento i, (Rodríguez, 2011). | 11 |
| Figura 2.8: Carga vs Desplazamiento Muro M-1. (Rodríguez, 2011)..... | 12 |
| Figura 2.9: Carga vs Desplazamiento, Muro M-2. (Rodríguez, 2011)..... | 12 |
| Figura 2.10: Fisuras muro M-1 en fase 10. | 12 |
| Figura 2.11: Fisuras muro M-2 en fase 9. | 12 |
| Figura 2.12: Esquema de implementación computacional (Ncorr, 2019). | 14 |
| Figura 3.1: Esquema dimensiones de los muros M3 y M4, (Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2018). | 18 |
| Figura 3.2: Distribución de armaduras, (Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2018). | 19 |
| Figura 3.3: Construcción y cierre del moldaje con la armadura en su interior, (Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2018)..... | 20 |
| Figura 3.4: Hormigonado de probetas, (Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2018)..... | 21 |
| Figura 3.5: Probetas previas a ser transportadas, (Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2018)..... | 22 |
| Figura 3.6: Esquema de montaje experimental (se omite marco y sensores de medición)..... | 24 |
| Figura 3.7: Sistema de carga axial..... | 25 |
| Figura 3.8: Ciclos de carga aplicados a muros. | 26 |
| Figura 3.9: Distribución esquemática de sensores LVDT's en ensayo de muros. | 27 |
| Figura 4.1: Esquema análisis lado derecho de la viga de coronamiento del muro..... | 30 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.2: Interfaz de Ncorr..... | 31 |
| Figura 4.3: Ingreso de imagen de referencia..... | 31 |
| Figura 4.4: Ingreso de imágenes del ensayo, excluyendo imagen de referencia. | 32 |
| Figura 4.5: Dibujo de región de interés..... | 32 |
| Figura 4.6: Configuración de parámetros DIC..... | 33 |
| Figura 4.7: Configuración de semillas..... | 34 |
| Figura 4.8: Previsualización de semillas..... | 34 |
| Figura 4.9: Configuración de escala..... | 35 |
| Figura 4.10: Formato de desplazamientos..... | 35 |
| Figura 4.11: Configuración de parámetros de deformación. | 36 |
| Figura 4.12: Análisis finalizado..... | 36 |
| Figura 4.13: Estructura de datos entregada por Ncorr – data dic save..... | 37 |
| Figura 4.14: Estructura optimizada..... | 38 |
| Figura 4.15: Error deformaciones fotografías consecutivas..... | 40 |
| Figura 4.16: Sección rectangular típica de capas de membrana (Rojas, 2016)..... | 41 |
| Figura 4.17: Modelo constitutivo del hormigón en compresión usando la curva de Thorenfeldt, (Rojas, 2016)..... | 42 |
| Figura 4.18: Modelo constitutivo del hormigón en tracción usando la ecuación de Belarbi and Hsu, (Rojas, 2016)..... | 43 |
| Figura 4.19: Reglas de histéresis del modelo de hormigón, (Rojas, 2016)..... | 44 |
| Figura 4.20: Coeficientes de modificación del hormigón, (Rojas, 2012)..... | 45 |
| Figura 4.21: Relación tensión-deformación de barras de acero embebidas en hormigón y barras de acero, (Rojas, 2012)..... | 47 |
| Figura 4.22: Modelo constitutivo del acero de Menegotto–Pinto, (Rojas, 2016)..... | 47 |
| Figura 5.1: Carga vs desplazamiento: (a) muro M3 FPA; (b) muro y M3 FPB; (c) muro M3 MEA; (d) muro M3 MEB..... | 51 |
| Figura 5.2: Carga vs desplazamiento: (a) muro M4 FPA; (b) muro y M4 FPB; (c) muro M4 MEA; (d) muro M4 MEB..... | 52 |
| Figura 5.3: Comparación de las probetas de fierro preparado y malla electrosoldada del muro M3. | 53 |
| Figura 5.4: Comparación de las probetas de fierro preparado y malla electrosoldada del muro M4. | 53 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.5: Correlación entre fotogrametría y LVDT's: (a) M3 FPA; (b) M3 FPB; (c) M3 MEA; (d) M3 MEB..... | 54 |
| Figura 5.6: Correlación entre fotogrametría y LVDT's: (a) M4 FPA; (b) M4 FPB; (c) M4 MEA; (d) M4 MEB..... | 55 |
| Figura 5.7: Desplazamiento horizontal en altura del muro M3 FPA para las distintas derivas... | 56 |
| Figura 5.8: Desplazamiento horizontal en altura del muro M3 FPB para las distintas derivas... | 57 |
| Figura 5.9: Desplazamiento horizontal en altura del muro M3 MEA para las distintas derivas... | 57 |
| Figura 5.10 Desplazamiento horizontal en altura del muro M3 MEB para las distintas derivas. | 58 |
| Figura 5.11: Desplazamiento horizontal en altura del muro M4 FPA para las distintas derivas. | 58 |
| Figura 5.12: Desplazamiento horizontal en altura del muro M4 FPB para las distintas derivas. | 59 |
| Figura 5.13: Desplazamiento horizontal en altura del muro M4 MEA para las distintas derivas. | 59 |
| Figura 5.14: Desplazamiento horizontal en altura del muro M4 MEB para las distintas derivas. | 60 |
| Figura 5.15: Desplazamiento horizontal en el borde del muro para las probetas del muro M3: (a) M3 FPA; (b) M3 FPB; (c) M3 MEA; (d) M3 MEB..... | 62 |
| Figura 5.16: Desplazamiento horizontal en el borde del muro para las probetas del muro M4: (a) M4 FPA; (b) M4 FPB; (c) M4 MEA; (d) M4 MEB..... | 63 |
| Figura 5.17: Deformación vertical para el muro M3: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB, (c); Probeta MEA; (d) Probeta MEB..... | 66 |
| Figura 5.18: Deformación vertical para el muro M4: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB, (c) Probeta MEA; (d) Probeta MEB..... | 67 |
| Figura 5.19: Esquema de columnas donde se extrajeron las deformaciones verticales en los muros. | 68 |
| Figura 5.20: Deformación vertical a distintas distancias del borde del muro M3 FPA..... | 69 |
| Figura 5.21: Deformación vertical a distintas distancias del borde del muro M3 FPB..... | 69 |
| Figura 5.22: Deformación vertical a distintas distancias del borde del muro M3 MEA..... | 70 |
| Figura 5.23: Deformación vertical a distintas distancias del borde del muro M3 MEB..... | 70 |
| Figura 5.24: Deformación vertical a distintas distancias del borde del muro M4 FPA..... | 71 |
| Figura 5.25: Deformación vertical a distintas distancias del borde del muro M4 FPB..... | 71 |
| Figura 5.26: Deformación vertical a distintas distancias del borde del muro M4 MEA..... | 72 |
| Figura 5.27: Deformación vertical a distintas distancias del borde del muro M4 MEB..... | 72 |
| Figura 5.28: Deformación horizontal para un drift del -2% para el muro M3: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB; (c) Probeta MEA; (d) Probeta MEB..... | 73 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.29: Deformación horizontal para un drift del 2% para el muro M3: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB; (c) Probeta MEA; (d) Probeta MEB..... | 73 |
| Figura 5.30: Deformación vertical para un drift del -2% para el muro M3: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB; (c) Probeta MEA; (d) Probeta MEB..... | 74 |
| Figura 5.31: Deformación vertical para un drift del 2% para el muro M3: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB; (c) Probeta MEA; (d) Probeta MEB..... | 74 |
| Figura 5.32: Deformación horizontal para un drift del -2% para el muro M4: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB; (c) Probeta MEA; (d) Probeta MEB..... | 75 |
| Figura 5.33: Deformación horizontal para un drift del 2% para el muro M4: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB; (c) Probeta MEA; (d) Probeta MEB..... | 75 |
| Figura 5.34: Deformación vertical para un drift del -2% para el muro M4: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB; (c) Probeta MEA; (d) Probeta MEB..... | 76 |
| Figura 5.35: Deformación vertical para un drift del 2% para el muro M4: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB; (c) Probeta MEA; (d) Probeta MEB..... | 76 |
| Figura 6.1: Modelo elementos finitos muro M3..... | 78 |
| Figura 6.2: Modelo elementos finitos muro M4..... | 79 |
| Figura 6.3: Comparación entre modelo de elementos finitos y resultados experimentales de muro M3 – FPA y muro M3 – MEA..... | 80 |
| Figura 6.4: Comparación entre modelo de elementos finitos y resultados experimentales de muro M4 – FPA..... | 81 |
| Figura 6.5: Deformación máxima muro M3 – FPA..... | 81 |
| Figura 6.6: Deformación máxima muro M3 – MEA..... | 82 |
| Figura 6.7: Deformación máxima muro M4 – FPA..... | 82 |
| Figura 6.8: Deformación máxima muro M4 – MEA..... | 82 |
| Figura 6.9: Deformación vertical calculado con Safe-TB: (a) Probeta M3 FPA; (b) Probeta M3 MEA, (c); Probeta M4 FPA; (d) Probeta M4 MEA..... | 83 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1: Resultados en los ensayos de las barras de acero (Muñoz, 2017)..... | 7 |
| Tabla 2.2: Desplazamientos inducidos para cada deriva de techo (Muñoz, 2017)..... | 7 |
| Tabla 3.1: Notación muros..... | 18 |
| Tabla 3.2: Dimensiones de los elementos de las probetas..... | 18 |
| Tabla 3.3: Especificaciones de armadura para muros..... | 19 |
| Tabla 3.4: Resumen de resistencia a compresión obtenida en ensayos de cilindros. | 23 |
| Tabla 3.5: Resumen de resistencia a tracción obtenida en ensayos de barras..... | 23 |
| Tabla 3.6: Derivas para distintos ciclos..... | 26 |
| Tabla 3.7: Descripción de sensores LVDT's..... | 26 |
| Tabla 3.8: Continuación Descripción de sensores LVDT's..... | 27 |
| Tabla 4.1: Escala probetas [mm/pixel]..... | 39 |
| Tabla 4.2: Errores de fotografías consecutivas..... | 40 |
| Tabla 5.1: Desplazamiento horizontal promedio para la altura máxima del muro M3. | 60 |
| Tabla 5.2:Desplazamiento horizontal promedio para la altura máxima del muro M4. | 61 |
| Tabla 5.3: Desplazamiento horizontal promedio debido al corte – Muro M3. | 64 |
| Tabla 5.4: Desplazamiento horizontal promedio debido al corte – Muro M4. | 64 |
| Tabla 5.5: Largo de rótula plástica..... | 68 |
| Tabla 6.1: Elementos y nodos para cada probeta usados en modelación..... | 77 |
| Tabla 6.2: Parámetros de modelación..... | 79 |
| Tabla 6.3: Continuación Tabla 6.2..... | 80 |

Capítulo 1

Introducción

A diferencia de otros mercados, el área de la construcción se encuentra atrasada en industrializar sus tareas, y sigue siendo señalada como una labor de carácter artesanal, esto debido a las singularidades que presenta cada edificación. Pero actualmente la construcción ha estado apostando paulatinamente por utilizar elementos prefabricados, ya sea en edificaciones de menor magnitud como casas o edificaciones más complejas como edificios de uso habitacional. Los elementos prefabricados tienen el beneficio de presentar una calidad estandarizada, mejor control de residuos y menor costo. Es en este contexto que la empresa ACMA ofrece una solución constructiva para dejar atrás las mallas tradicionales, las cuales son amarradas con alambre y fabricadas por los obreros in situ, dicha solución constructiva propuesta por la empresa ACMA consiste en mallas electrosoldadas confeccionadas con un acero dúctil, específicamente acero A630S, el cual permitiría ser utilizado en la construcción de muros y losas de hormigón armado que sean de tipo estructural.

Es importante destacar, que constructivamente es más rápido utilizar mallas electrosoldadas que mallas tradicionales en la fabricación de estructuras de hormigón armado, lo cual repercute en un ahorro de mano de obra y en un ahorro de dinero puesto que las mallas electrosoldadas son un producto con un precio competitivo, esto convierte al uso de las mallas electrosoldadas en un método constructivo más barato que el método tradicional.

El problema de introducir un nuevo producto al mercado de la construcción radica en que Chile es un país sísmico, debido a que se encuentra sobre la placa Sudamericana, mientras que al oeste la placa de Nazca y al sur oeste se encuentra la placa Antártica, ambas placas en constante subducción con respecto a la placa Sudamericana. Se estima que la velocidad a la cual se mueve la placa de Nazca es entre 8 a 9 [cm/año]. Es por esto, que los elementos que constituyan sistemas estructurales deben ser capaces de resistir tanto las solicitaciones estáticas como sísmicas. En el presente estudio se analiza el comportamiento de muros de hormigón armado construidos con malla electrosoldada, los cuales se comparan con muros de hormigón armado construidos con la malla tradicional, la cual se denominará hierro preparado.

A continuación, se muestran los principales objetivos del presente estudio, la metodología empleada y la organización de la memoria.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

- Estudiar la respuesta de cuatro pares de muros de hormigón armado construidos con mallas electrosoldadas ACMA® A630S y mallas tradicionales A630, para así evaluar y comparar el comportamiento de los dos tipos de mallas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Evaluar la respuesta de muros de hormigón armado ensayados con cargas cíclicas mediante fotogrametría.
- Caracterizar la distribución de fisuras en el muro, información de rótula plástica y distribución de daños dentro del sistema.
- Comparar los resultados experimentales con los resultados obtenidos con modelos numéricos y verificar si dichos modelos son capaces de captar la diferencia entre mallas electrosoldadas ACMA® A630S y mallas tradicionales A630.

1.2 Metodología

Para alcanzar los objetivos previamente mencionados se realiza la siguiente metodología:

- Revisión bibliográfica: se buscará información respecto al uso de fotogrametría en ingeniería civil, ensayo de muro, mallas electrosoldadas y normativa asociada, además del uso de SAFE-TB para modelación no lineal de muro de hormigón armado.
- Estudio del proceso de fotogrametría: se analizará cual es el mejor software para realizar análisis por fotogrametría.
- Procesamiento de datos: se analizarán los experimentos realizados a muros de hormigón armado mediante el uso de fotogrametría e instrumentación estándar.
- Análisis de los experimentos: se caracterizará el comportamiento de los muros, distribución de fisuras, deformación, información sobre rótula plástica y distribución de daños en el sistema.

- Generación de modelos no lineales en SAFE-TB: se generará la modelación numérica con SAFE Toolbox utilizando Matlab, tanto para muros armados con mallas electrosoldadas A630S y mallas tradicionales A630.
- Comparación de resultados experimentales y modelos numéricos: se compararán los modelos numéricos con los resultados experimentales.
- Síntesis de resultados: se realizará una síntesis de resultados con el fin de dar recomendaciones para el uso de mallas electrosoldadas en la construcción de muros de hormigón armado.

Se espera realizar recomendaciones para el uso de mallas electrosoldadas en la construcción de muros de hormigón armado. En particular se espera que los muros de hormigón armado con malla electrosoldada presenten un comportamiento dúctil ante las cargas sísmicas cíclicas.

1.3 Organización de la memoria

- Introducción

Se muestra la motivación de este estudio, los objetivos tanto general como específicos, con el fin de alcanzar dichos objetivos se plantea una metodología de trabajo.

- Revisión bibliográfica

Se exponen los conocimientos necesarios para el desarrollo de este trabajo, específicamente se muestra información sobre ensayos previos de muros de hormigón armado, mallas electrosoldadas, fotogrametría y modelación del comportamiento de muros de hormigón armado.

- Antecedentes de los muros ensayados

Se presentan las dimensiones de las probetas, las cuantías, el método de construcción de las probetas, la capacidad de los materiales constituyentes de las probetas, la soldadura empleada en las mallas electrosoldadas y la ejecución de los ensayos.

- Antecedentes para el análisis de los muros ensayados por fotogrametría y modelación numérica

En este capítulo se explica con mayor profundidad el funcionamiento del software Ncorr que se utiliza para analizar los muros ensayados por fotogrametría, además se plasman los supuestos utilizados en la modelación de SAFE-TB.

- Resultados experimentales

Se muestran los resultados experimentales de los muros de hormigón armado con malla preparada y con malla electrosoldada calculados a través de fotogrametría.

- Resultados analíticos

Se muestran los resultados analíticos obtenidos mediante el uso de elementos finitos calculados con la plataforma SAFE-TB.

- Conclusiones

Para dar un cierre a este estudio, en este capítulo se realiza un resumen de lo realizado y se termina con las principales conclusiones a partir de los resultados, los análisis y los objetivos que se plantean al inicio.

Capítulo 2

Revisión bibliográfica

El propósito de este capítulo es plasmar la información necesaria para desarrollar una correcta comparación entre muros de hormigón armado con malla preparada versus malla electrosoldada ante carga cíclica, para esto en la primera sección se presentan ensayos en muros de hormigón armado, detallando las características de los muros y las principales conclusiones.

Luego se ahonda en la normativa asociada a las mallas electrosoldadas y un estudio realizado a muros construidos con mallas electrosoldadas y sometidos a cargas cíclicas.

Debido a que se utilizará fotogrametría para analizar el comportamiento de los muros se analiza que software de fotogrametría es el más conveniente y cómo funciona.

Para realizar un estudio completo se obtendrán resultados tanto experimentales como analíticos, para este último se utiliza una plataforma de elementos finitos.

2.1 Ensayos en muros de hormigón armado

Existen estudios previos de muros de hormigón armado con malla tradicional, es decir, amarrada con alambres, dichos muros han sido ensayados a cargas cíclicas.

Muñoz estudia el comportamiento de muros de hormigón armado con discontinuidad central en la base, tomando en consideración la interacción del muro con losas, para realizar dicho estudio construye cuatro muros de hormigón armado, las dimensiones de los muros son iguales, teniendo 2.65 [m] de alto, 0.90 [m] de ancho y un espesor de 0.15 [m], diferenciándose en la abertura que cada muro tiene en la base. Cada muro tiene una fundación de 1.40 [m] de largo, 0.70 [m] de ancho y 0.40 [m] de espesor. Finalmente, los muros terminan en la parte superior con una viga de 0.90 [m] de largo, 0.30 [m] de alto y 0.40 [m] de ancho, ver Figura 2.1

Muñoz detalla la distribución de la armadura de la siguiente forma: el refuerzo de borde longitudinal consta de 4 barras de 16 [mm], las cuales están confinadas en los primeros 920 [mm] con estribos de 6 [mm] de diámetro espaciados a 70 [mm]. Sobre los 920 [mm] el confinamiento cambia: para un extremo se aumenta el espaciamiento a 100 [mm], mientras que para el otro extremo no se dispusieron estribos. La armadura horizontal, doble malla, es de barras de 8 [mm] espaciadas a 150 [mm] a la altura de la discontinuidad, y separadas a 200 [mm] en el resto del muro.

La armadura vertical (también doble malla) es la que sufre los mayores cambios con respecto a MR0: mientras en el caso base son tres barras de 8 [mm] espaciadas a 200 [mm], en las demás probetas son sólo dos barras que van proyectadas cerca de los bordes de la discontinuidad, y no llegan a la base.

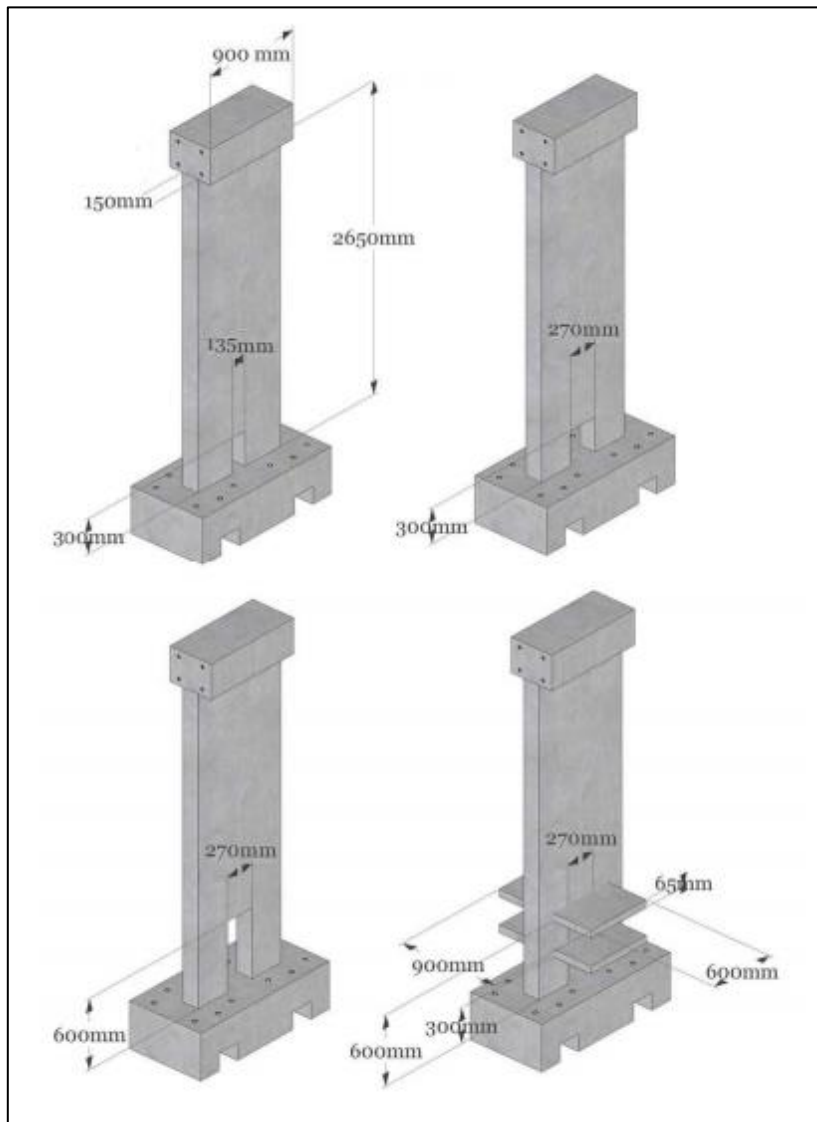


Figura 2.1: Esquema geometría muros ensayados, Muñoz (2017).

El refuerzo de abertura consta de dos barras de 10 [mm] de diámetro, que se empalman con la armadura vertical por sobre la abertura. se reemplazan seis barras de 6 [mm] de diámetro (la armadura de repartición vertical) con cuatro barras de 10 [mm] de diámetro (el refuerzo de armadura en la abertura).

Las losas del muro MR4 constan de 4 barras de 8 [mm] en cada capa (superior e inferior) para la dirección longitudinal, donde 2 están en el plano del muro actuando como refuerzo de losa, y las otras dos están en la losa misma. En la dirección transversal, se disponen de tres barras de 8 [mm] tanto por arriba como por abajo, espaciadas a 225 [mm].

Los materiales empleados en la construcción de los muros tienen teóricamente una resistencia a la compresión (f'_c) de 25 [MPa] en el caso del hormigón y un límite de fluencia (f_y) para el acero de la malla y 280 [MPa] para el acero de los estribos. Luego de ser ensayados, la resistencia del hormigón a la compresión es de 40 [MPa] y la resistencia del acero se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Resultados en los ensayos de las barras de acero (Muñoz, 2017).

| Barra | Fluencia del acero f_y | | | Deformación de fluencia ϵ_y | | |
|-----------|--------------------------|----------------|----------------|--------------------------------------|---------------------|---------------------|
| | f_{y1} [MPa] | f_{y1} [MPa] | f_{y1} [MPa] | ϵ_{y1} [] | ϵ_{y2} [] | ϵ_{y3} [] |
| ϕ 6 | 413.7 | 409.9 | 417.1 | 0.0015 | 0.0023 | 0.0021 |
| ϕ 8 | 506.7 | 508.5 | 498.3 | 0.0040(*) | 0.0038(*) | 0.0037(*) |
| ϕ 10 | 485.6 | 489.5 | 490.9 | 0.0023 | 0.0040(*) | 0.0042(*) |
| ϕ 12 | 478.0 | 476.4 | 477.7 | 0.0025 | 0.0025 | 0.0026 |
| ϕ 16 | 492.3 | 496.1 | 503.7 | 0.0026 | 0.0026 | 0.0022 |
| ϕ 18 | 481.4 | 484.3 | 472.9 | 0.0030 | 0.0026 | 0.0024 |

Para la obtención de datos Muñoz lo hace mediante cuatro métodos: celdas de carga para registrar la carga lateral y la carga ejercida por uno de los cuatro gatos, strain gages soldados a las barras de refuerzo para registrar su deformación unitaria, LVDT's ubicados dentro y fuera del muro para registrar desplazamientos, y el uso de fotogrametría para obtener desplazamientos y deformaciones de todo el muro. Los porcentajes de deriva con respecto a 2.8 [m] se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Desplazamientos inducidos para cada deriva de techo (Muñoz, 2017).

| Deriva[%] | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.6 | 0.9 | 1.35 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|----|----|-----|
| Desplazamiento [mm] | 2.8 | 5.6 | 8.4 | 11.2 | 16.8 | 25.2 | 37.8 | 56 | 84 | 112 |

La respuesta de los cuatro muros se muestra en la Figura 2.2, Figura 2.3, Figura 2.4 y Figura 2.5.

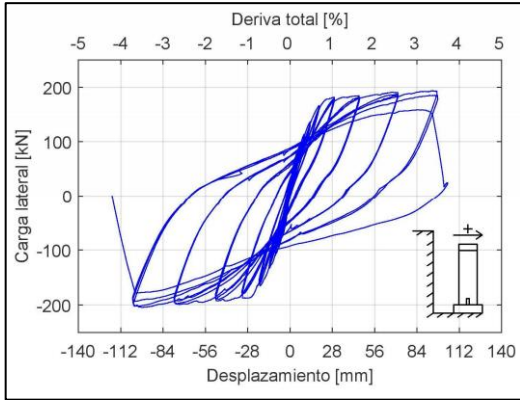


Figura 2.2: Respuesta carga-desplazamiento MR1.

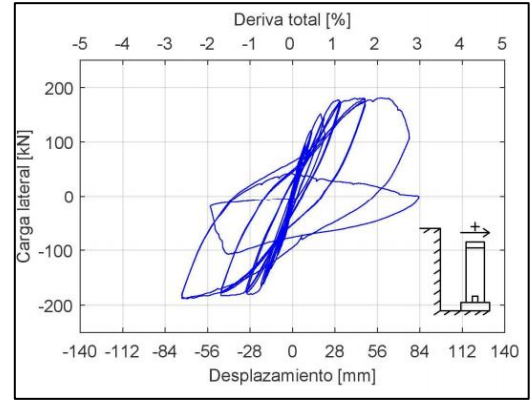


Figura 2.3: Respuesta carga-desplazamiento MR2.

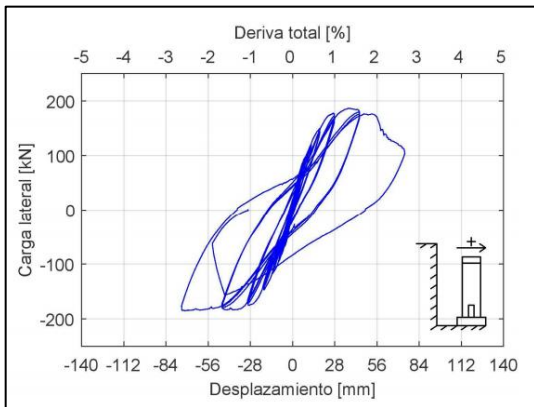


Figura 2.4: Respuesta carga-desplazamiento MR3.

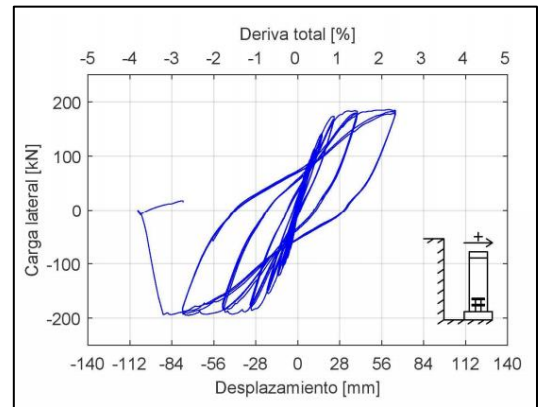


Figura 2.5: Respuesta carga-desplazamiento MR4.

Muñoz concluye que en los cuatro muros ensayados se presenta similitud en cuanto a la resistencia, rigidez y endurecimiento, la capacidad a flexocompresión no se ve influenciada por la presencia de aberturas. La degradación de capacidad es en la deriva de 3.2%, 2.5%, 2.1% y 3.3% para MR1, MR2, MR3 y MR4 respectivamente. Todos los muros con abertura presentan grieta de corte, mientras que el muro sin abertura falla por bloque de compresión antes de generar grieta de corte.

2.2 Mallas electrosoldadas

La malla electrosoldada está constituida por acero distribuido vertical y horizontalmente unido mediante soldadura eléctrica. La calidad del acero que se estudia en este documento para las mallas electrosoldadas es A360S. Por lo general el acero soldable es frágil, pero en el caso de las mallas electrosoldadas que se estudian en este documento el acero es dúctil, esta característica es que se busca al momento de diseñar una estructura sismorresistente.

Actualmente la normativa chilena que regulariza el uso de mallas electrosoldadas dúctiles exige que se cumpla la norma NCh204 “Acero – Barras laminadas en caliente para hormigón armado”, esta norma detalla las propiedades mecánicas que debe cumplir el acero que se utiliza para hormigón armado; la norma NCh3334 “Acero – Barras laminadas en caliente soldables para hormigón armado - Requisitos” establece los requisitos mecánicos, geométricos y de composición química que deben cumplir las barras laminadas en caliente soldables, con los requisitos de composición químicos que establece esta norma se garantiza que las barras de acero presentan la característica de soldabilidad; finalmente se exige el cumplimiento de la norma NCh3335 “Acero – Mallas electrosoldadas de Barras Laminadas en Caliente, Soldables, para hormigón armado – Requisitos”, en la cual se establecen los requisitos que deben cumplir las mallas electrosoldadas que se utilizan en hormigón armado que cumplen la norma NCh3334.

La aplicación de mallas electrosoldadas es amplia puesto que se puede utilizar en radieres, piscinas, losas y sobrelosas, estanques, pavimentos, túneles, ductos, muros estructurales y pisos.

Tanto en Chile como en el mundo se está fomentando la industrialización en la construcción, debido a que se busca reducir los tiempos de construcción, la reducción de los residuos y control de estos, además asegurar la calidad de los productos, cabe destacar que para optimizar los tiempos de construcción se debe tener planificación en obra adecuada. Por esto se propone el uso de mallas electrosoldadas como solución constructiva de muros de hormigón armado, reemplazando las mallas tradicionales que son amarradas con alambre. Los beneficios de utilizar malla electrosoldada son variados, gracias al reemplazo del alambre por soldadura se reduce el peso de la malla, al estar listas se reduce el tiempo de ejecución en obra y a la vez la cantidad de mano de obra, es de fácil instalación y tiene un costo competitivo, como asegura ACMA.

Las desventajas del uso de mallas electrosoldadas en la construcción de muros de hormigón armado es que no se conoce el comportamiento de estas ante estímulos de carácter sísmico, actualmente la normativa chilena NCh219 “Construcción – Mallas de acero de alta resistencia – Condiciones de uso en el hormigón armado”, especifica que las mallas soldadas se pueden emplear en elementos con solicitaciones sísmicas siempre y cuando no se apliquen en tableros de puentes, tribunas sin asientos fijos, losas de patios de tránsito de vehículos, etc., es decir, cuando se tengan

cargas preponderantemente dinámicas, y que además se cumpla una cuantía geométrica superior a 0.158.

Rodríguez estudia el comportamiento de muros de hormigón armado con malla electrosoldada de 0.80 [m] de espesor de ductilidad limitada, para ello realiza ensayos de carga lateral cíclica en dos muros que están armados de la misma forma, pero están cargados diferentes. Al primer muro (M-1) se le aplicó una carga vertical con el fin de representar el peso de un muro central y el segundo muro (M-2) se carga con un muro esquinero correspondiente a un edificio de cinco pisos. La malla electrosoldada es de 6 [mm] de diámetro. La distribución de la armadura y las dimensiones del muro de puede apreciar en la Figura 2.6.

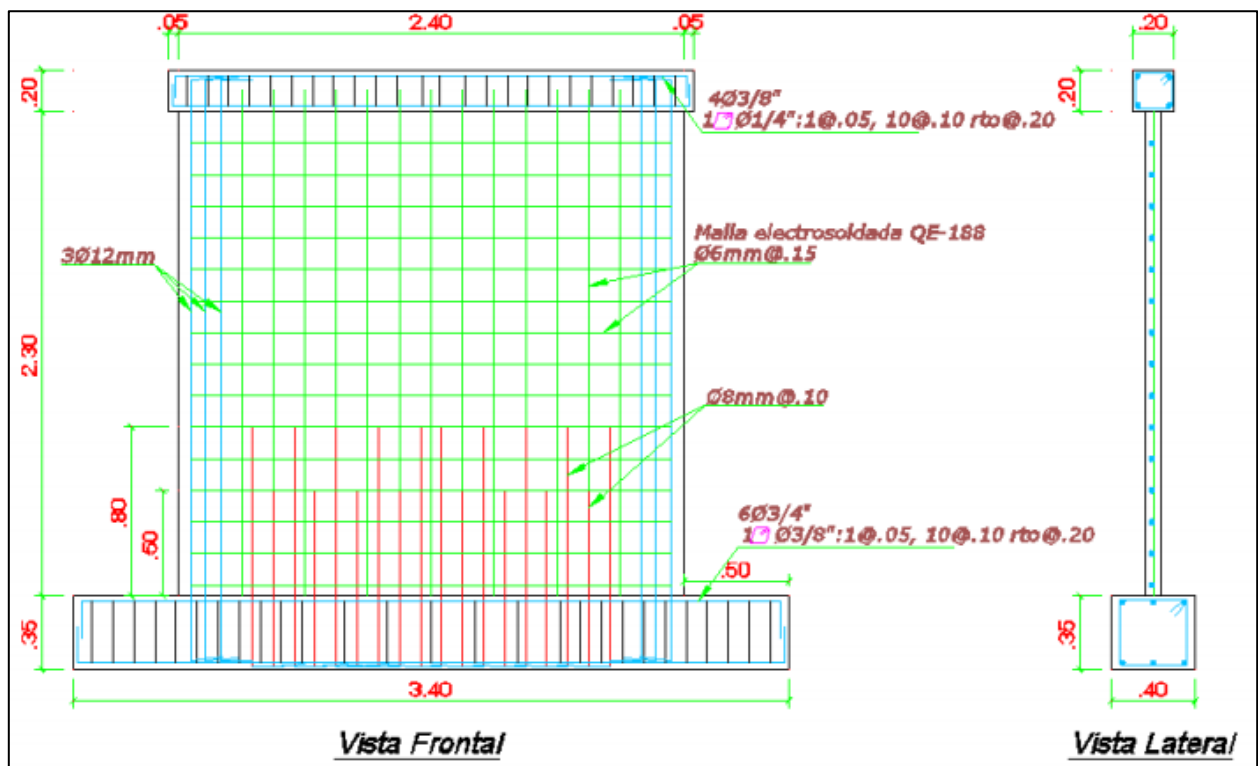


Figura 2.6: Esquema muros ensayados por (Rodríguez, 2011).

El límite de fluencia (f_y) del acero utilizado en las mallas electrosoldadas es de 667 [MPa], con un límite de rotura (f_u) de 746 [MPa]. El hormigón tiene una resistencia a la compresión a los 28 días (f'_c) de 20.8 [MPa].

Para caracterizar el comportamiento de cada muro se instrumenta con doce sensores de desplazamiento llamados LVDT, como se muestra en la Figura 2.7.

Al inicio se carga los muros con el valor de la combinación de "1.4CM+1.7CV", siendo de 17.52 [tonf] y 8.64 [tonf] para M-1 y M-2 respectivamente y luego se reduce la carga a la correspondiente

de una combinación “1.25(CM+CV)+S”, específicamente de 15.44 [tonf] y 7.61 [tonf] para M-1 y M-2 respectivamente.

Los resultados obtenidos del ensayo de desplazamiento lateral cíclico se muestran en la Figura 2.8 e Figura 2.9, donde la Figura 2.10 e Figura 2.11 muestran un esquema de las fisuras generadas en esa fase.

En el muro M-1 conforme avanza el ensayo se genera una disminución de rigidez, en la fase 10, que corresponde a un desplazamiento de 20.0 [mm] y una deriva de 0.8%, comienza una degradación de la resistencia donde se observa que la carga lateral disminuye. En el muro M-2 del mismo modo que el muro M-1 existe una disminución de la rigidez lateral a medida que avanza el ensayo, ocurre pérdida de resistencia a la carga lateral en la fase 9, que corresponde a un desplazamiento de 17.5 [mm] y una deriva de 0.7%.

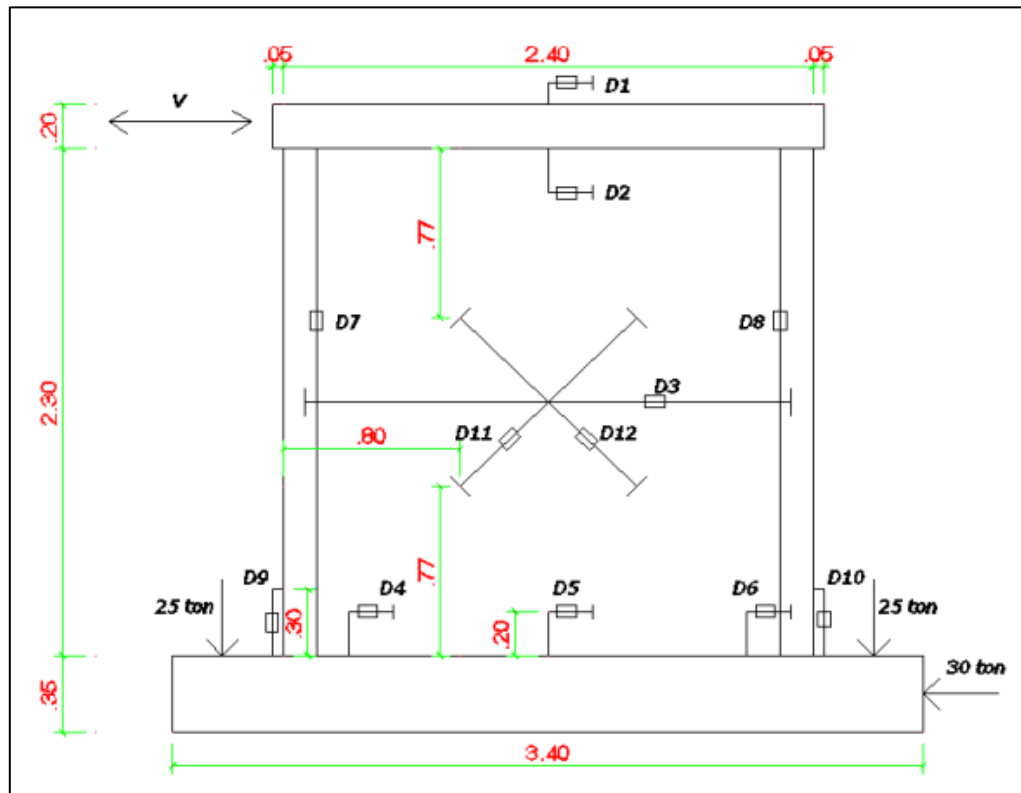


Figura 2.7: Plano de instrumentación para ensayos de muro, donde Di corresponde al sensor de desplazamiento i, (Rodríguez, 2011).

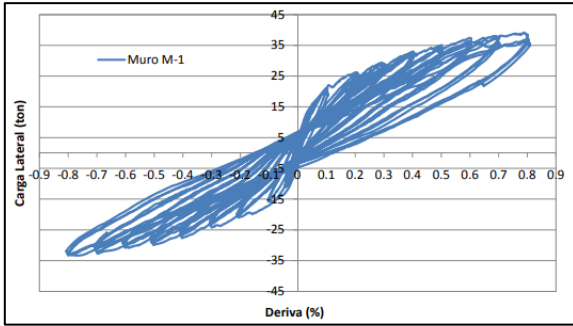


Figura 2.8: Carga vs Desplazamiento Muro M-1. (Rodríguez, 2011).

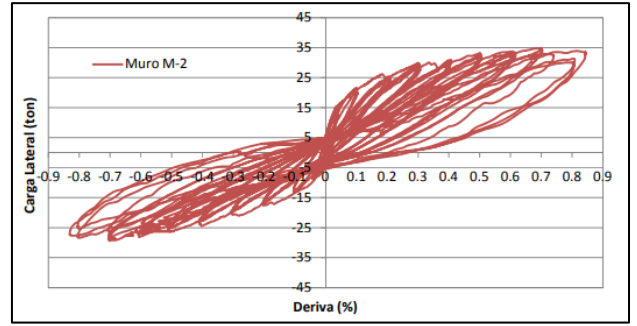


Figura 2.9: Carga vs Desplazamiento, Muro M-2. (Rodríguez, 2011).

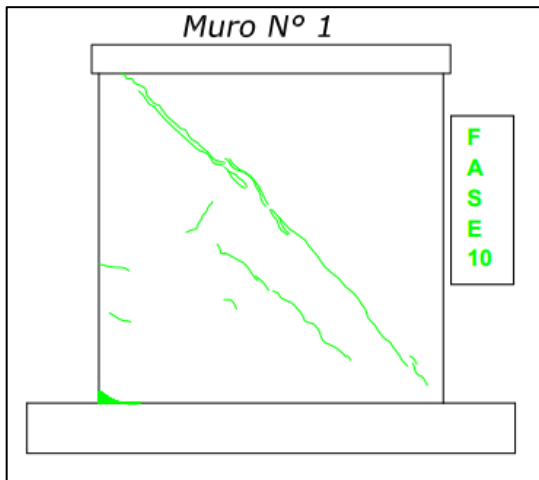


Figura 2.10: Fisuras muro M-1 en fase 10.

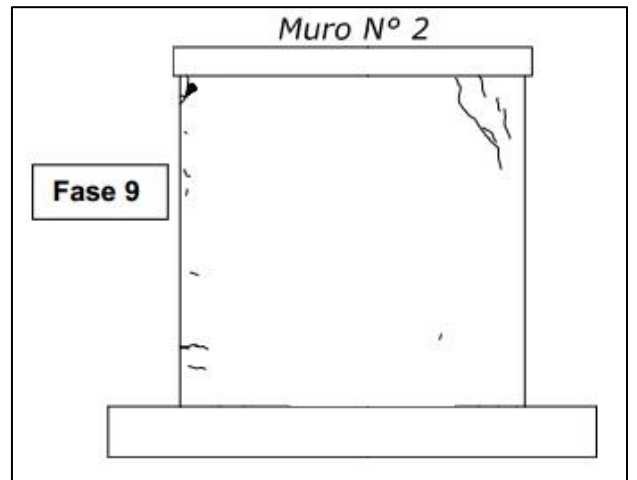


Figura 2.11: Fisuras muro M-2 en fase 9.

Con el fin de caracterizar el comportamiento de los muros de hormigón armado con malla electrosoldada se analizarán muros ensayados a carga cíclica mediante la herramienta de fotogrametría.

2.3 Fotogrametría

La fotogrametría es una herramienta para analizar el comportamiento de un objeto mediante imágenes, específicamente el análisis se basa en el seguimiento de los píxeles que conforman las imágenes, por ende, a mayor resolución de la imagen, mayor será la cantidad de píxeles y por ende se obtendrán resultados más precisos.

La fotogrametría es utilizada tanto en ingeniería civil analizando muros y losas, como en geotecnia analizando suelos.

Manruez (2016) compara tres programas de fotogrametría analizando sus ventajas y desventajas, estos son: el software desarrollado por Insunza en su memoria (2014), VIC-2D y Ncorr. El primer software funciona comparando imenes secuenciales, para ello se aplica cal hidráulica sobre la superficie a ensayar, luego se dibuja una grilla de puntos, de este modo el software ubica la posición de cada punto en un plano X e Y, y lo compara con la posición que tenía dicho punto en la imagen anterior, de este obtiene el desplazamiento entre cada imagen, si se suman todos estos desplazamientos se puede obtener el desplazamiento total. Para identificar la grilla de puntos el software de Insunza utiliza el rango de tonalidades rojas, verdes y azules, más conocido como RGB, para ello se le asigna un valor entre 0 y 1 para cada una de estas tonalidades y al juntar las 3 se puede saber de qué color es. El segundo software corresponde a VIC-2D, según Insunza para grandes deformaciones este no obtiene resultados correctos, por lo cual no sirve para estudiar el comportamiento de muros de hormigón armado ante cargas cíclicas hasta la rotura. Por último, se tiene el software de fotogrametría llamado Ncorr, Manruez elige este software por sobre los demás debido a que es un programa de libre acceso, su avanzado nivel matemático, interfaz de fácil interacción con el usuario, permite suavizar los datos ruidosos, lo cual es útil ante la aparición de grietas, logra mostrar las zonas de mayor deformación y mayor deslizamiento, esto permite detectar de manera clara y precisa el agrietamiento en el muro que se estudia.

Para que se comprenda el funcionamiento de Ncorr se explica a grandes rasgos cómo está programado este software. Ncorr analiza un conjunto de pixeles de las fotografías que son definidos como región de interés (ROI), esta a su vez se subdivide en subconjuntos, que son un grupo de coordenadas. Se define una imagen de referencia que se considera para caracterizar la situación inicial sin deformación, el resto de las imenes son definidas como imagen actual. Para relacionar la traslación de cada punto se utiliza una ecuación de primer orden como se muestra a continuación y se esquematiza en la Figura 2.12.

$$\tilde{x}_{cur_i} = x_{ref_i} + u_{rc} + \frac{\partial u}{\partial x_{rc}}(x_{ref_i} - x_{ref_c}) + \frac{\partial u}{\partial y_{rc}}(y_{ref_j} - y_{ref_c}) \quad (2.1)$$

$$\tilde{y}_{cur_j} = y_{ref_j} + v_{rc} + \frac{\partial v}{\partial x_{rc}}(x_{ref_i} - x_{ref_c}) + \frac{\partial v}{\partial y_{rc}}(y_{ref_j} - y_{ref_c}) \quad (2.2)$$

Donde x_{ref_i} es la coordenada en x de un punto del subconjunto de referencia inicial en la posición i, y_{ref_j} es la coordenada en y de un punto del subconjunto de referencia inicial en la posición j, x_{ref_c} es la coordenada en x del centro del subconjunto de referencia inicial, y_{ref_c} es la coordenada en y del centro del subconjunto de referencia inicial, \tilde{x}_{cur_i} es la coordenada en x de un

punto final del subconjunto actual en la posición i , \tilde{y}_{cur_j} es la coordenada en y de un punto final del subconjunto actual en la posición j .

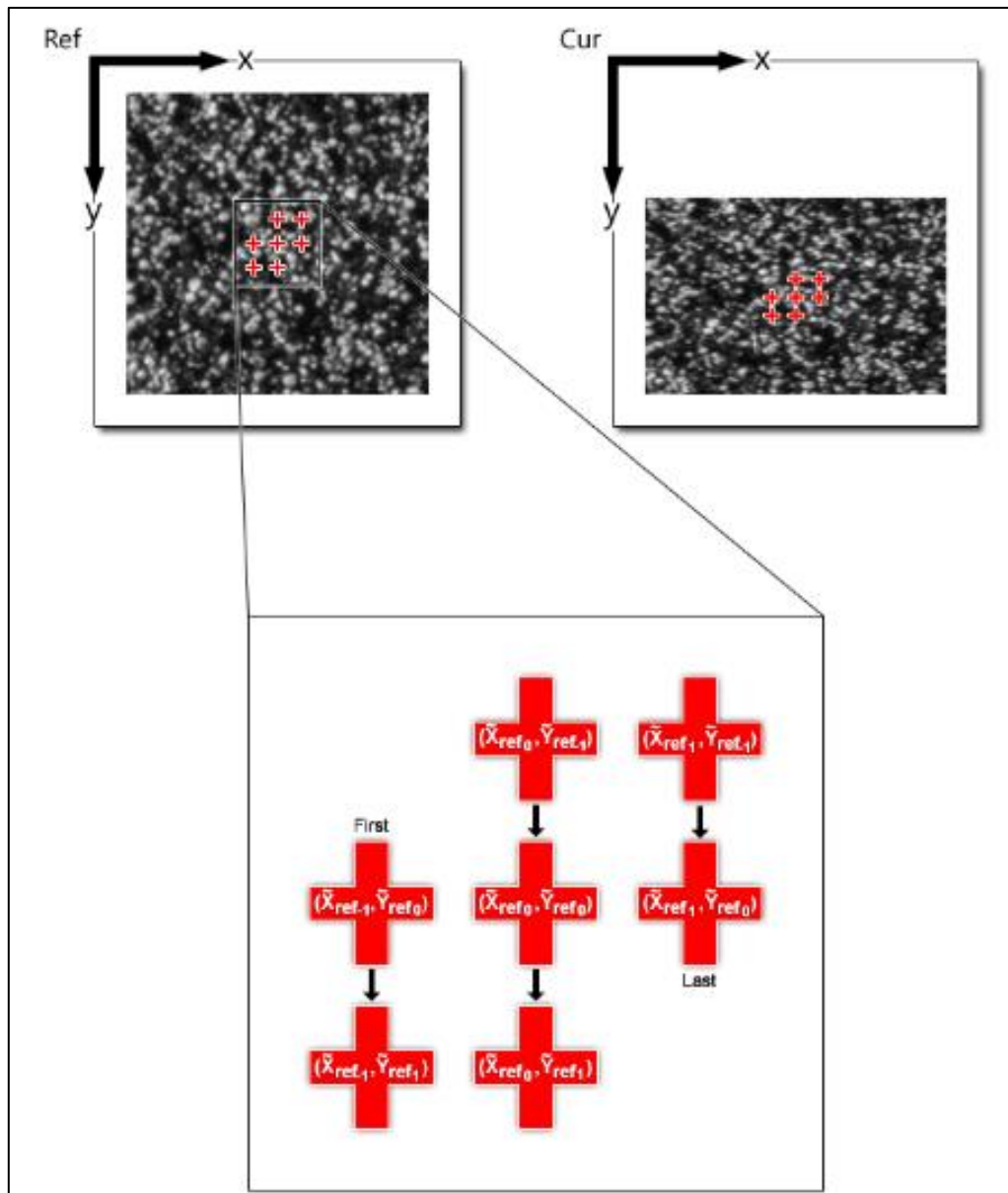


Figura 2.12: Esquema de implementación computacional (Ncorr, 2019).

Cabe destacar que se permite deformación de los puntos dentro de cada subconjunto. Luego se realiza un criterio de correlación para identificar la correlación entre un subconjunto de referencia final y un subconjunto actual final, es decir, hacer un seguimiento de los subconjuntos fotografía a fotografía, para ello, se compara en escala de grises la similitud entre los puntos. En términos matemáticos se definen dos cuantificadores, el primero es C_{CC} que es un criterio de correlación cruzada normalizado, cuando este indicador está más cerca de 1 mayor es la coincidencia. El

segundo es C_{LS} que es un criterio de mínimos cuadrados normalizados, mientras más cercano a 0 está este indicador, mayor es la coincidencia.

Para lograr mejor resultado Ncorr realiza una optimización iterativa con el fin de lograr valores de C_{LS} cercano a 0. Para esta optimización se requiere de tres partes. La primera es tener una estimación inicial, puesto que los esquemas iterativos convergen a un máximo o mínimo global. La segunda parte es un esquema de optimización iterativo de Gauss-Newton, donde se discute entre el método de Gauss Newton aditivo directo y el método de Gauss-Newton de composición inversa. Por último, la tercera parte es la interpolación de escala de grises y gradientes, ambos necesarios para utilizar los métodos nombrados en la segunda parte.

Las deformaciones se calculan de la siguiente forma:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{2} \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right) \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{2} \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right) \quad (2.5)$$

Para utilizar el método de fotogrametría es necesario trabajar con gran cantidad información, para organizar esta base de datos se recurre al trabajo realizado por (Ruiz, 2018).

Por otro lado, para contrastar los resultados experimentales con resultados analíticos, se modela el comportamiento de los muros tal como se ve en la sección 2.4 y en mayor profundidad en la sección 4.2.

2.4 Modelación

Con el fin de comparar los resultados experimentales con resultados analíticos se modela mediante elementos finitos con una herramienta programada en Matlab llamada SAFE-TB “*Structural Analysis and Finite Elements ToolBox*” (Rojas, 2016).

El beneficio de utilizar esta plataforma o herramienta es que permite calcular esfuerzos y desplazamientos en elementos y estructuras, siendo flexible a nivel de programación, dando la opción de variar parámetros según sea necesario, lo que repercute en poder realizar análisis de manera rápida (Castro, 2017).

Capítulo 3

Antecedentes de los muros ensayados

Los muros estudiados corresponden a muros de hormigón armado están constituidos por tres partes principales: viga de coronamiento, muro, y fundación, pese a que la viga y el muro de ambos tipos de probetas tengan las mismas dimensiones, las probetas se diferencian en el tamaño de la fundación, el tipo de armadura y las cuantías.

En el presente capítulo se especifican las características de los muros, el método de construcción, la resistencia de los materiales constituyentes, la soldadura utilizada en las mallas electrosoldadas con las que se construyeron los muros de hormigón. Finalmente se explica en que consiste el ensayo cíclico y los sensores de movimiento empleados, especificando su distribución y función en la adquisición de datos.

3.1 Caracterización de probetas

A continuación, se describen las dimensiones de las probetas, la notación que se emplea para identificar cada una de ellas, la enfierradura, entre otros.

Las probetas están constituidas por tres elementos:

- Fundación o pedestal: se ubica en la base el muro y tiene por objetivo poder empotrar la probeta a una losa.
- Muro: es el elemento de interés en este estudio, posee una malla simple y posee un espesor de 12 centímetros.
- Viga de transferencia: se ubica en el coronamiento del muro, tiene por objetivo transmitir la carga aplicada al muro.

Los muros ensayados se diferencian en las dimensiones, la distribución de armadura y en el tipo de armadura. La notación y dimensiones de las probetas se muestran en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 respectivamente. Se muestra un esquema de las probetas en la Figura 3.1.

Tabla 3.1: Notación muros.

| Probeta | Enfierradura | Notación |
|---------|----------------------|----------|
| M3 | Fierro Preparado | FPA |
| | | FPB |
| | Malla electrosoldada | MEA |
| | | MEB |
| M4 | Fierro Preparado | FPA |
| | | FPB |
| | Malla electrosoldada | MEA |
| | | MEB |

Tabla 3.2: Dimensiones de los elementos de las probetas.

| Probeta | Fundación | | | Muro | | | Viga | | |
|---------|---------------|---------------|----------------|---------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|----------------|
| | Largo [cm] | Ancho [cm] | Altura [cm] | Largo [cm] | Altura [cm] | Espesor [cm] | Largo [cm] | Ancho [cm] | Altura [cm] |
| M3 | 190 | 70 | 45 | 140 | 140 | 12 | 140 | 40 | 30 |
| M4 | 270 | 70 | 45 | 140 | 140 | 12 | 140 | 40 | 30 |

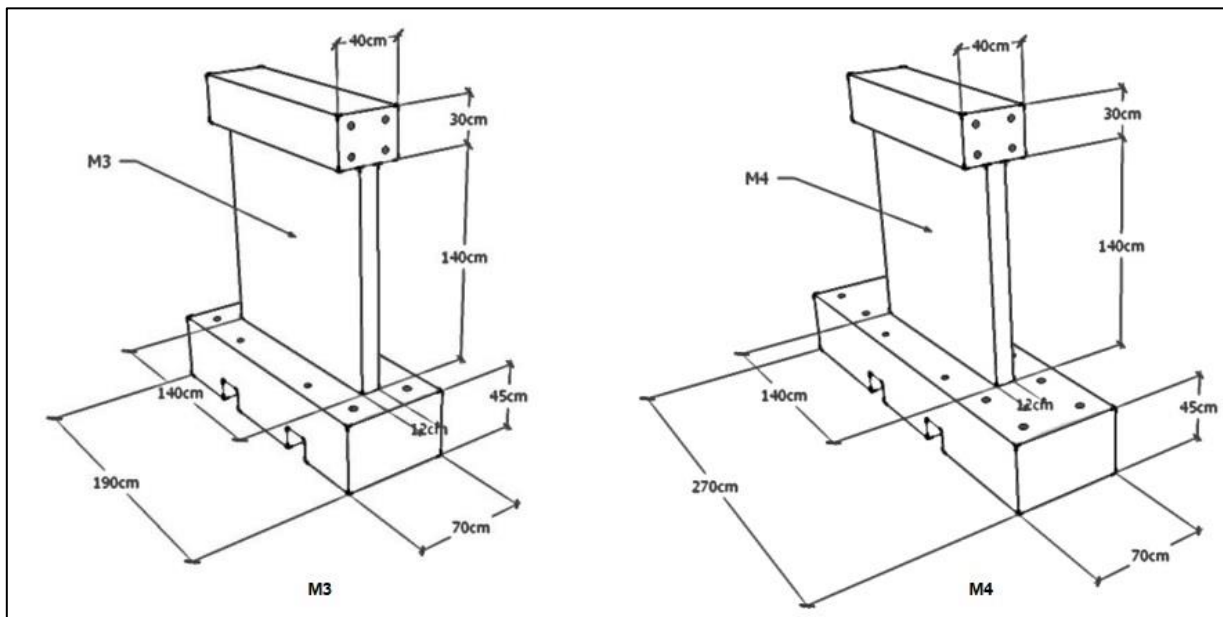


Figura 3.1: Esquema dimensiones de los muros M3 y M4, (Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2018).

La distribución de la armadura se muestra en la Figura 3.2, mientras que la especificación de la armadura se muestra en la Tabla 3.3.

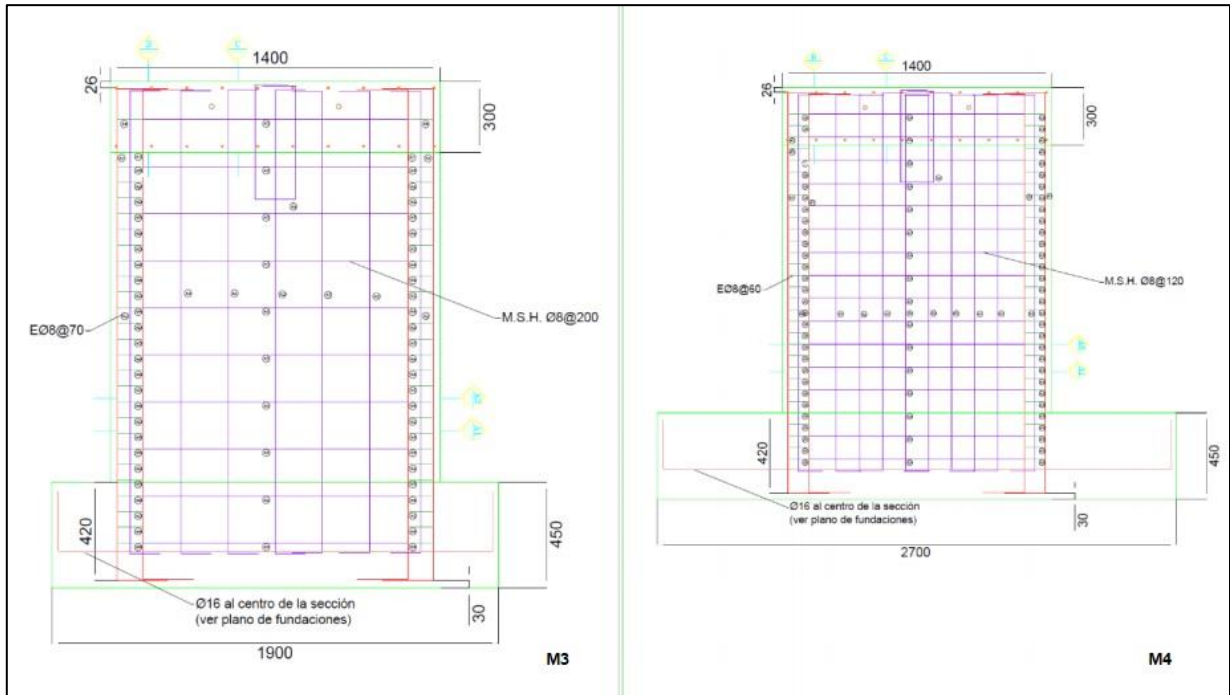


Figura 3.2: Distribución de armaduras, (Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2018).

Tabla 3.3: Especificaciones de armadura para muros.

| Variable | M3 | | M4 | |
|---------------------------|---------------------------------------|---------|-------------------------------------|---------|
| | Especificación | Cuantía | Especificación | Cuantía |
| Malla Horizontal | $\Phi 8@20$ simple | 0.0021 | $\Phi 8@12$ simple | 0.0035 |
| Malla Vertical | $\Phi 8@20$ simple | 0.0021 | $\Phi 8@12$ simple | 0.0035 |
| Estribos de confinamiento | 2E $\Phi 8@15$ entre malla (s=6,7 cm) | 0.0120 | 1E $\Phi 8@15$ entre malla (s=6 cm) | 0.0140 |
| Elementos de borde | 4 $\Phi 12 + \Phi 8$ (al medio) | 0.0220 | 4 $\Phi 12 + \Phi 8$ (al medio) | 0.0220 |

3.2 Construcción de probetas

Elaboración de moldaje y enfierradura

La construcción de las probetas se realizó en las dependencias de la Universidad de Chile, pero primero se confeccionan las mallas prefabricadas que son la armadura de las probetas en la empresa ACMA®. Cabe destacar que para cada tipo de acero se utiliza un único rollo de material, por ende, los resultados de resistencia de estos son representativos para el muro en su totalidad.

Una vez terminada la armadura, esta se transporta hacia la Universidad de Chile donde será puesta dentro del moldaje que es cerrado y luego apuntalado para evitar cambios de secciones debido al empuje que genera el peso del hormigón, tal como se muestra en la Figura 3.3.



Figura 3.3: Construcción y cierre del moldaje con la armadura en su interior, (Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2018).

Hormigonado de probetas

Las cuatro probetas pertenecientes a la denominación muro M3 son hormigonadas con un solo camión de hormigón, del mismo modo para el set de probetas del muro M4, así se evita variar el hormigón.

La calidad del hormigón tanto para las probetas M3 como M4 es un hormigón H25, que corresponde a una resistencia $f'c = 21[MPa]$. La especificación de áridos corresponde al uso de una gravilla con diámetro menor a $13[mm]$. El cono especificado para las probetas M3 es de $10[cm]$ y de $8[cm]$ para las probetas M4.

Para el hormigonado de las probetas se traslada el hormigón de la rampa del camión mediante carretillas, se realiza primero el hormigonado de las fundaciones y luego el de las vigas de

transferencia. Para evitar que se generen nidos dentro de las probetas se utilizan vibradores de 50 [mm] de diámetro, (ver Figura 3.4).



Figura 3.4: Hormigonado de probetas, (Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2018).

Mientras se realiza el hormigonado de las probetas, se extraen cuatro cilindros de hormigón por camión para caracterizar posteriormente la resistencia de los elementos. Los cilindros tienen dimensiones nominales correspondientes a un diámetro de 105 [mm] y altura de 201 [mm], y cumplen las especificaciones de las normas NCh0171.EOf75 y NCh1017.EOf75.

Curado, fraguado y descimbre

El curado de las probetas consiste en regar los elementos a diario durante siete días y se cubren con arpillera para conservar la humedad. Luego de estos días se procede al descimbre de las probetas.

Traslado

Una vez transcurridos los 28 días de fraguado de las probetas se realiza el traslado (ver Figura 3.5), de estas al Laboratorio de Estructuras la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, donde finalmente son ensayados. Las probetas son transportadas en un camión pluma que iza las probetas mediante ganchos embebidos en la fundación de la probeta que fueron diseñados para ese fin, se elige utilizar la fundación para el izaje de las probetas para evitar solicitar las zonas de interés de estudio innecesariamente.



Figura 3.5: Probetas previas a ser transportadas, (Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2018).

Una vez ensayados los muros son retornados a las dependencias de la empresa ACMA.

3.3 Materiales de las probetas ensayadas

La resistencia del hormigón utilizado en las probetas se muestra en la Tabla 3.4, mientras que en la Tabla 3.5 se muestra la resistencia a la tracción de las barras de acero utilizadas en los muros.

Los ensayos de resistencia son realizados en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, la resistencia del hormigón se obtiene mediante ensayos de compresión en una máquina universal marca ISTRON, modelo 600LX, de capacidad 60 [Tonf] en compresión y 30 [Tonf] en tracción. Para obtener la resistencia del acero se realizan ensayos a tracción con el mismo equipo que se utiliza para el hormigón.

Tabla 3.4: Resumen de resistencia a compresión obtenida en ensayos de cilindros.

| Probeta | Tipo | $f'c$ [MPa] | | | | | | |
|---------|------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|------|
| | | 21 días | | 28 días | | día ensayo | | |
| | | Valor ensayo | Promedio | Valor ensayo | Promedio | Valor ensayo | Promedio | |
| M3 | FPA | 29.5 | 32.3 | 32.6 | 31.5 | 41.9 | 37.4 | 37.2 |
| | MEA | 33.4 | | 30.0 | | 41.0 | 36.0 | |
| | FPB | 33.4 | | 31.9 | | 40.8 | 33.2 | |
| | MEB | 32.9 | | 31.5 | | 30.4 | 36.8 | |
| M4 | FPA | 24.8 | 24.2 | 29.7 | 28.0 | 35.7 | 34.1 | 32.2 |
| | MEA | 25.4 | | 28.2 | | 31.4 | 30.3 | |
| | FPB | 21.4 | | 25.8 | | 30.5 | 30.3 | |
| | MEB | 24.9 | | 28.1 | | 30.4 | 34.7 | |

Tabla 3.5: Resumen de resistencia a tracción obtenida en ensayos de barras.

| Diámetro [mm] | Calidad | F_y [MPa] | F_u [MPa] | Alargamiento [%] | Relación F_y/F_u |
|---------------|---------|-------------|-------------|------------------|--------------------|
| 8 | A360 | 570 | 832 | 10.0 | 1.50 |
| | | 627 | 888 | 10.0 | 1.41 |
| | | 492 | 738 | 10.0 | 1.50 |
| 8 | A360S | 652 | 871 | 12.5 | 1.34 |
| | | 662 | 891 | 8.0 | 1.35 |
| | | 656 | 851 | 10.0 | 1.30 |
| 12 | A360 | 470 | 765 | 15.0 | 1.63 |
| | | 501 | 780 | 13.5 | 1.56 |
| | | 530 | 799 | 13.5 | 1.51 |

Las barras de diámetro 10 [mm], 16 [mm] y 18 [mm] no son ensayadas, puesto que se encuentran en la enfierradura de las fundaciones y/o vigas de transferencia, dichas zonas no son relevantes en este estudio y por ende se descarta obtener su resistencia a la tracción.

3.4 Soldadura en mallas

Existe cumplimiento de la normativa vigente (NCh3334 y NCh3335) respecto a las propiedades mecánicas de la soldadura. La inspección técnica realizada no pone en evidencia ninguna anomalía

en las metodologías desarrolladas para la ejecución de mallas electrosoldadas. La empresa ACMA S.A. posee procedimientos automatizados del equipo utilizado y metodologías de aseguramiento de la calidad con un laboratorio y procedimientos 43. La calidad de la soldadura (testada a partir de ensayos de laboratorio a la unión soldada) satisface los requerimientos establecidos en la normativa consultada. No obstante, se levantaron algunas observaciones a modo de recomendaciones las cuales se pueden observar en detalle en el documento adjunto “Revisión de las propiedades en mallas electrosoldadas ACMA A630S según requerimientos establecidos en norma vigente nacional”.

3.5 Ejecución de ensayos

Las probetas son empotradas a una losa de reacción a través de su fundación, mediante barras de acero de alta resistencia las cuales son postensadas gracias a que cuentan con un hilo. La carga cíclica es aplicada a la probeta mediante un actuador hidráulico a través de la viga de coronamiento o también llamada viga de transferencia.

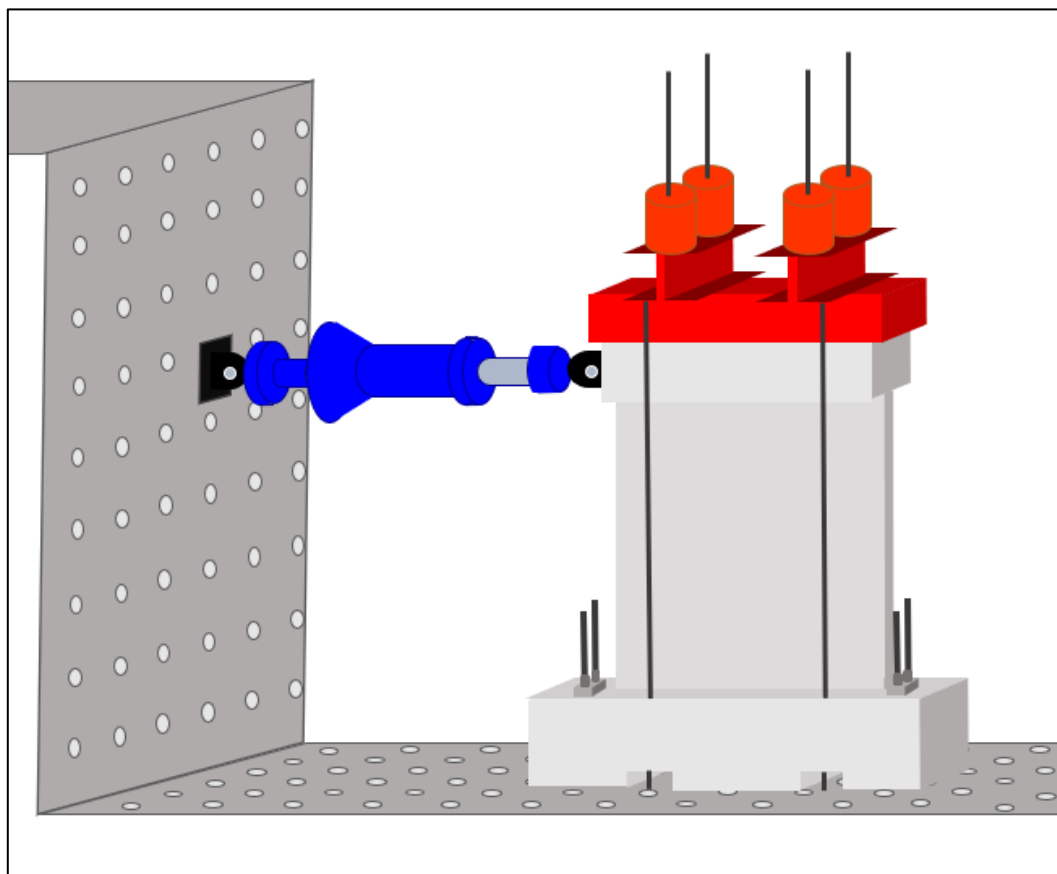


Figura 3.6: Esquema de montaje experimental (se omite marco y sensores de medición).

Además, las probetas son cargadas axialmente con una carga constante con el fin de emular la sollicitación de los muros al estar dentro de una edificación, para lograrlo se utilizan cuatro gatos hidráulicos y una celda de carga que empujan una estructura constituida por dos vigas doble canal de dimensiones 320 [mm] de ancho, 350 [mm] de alto y 14 [mm] de espesor, ambas vigas se encuentran sobre una viga de acero que tiene una sección rectangular de 400 [mm] de ancho y 250 [mm] de alto y 20 [mm] de espesor, ver Figura 3.6 y Figura 3.7. La carga axial aplicada para las probetas M3 y M4 son de 56 [Tonf] y 52 [Tonf] respectivamente, a partir de considerar que la resistencia a la compresión del hormigón era 33 [MPa] para M3 y 32 [MPa] para M4.

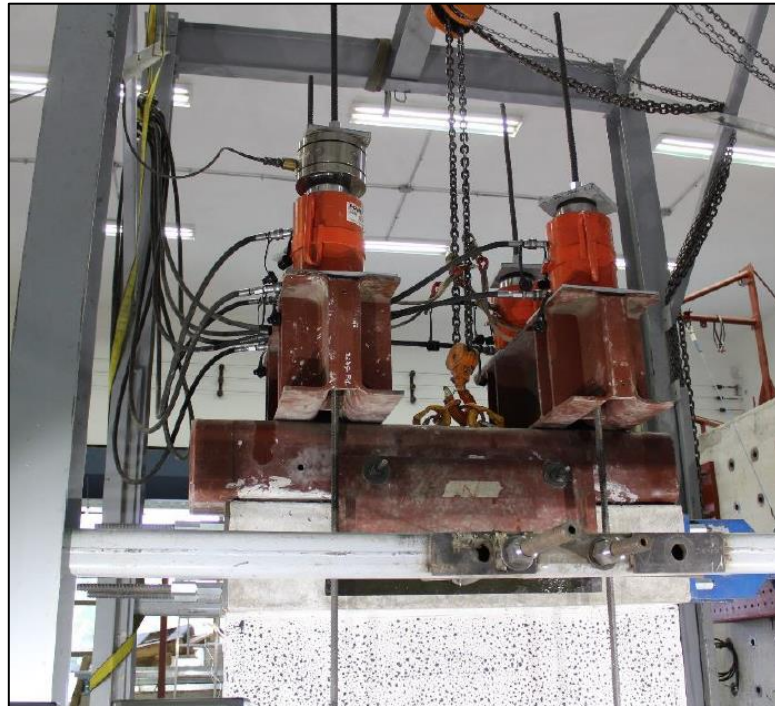


Figura 3.7: Sistema de carga axial.

La carga cíclica es aplicada en tríos de ciclos que tienen el mismo desplazamiento o deriva, tal como se muestra en la Figura 3.8 y Tabla 3.6. El procedimiento finaliza una vez que la falla del elemento estructural sea evidente y apreciable, esta falla se caracteriza como un 20% de degradación de la carga monitoreada.

La deriva de techo se mide porcentaje y se calcula como se define en la ecuación (3.1).

$$\Delta = \left(\frac{d}{h_M} \right) \cdot 100 \quad (3.1)$$

Donde d corresponde al desplazamiento horizontal medido a nivel de techo y h_M corresponde a la altura del muro.

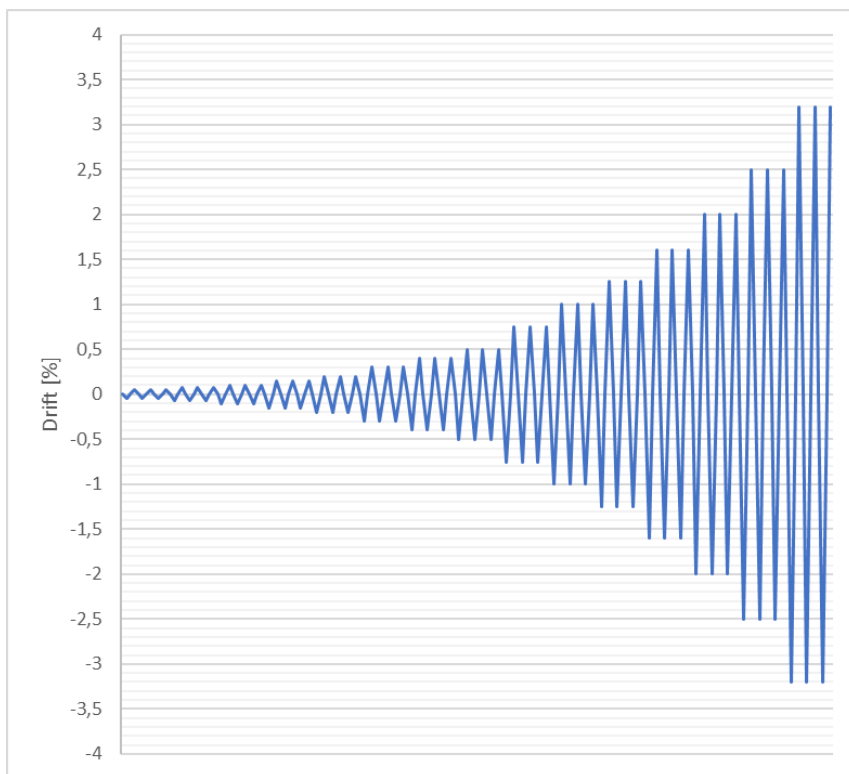


Figura 3.8: Ciclos de carga aplicados a muros.

Tabla 3.6: Derivas para distintos ciclos.

| Nº ciclos | Deriva de techo [%] |
|-----------|---------------------|
| 3 | 0.050 |
| 3 | 0.075 |
| 3 | 0.100 |
| 3 | 0.150 |
| 3 | 0.200 |
| 3 | 0.300 |
| 3 | 0.400 |
| 3 | 0.500 |
| 3 | 0.750 |
| 3 | 1.000 |
| 3 | 1.250 |
| 3 | 1.600 |
| 3 | 2.000 |
| 3 | 2.500 |
| 3 | 3.200 |

Para el monitoreo de desplazamientos se utilizan sensores de LVDT's de voltaje distribuidos de la forma que se muestra en la Figura 3.9, en la Tabla 3.7 se describe la función que tiene cada sensor LVDT, su respectivo nombre y la conversión de voltaje a milímetros.

Tabla 3.7: Descripción de sensores LVDT's.

| Nº | Nombre | Función | Conversión [mm/voltaje] |
|----|-----------------|---|-------------------------|
| 0 | Deriva de techo | Medir el desplazamiento a nivel de techo | 28.5 |
| 1 | Deslizamiento | Medir el deslizamiento de la fundación | 1.26 |
| 2 | Rotación Oeste | Medir el levantamiento del extremo oeste de la fundación | 1.3773 |
| 3 | Rotación Este | Medir el levantamiento del extremo este de la fundación | 1.3352 |
| 4 | Base Oeste | Medir el desplazamiento entre el hilo inferior oeste y la fundación | 2.7014 |
| 5 | Base Este | Medir el desplazamiento entre el hilo inferior este y la fundación | 2.5712 |

Tabla 3.8: Continuación Descripción de sensores LVDT's.

| Nº | Nombre | Función | Conversión [mm/voltaje] |
|----|---------------|---|-------------------------|
| 6 | Flexión Oeste | Medir el desplazamiento entre el hilo inferior oeste y el hilo superior oeste | 13.038 |
| 7 | Flexión Este | Medir el desplazamiento entre el hilo inferior este y el hilo superior este | 13.324 |
| 8 | Corte Oeste | Medir el desplazamiento entre el hilo superior oeste y el hilo inferior este | 5.2295 |
| 9 | Corte Este | Medir el desplazamiento entre el hilo superior este y el hilo inferior oeste | 5.2386 |

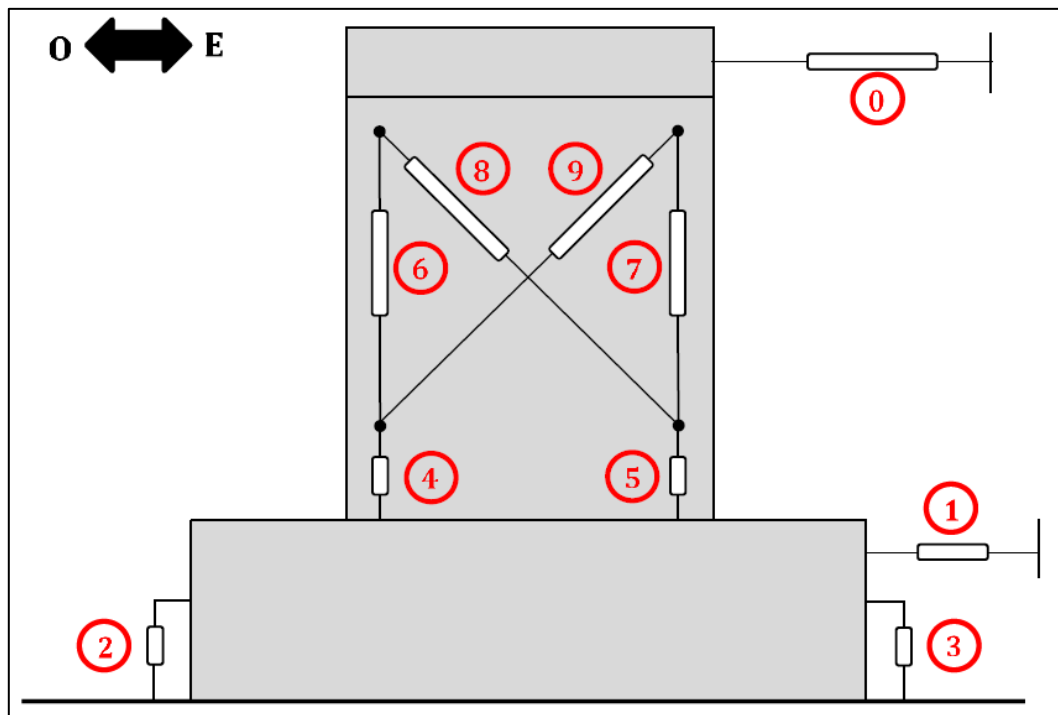


Figura 3.9: Distribución esquemática de sensores LVDT's en ensayo de muros.

Para el correcto cálculo de la deriva en la viga de coronamiento, que ha sido medida con el sensor 0, se debe realizar una corrección por giro y desplazamiento. Para el cálculo de deriva de techo medida directamente (Δ_{sc}) y corregida (Δ_{corr}), se define como se muestra en la ecuación (3.2) y en la ecuación (3.3), en milímetros y porcentaje respectivamente.

$$\Delta_{corr} [\text{mm}] = \Delta_{sc} - corr_{desl} - corr_{giro} \quad (3.2)$$

$$\Delta_{\text{corr}}[\%] = \left(\frac{\Delta_{sc} - \text{corr}_{\text{desl}} - \text{corr}_{\text{giro}}}{h_M} \right) \cdot 100 \quad (3.3)$$

Donde h_M corresponde a la altura del muro. La deriva de techo medida directamente sin corregir se calcula como se define en la ecuación (3.4) y ecuación (3.5), medida en milímetros y porcentaje respectivamente.

$$\Delta_{sc}[\text{mm}] = d_{s0} \quad (3.4)$$

$$\Delta_{sc}[\%] = \left(\frac{d_{s0}}{h_M} \right) \cdot 100 \quad (3.5)$$

Donde d_{s0} corresponde al desplazamiento que mide el sensor 0. La corrección por deslizamiento se calcula según la ecuación (3.6), mientras que la corrección por giro se calcula según la ecuación definida en (3.6)(3.7).

$$\text{corr}_{\text{desl}} = d_{s1} \quad (3.6)$$

$$\text{corr}_{\text{giro}} = \frac{(d_{s3} - d_{s2})}{L_F} \cdot h_M \quad (3.7)$$

Donde d_{s1} , d_{s2} y d_{s3} corresponde al desplazamiento medido con el sensor 1, sensor 2 y sensor 3 respectivamente, L_F es el largo de la fundación.

Capítulo 4

Antecedentes para el análisis de los muros ensayados por fotogrametría y modelación numérica

Los muros de hormigón armado son analizados mediante fotogrametría y modelación numérica, el presente capítulo se divide en dos secciones, en la primera se explica el procedimiento empleado para analizar el comportamiento de los muros de hormigón armado mediante fotogrametría con el *software* Ncorr, se exponen los requerimientos necesarios para utilizar este software, los parámetros utilizados para el análisis, entre otros.

La segunda parte de este capítulo se enfoca en el modelamiento numérico de elementos finitos de la plataforma Safe-TB. Se presentan los modelos constitutivos del hormigón y acero, en particular se exponen las curvas de tensión-deformación de los materiales tanto cuando están sometidos a compresión, tracción e histéresis, además de las consideraciones para casos particulares.

4.1 Fotogrametría

Para utilizar Ncorr es necesario tener un compilador de C++ adecuado para el modelo Matlab que se utilice, se recomienda utilizar para Matlab R2015b el compilador en C++ llamado Visual Studio Professional 2013. Además, las fotografías deben estar ordenadas de manera correlativa y de forma ascendente.

4.1.1 Selección de fotografías

Debido a que Ncorr consume una gran cantidad de recursos es necesario filtrar las imágenes, a modo de conservar aquellas imágenes que correspondan a un cero o peak, para ello se analiza un

sector pequeño del muro (Figura 4.1) y se analizan todas las fotografías capturadas durante el ensayo (aproximadamente 2000 fotografías). Una vez que se obtienen los resultados de desplazamiento y deformación, se seleccionan las imágenes asociadas a desplazamiento máximo y nulo, los cuales serán nombrados como peak y cero respectivamente. Con esto se logra reducir la cantidad de fotografías a aproximadamente 160, o más, dependiendo de la cantidad de ciclos que resista cada muro. Para este caso, al existir 15 niveles de desplazamientos y 3 ciclos por nivel, el máximo de peaks y ceros es de 180 fotografías.

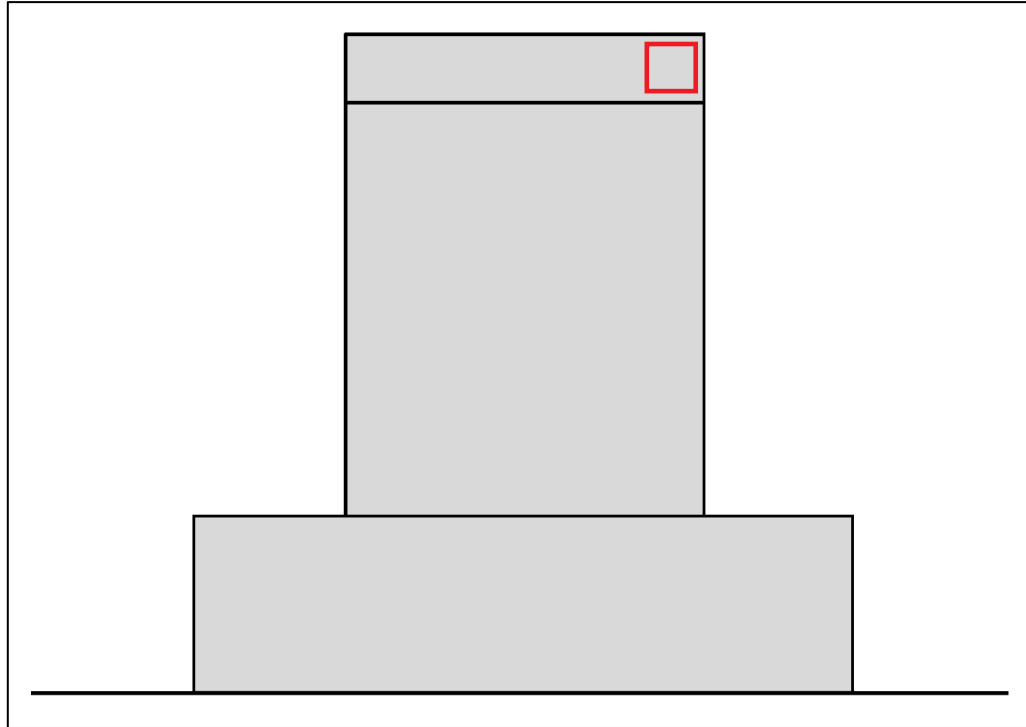


Figura 4.1: Esquema análisis lado derecho de la viga de coronamiento del muro.

4.1.2 Manual Ncorr

Para iniciar el software Ncorr se abre en Matlab la carpeta que contiene los archivos de Ncorr, luego se escribe en el comando `handles_ncorr=ncorr`, se configura la cantidad de núcleos con los que se desea trabajar, luego aparece la interfaz que se muestra en la Figura 4.2.

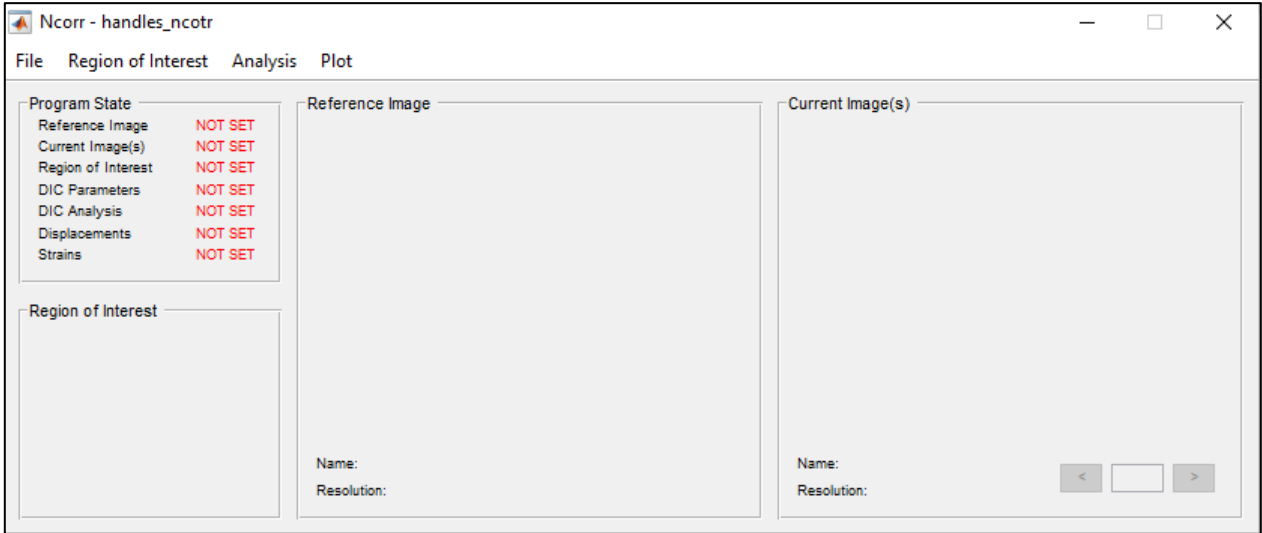


Figura 4.2: Interfaz de Ncorr.

Para el ingreso de las fotografías, primero se ingresa la fotografía sin deformación, esta sirve de referencia para el cálculo de los desplazamientos y deformaciones. La ruta corresponde a *File > Load Reference Image*, tal como se muestra en la Figura 4.3, se selecciona la imagen inicial y sin deformación.

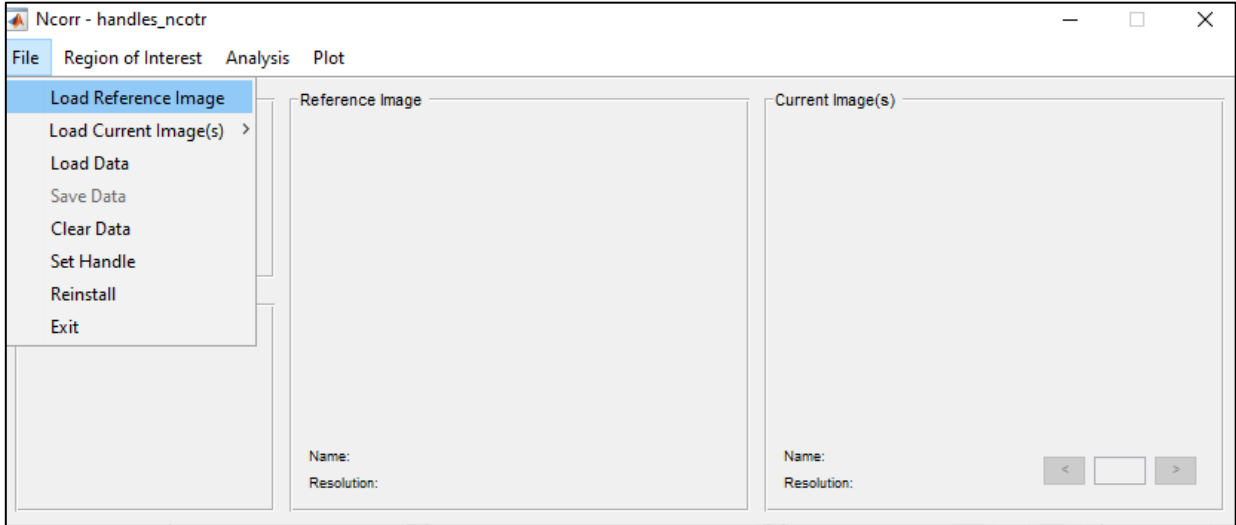


Figura 4.3: Ingreso de imagen de referencia.

Después se seleccionan las imágenes del resto del ensayo, la ruta es *File > Load Current Images(s) > Load Lazy (slower but less memory)*, se selecciona el resto de las imágenes del ensayo (ver Figura 4.4).

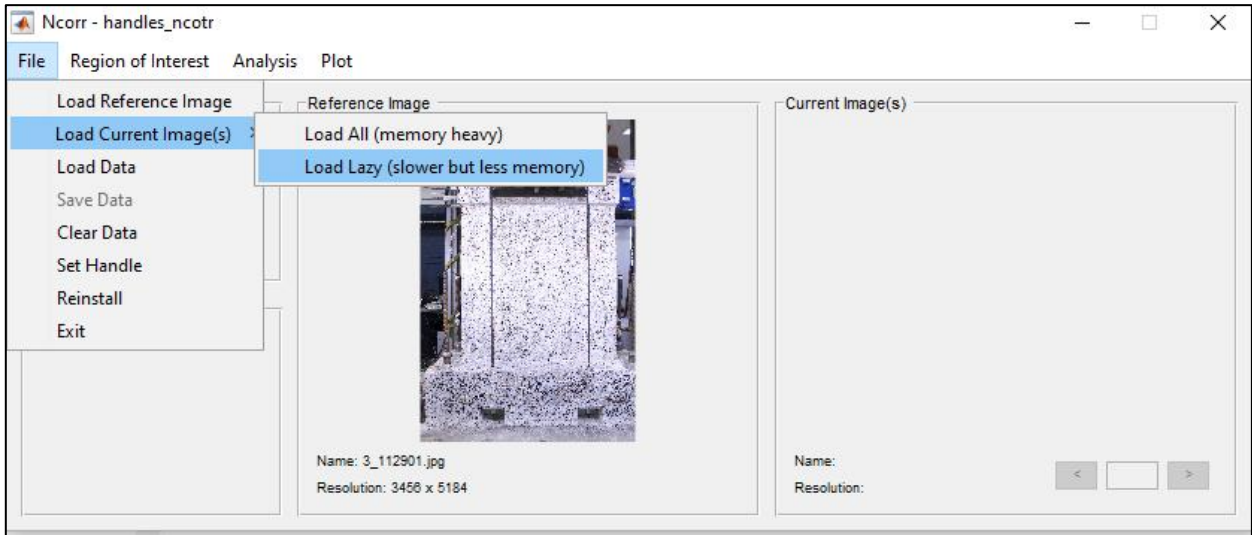


Figura 4.4: Ingreso de imágenes del ensayo, excluyendo imagen de referencia.

Luego se configura la región de interés del análisis. La ruta es *Region of interest > Set Reference ROI* y luego se presiona *Draw ROI*, tal como se muestra en la Figura 4.5.

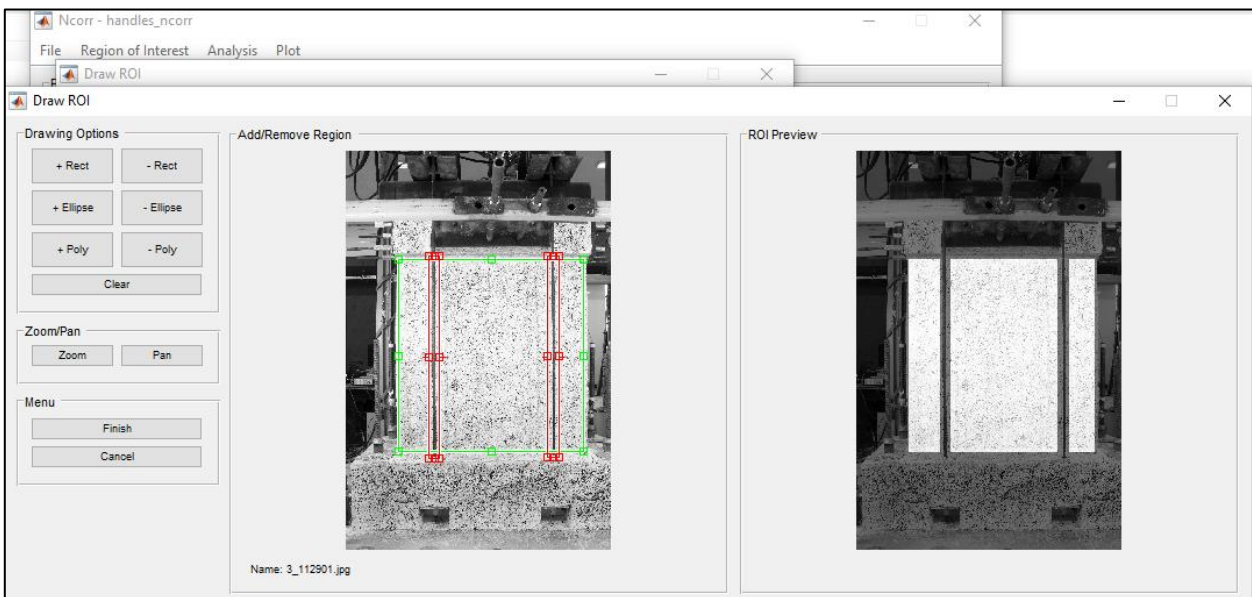


Figura 4.5: Dibujo de región de interés.

Una vez dibujada la región de interés se configuran los parámetros de correlación de imágenes digitales (DIC), la ruta corresponde a *Analysis > Set DIC Parameters*. En este estudio se utiliza un *Radius* igual a 50 y *Spacing* igual a 10. Se habilita la opción *Enable Step Analysis, Auto Propagation* y *Subset Truncation*, tal como se muestra en la Figura 4.6.

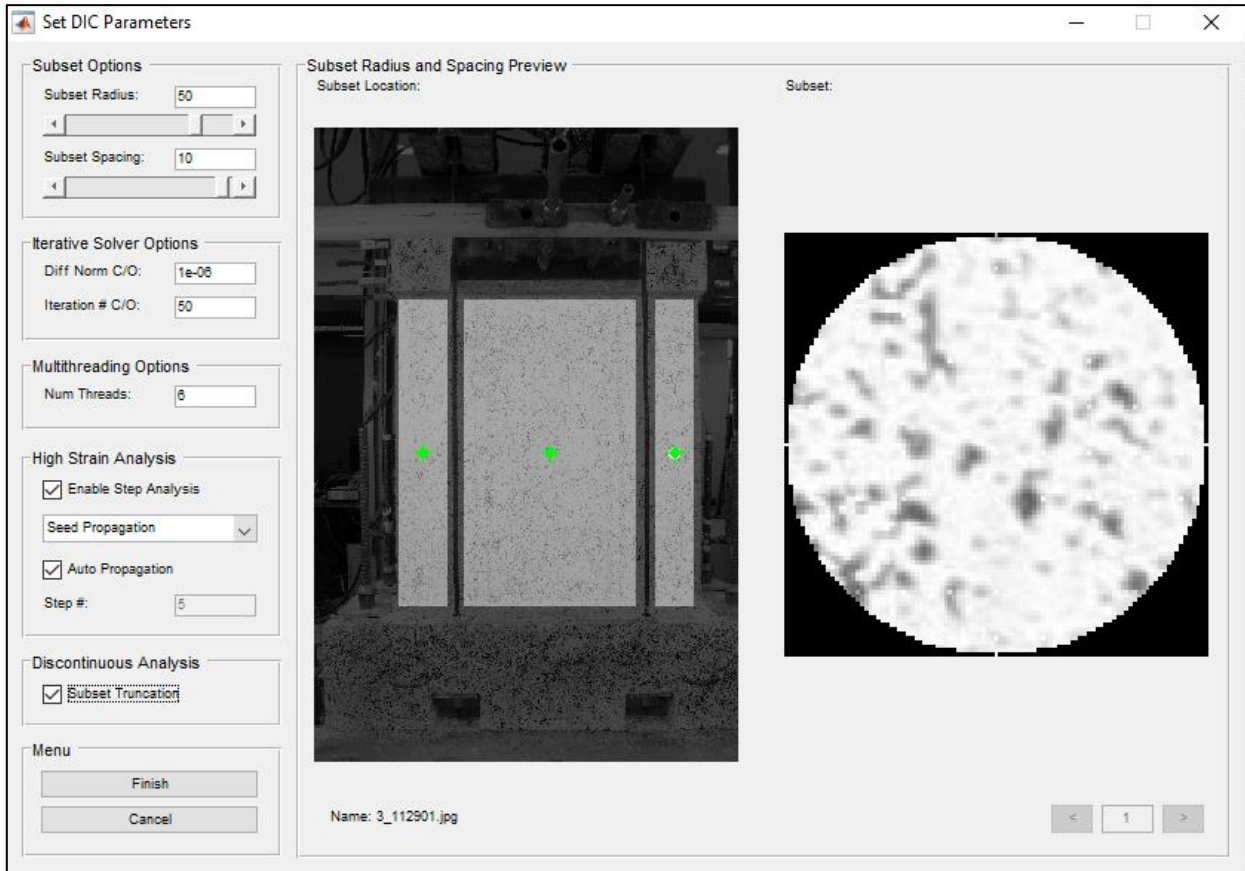


Figura 4.6: Configuración de parámetros DIC.

En este caso existen 3 regiones de interés, por lo tanto, se decide utilizar 6 núcleos lógicos para procesar los datos. Ahora se configura la ubicación de las semillas de análisis, para ello se sigue la ruta *Analysis > Perform DIC Analysis*. Luego se selecciona la primera región de análisis, luego se ubican las semillas, en este caso al utilizar 6 núcleos se tienen 6 semillas. Las semillas se deben ubicar en un lugar que se pueda rastrear a lo largo de todo el análisis, es decir, evitar poner semillas en grietas, zonas en que se pierde el recubrimiento, etc. Tal como se muestra en la Figura 4.7.

Una vez que a partir de las semillas se analiza la región de interés, se muestra el procesamiento previo (ver Figura 4.8), para dicha región, en donde se especifica la correlación lograda entre las fotografías y el número de fotografías que se logró analizar sin perder las semillas, se debe intentar analizar todas las imágenes con una sola configuración de semillas para evitar errores. En el caso de existir más de una región de interés se debe volver al paso anterior y realizar el procedimiento hasta analizar todas las regiones.

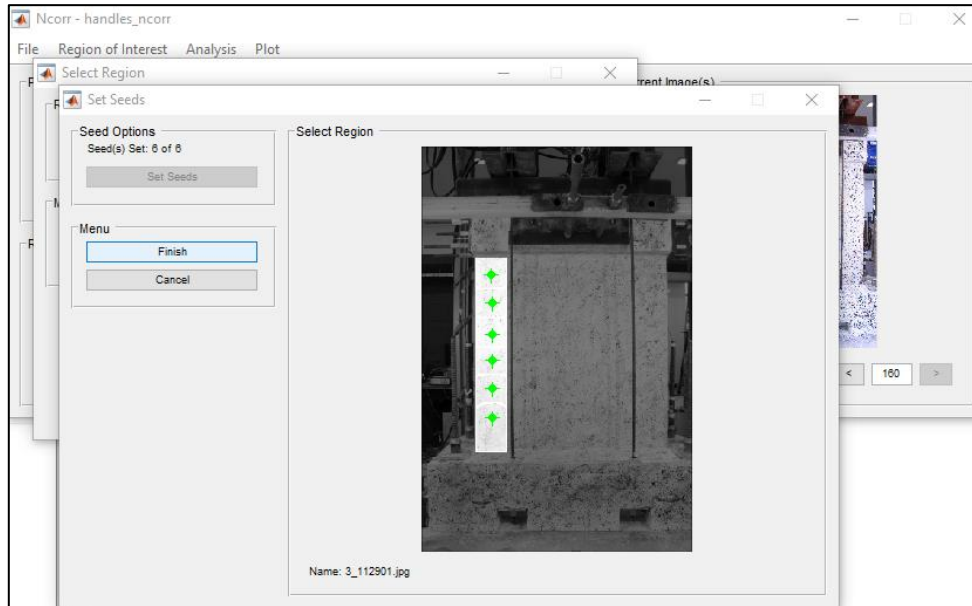


Figura 4.7: Configuración de semillas.

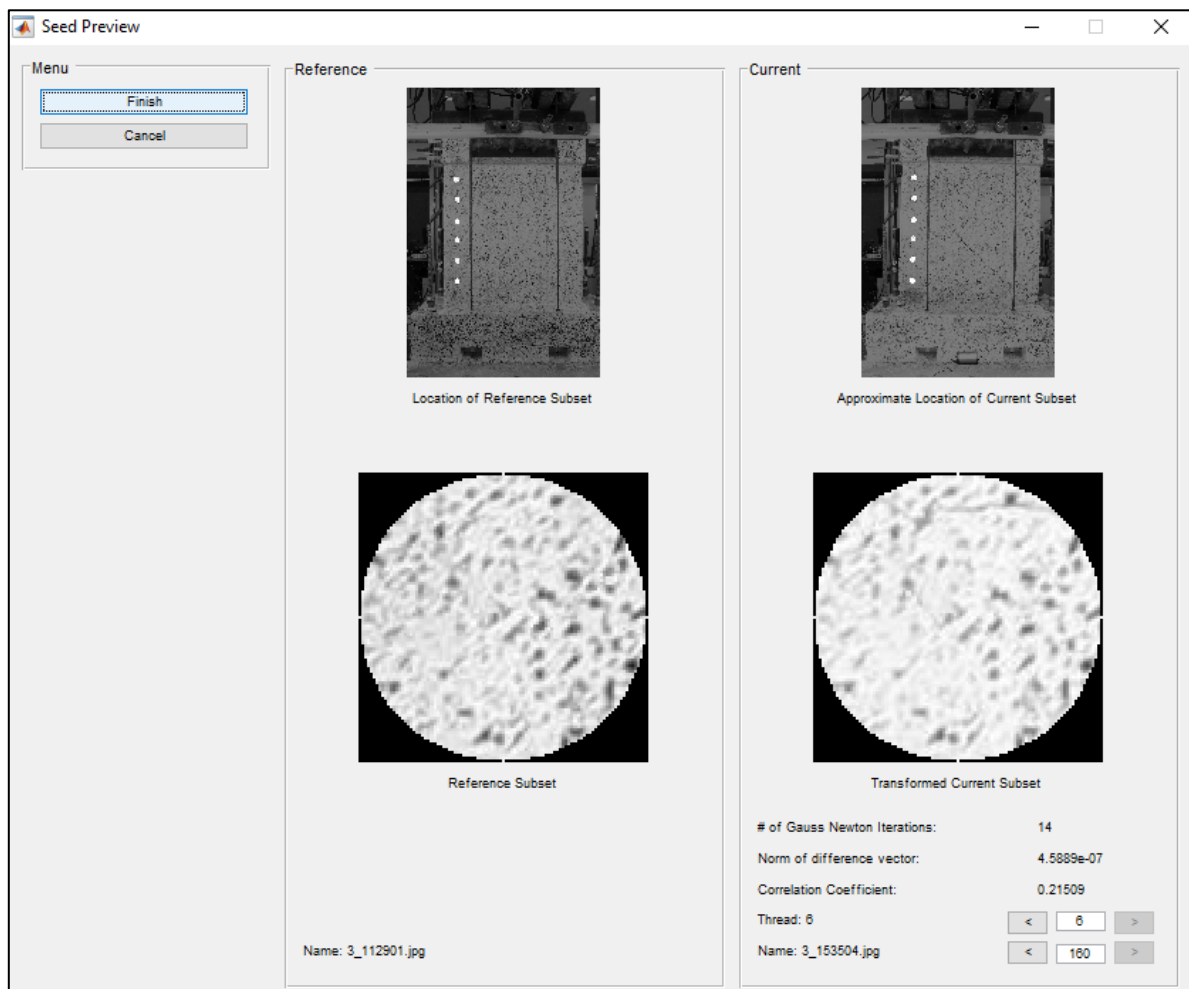


Figura 4.8: Previsualización de semillas.

Se da click a *Finish* y con esto se completa el procesamiento de los datos para todas las regiones de interés. Cuando se finaliza esta etapa se continúa con configurar la escala de las fotografías, para ello se sigue la ruta *Analysis > Format Displacements > Get Unit Conversion > Load Calibration Image*, se selecciona la imagen que tenga algún elemento de largo conocido. Luego con *Set Line* se especifica el largo del elemento con el cual se obtendrá la escala y en *Unit options* se ingresa la medida real del elemento, en este caso el elemento es de 434 milímetros, tal como se muestra en la Figura 4.9.

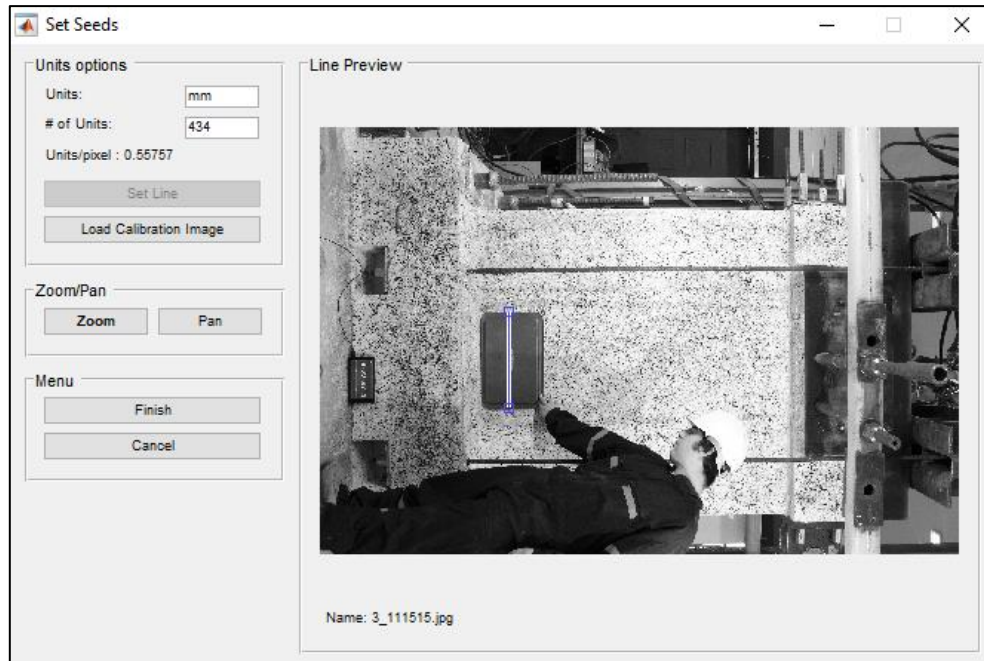


Figura 4.9: Configuración de escala.

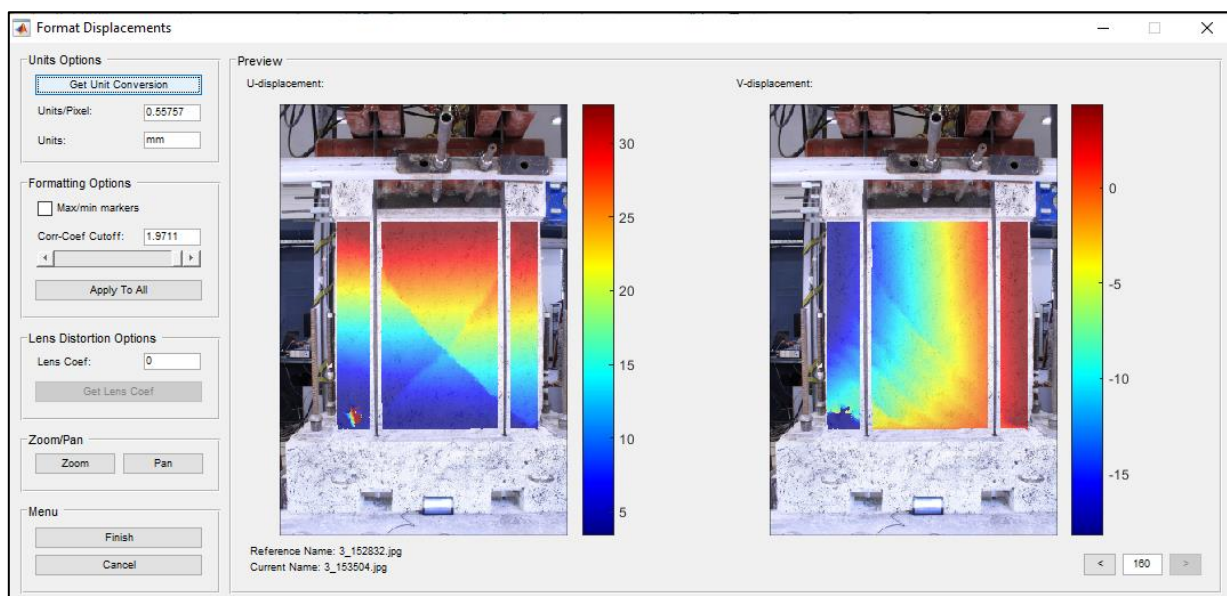


Figura 4.10: Formato de desplazamientos.

Luego se presiona *Finish* y se muestra el recuadro de la Figura 4.10 donde queda configurada la escala, de mm a pixeles para este caso. Se continúa con la configuración de las deformaciones, para ello se sigue la ruta *Analysis > Calculate Strains*, en la sección *Strain Options* se configura el radio de deformación, en este caso se utiliza 15. Además, en la sección *Discontinuous Analysis* se selecciona *Subset Truncation*, como se muestra en la Figura 4.11.

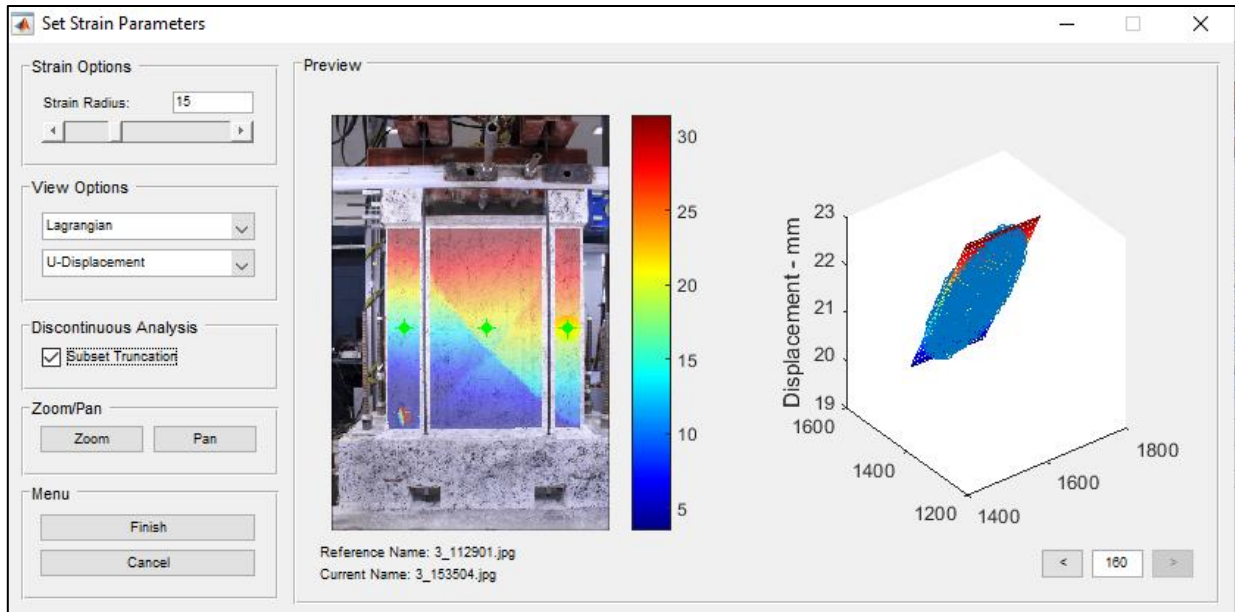


Figura 4.11: Configuración de parámetros de deformación.

Posterior a dar *Finish* al paso anterior se da por finalizado el análisis de fotogrametría con Ncorr, para guardar los datos se sigue la ruta *File > Save*. Se recomienda hacer un guardado previo luego de que se finalice *DIC Analysis* (ver Figura 4.12).

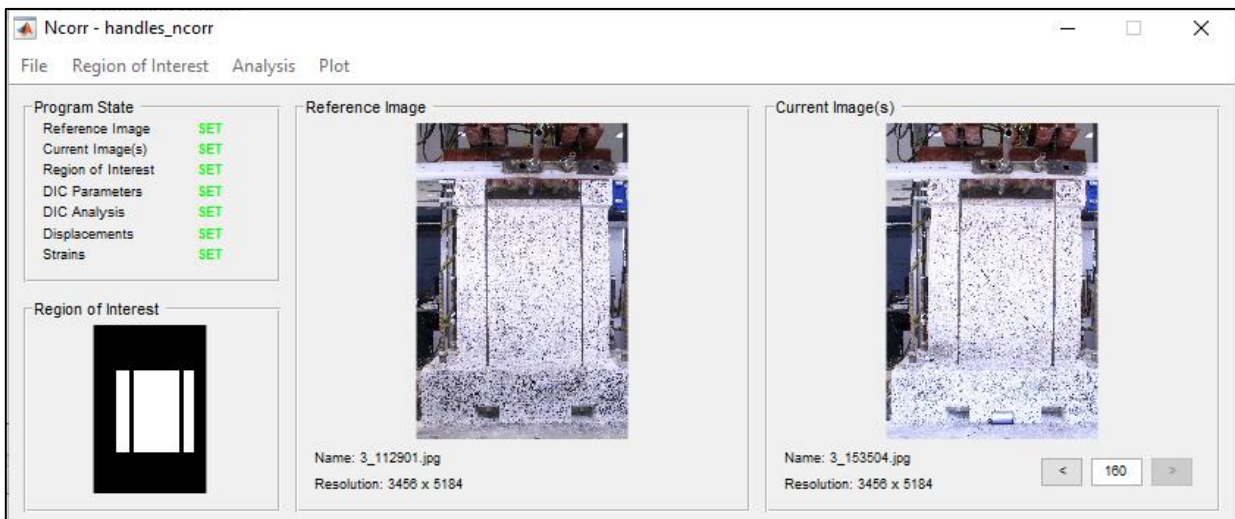


Figura 4.12: Análisis finalizado.

4.1.3 Estructura de datos optimizada

Con el fin de utilizar una estructura de datos con la cual sea más fácil e intuitivo trabajar, se modifica que estructura de datos que proporciona el programa Ncorr se muestran en la Figura 4.13.

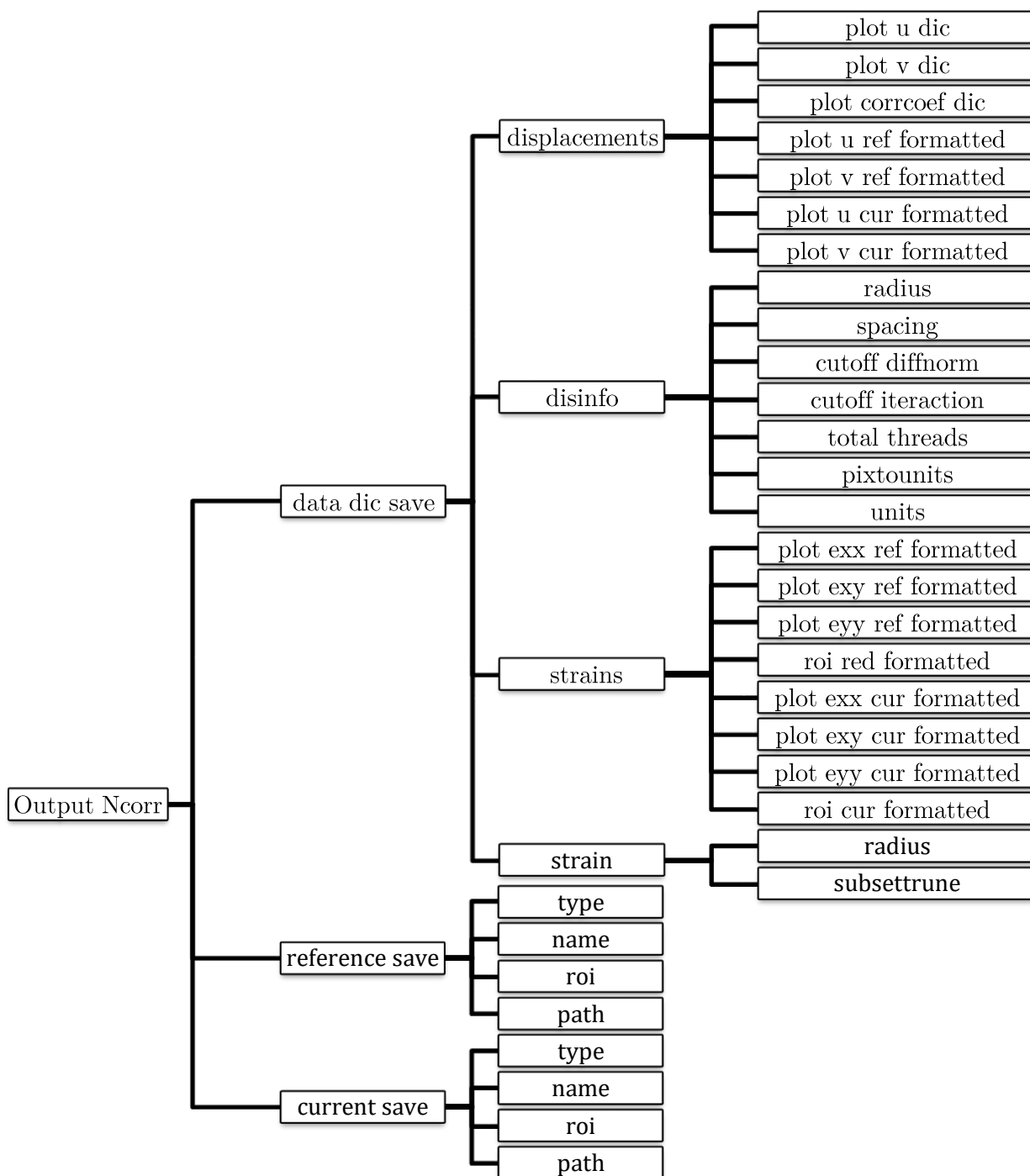


Figura 4.13: Estructura de datos entregada por Ncorr – data dic save.

Se modifica la estructura de datos que entre Ncorr a la estructura de datos optimizada (Ruiz, 2018) que se muestra en la Figura 4.14.

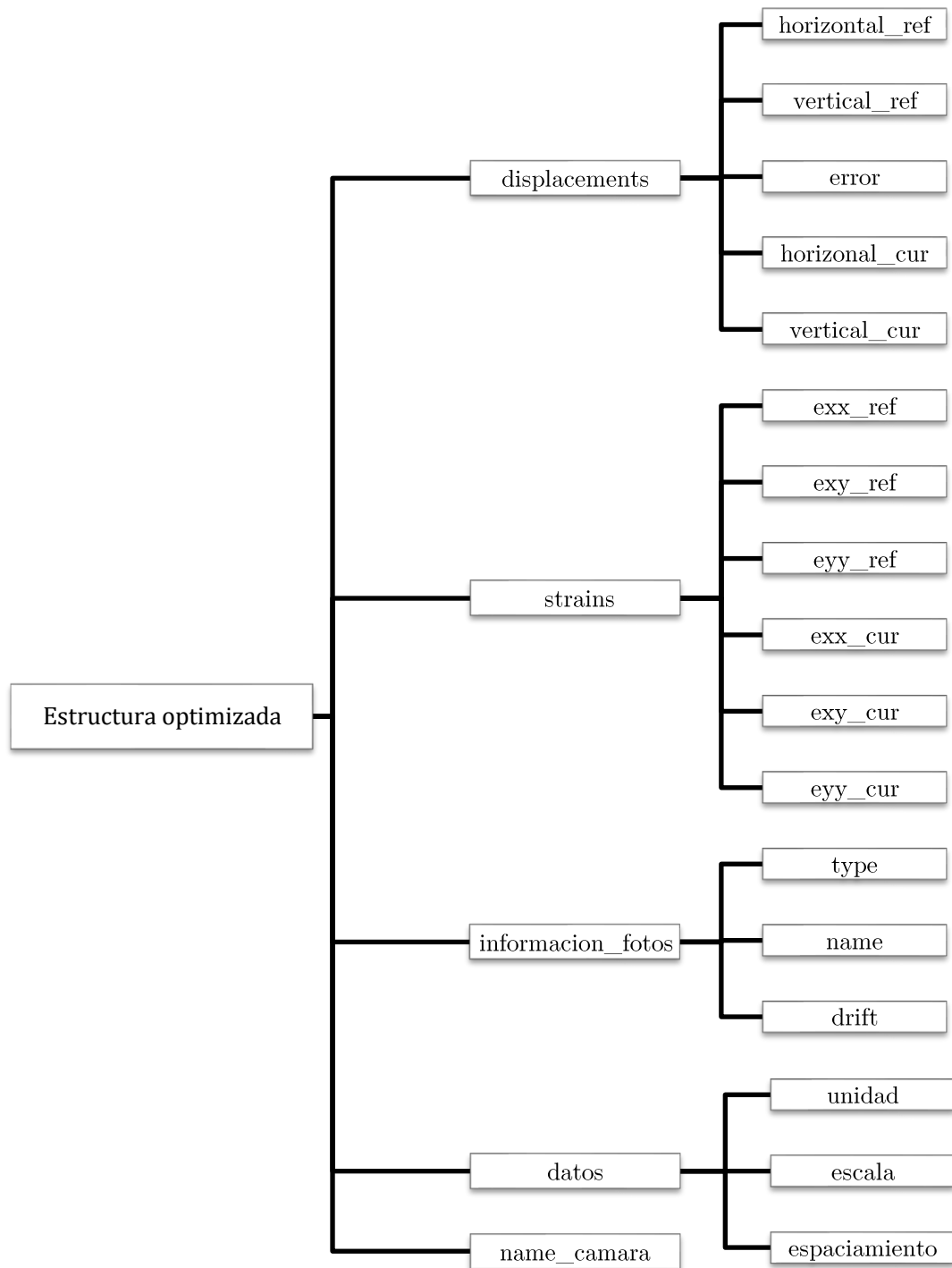


Figura 4.14: Estructura optimizada.

4.1.4 Precisión de resultados medidos con fotogrametría

La obtención de datos mediante fotogrametría usando el programa Ncorr tiene asociado dos principales tipos de error, el primero corresponde a la sensibilidad que posee la cámara con la cual se capturan las fotografías del elemento que se quiere analizar y la distancia a la cual se encuentra la cámara del elemento, el segundo error está asociado a los procedimientos computacionales que emplea el programa, donde se encuentran las iteraciones que realiza, los parámetros de correlación, etc.

El primer error, asociado a la calidad de la fotografía se ve reflejado en la cantidad de milímetros que contiene cada pixel, es decir, la escala de conversión de pixeles a milímetros. En la Tabla 4.1 se muestra las escalas de conversión para cada probeta, donde se compara con una fotografía en el plano general versus un que toma un plano local del muro, el cual abarca desde la fundación hasta alrededor de la mitad del alto del muro.

Tabla 4.1: Escala probetas [mm/pixel].

| Muro | FPA | | FPB | | MEA | | MEB | |
|------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| | General | Local | General | Local | General | Local | General | Local |
| M3 | 0.5576 | 0.3492 | 0.5422 | 0.3195 | 0.5435 | 0.3186 | 0.5626 | 0.3508 |
| M4 | 0.5683 | 0.3581 | 0.5695 | 0.3654 | 0.5612 | 0.3413 | 0.5436 | 0.3348 |

En la Tabla 4.1 se aprecia que la sensibilidad de la cámara local es alrededor de 60% más sensible que la cámara general.

El error asociado al procesamiento computacional de Ncorr responde al número de iteraciones configuradas por el usuario, en este caso, tal como se muestra en la Figura 4.6 se define una tolerancia de 10^{-6} y 50 iteraciones, para un subconjunto de radio de 50 pixeles y un espaciamiento de 10 pixeles entre cada subconjunto.

Finalmente se puede realizar una verificación de desplazamientos falsos que capta el programa de fotogrametría al analizar dos fotografías consecutivas en las cuales el muro se encuentre en reposo. Ver Figura 4.15 y Tabla 4.2.

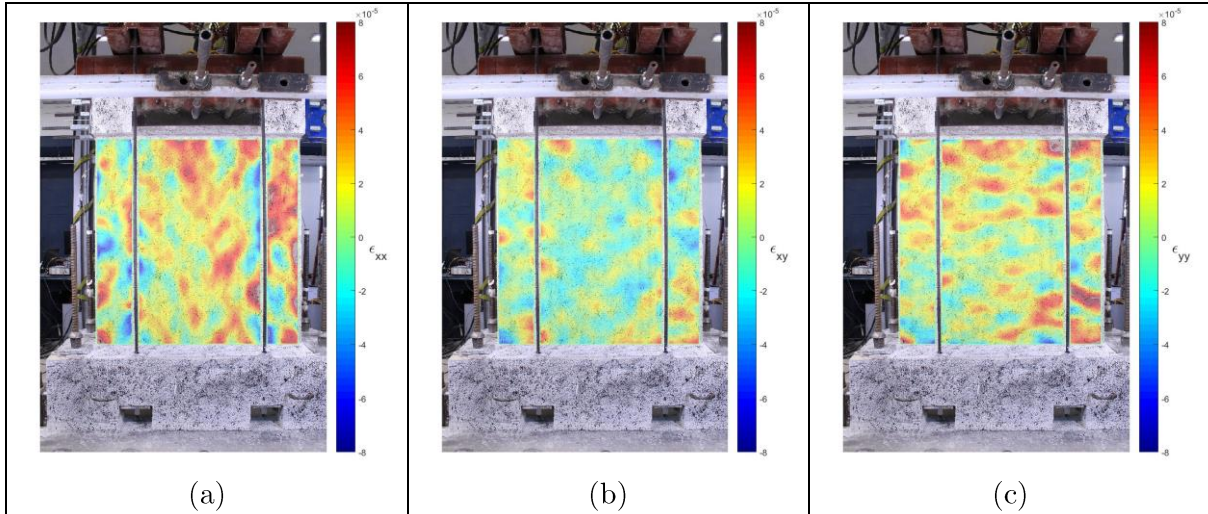


Figura 4.15: Error deformaciones fotografías consecutivas.

Tabla 4.2: Errores de fotografías consecutivas.

| Cámara | Probeta | du [mm] | dv [mm] | exx [-] | exy [-] | eyy [-] |
|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| General | M3 FPA | 0.051 | 0.041 | 1.46E-04 | 8.07E-05 | 1.84E-04 |
| | M3 FPB | 0.122 | 0.060 | 3.12E-04 | 1.32E-04 | 1.20E-04 |
| | M3 MEA | 0.052 | 0.105 | 1.19E-04 | 2.46E-04 | 1.70E-04 |
| | M3 MEB | 0.195 | 0.116 | 4.20E-04 | 4.20E-04 | 2.72E-04 |
| | M4 FPA | 0.421 | 0.088 | 2.73E-04 | 1.02E-04 | 2.16E-04 |
| | M4 FPB | 0.164 | 0.164 | 3.94E-02 | 9.93E-05 | 1.44E-04 |
| | M4 MEA | 0.101 | 0.064 | 1.47E-04 | 7.18E-05 | 1.44E-04 |
| | M4 MEB | 0.166 | 0.166 | 1.83E-04 | 1.83E-04 | 1.38E-04 |
| Local | M3 FPA | 0.043 | 0.081 | 3.07E-04 | 1.00E-04 | 1.66E-04 |
| | M3 FPB | 0.075 | 0.075 | 2.50E-04 | 2.50E-04 | 1.75E-04 |
| | M3 MEA | 0.054 | 0.025 | 4.86E-04 | 1.37E-04 | 2.51E-04 |
| | M3 MEB | 0.107 | 0.101 | 5.69E-04 | 3.09E-04 | 2.55E-04 |
| | M4 FPA | 0.062 | 0.043 | 2.22E-04 | 2.12E-04 | 3.19E-04 |
| | M4 FPB | 0.028 | 0.030 | 1.72E-04 | 1.52E-04 | 1.60E-04 |
| | M4 MEA | 0.041 | 0.031 | 2.35E-04 | 1.30E-04 | 2.27E-04 |
| | M4 MEB | 0.035 | 0.049 | 1.63E-04 | 1.76E-04 | 1.85E-04 |

Al comparar los resultados entre ambas fotografías se tiene que la máxima diferencia de desplazamiento es de 0.4 [mm] y de 0.1 [mm] para la vista general y local respectivamente, por lo tanto, el error que controla es el asociado a la escala para ambos casos.

4.2 Modelación numérica

El programa utilizado para la modelación numérica es Safe-TB (Rojas, 2016), el cual consiste en una plataforma de Matlab de elementos finitos enfocado en elementos de hormigón armado, los elementos son caracterizados como cuadriláteros no lineales formados por capas de membranas, tal como se muestra en la Figura 4.16. Cada elemento presenta doce grados de libertad, debido a que cada nodo del cuadrilátero puede moverse horizontal y verticalmente, y además girar en el plano. En cuanto al análisis mediante elementos finitos cada elemento posee nueve puntos de cuadratura, siendo un punto en cada esquina, un punto en el centro de cada arista y un punto en el centro del elemento.

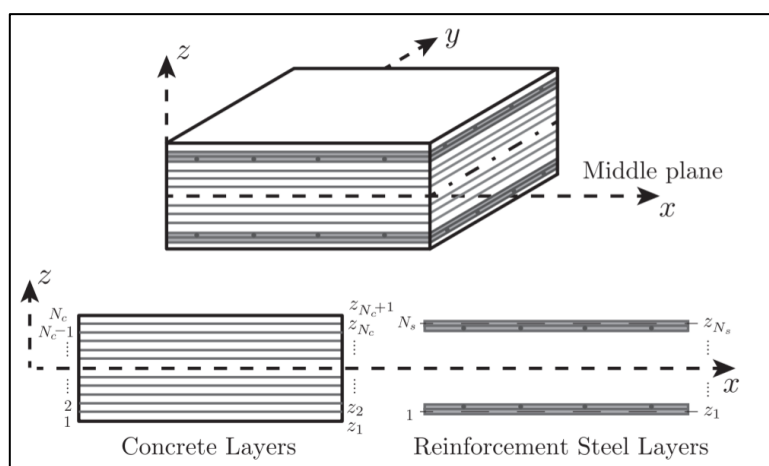


Figura 4.16: Sección rectangular típica de capas de membrana (Rojas, 2016).

El análisis que utiliza para el cálculo de las deformaciones y esfuerzos es a partir del control de desplazamientos, en este caso se ingresa un vector con los desplazamientos cíclicos que se alcanzaron experimentalmente. El método iterativo que se utiliza está basado en el método Newton-Raphson que busca llegar al desplazamiento previamente ingresado.

En cuanto a los *inputs* que necesita el software de Rojas además de los desplazamientos necesita los nodos que constituyen la estructura que se desea analizar, los elementos que la forman e información sobre los nodos que pertenecen a cada elemento, los nodos que están apoyados, entre otros.

4.2.1 Modelos constitutivos de los materiales

Tal como se menciona anteriormente se caracteriza el comportamiento del hormigón armado mediante capas de membrana, las cuales presentan adherencia perfecta entre sí. Los materiales son ortotrópicos, donde las relaciones uniaxiales de tensión-deformación se desarrollan en los ejes principales.

4.2.1.1 Hormigón

Para modelar el comportamiento del hormigón se asume que es un material ortotrópico. Además, el programa considera que la dirección de la tensión y deformación coinciden, que la relación tensión–deformación puede ser representada por las tensiones–deformaciones promedio. Por otro lado, se asume que el modelo constitutivo del hormigón en cada tensión principal puede ser representada por un modelo de hormigón uniaxial. Finalmente, el módulo de Poisson no es válido después de la fisuración.

a) Hormigón a compresión

El modelo uniaxial utilizado para caracterizar el comportamiento el hormigón en compresión es el propuesto por Massone para cargas estáticas, y ha sido extendido para incorporar el efecto de histeresis. La curva de compresión está definida según la curva propuesta por Thorenfeldt en el año 1987, posteriormente en 1989 Collins y Porasz calibran los valores de la curva. La curva de tensión deformación para el hormigón en compresión se define como se muestra en la ecuación (4.1), ver Figura 4.17.

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = f'_c \frac{n \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)}{n - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^{nk}} \quad (4.1)$$

Donde f'_c es la tensión o capacidad máxima del hormigón en compresión, n se define según las calibración de Carreira y Kuang-Han para hormigones de resistencia normal como se presenta en la ecuación (4.2) para $k = 1$, ε_{c0} es la deformación para la tensión f'_c .

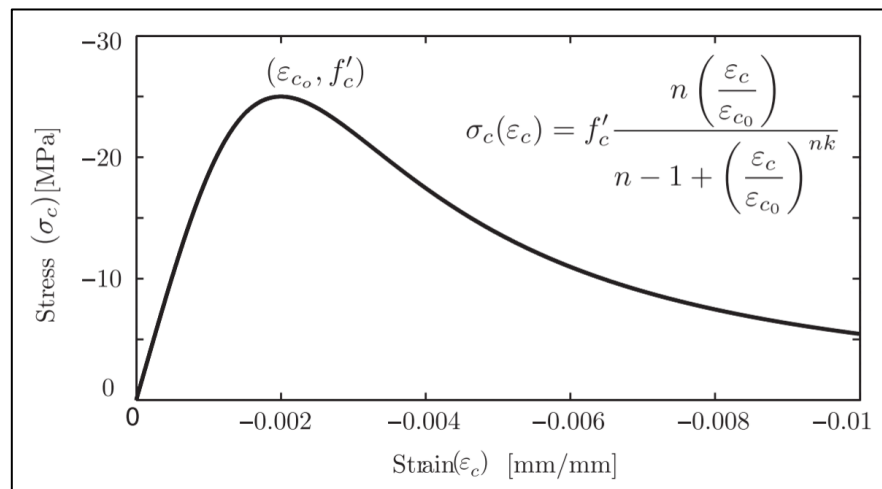


Figura 4.17: Modelo constitutivo del hormigón en compresión usando la curva de Thorenfeldt, (Rojas, 2016).

$$n = 1.55 + \left(\frac{f'_c (MPa)}{32.4} \right)^3 \quad (4.2)$$

b) Hormigón en tracción

La curva de tensión deformación para el hormigón en tracción corresponde a la presentada por Massone, esta se basa en lo propuesto por Belarbi y Hsu en 1994, quienes propusieron este modelo después de ensayar diecisiete paneles de hormigón armado sometidos a tensión pura. Esta curva se divide en dos secciones, la primera sección corresponde al comportamiento del hormigón en tracción previo al fisuración y la segunda sección de la curva posterior al fisuración, en donde se considera el aporte de resistencia del acero ante el agrietamiento del hormigón traccionado, como se muestra en la ecuación (4.3), ver Figura 4.18.

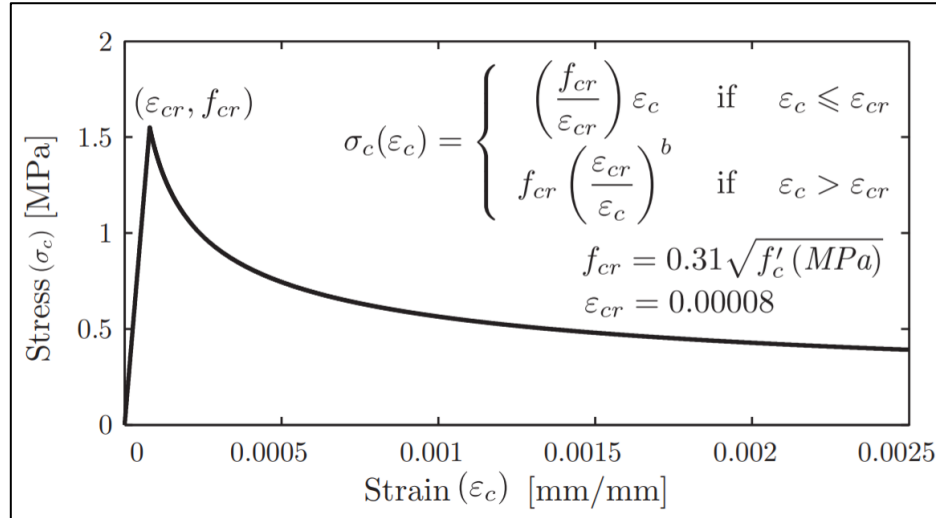


Figura 4.18: Modelo constitutivo del hormigón en tracción usando la ecuación de Belarbi and Hsu, (Rojas, 2016).

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = \begin{cases} \left(\frac{f_{cr}}{\varepsilon_{cr}} \right) \varepsilon_c & , \quad \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cr} \\ f_{cr} \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_c} \right)^b & , \quad \varepsilon_c > \varepsilon_{cr} \end{cases} \quad (4.3)$$

Donde f_{cr} y ε_{cr} corresponden a la tensión y deformación en la fisura respectivamente, b es un parámetro que caracteriza la disminución de resistencia del hormigón después de fisurarse, se propone $b = 0.4$ para hormigones confinados y $b = 0.6$ para hormigones confinados. f_{cr} se calcula como se muestra en la ecuación (4.4) .

$$f_{cr} = 0.31 \sqrt{f'_c (MPa)} \quad (4.4)$$

c) Histéresis

El comportamiento histórico del hormigón es modelado mediante secciones lineales en las curvas de carga y descarga, donde la zona de carga tiene una pendiente igual al módulo de rigidez del hormigón E_c , esta zona será unida con la zona de descarga mediante una recta con pendiente del 7.1% de E_c , tal como se muestra en la Figura 4.19.

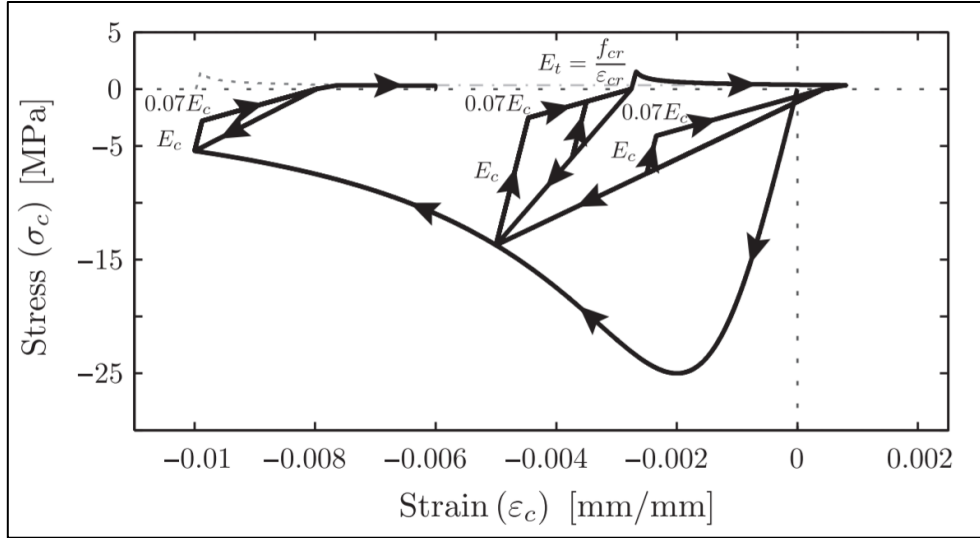


Figura 4.19: Reglas de histéresis del modelo de hormigón, (Rojas, 2016).

El comportamiento de la deformación plástica del hormigón en compresión y tracción en descarga total está dado por la ecuación (4.5) y (4.6) respectivamente.

$$\varepsilon_p^c = \varepsilon_m^c \left(1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon_m^c}{\varepsilon_{c0}}\right)\alpha_c} \right) \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_p^t = \varepsilon_m^t \left(1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon_m^t}{\varepsilon_{cr}}\right)\alpha_t} \right) \quad (4.6)$$

Donde ε_m^c y ε_m^t corresponde a la deformación máxima de compresión y tracción respectivamente que se alcanza en el ciclo anterior, finalmente el valor de $\alpha_c = 0.32$ y $\alpha_t = 0.08$.

d) Coeficientes de modificación del modelo del hormigón

El comportamiento del hormigón se ve afectado debido a ciertos estados de carga y/o a la interacción con el acero, de modo que a continuación se presentan distintos coeficientes que modifican el modelo inicial planteado para el hormigón.

- Degradación de resistencia del hormigón

La reducción de la resistencia a compresión del hormigón debido a que este está siendo traccionado en la dirección transversal es modelada por Belarbi y Hsu en 1995 y se define en la ecuación (4.7), este factor β_S multiplica la resistencia a compresión del hormigón f'_c , tal como se muestra en la Figura 4.20.

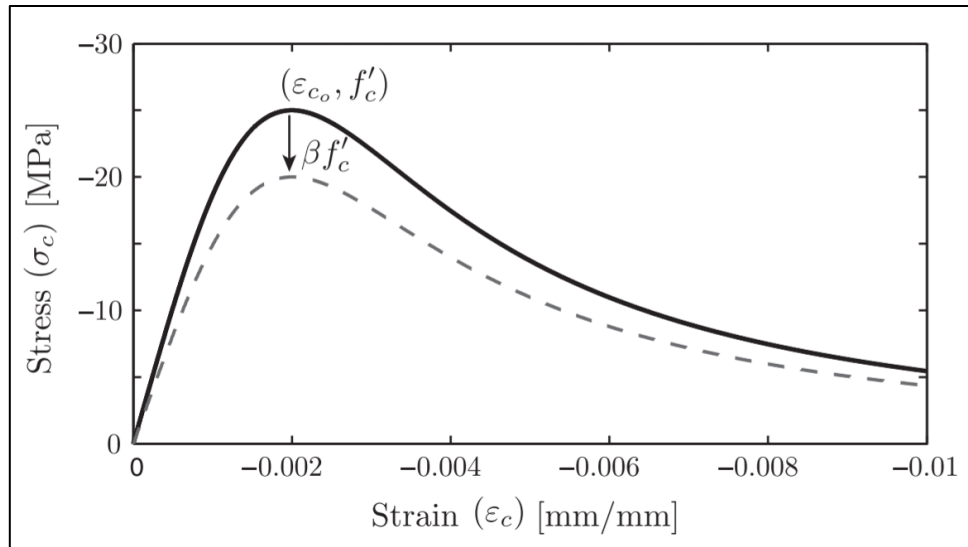


Figura 4.20: Coeficientes de modificación del hormigón, (Rojas, 2012).

$$\beta_S = \frac{k}{\sqrt{1 + k_\sigma \epsilon_{tracción}}} \quad (4.7)$$

Belarbi y Hsu proponen que $k = 0.9$, pero con $k = 1$ se obtienen resultados más estables sin necesariamente perder precisión (Rojas, 2016), el parámetro $k_\sigma = 250$ si se tiene una carga secuencial y $k_\sigma = 400$ en el caso de tener una carga proporcional, finalmente $\epsilon_{tracción}$ corresponde a la deformación a tracción en la dirección transversal.

- Mejora de la resistencia a compresión

El aumento en la resistencia a compresión del hormigón es fenómeno se debe a un estado de compresión biaxial o al confinamiento otorgado por los estribos, trabas o zunchos en el hormigón. Vecchio propone que la mejora debido a la compresión biaxial del hormigón esté definida según la ecuación

$$\beta_{e_{ij}} = 1 + 0.92 \left(\frac{\sigma_{c_j}}{f'_c} \right) - 0.76 \left(\frac{\sigma_{c_j}}{f'_c} \right)^2 \quad (4.8)$$

- Daño por carga cíclica

Cuando el hormigón es sometido a ciclos de carga y descarga puede sufrir un deterioro en la resistencia a la compresión, este fenómeno fue caracterizado por Palermo y Vecchio, en este caso se estudia la reducción por compresión, y es definida según la ecuación (4.9).

$$\beta_d = \frac{1}{1 + \alpha_1 \left(\frac{\varepsilon_{rec}}{\varepsilon_{c_0}} \right)^{\alpha_2}} \quad (4.9)$$

$$\varepsilon_{rec} = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min} \quad (4.10)$$

Donde ε_{c_0} es la deformación para la tensión máxima del hormigón a compresión, $\alpha_1 = 0.5$ para el hormigón previo a la fisura y $\alpha_1 = 0.6$ posterior a la fisura en compresión, $\alpha_2 = 0.1$ para el hormigón previo a la fisura y $\alpha_2 = 0.175$ posterior a la fisura en compresión. Además ε_{max} es la deformación máxima durante un ciclo de carga, ε_{min} es la deformación mínima.

- Coeficiente de mejora por confinamiento

La resistencia del hormigón aumenta cuando este se encuentra confinado, para reflejar este aumento se multiplica a f'_c por un factor, el cual será llamado β_{conf} , el cual se define según la (4.11).

$$\beta_{conf} = 1 + \frac{\rho_s f_y}{f'_c} \quad (4.11)$$

Donde ρ_s es el cociente entre el volumen del acero transversal y el volumen del núcleo de hormigón medido desde los estribos, también conocida como cuantía, f_y es el módulo de elasticidad del acero transversal y f'_c es la resistencia máxima del hormigón a compresión.

4.2.1.2 Acero

Para el modelo constitutivo del acero se utiliza el modelo propuesto por Menegotto-Pinto en 1973 (ver Figura 4.21), y el modelo propuesto por Massone y Moroder en 2009. Los supuestos que

se toman para el modelo de acero es que la relación tensión–deformación se calcula con la tensión–deformación promedio, se asume que el hormigón y el acero están perfectamente adheridos, después del agrietamiento el módulo de Poisson no es válido, finalmente se asume que el acero trabaja solo en la dirección de su orientación.

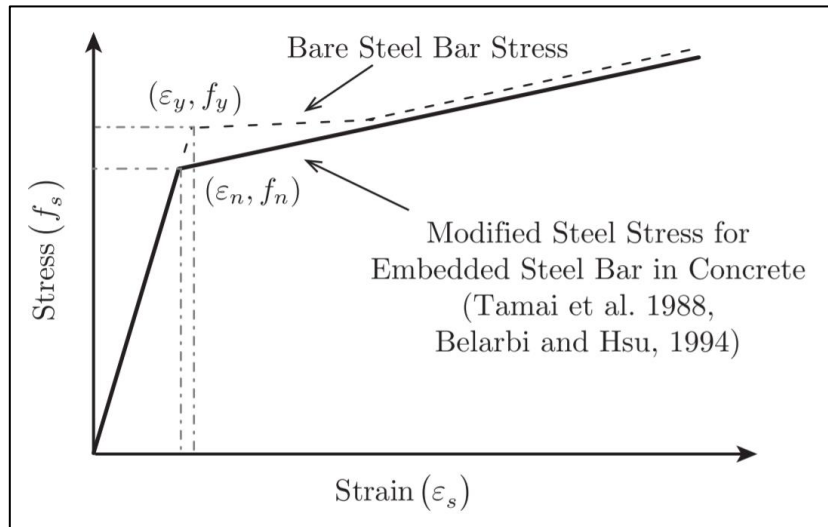


Figura 4.21: Relación tensión–deformación de barras de acero embebidas en hormigón y barras de acero, (Rojas, 2012).

- Modelo uniaxial de Menegotto–Pinto

El modelo de acero uniaxial postulado por Menegotto–Pinto es una curva que está contenida entre cuatro rectas, ver Figura 4.22, donde dos de ellas tienen la pendiente del módulo de elasticidad del acero, y las otras dos rectas tienen la pendiente del módulo de elasticidad del acero reducido por un factor b , esta pendiente se conoce como el endurecimiento post fluencia. La curva es definida según la ecuación (4.12).

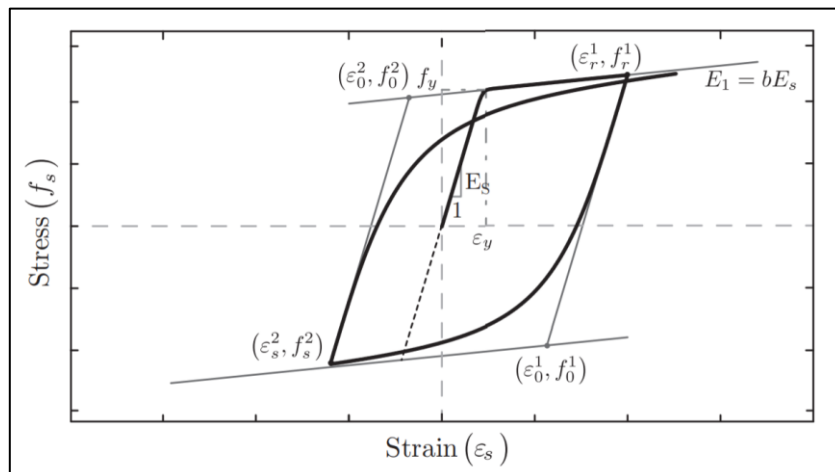


Figura 4.22: Modelo constitutivo del acero de Menegotto–Pinto, (Rojas, 2016).

$$f_s^*(\varepsilon_s^*) = b\varepsilon_s^* + \frac{(1-b)\varepsilon_s^*}{(1+(\varepsilon_s^*)^R)^{1/R}} \quad (4.12)$$

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r} \quad (4.13)$$

$$f_s^* = \frac{f_s - f_r}{f_0 - f_r} \quad (4.14)$$

Donde ε_r y f_r corresponden a la deformación y tensión última respectivamente, este punto está ubicado en donde comienza la descarga. ε_0 y f_0 corresponden a la deformación y tensión en el cambio de pendiente desde E_s a bE_s , tanto para el ciclo de descarga como ciclo de carga.

El parámetro R está definido según la ecuación (4.15).

$$R = R_0 - \frac{\alpha_1 \xi}{\alpha_2 + \xi} \quad (4.15)$$

Donde los valores han sido calibrados a través de experimentos resultado que $R_0 = 18$, $\alpha_1 = 16.2$ y $\alpha_2 = 0.15$. Por otro lado, la variable ξ queda definida según la ecuación (4.16).

$$\xi = \left| \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_0}{\varepsilon_y} \right| \quad (4.16)$$

Donde ε_m corresponde a la deformación máxima en un ciclo de carga o la deformación mínima en un ciclo de descarga, y ε_y es la deformación de fluencia.

Debido a que el acero está embebido en acero ocurren dos fenómenos según Belarbi, el primero es que existe una disminución en la tensión de fluencia del acero, el segundo es que aumenta el endurecimiento posterior a la fluencia, estos se muestran en las ecuaciones (4.17) y (4.18).

$$f_y^{average} = (0.91 - 2B)f_y \quad (4.17)$$

$$b_{average} = (0.02 + 0.25B)b \quad (4.18)$$

Donde B se calcula según la ecuación (4.19).

$$B = \frac{1}{\rho} \left(\frac{f_{cr}}{f_y} \right)^{1.5} \quad (4.19)$$

Donde ρ es la cuantía, que corresponde al área de acero en la sección de hormigón que se encuentra embebido.

Capítulo 5

Resultados experimentales

Los resultados experimentales son obtenidos mediante el uso de sensores LVDT's y fotogrametría, los sensores son utilizados para validar el método de fotogrametría y además para realizar correcciones por giro y desplazamiento debido a que las probetas no son completamente empotradas a la losa de reacción.

En este capítulo se presenta una comparación de los resultados de fotogrametría contra los resultados obtenidos mediante sensores LVDT's, una vez validados los resultados de fotogrametría se presenta el desplazamiento horizontal a lo largo del borde de muro de cada probeta, el aporte del corte en el desplazamiento horizontal, la deformación vertical en el borde del muro, el avance del agrietamiento y finalmente una comparación de las fisuras para las distintas probetas para un mismo drift o deriva.

5.1 Ciclo de histéresis

A partir de los datos obtenidos con los sensores LVDT's se construye el gráfico de carga vs desplazamiento en el extremo superior del muro, este desplazamiento horizontal se corrige por desplazamiento y giro, debido a que el empotramiento de la fundación no es perfecto. La comparación entre el comportamiento de las probetas del muro M3 y muro M4 se presentan en la Figura 5.1 y Figura 5.2 respectivamente. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** e **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta una comparación del ciclo de histéresis para las distintas probetas en el muro M3 y M4 respectivamente.

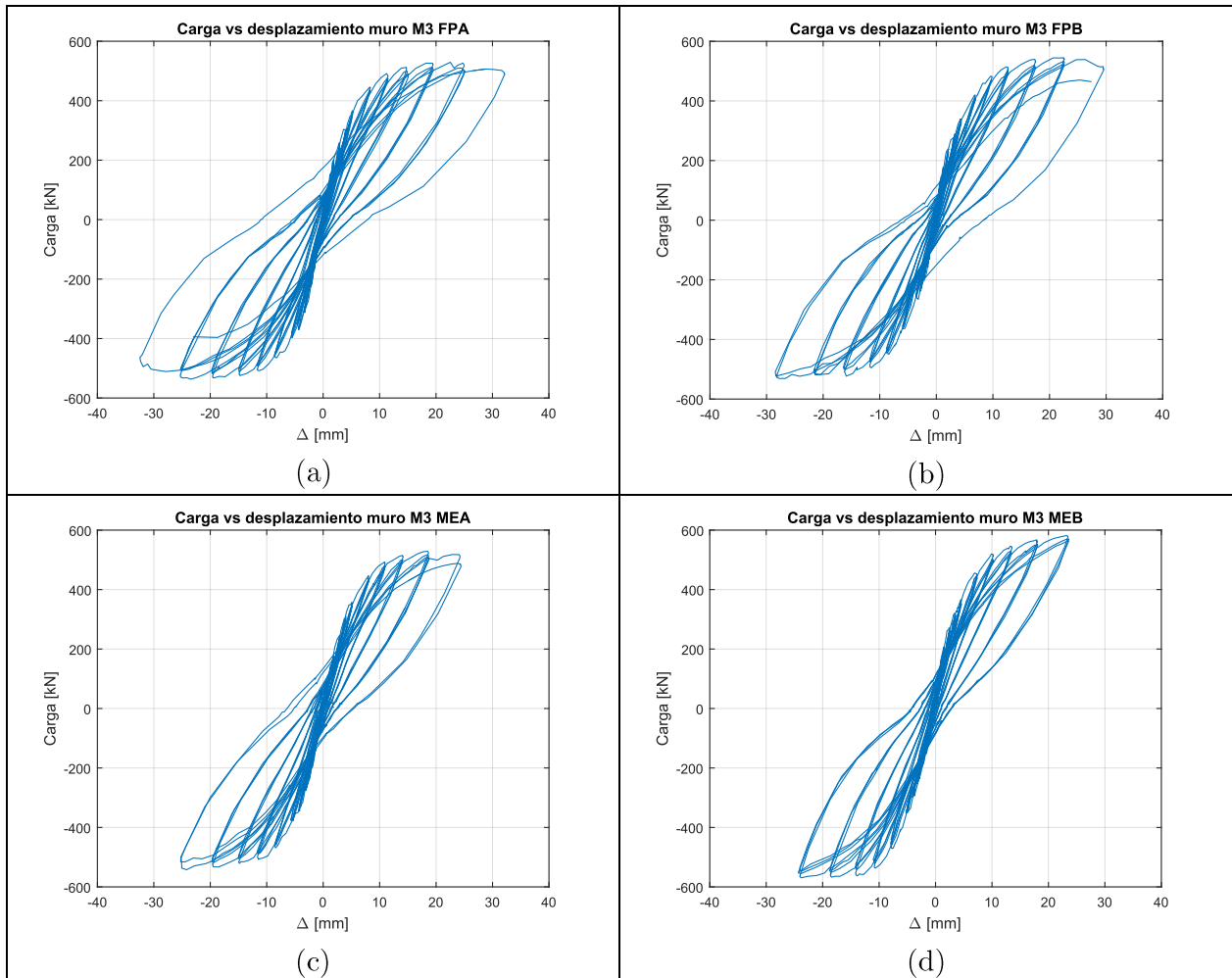


Figura 5.1: Carga vs desplazamiento: (a) muro M3 FPA; (b) muro y M3 FPB; (c) muro M3 MEA; (d) muro M3 MEB.

En la Figura 5.1 se observa que en las probetas construidas con fierro preparado alcanzan mayor desplazamiento que las probetas construidas con malla electrosoldada, sin embargo, solo logran alcanzar uno o dos ciclos más antes de la rotura. La carga máxima alcanzada por las probetas es de aproximadamente de 550 [kN].

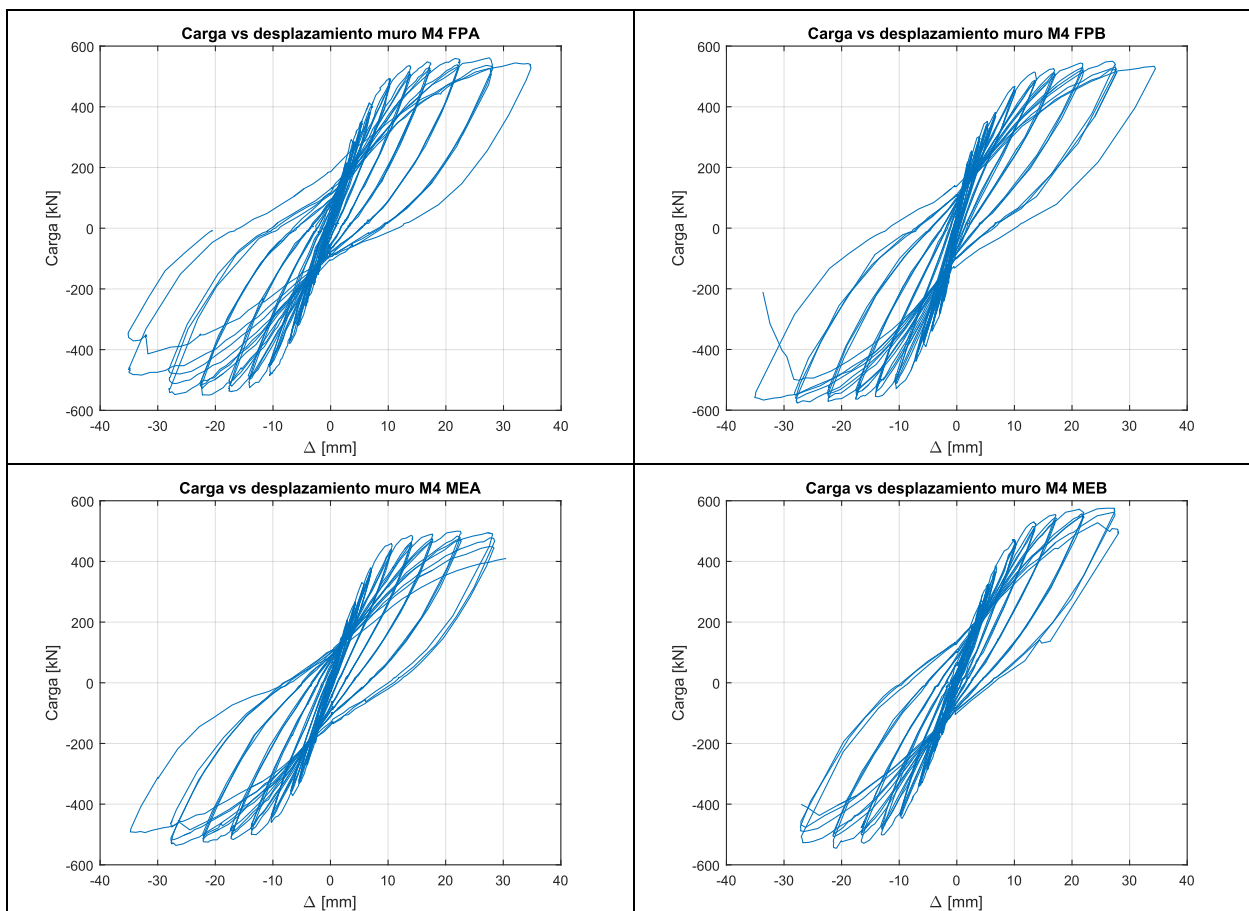


Figura 5.2: Carga vs desplazamiento: (a) muro M4 FPA; (b) muro y M4 FPB; (c) muro M4 MEA; (d) muro M4 MEB.

En la Figura 5.2 se observa que los desplazamientos de las probetas construidas con fierro preparado alcanzan desplazamientos y cargas similares, pese a que la resistencia del hormigón de la probeta FPA es de $f'c = 34.9$ [MPa], es de FPB $f'c = 30.4$ [MPa], esto equivale a un 14.8% mayor. En el caso de las probetas construidas con malla electrosoldada pese a que se alcanzan desplazamientos similares la carga para la probeta B es mayor que en la probeta A, esto se puede deber a que la probeta MEA tiene un $f'c = 30.9$ [MPa] mientras que la probeta MEB está constituida por un hormigón de resistencia de $f'c = 32.6$ [MPa], esto corresponde a un 5.5% de resistencia mayor, cabe recordar que el acero constituyente para todas las probetas pertenece a un mismo rollo, por ende, se descarta como causante de las diferencias de resultado.

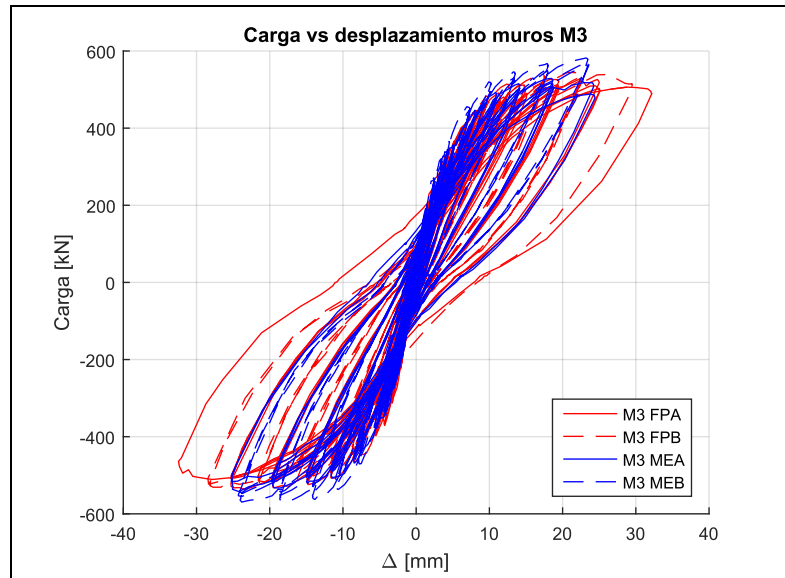


Figura 5.3: Comparación de las probetas de hierro preparado y malla electrosoldada del muro M3.

En el muro M3 las probetas construidas con malla electrosoldada requieren mayor carga que en las probetas construidas con hierro preparado.

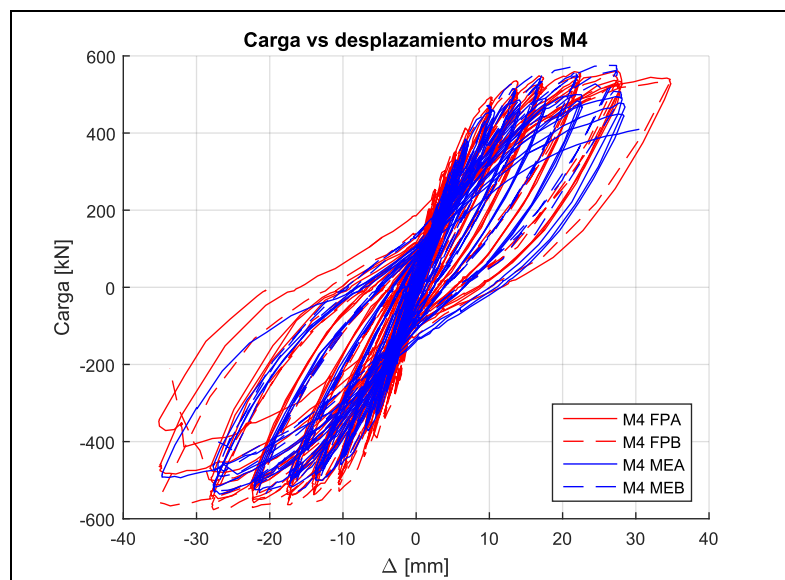


Figura 5.4: Comparación de las probetas de hierro preparado y malla electrosoldada del muro M4.

En el muro M4 las cargas requeridas para alcanzar el desplazamiento requerido es similar tanto en las construidas con hierro preparado que las construidas con malla electrosoldada.

5.2 Validación entre fotogrametría y sensores LVDT's

Este estudio es la continuación de una investigación para la empresa ACMA, en la cual se caracterizó el comportamiento de los muros mediante sensores LVDT's ubicados en diez puntos del muro, tal como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Para validar los resultados obtenidos mediante fotogrametría, se comparan los drifts alcanzados por los muros en la viga de coronamiento medido con un sensor ubicado a media altura de la viga de coronamiento y que está etiquetado como LVDT 0 y por fotogrametría.

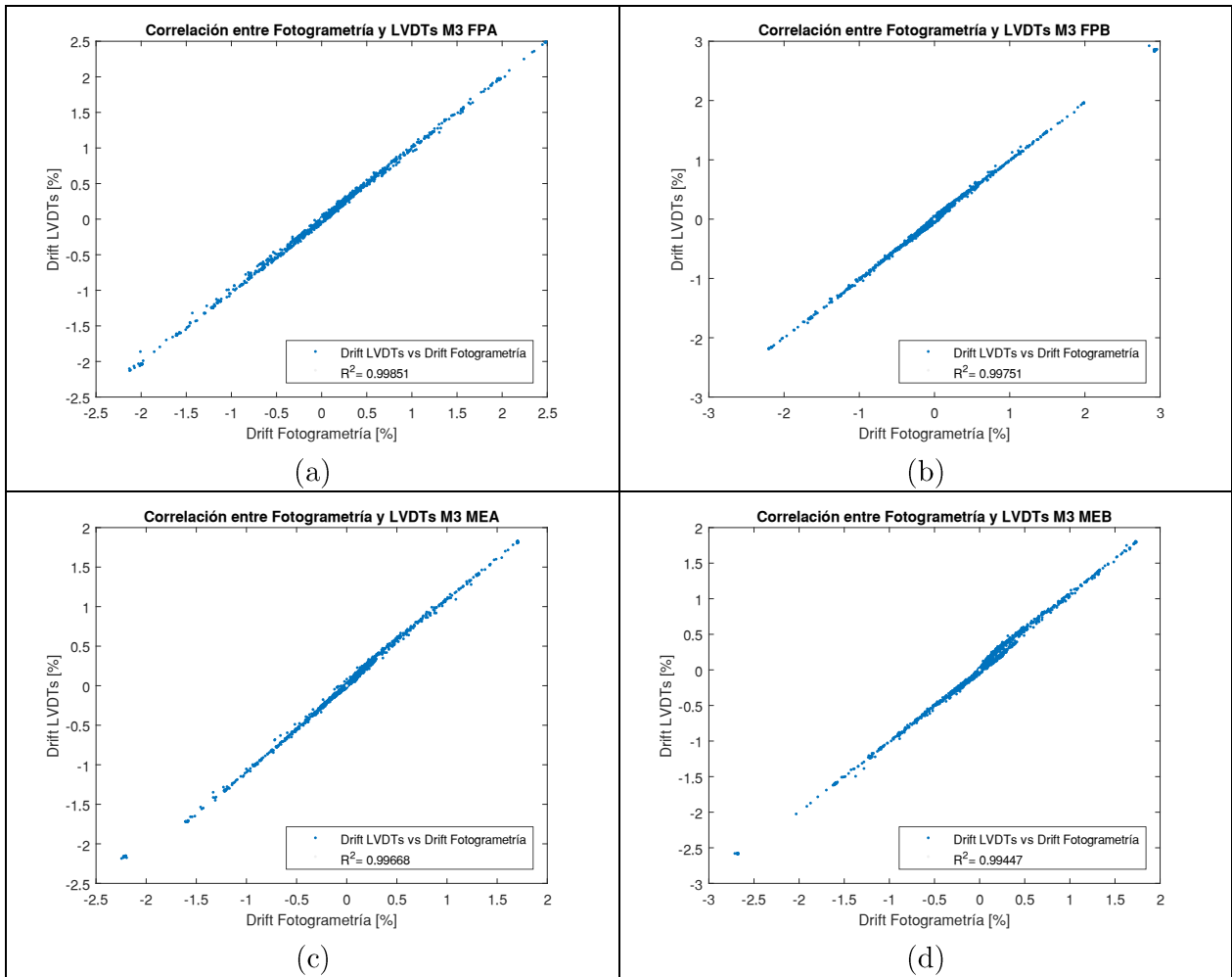


Figura 5.5: Correlación entre fotogrametría y LVDT's: (a) M3 FPA; (b) M3 FPB; (c) M3 MEA; (d) M3 MEB.

Para el cálculo de los drifts se realiza una corrección por giro según la ecuación (3.3), tanto los datos obtenidos mediante los sensores LVDT's y fotogrametría se corrigen a partir de los desplazamientos medidos mediante sensores. La correlación entre fotogrametría y sensores LVDT's se logra a partir de graficar el drift calculado por los sensores versus el obtenido a partir de fotogrametría, para que los datos de fotogrametría sean correctos los puntos se deben distribuir a

lo largo de una recta con pendiente 1 o de 45 grados, para cuantificar esta validación se calcula el valor R^2 , mientras más cercano a 1 sea este valor, más precisa será la obtención de resultados mediante fotogrametría. La comparación se los resultados para la probeta M3 se presentan en la Figura 5.5, para la probeta M4 se presentan los resultados en la Figura 5.6.

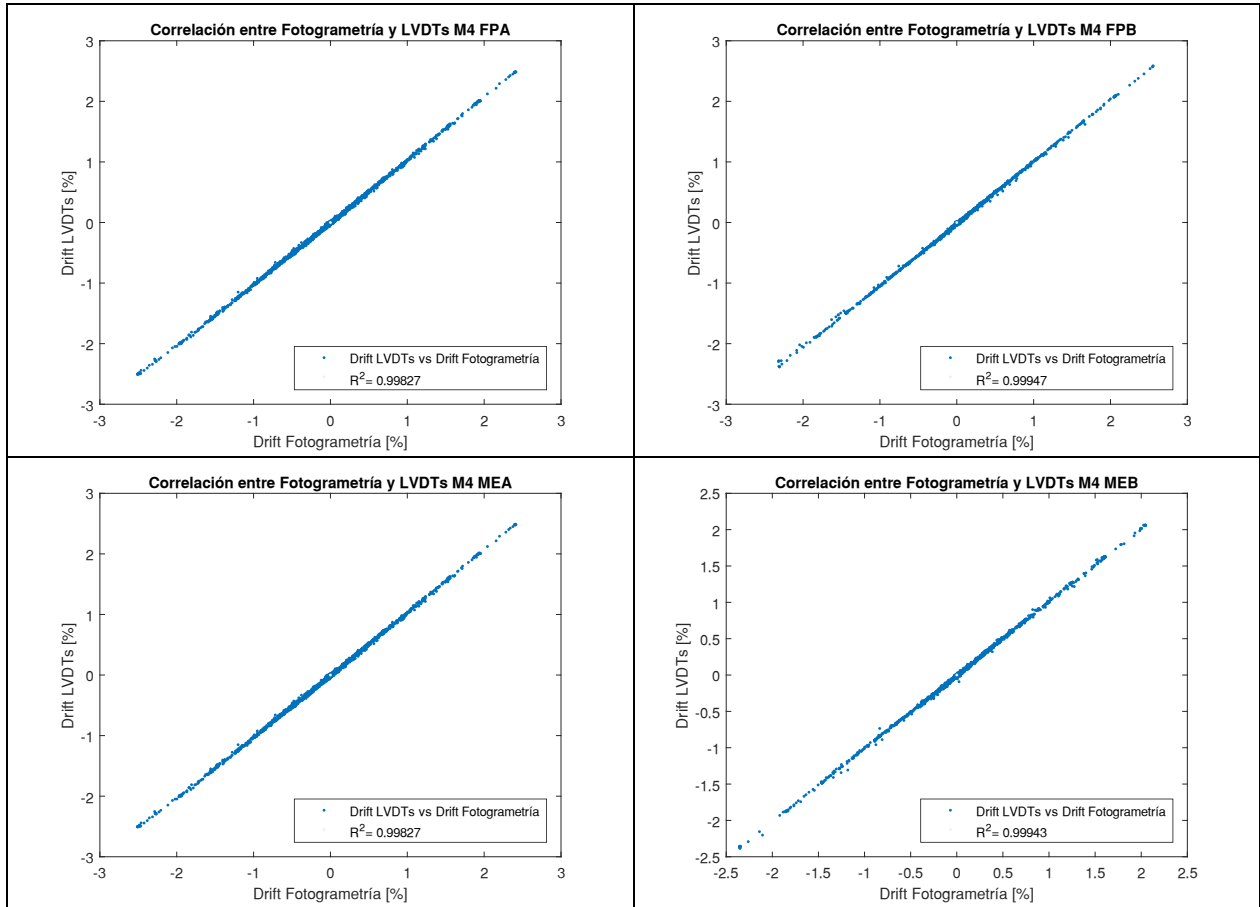


Figura 5.6: Correlación entre fotogrametría y LVDT's: (a) M4 FPA; (b) M4 FPB; (c) M4 MEA; (d) M4 MEB.

A partir de los resultados de correlación entre fotogrametría y sensores LVDT's se concluye que usar el método de fotogrametría es válido para obtener los resultados de desplazamiento y deformación para los distintos muros. En la sección de a continuación se muestran los desplazamientos horizontales, deformación vertical, avance del agrietamiento y la comparación de fisuras en las probetas.

5.3 Fotogrametría

Se presentan los resultados obtenidos mediante fotogrametría, específicamente, el desplazamiento horizontal en el borde del muro para las distintas derivas aplicadas, luego la deformación vertical en el borde del muro para las distintas derivas aplicadas, posteriormente se presenta el avance del agrietamiento a lo ancho del muro, finalmente se presentan ilustraciones con las fisuras para una deriva del 2%.

5.3.1 Desplazamiento horizontal

Se presentan los desplazamientos horizontales promedio calculados para cada deriva teórica, se calcula en el borde del muro a 60 [mm] del borde – para las distintas derivas, se presentan los resultados del muro M3 en la Figura 5.7, Figura 5.8, Figura 5.9, Figura 5.10; mientras que los resultados del muro M4 se presentan en la Figura 5.11, Figura 5.12, Figura 5.13 y Figura 5.14. Los desplazamientos horizontales se encuentran corregidos por giro y deslizamiento en la base, puesto que no existe un empotramiento perfecto.

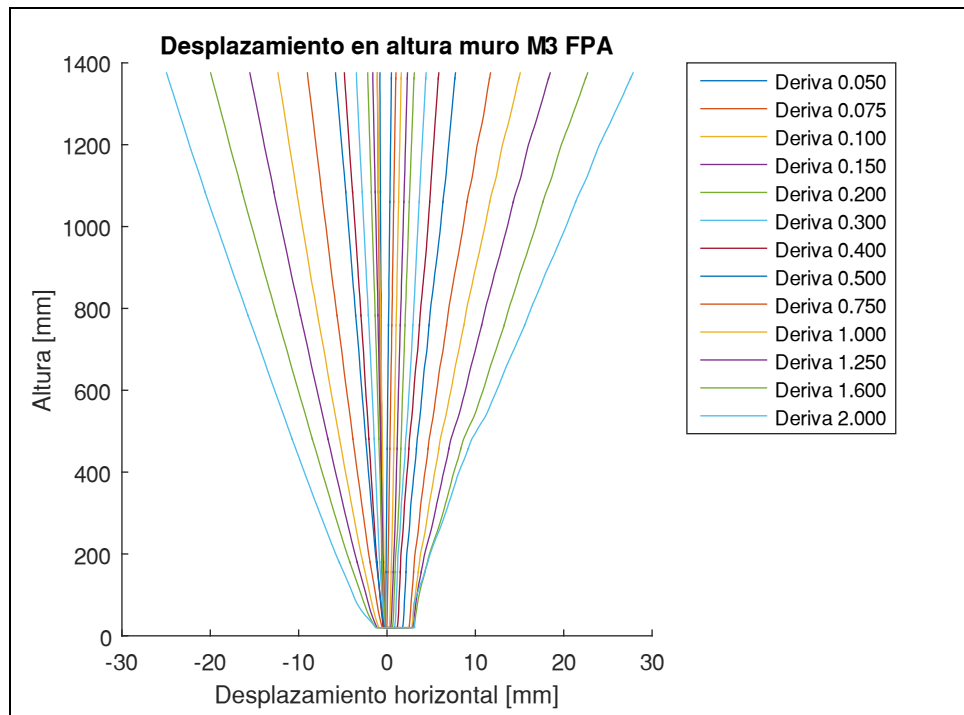


Figura 5.7: Desplazamiento horizontal en altura del muro M3 FPA para las distintas derivas.

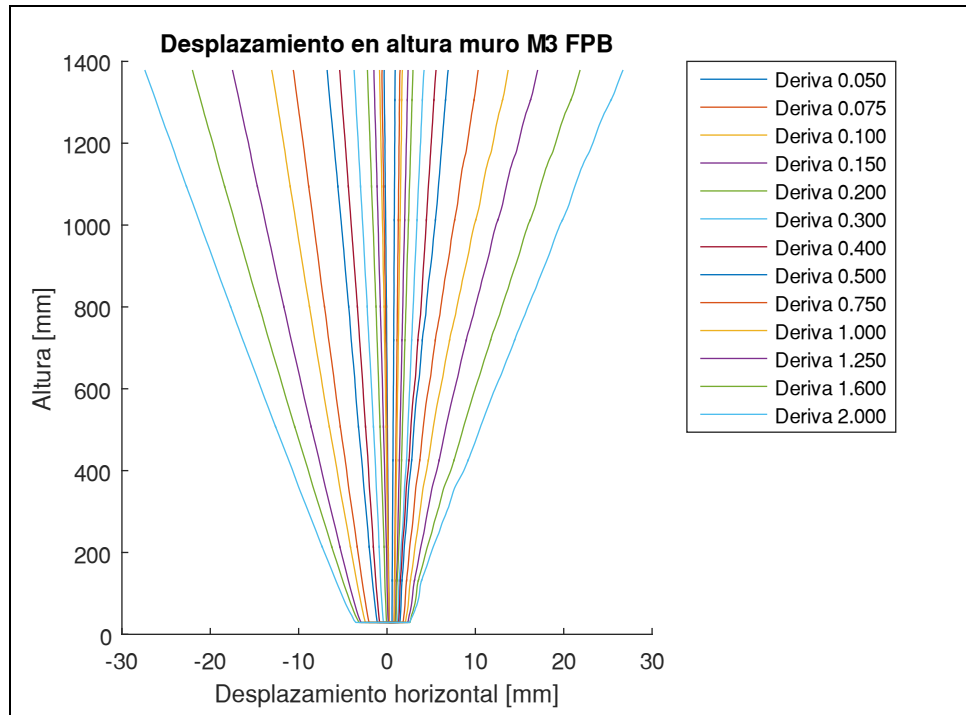


Figura 5.8: Desplazamiento horizontal en altura del muro M3 FPB para las distintas derivas.

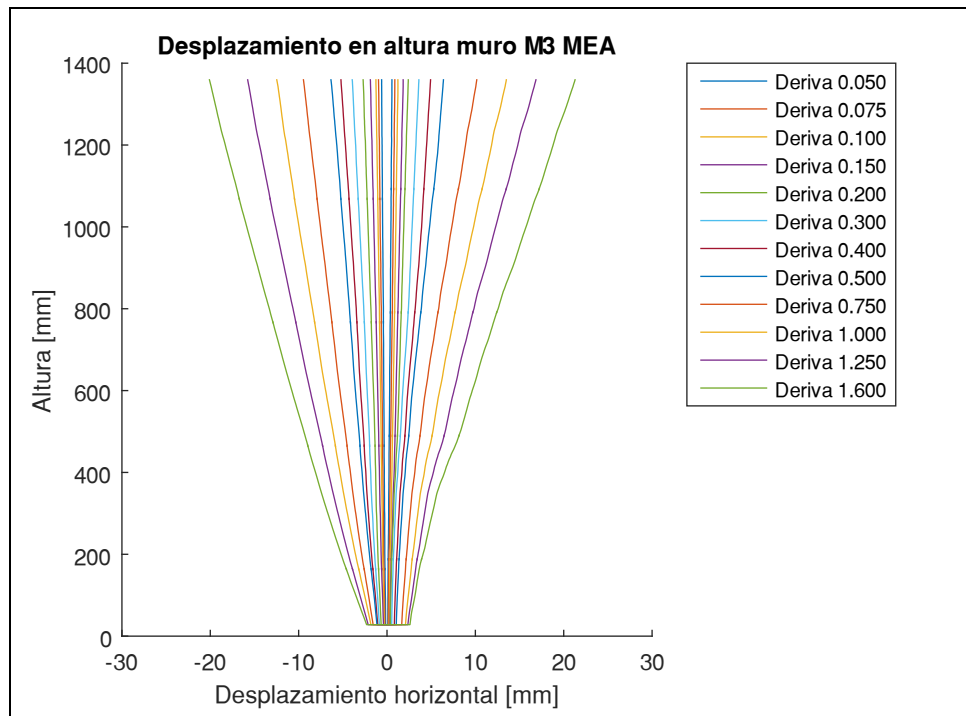


Figura 5.9: Desplazamiento horizontal en altura del muro M3 MEA para las distintas derivas.

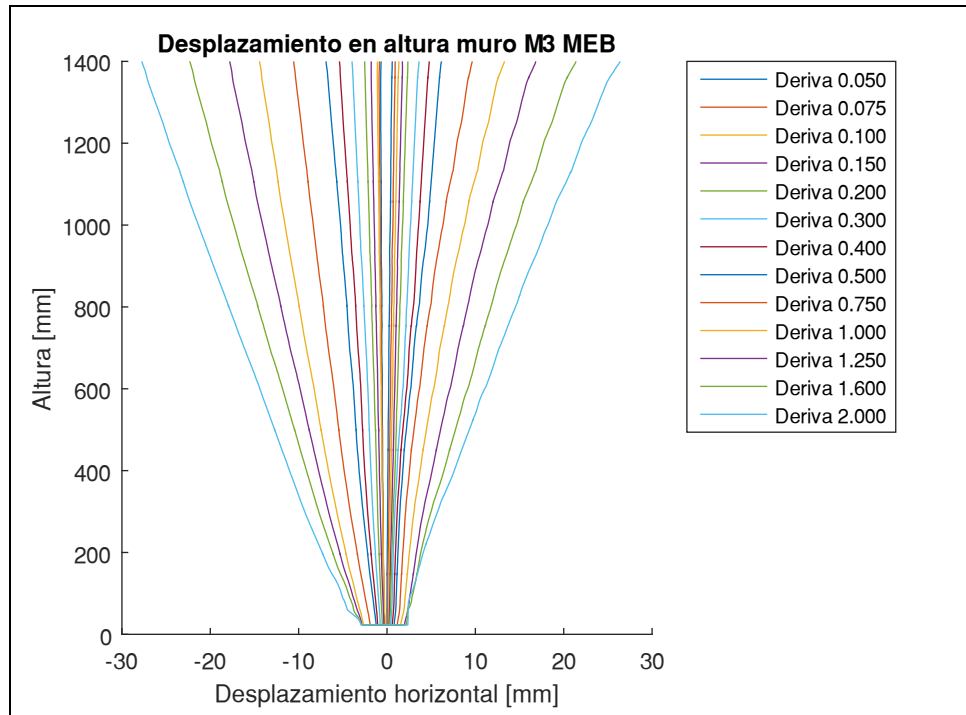


Figura 5.10 Desplazamiento horizontal en altura del muro M3 MEB para las distintas derivas.

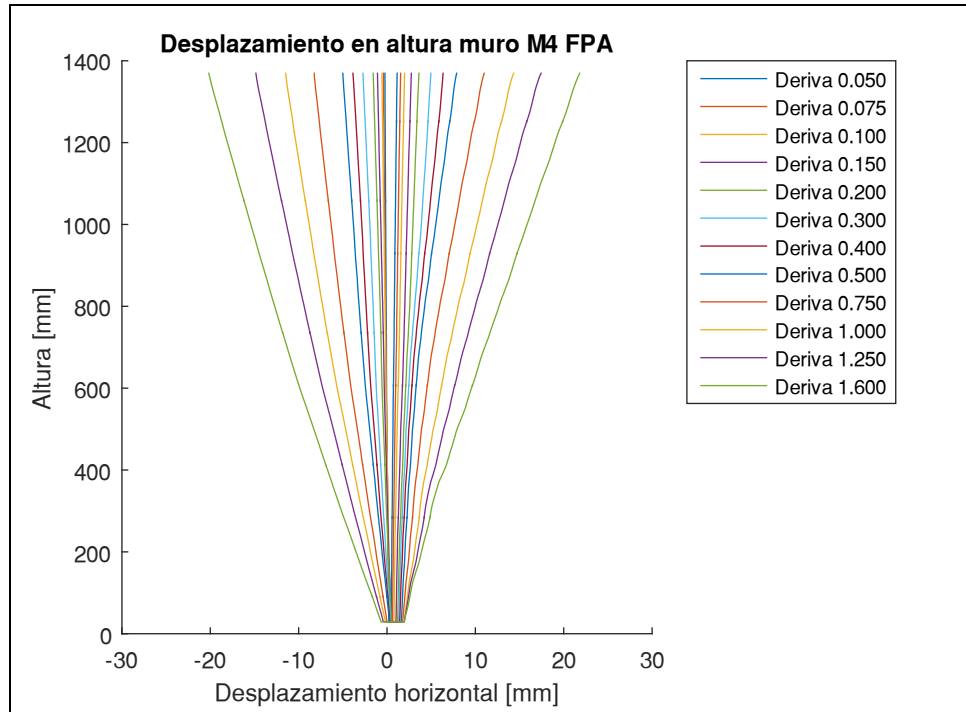


Figura 5.11: Desplazamiento horizontal en altura del muro M4 FPA para las distintas derivas.

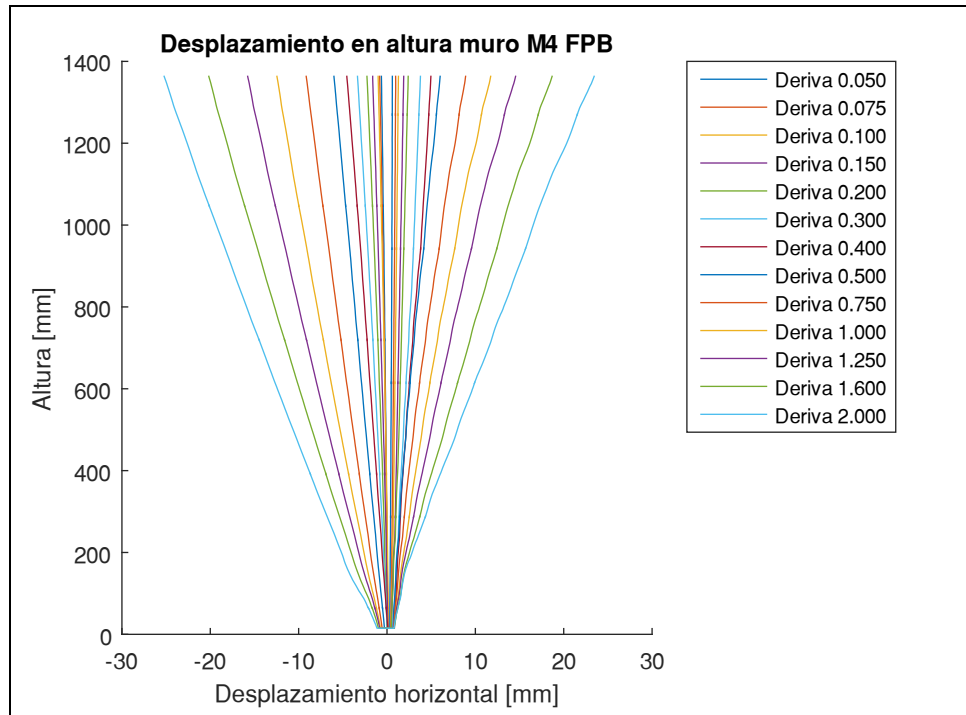


Figura 5.12: Desplazamiento horizontal en altura del muro M4 FPB para las distintas derivas.

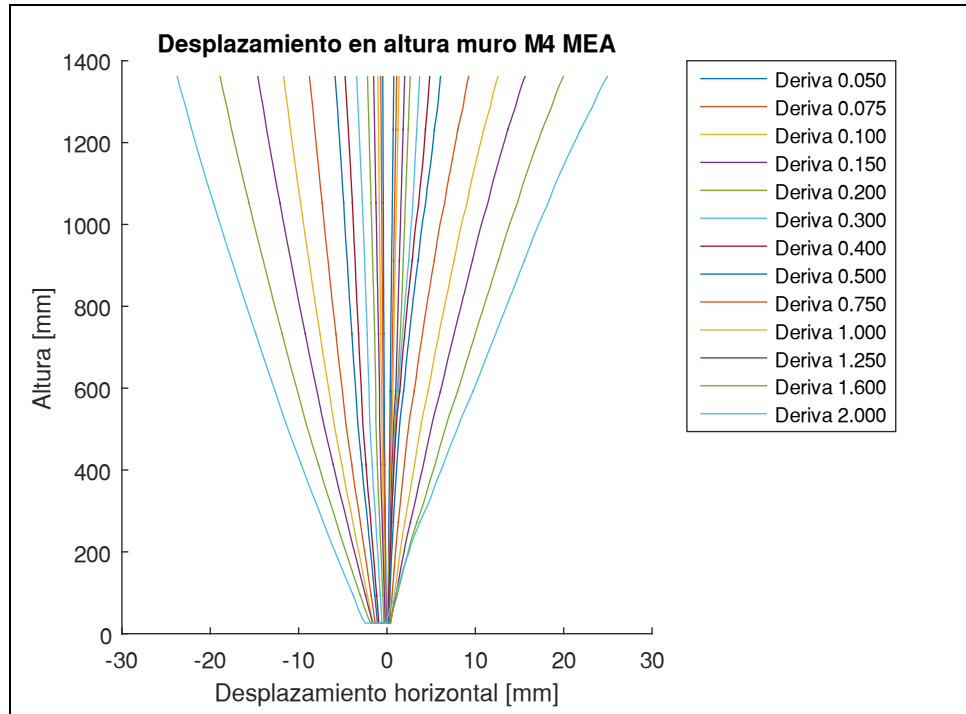


Figura 5.13: Desplazamiento horizontal en altura del muro M4 MEA para las distintas derivas.

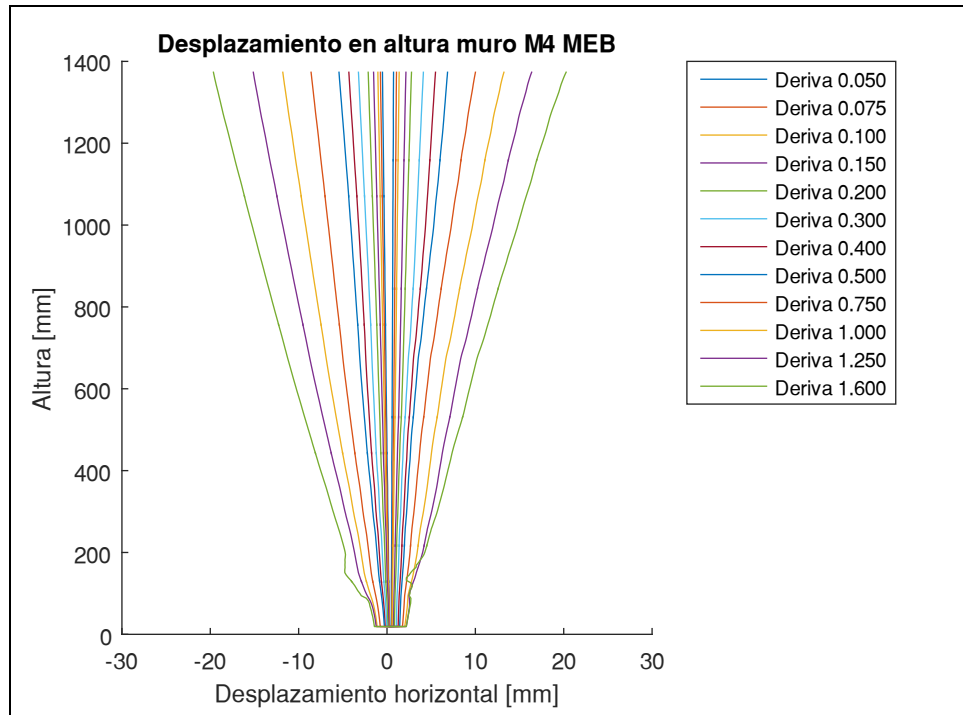


Figura 5.14: Desplazamiento horizontal en altura del muro M4 MEB para las distintas derivas.

Se presenta un promedio entre el desplazamiento positivo y negativo para cada drift con su correspondiente error en la Tabla 5.1 y Tabla 5.2.

Tabla 5.1: Desplazamiento horizontal promedio para la altura máxima del muro M3.

| Drift nominal [mm] | Desplazamiento promedio [mm] - Muro M3 | | | | | | | | | | | |
|--------------------|--|-----------|----------|------|-----------|----------|------|-----------|----------|------|-----------|----------|
| | FPA | | | FPB | | | MEA | | | MEB | | |
| | Prom | Error [%] | σ | Prom | Error [%] | σ | Prom | Error [%] | σ | Prom | Error [%] | σ |
| 0.7 | 0.6 | 8 | 0.1 | 0.6 | 11 | 0.2 | 0.6 | 17 | 0.0 | 0.6 | 11 | 0.1 |
| 1.05 | 1.1 | 0 | 0.0 | 1.0 | 3 | 0.4 | 0.9 | 11 | 0.1 | 0.9 | 15 | 0.1 |
| 1.4 | 1.4 | 3 | 0.3 | 1.3 | 8 | 0.3 | 1.2 | 11 | 0.0 | 1.2 | 16 | 0.1 |
| 2.1 | 2.0 | 7 | 0.4 | 1.9 | 8 | 0.3 | 1.9 | 12 | 0.1 | 1.8 | 16 | 0.0 |
| 2.8 | 2.6 | 7 | 0.5 | 2.6 | 8 | 0.4 | 2.6 | 9 | 0.0 | 2.4 | 13 | 0.4 |
| 4.2 | 4.0 | 5 | 0.6 | 3.9 | 7 | 0.1 | 3.8 | 10 | 0.3 | 3.8 | 10 | 0.2 |
| 5.6 | 5.4 | 4 | 0.4 | 5.5 | 2 | 0.2 | 5.0 | 10 | 0.2 | 5.1 | 9 | 0.5 |
| 7.0 | 6.8 | 3 | 1.1 | 6.9 | 2 | 0.1 | 6.4 | 9 | 0.2 | 6.5 | 7 | 0.5 |
| 10.5 | 10.4 | 1 | 1.3 | 10.4 | 1 | 0.5 | 9.9 | 6 | 0.5 | 10.1 | 3 | 0.7 |
| 14.0 | 13.7 | 2 | 1.4 | 14.5 | -4 | 0.7 | 13.0 | 7 | 0.4 | 13.8 | 1 | 0.8 |
| 17.5 | 17.0 | 3 | 1.6 | 18.0 | -3 | 1.1 | 16.3 | 7 | 0.3 | 17.3 | 1 | 0.5 |
| 22.4 | 21.4 | 5 | 1.2 | 22.8 | -2 | 1.3 | 20.7 | 8 | 0.7 | 21.9 | 2 | 0.8 |
| 28.0 | 26.4 | 6 | 1.5 | 28.2 | -1 | 1.5 | - | - | - | 27.1 | 3 | 0.6 |

Se aprecia que en el muro M3 el error es mayor para drifts pequeños, esto se puede deber a la sensibilidad que posee el programa de fotogrametría con el cual se analiza.

Tabla 5.2:Desplazamiento horizontal promedio para la altura máxima del muro M4.

| Drift nominal [mm] | Desplazamiento promedio [mm] - Muro M4 | | | | | | | | | | | |
|--------------------|--|-----------|----------|------|-----------|----------|------|-----------|----------|------|-----------|----------|
| | FPA | | | FPB | | | MEA | | | MEB | | |
| | Prom | Error [%] | σ | Prom | Error [%] | σ | Prom | Error [%] | σ | Prom | Error [%] | σ |
| 0.7 | 0.7 | 1 | 0.5 | 0.6 | 11 | 0.2 | 0.6 | 11 | 0.6 | 0.6 | 10 | 0.1 |
| 1.05 | 1.0 | 8 | 0.6 | 0.9 | 14 | 0.1 | 0.9 | 14 | 0.6 | 0.9 | 13 | 0.2 |
| 1.4 | 1.3 | 8 | 0.7 | 1.2 | 18 | 0.0 | 1.2 | 14 | 0.6 | 1.2 | 14 | 0.2 |
| 2.1 | 1.9 | 9 | 0.8 | 1.8 | 16 | 0.0 | 1.8 | 16 | 0.5 | 1.8 | 13 | 0.3 |
| 2.8 | 2.6 | 8 | 1.0 | 2.3 | 17 | 0.1 | 2.4 | 14 | 0.6 | 2.5 | 12 | 0.3 |
| 4.2 | 3.9 | 8 | 1.1 | 3.6 | 15 | 0.1 | 3.6 | 15 | 0.6 | 3.7 | 12 | 0.4 |
| 5.6 | 5.1 | 9 | 1.2 | 4.8 | 15 | 0.1 | 4.8 | 14 | 0.7 | 4.9 | 12 | 0.6 |
| 7.0 | 6.5 | 8 | 1.5 | 6.0 | 14 | 0.1 | 6.0 | 15 | 0.7 | 6.1 | 12 | 0.7 |
| 10.5 | 9.6 | 8 | 1.4 | 9.0 | 14 | 0.3 | 9.0 | 14 | 0.5 | 9.3 | 11 | 0.7 |
| 14.0 | 12.9 | 8 | 1.5 | 12.1 | 14 | 0.5 | 12.2 | 13 | 0.4 | 12.5 | 11 | 0.7 |
| 17.5 | 16.2 | 8 | 1.3 | 15.2 | 13 | 0.7 | 15.1 | 14 | 0.3 | 15.8 | 10 | 0.6 |
| 22.4 | 21.0 | 6 | 0.8 | 19.5 | 13 | 0.9 | 19.5 | 13 | 0.2 | 20.0 | 11 | 0.3 |
| 28.0 | - | - | - | 24.4 | 13 | 1.0 | 24.4 | 13 | 0.2 | - | - | - |

En el muro M4 el resultado del desplazamiento horizontal promedio para la máxima altura difiere en un 15% aproximadamente del drift nominal, a diferencia del muro M3 el error se mantiene constante para los distintos drifts.

5.3.2 Aporte del corte

Se calcula el desplazamiento horizontal en el borde del muro – a una distancia de 60 [mm] del borde - debido al corte, este se calcula a partir de la deformación ϵ_{xy} , para esto se realiza una suma acumulada de la deformación ϵ_{xy} correspondiente a cada tramo de altura d_y , la suma acumulada se hace desde la base del muro hasta el extremo superior de este y se amplifica por la altura d_y . Los resultados del muro M3 se presentan Figura 5.15; los resultados del muro M4 se presentan en la Figura 5.16, para la probeta FPA, FPB, MEA y MEB respectivamente.

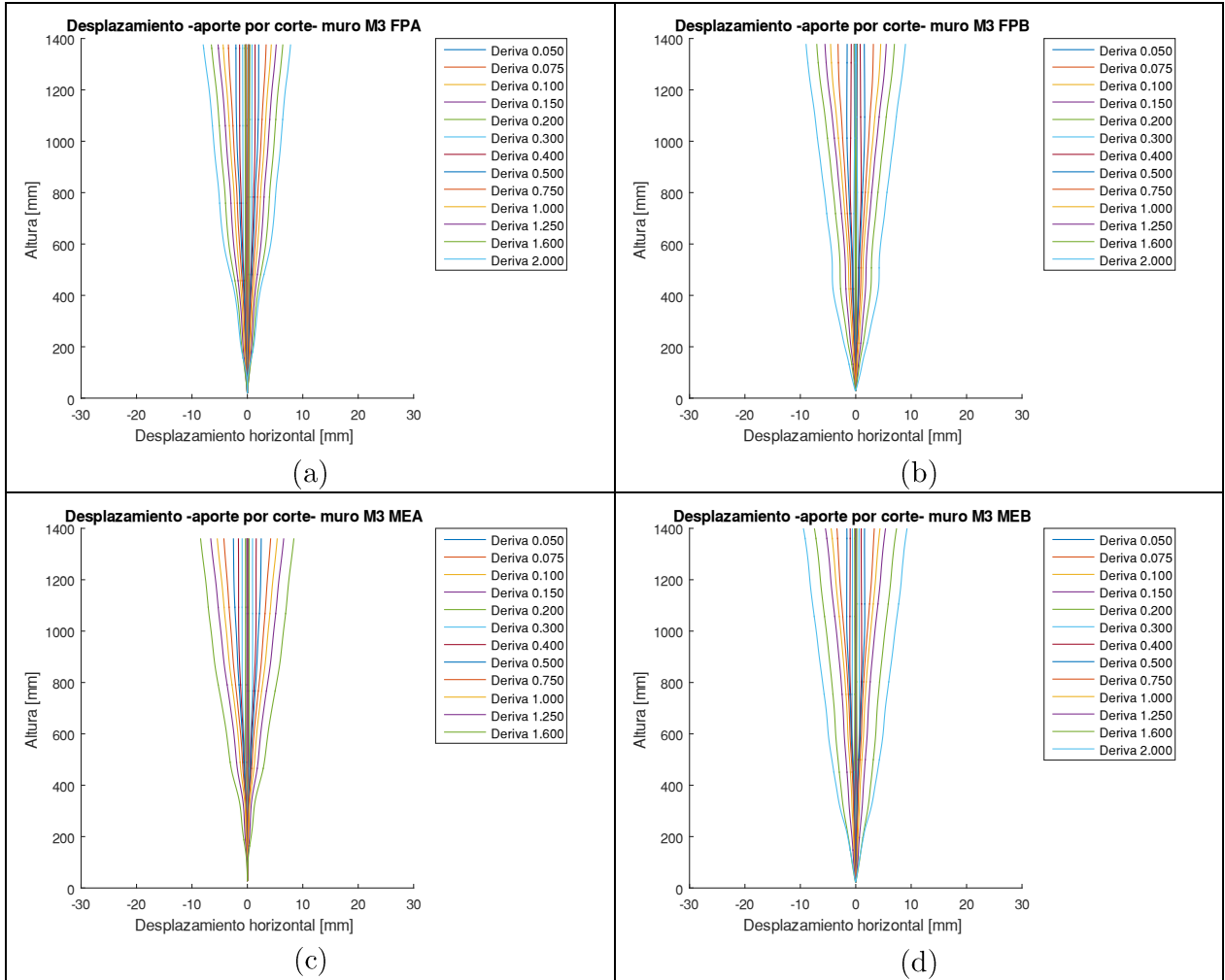


Figura 5.15: Desplazamiento horizontal en el borde del muro para las probetas del muro M3: (a) M3 FPA; (b) M3 FPB; (c) M3 MEA; (d) M3 MEB.

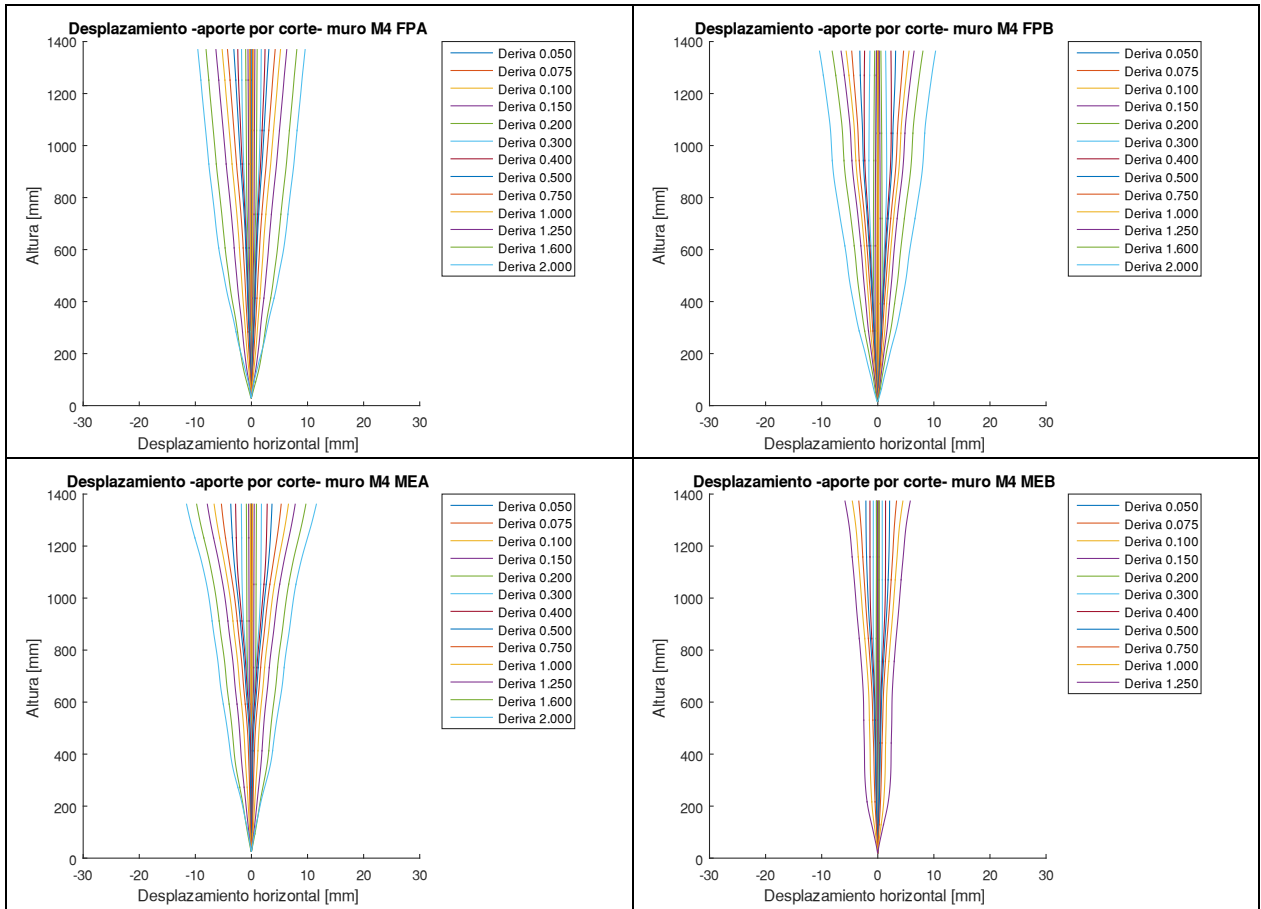


Figura 5.16: Desplazamiento horizontal en el borde del muro para las probetas del muro M4: (a) M4 FPA; (b) M4 FPB; (c) M4 MEA; (d) M4 MEB.

A continuación se presenta un resumen de los desplazamientos horizontales promedio debidos al corte en la altura máxima del muro, en la Tabla 5.3 se muestran los resultados para el muro M3, mientras que en la Tabla 5.4 se muestran los resultados para el muro M4.

Tabla 5.3: Desplazamiento horizontal promedio debido al corte – Muro M3.

| Drift nominal [mm] | Desplazamiento horizontal promedio debido al corte [mm] – Muro M3 | | | | | | | |
|--------------------|---|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| | FPA | | FPB | | MEA | | MEB | |
| | Prom | [%] | Prom | [%] | Prom | [%] | Prom | [%] |
| 0.7 | 0.2 | 22 | 0.2 | 26 | 0.1 | 9 | 0.1 | 13 |
| 1.1 | 0.2 | 20 | 0.2 | 21 | 0.0 | 3 | 0.1 | 10 |
| 1.4 | 0.3 | 19 | 0.3 | 19 | 0.0 | 2 | 0.1 | 10 |
| 2.1 | 0.4 | 17 | 0.3 | 14 | 0.1 | 4 | 0.1 | 3 |
| 2.8 | 0.5 | 16 | 0.2 | 7 | 0.3 | 12 | 0.2 | 7 |
| 4.2 | 0.9 | 20 | 0.1 | 2 | 0.9 | 22 | 0.6 | 14 |
| 5.6 | 1.4 | 25 | 0.8 | 14 | 1.6 | 29 | 1.0 | 18 |
| 7.0 | 2.1 | 29 | 1.5 | 22 | 2.5 | 36 | 1.6 | 23 |
| 10.5 | 3.4 | 32 | 3.2 | 30 | 4.2 | 40 | 3.4 | 32 |
| 14.0 | 4.4 | 31 | 4.5 | 32 | 5.4 | 39 | 4.4 | 31 |
| 17.5 | 5.3 | 30 | 5.5 | 32 | 6.6 | 38 | 5.4 | 31 |
| 22.4 | 6.5 | 29 | 7.0 | 31 | 8.4 | 38 | 7.4 | 33 |
| 28.0 | 7.9 | 28 | 9.0 | 32 | - | - | 9.4 | 33 |

En el muro M3 el aporte del corte en el desplazamiento horizontal se mueve entre un 30 y 40% del desplazamiento horizontal total.

Tabla 5.4: Desplazamiento horizontal promedio debido al corte – Muro M4.

| Drift nominal [mm] | Desplazamiento horizontal promedio debido al corte – Muro M4 | | | | | | | |
|--------------------|--|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| | FPA | | FPB | | MEA | | MEB | |
| | Prom | [%] | Prom | [%] | Prom | [%] | Prom | [%] |
| 0.7 | 0.1 | 13 | 0.2 | 32 | 0.0 | 0 | 0.3 | 36 |
| 1.1 | 0.2 | 20 | 0.1 | 13 | 0.1 | 10 | 0.2 | 21 |
| 1.4 | 0.3 | 24 | 0.0 | 3 | 0.2 | 15 | 0.2 | 12 |
| 2.1 | 0.6 | 29 | 0.2 | 12 | 0.5 | 24 | 0.0 | 1 |
| 2.8 | 1.0 | 37 | 0.6 | 20 | 0.9 | 32 | 0.2 | 8 |
| 4.2 | 1.8 | 42 | 1.4 | 33 | 1.8 | 43 | 0.8 | 19 |
| 5.6 | 2.4 | 43 | 2.4 | 42 | 2.8 | 50 | 1.4 | 25 |
| 7.0 | 3.1 | 45 | 3.2 | 46 | 3.7 | 53 | 2,1 | 30 |
| 10.5 | 4.3 | 41 | 4.6 | 44 | 5.3 | 51 | 3.4 | 32 |
| 14.0 | 5.2 | 37 | 5.6 | 40 | 6.6 | 47 | 4.5 | 32 |
| 17.5 | 6.3 | 36 | 6.5 | 37 | 7.8 | 45 | 5.8 | 33 |
| 22.4 | 8.1 | 36 | 8.1 | 36 | 9.8 | 44 | - | - |
| 28.0 | 9.6 | 34 | 10.4 | 37 | 11.6 | 41 | - | - |

En el muro M4 el aporte del corte en el desplazamiento horizontal es cercano al 40%.

5.3.3 Deformación vertical

Se presenta la deformación vertical del muro en el borde del muro - a 60 [mm] del borde - estos resultados se obtienen con el fin de saber el largo de la rótula plástica, para ello se considera que el acero está fluyendo a partir de una deformación vertical equivalente a 0.005.

Las deformaciones verticales promedio para las distintas derivas en la Figura 5.17. Para la probeta M4 se presentan las deformaciones verticales promedio para las distintas derivas en la Figura 5.18.

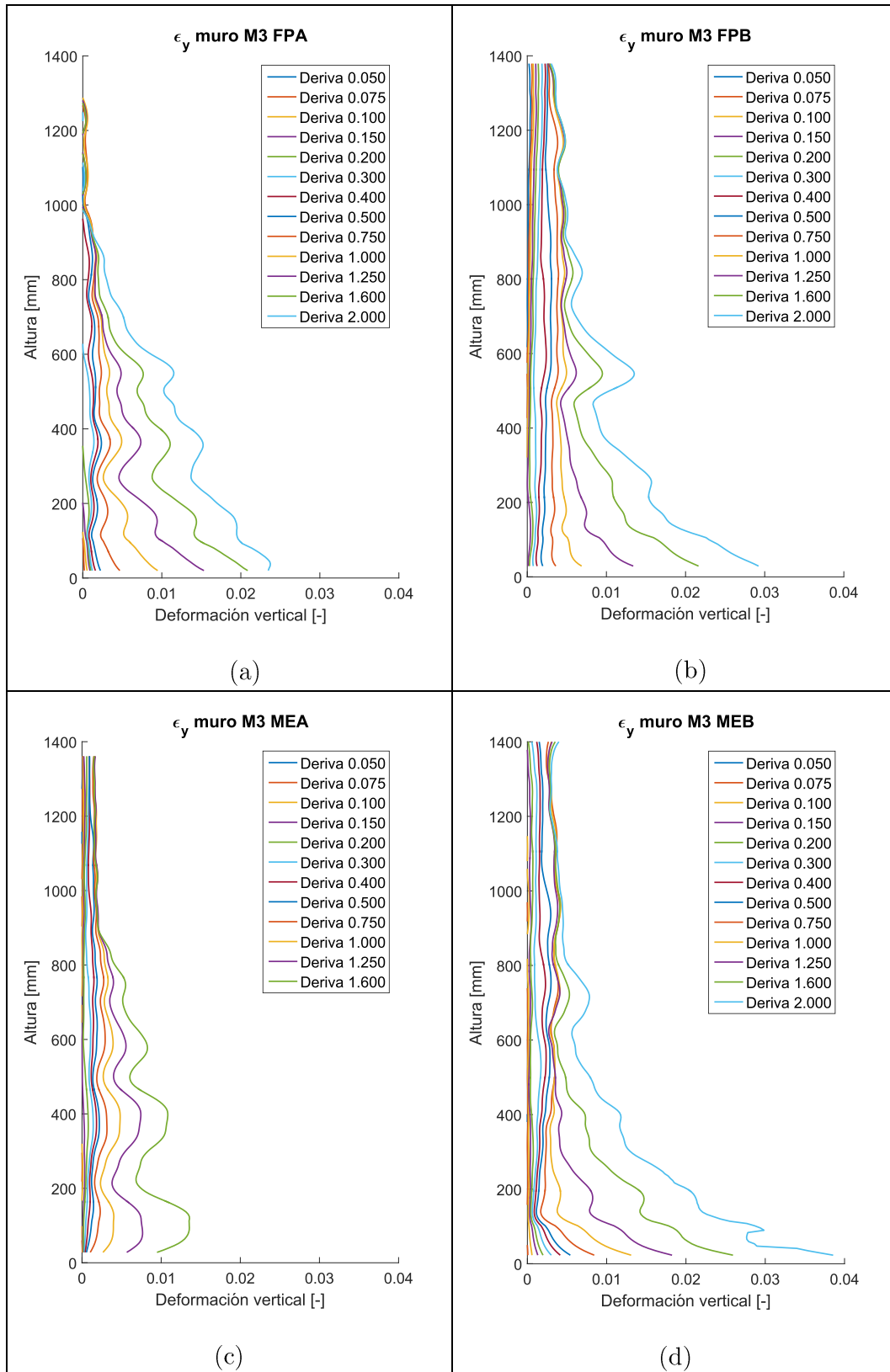


Figura 5.17: Deformación vertical para el muro M3: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB, (c); Probeta MEA; (d) Probeta MEB.

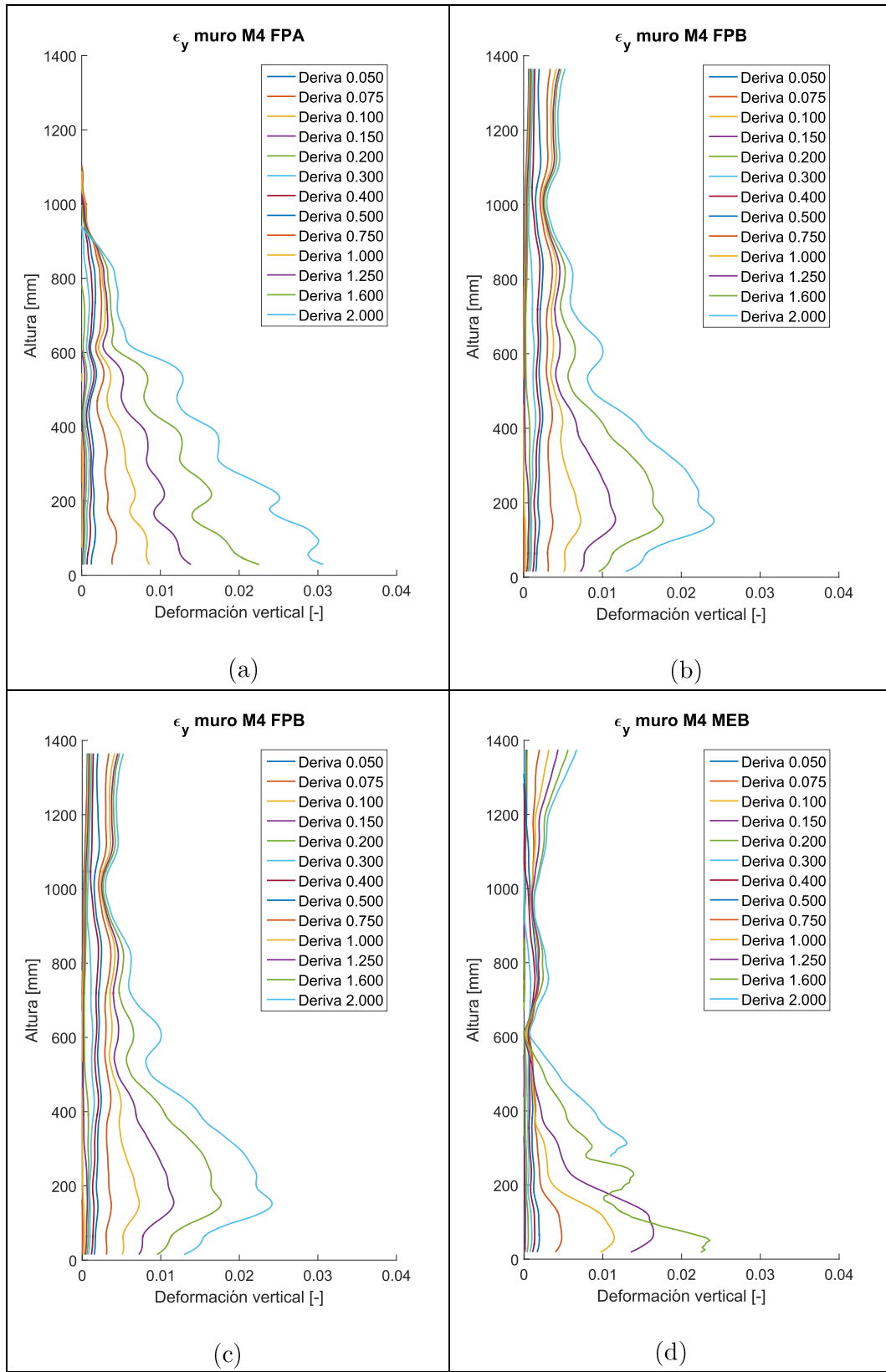


Figura 5.18: Deformación vertical para el muro M4: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB, (c) Probeta MEA; (d) Probeta MEB.

Tabla 5.5: Largo de rótula plástica.

| ϵ | Largo rótula plástica* [mm] | | | | | | | |
|------------|-----------------------------|------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|
| | M3 | | | | M4 | | | |
| | FPA | FPB | MEA | MEB | FPA | FPB | MEA | MEB |
| 0.005 | 707.5 | 1003 | 775.9 | 805.5 | 680.6 | 880 | 646.5 | 477.3 |
| Prom | 855 | | 791 | | 780 | | 562 | |

5.3.4 Avance del agrietamiento

Se presentan las deformaciones verticales a lo ancho del muro, primero se analiza una columna de muro a 60 [mm] del borde, luego a 180 [mm], 300 [mm] y 420 [mm] del borde, tal como se muestra en la Figura 5.19.

Para la probeta M3 se presentan las deformaciones verticales a lo ancho del muro en la Figura 5.20, Figura 5.21, Figura 5.22, Figura 5.23. Para la probeta M4 se presentan las deformaciones verticales en la Figura 5.24, Figura 5.25, Figura 5.26, Figura 5.27.

Las deformaciones verticales se calculan como el promedio de las deformaciones para los tres peaks con la misma deriva positiva, es decir, cuando el muro se encuentra traccionado en el lado izquierdo y comprimido en el lado derecho del muro.

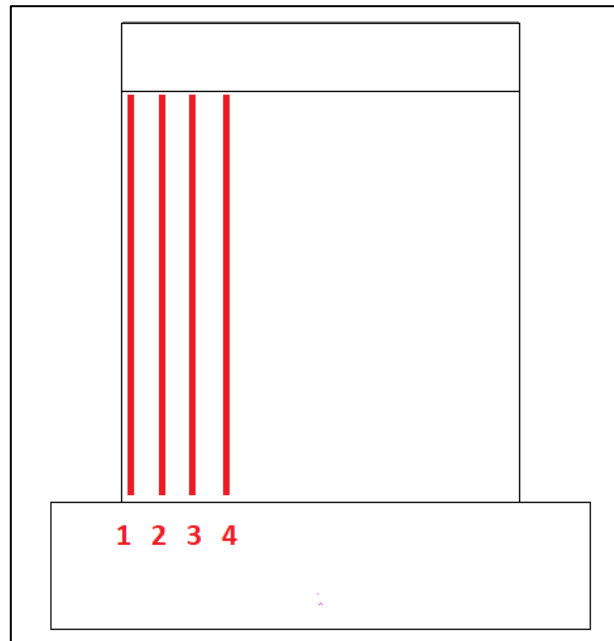


Figura 5.19: Esquema de columnas donde se extrajeron las deformaciones verticales en los muros.

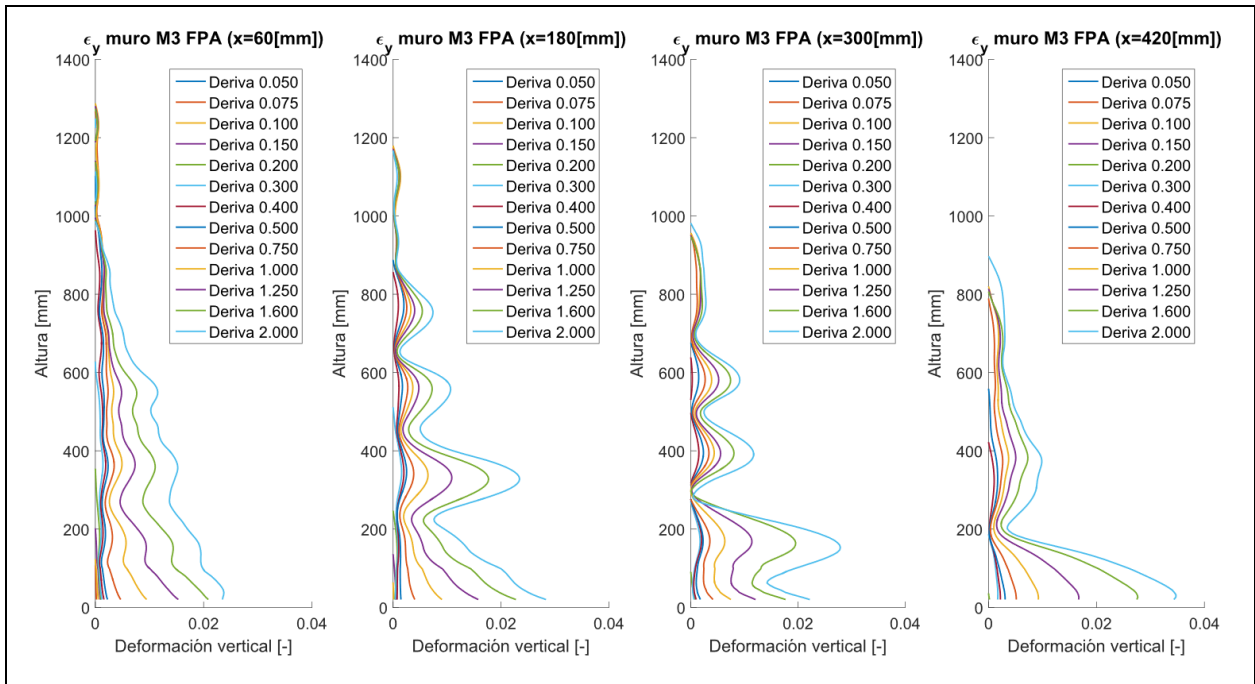


Figura 5.20: Deformación vertical a distintas distancias del borde del muro M3 FPA.

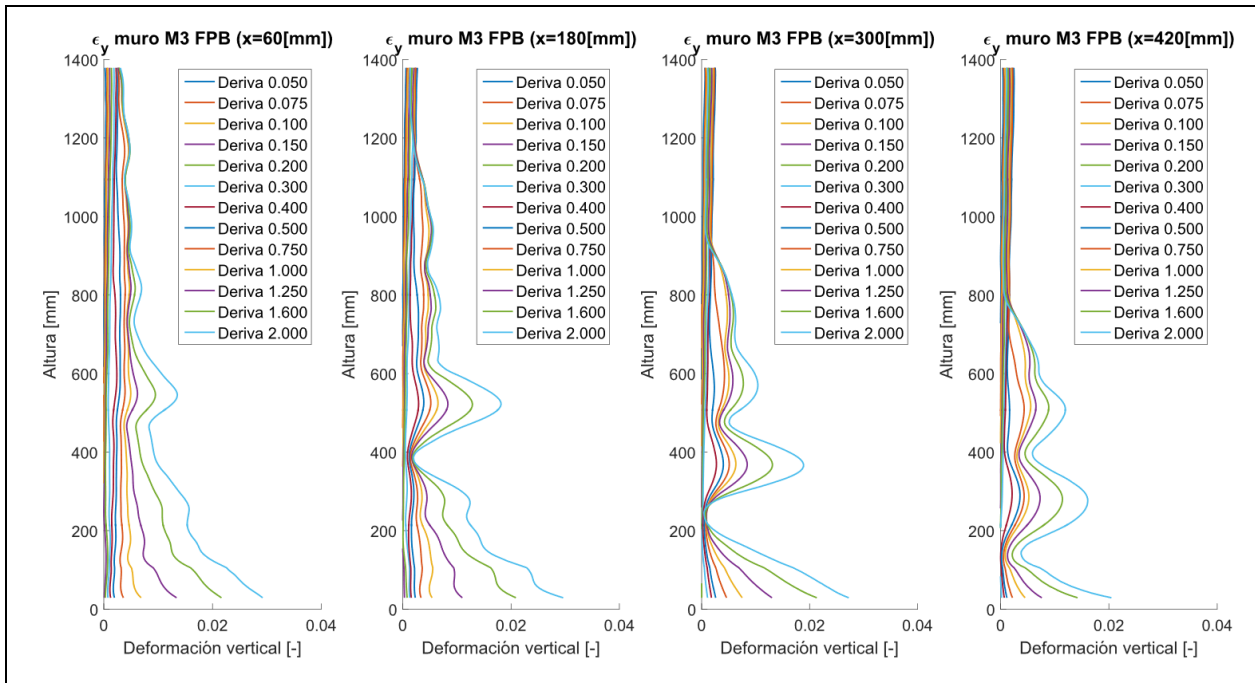


Figura 5.21: Deformación vertical a distintas distancias del borde del muro M3 FPB.

De la Figura 5.20 y Figura 5.21 se observa que existe una tendencia en las deformaciones verticales a aumentar a medida que se avanza a la base del muro, esto corresponde a fallas de flexión, pero también se aprecia que las grietas avanzan en una diagonal de alrededor de 45°, las cuales son características de fallas a corte.

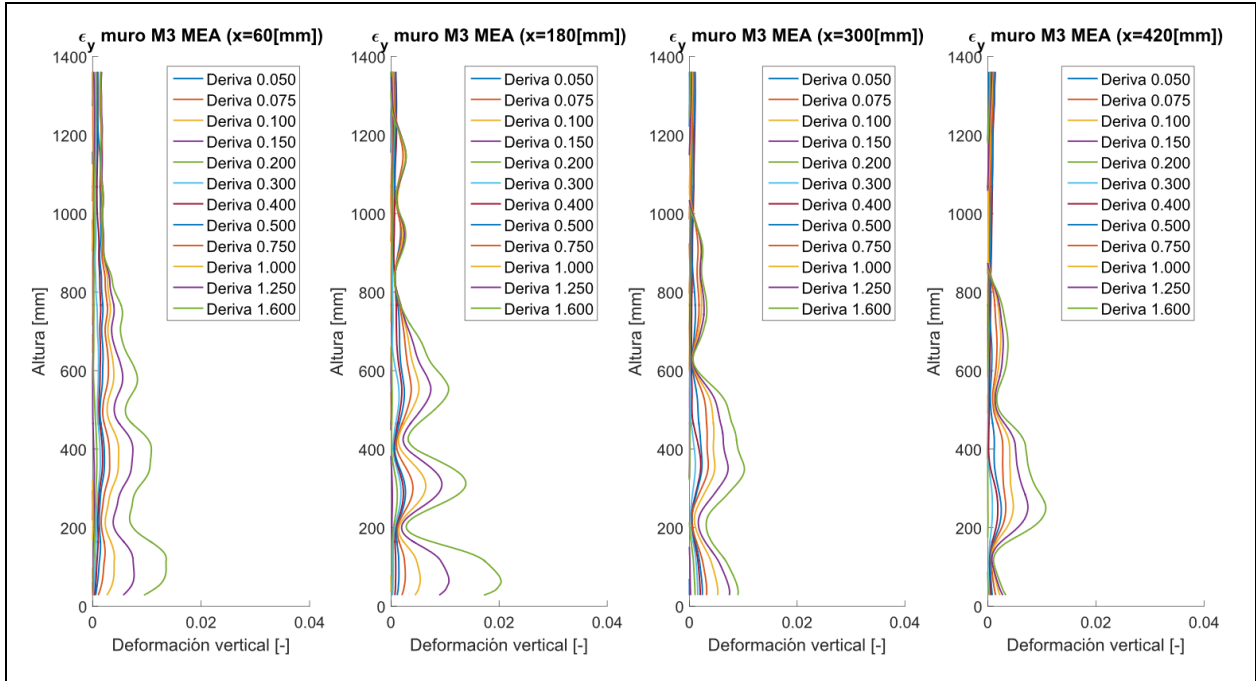


Figura 5.22: Deformación vertical a distintas distancias del borde del muro M3 MEA.

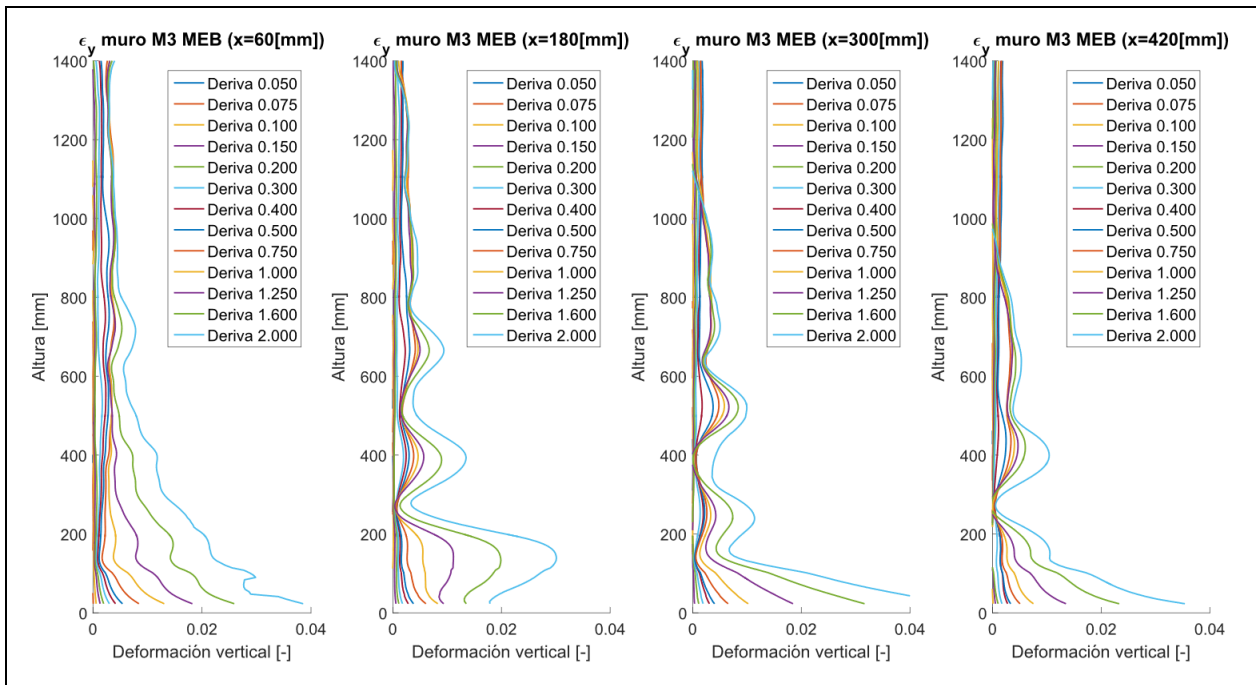


Figura 5.23: Deformación vertical a distintas distancias del borde del muro M3 MEB.

En el muro M3 MEA correspondiente a la Figura 5.22, no se alcanzan a desarrollar los seis peaks de la deriva del 2%, por ende se decide omitir los resultados de dicha deriva, puesto que los datos se encuentran distorsionados debido a la falla, en la Figura 5.23 se aprecia una concentración de deformaciones verticales en la base del muro, las cuales se deben a fisuras de flexión, del mismo

modo que en las probetas de fierro preparado están presentes las fisuras de corte, correspondientes a una fisura en un ángulo de aproximadamente 45°.

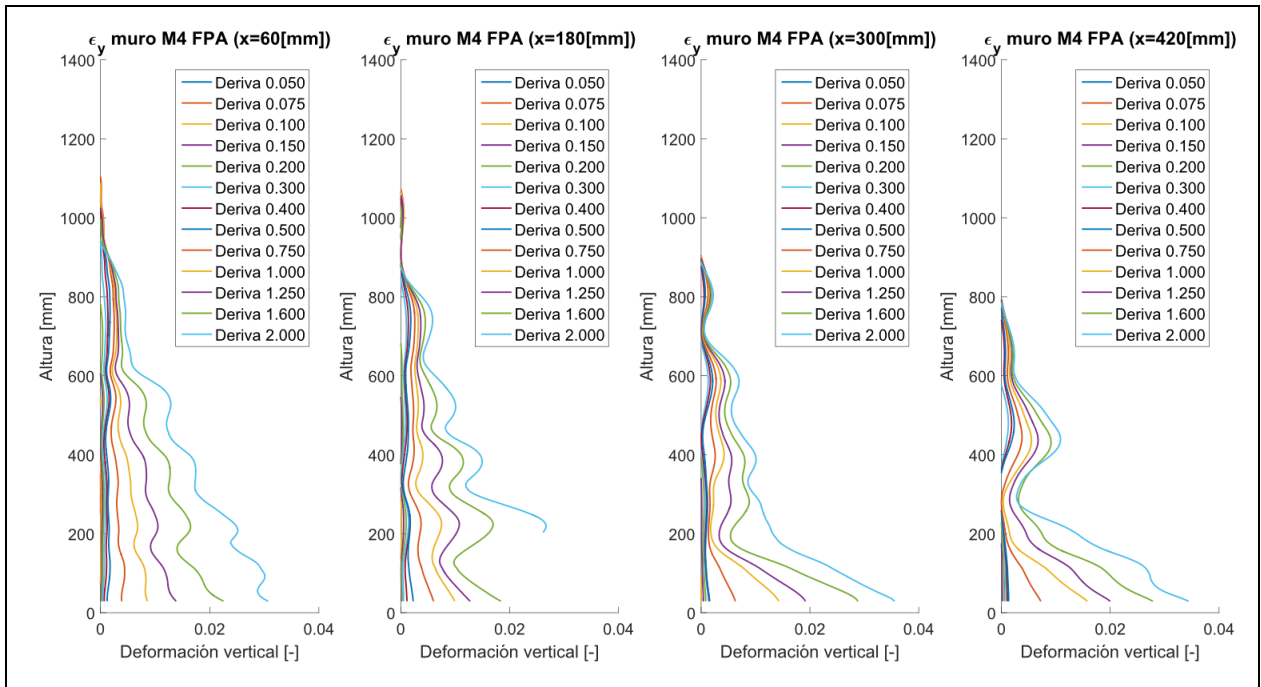


Figura 5.24: Deformación vertical a distintas distancias del borde del muro M4 FPA.

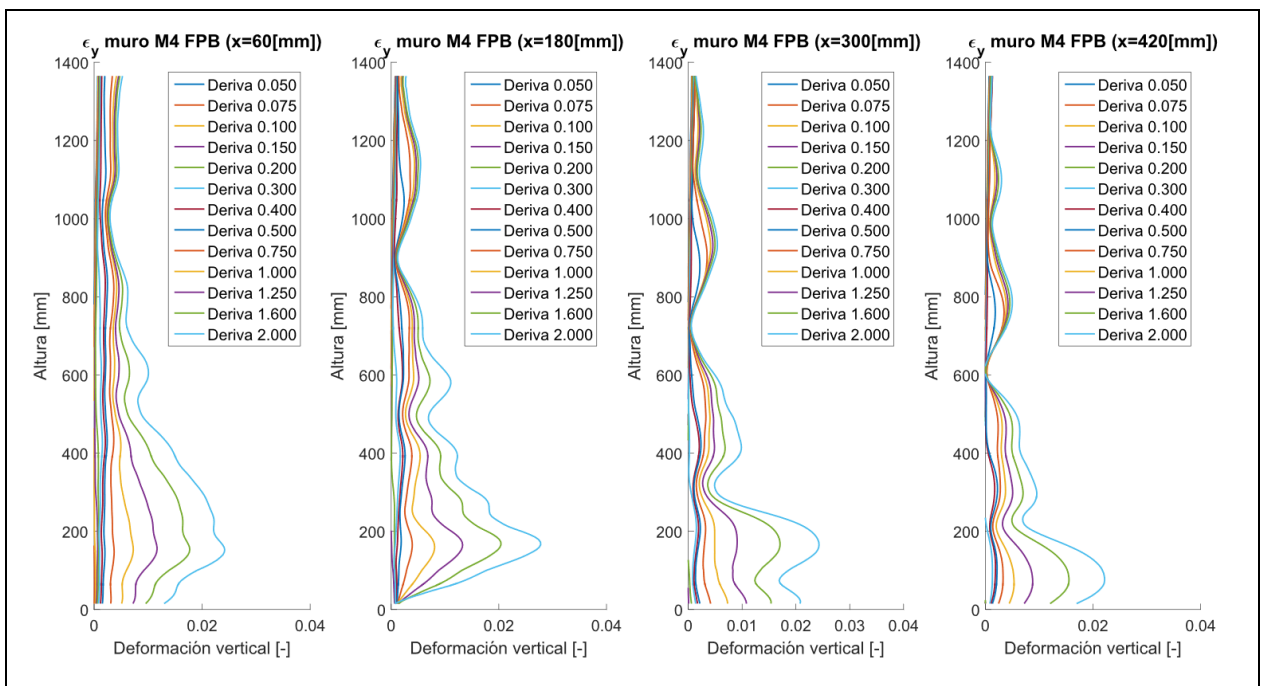


Figura 5.25: Deformación vertical a distintas distancias del borde del muro M4 FPB.

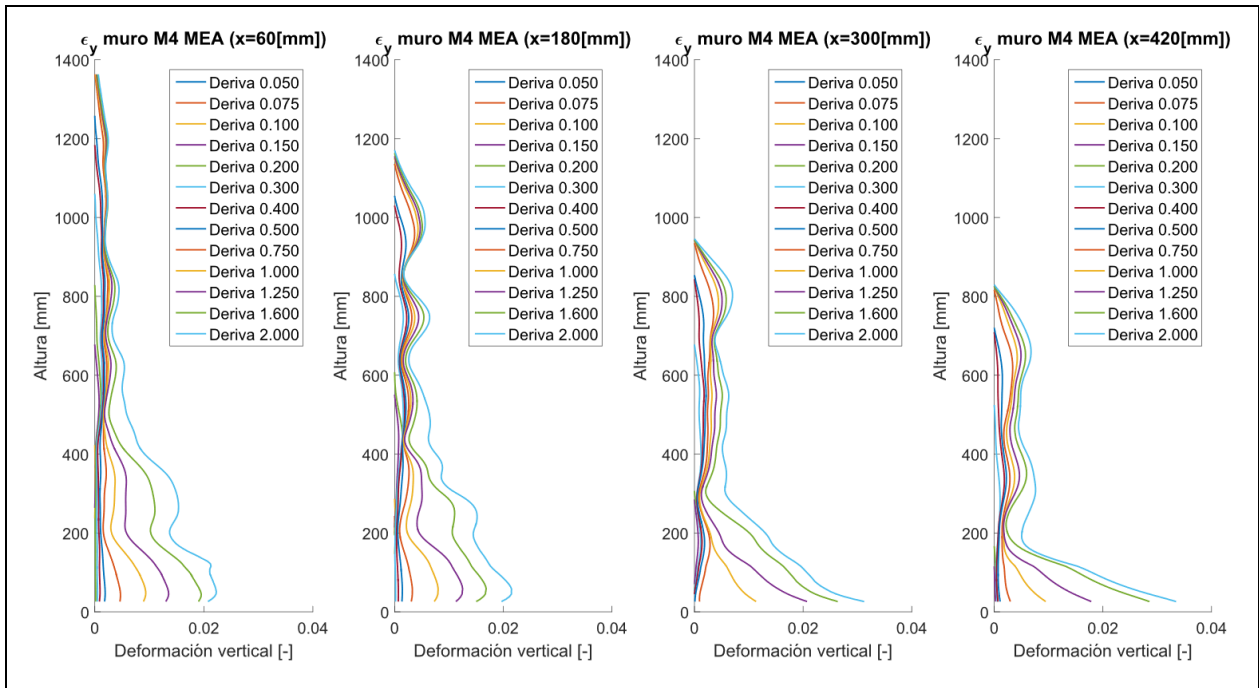


Figura 5.26: Deformación vertical a distintas distancias del borde del muro M4 MEA.

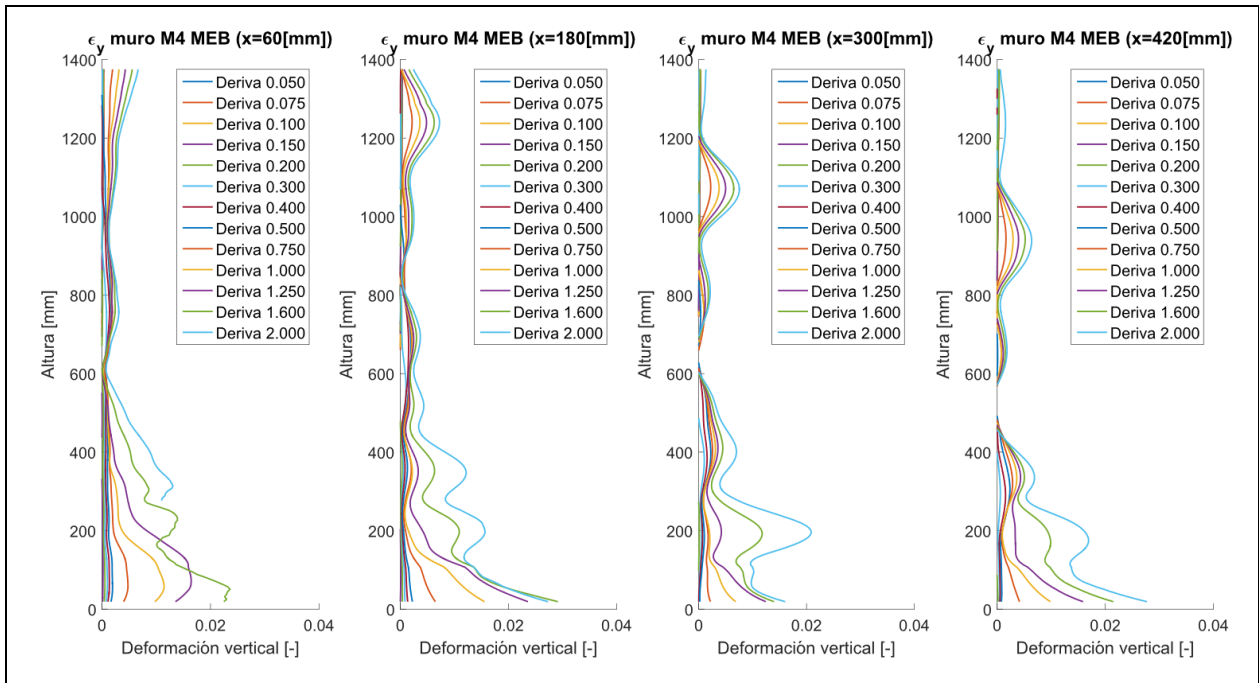


Figura 5.27: Deformación vertical a distintas distancias del borde del muro M4 MEB.

En la Figura 5.27 se aprecia una grieta principal en aproximadamente 45°, mientras en la base se concentran deformaciones verticales que son paralelas a la base delo muro características de falla por flexión. Cabe destacar que en la ^{iError!} para la deriva de 2% se pierden los datos desde la base del muro hasta una altura de aproximadamente 300[mm] debido a

que se pierde el recubrimiento del muro, en consecuencia, se pierde la correlación entre dos fotografías consecutivas.

5.3.5 Fisuras

Se presenta la distribución de fisuras para un drift del 2% y -2%, en el caso del drift positivo el lado izquierdo del muro se encuentra traccionado y el lado derecho se encuentra comprimido, mientras que para el drift negativo es viceversa. La barra de colores está graduada para una deformación entre -0.02 y 0.02 [mm/mm].

Muro M3

Deformación horizontal

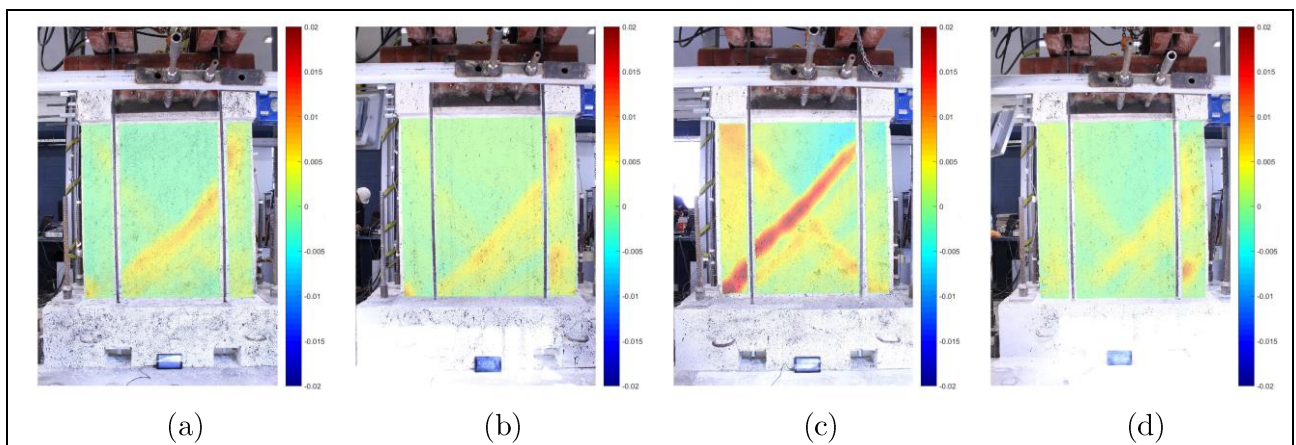


Figura 5.28: Deformación horizontal para un drift del -2% para el muro M3: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB; (c) Probeta MEA; (d) Probeta MEB.

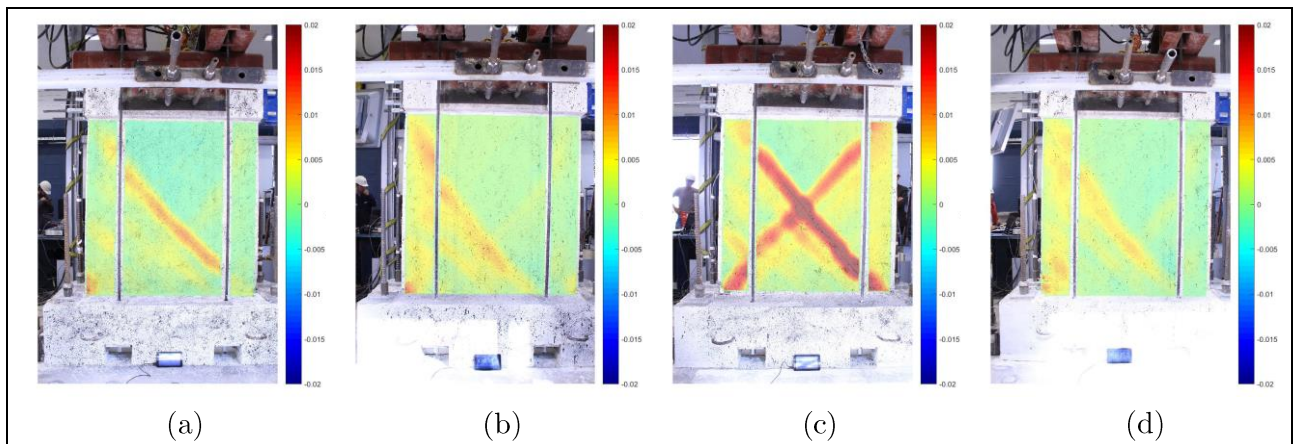


Figura 5.29: Deformación horizontal para un drift del 2% para el muro M3: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB; (c) Probeta MEA; (d) Probeta MEB.

La probeta M3 MEA presenta mayor deterioro para el mismo nivel de desplazamiento que las demás probetas. La probeta M3 MEB presenta bajo nivel de deformación, este comportamiento difiere a lo esperado, la razón de este resultado se puede deber a un mal procedimiento en la toma de fotografías durante el desarrollo del ensayo, lo cual queda reflejado en el haz de luz que atraviesa la fundación del muro, ver Figura 5.28 y Figura 5.29.

Deformación vertical

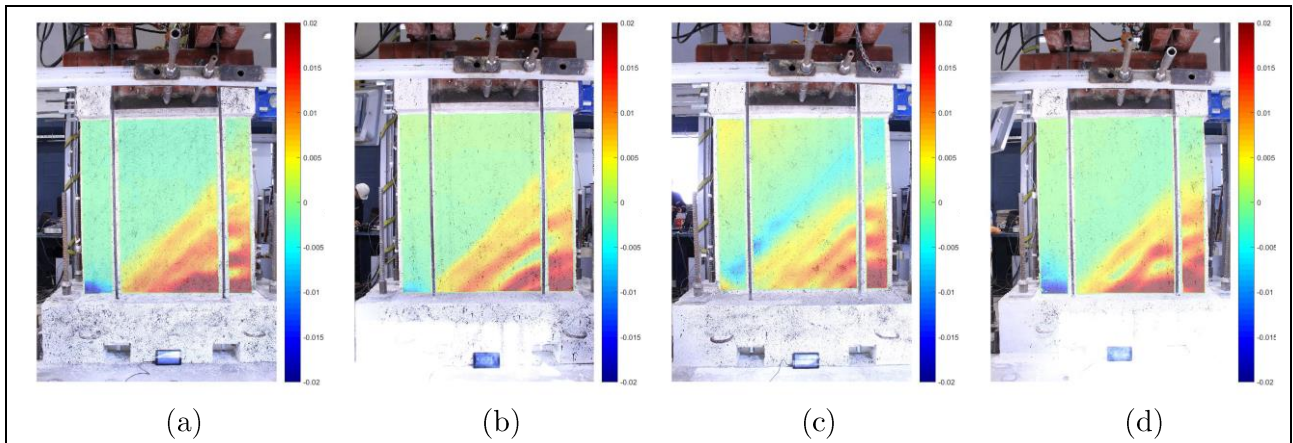


Figura 5.30: Deformación vertical para un drift del -2% para el muro M3: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB; (c) Probeta MEA; (d) Probeta MEB.

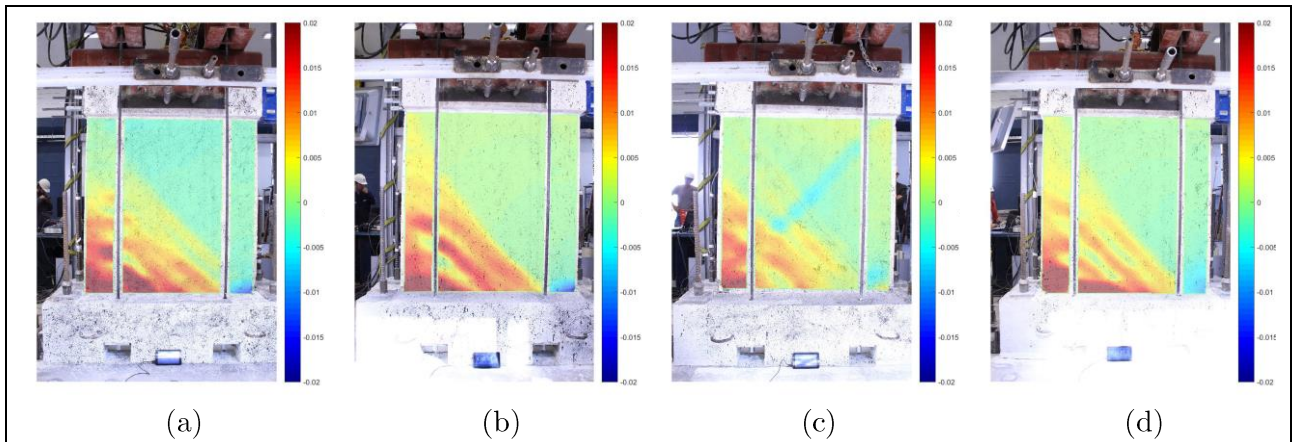


Figura 5.31: Deformación vertical para un drift del 2% para el muro M3: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB; (c) Probeta MEA; (d) Probeta MEB.

La deformación vertical de la probeta M3 MEA es menor que las demás probetas, esto se explica a que presenta mayor deformación horizontal.

Muro M4

Deformación horizontal

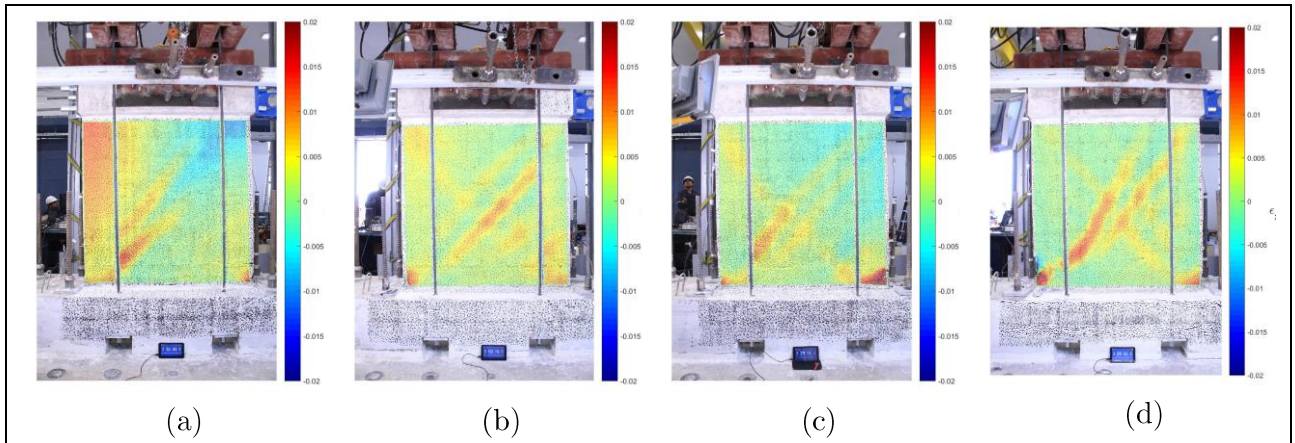


Figura 5.32: Deformación horizontal para un drift del -2% para el muro M4: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB; (c) Probeta MEA; (d) Probeta MEB.

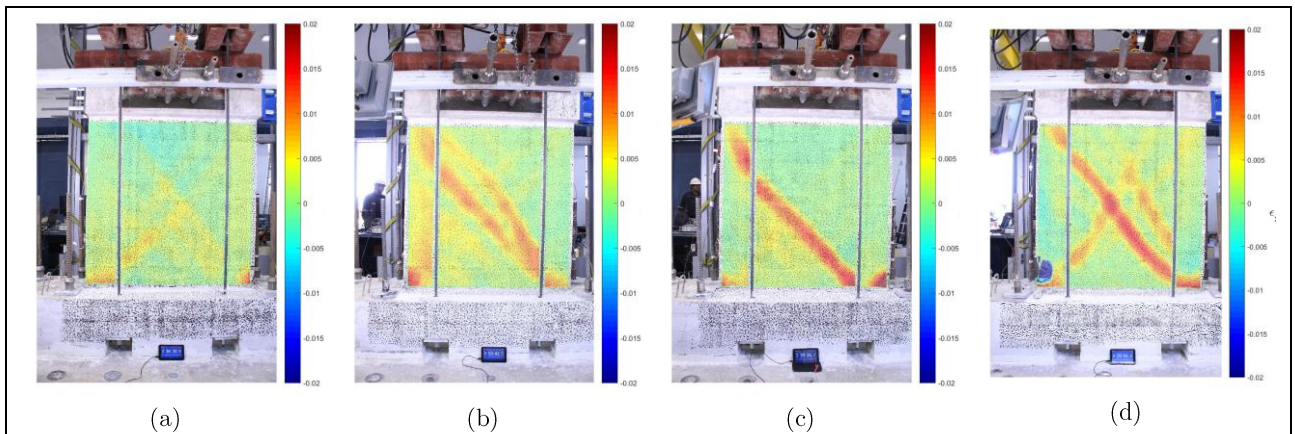


Figura 5.33: Deformación horizontal para un drift del 2% para el muro M4: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB; (c) Probeta MEA; (d) Probeta MEB.

La grieta principal tiene una mayor deformación horizontal para las probetas construidas con malla electrosoldada, tal como se aprecia en la Figura 5.32 y Figura 5.33, mientras que las grietas en la probetas construidas con fierro preparado se distribuyen en varias grietas con un ángulos de 45° .

Deformación vertical

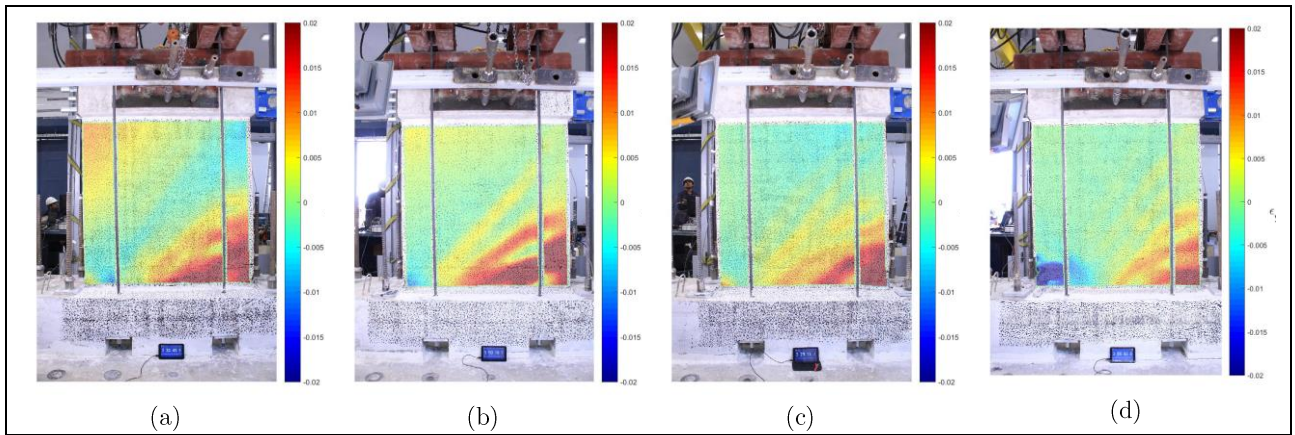


Figura 5.34: Deformación vertical para un drift del -2% para el muro M4: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB; (c) Probeta MEA; (d) Probeta MEB.

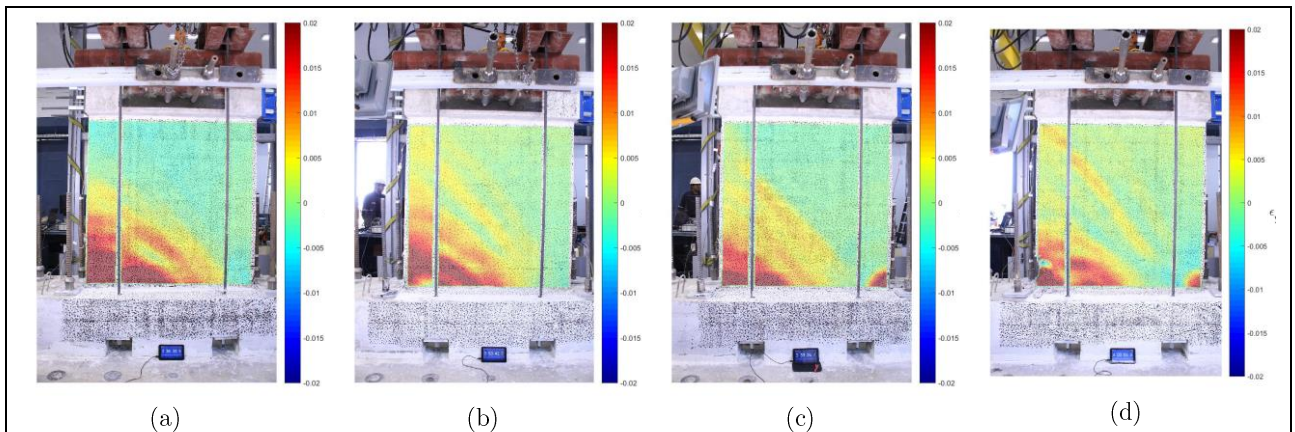


Figura 5.35: Deformación vertical para un drift del 2% para el muro M4: (a) Probeta FPA; (b) Probeta FPB; (c) Probeta MEA; (d) Probeta MEB.

En el caso de las probetas construidas con mallas electrosoldadas -M4 MEA y M4 MEB- las deformaciones verticales se concentran más en la base en caso de las probetas construidas con hierro preparado, tal como se aprecia en la Figura 5.34 y Figura 5.35.

Capítulo 6

Resultados analíticos

Se analizan los muros de hormigón armado mediante elementos finitos con el fin de comparar estos resultados con los resultados experimentales obtenidos mediante el uso de sensores LVDT's.

Con el modelamiento mediante Safe-TB se definen las propiedades de los materiales, tales como el módulo de elasticidad, límite de fluencia, entre otros, pero no se puede definir que la enfierradura corresponda a la malla electrosoldada o fierro preparado, de este modo para caracterizar la malla electrosoldada solo se pueden modificar las propiedades anteriormente mencionadas.

6.1 Modelamiento

Para el modelamiento de los muros se define un mallado de 100 [mm], se enumeran los nodos y elementos desde izquierda a derecha y de abajo hacia arriba. En la Tabla 6.1 se muestra la cantidad de elementos y nodos para cada probeta.

Tabla 6.1: Elementos y nodos para cada probeta usados en modelación.

| Probeta | Elementos | Nodos |
|---------|-----------|-------|
| M3 | 338 | 381 |
| M4 | 378 | 429 |

Se muestra un esquema de modelamiento de la probeta M3 y M4, en la Figura 6.1 y Figura 6.2 respectivamente. En el modelo se empotran todos los puntos ubicados en la base de la fundación, por otro lado, se modelan como un elemento elástico la viga de coronamiento y la fundación del muro.

Con el fin de evitar concentración de tensiones en un solo punto la fuerza horizontal se distribuye a lo largo de 10 puntos tanto para el caso del muro M3 como M4.

Debido a que en este modelo de elementos finitos se fija el o los desplazamientos con el fin de encontrar la carga, se utiliza un punto de control de desplazamiento ubicado a la misma altura donde se aplica la fuerza horizontal, este punto pretendo modelar el lugar donde se ubica el sensor LVDT 0.

Tal como se menciona anteriormente se considera un mallado de 100 [mm], por ende, tal como se muestra en la Figura 6.1 y Figura 6.2 se modela el borde de muro con un ancho de dos elementos, equivalente a 200 [mm].

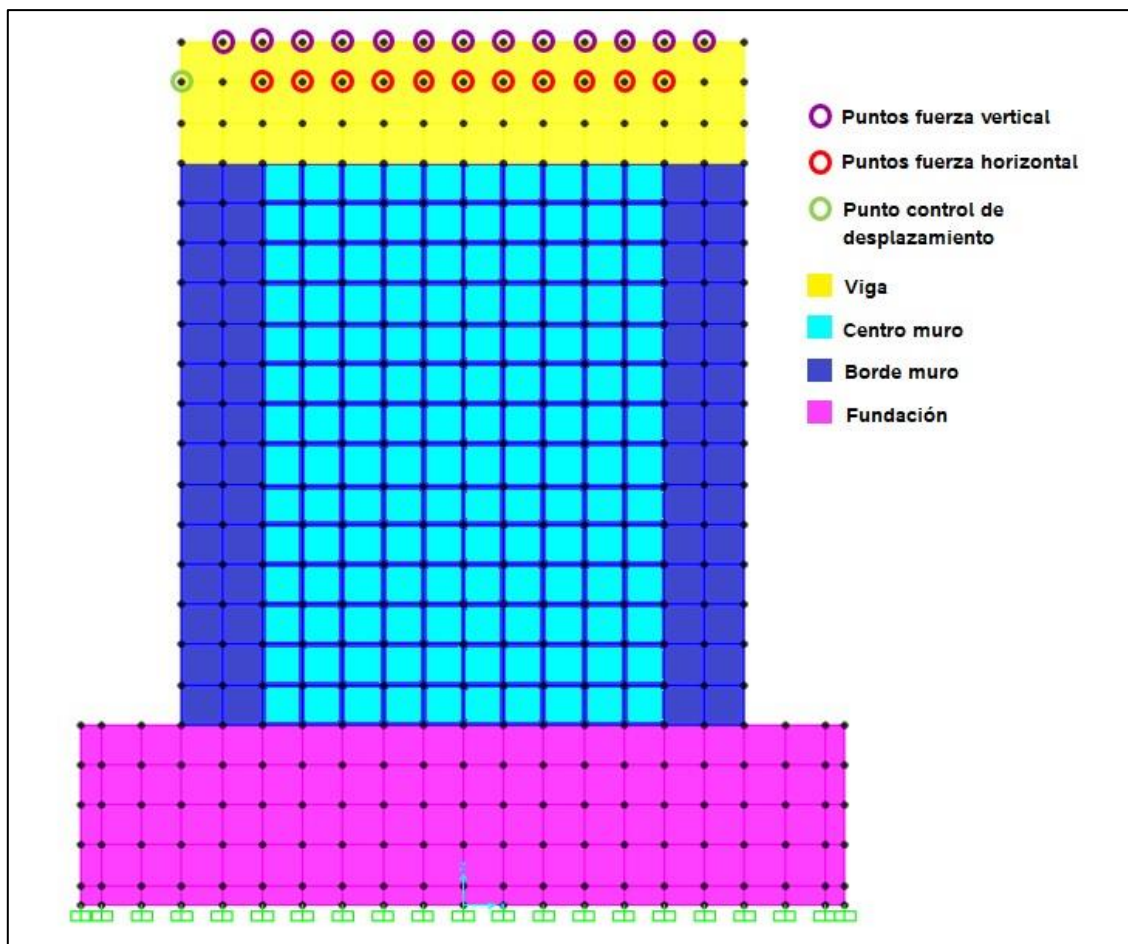


Figura 6.1: Modelo elementos finitos muro M3.

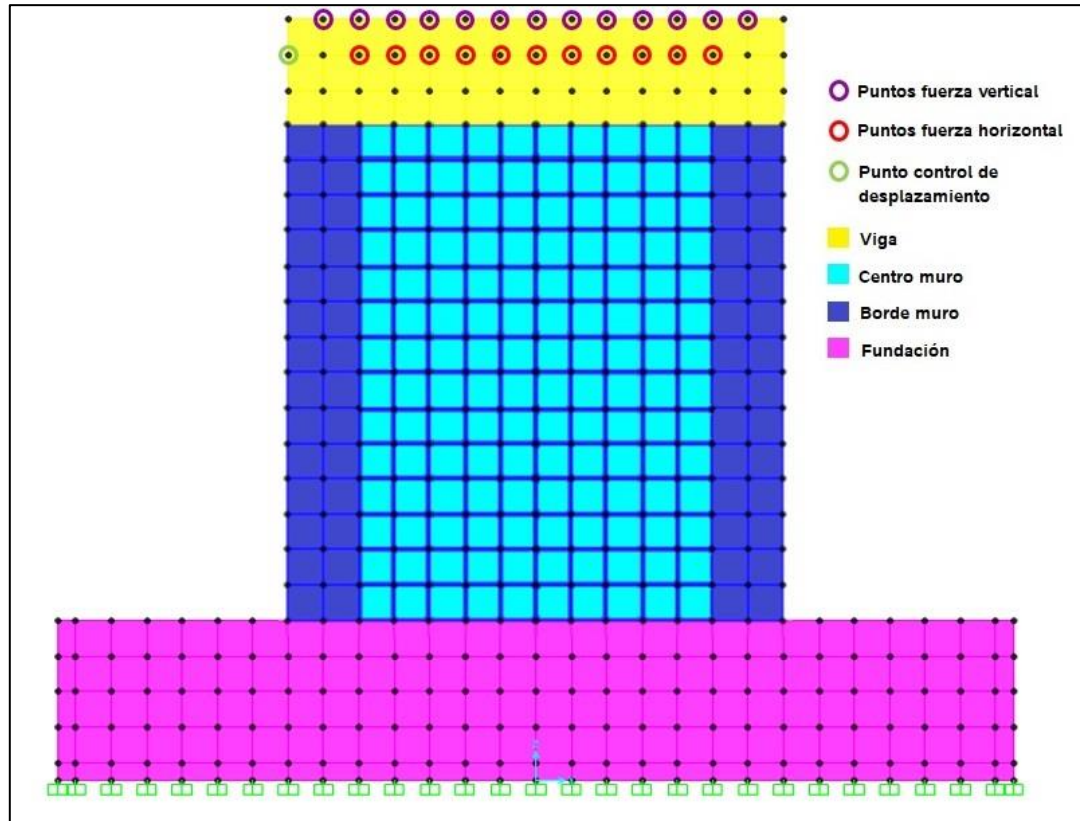


Figura 6.2: Modelo elementos finitos muro M4.

Los parámetros que se utilizan en el modelo se muestran en la Tabla 6.2 en el cual se especifican las propiedades de los materiales, coeficientes de las leyes constitutivas y las condiciones de los muros ensayados.

Tabla 6.2: Parámetros de modelación.

| Parámetro | M3 | | M4 | |
|--------------------------------|---------------------|-------|--------|-------|
| | FPA | MEA | FPA | MEA |
| Densidad, ρ [N/mm^3] | $2.5 \cdot 10^{-9}$ | | | |
| Coefficiente de Poisson, ν | 0.2 | | | |
| f_y [MPa] | 500 | 650 | 500 | 650 |
| Cuantía central hor [-] | 0.0021 | | 0.0035 | |
| Cuantía central ver [-] | 0.0021 | | 0.0035 | |
| Cuantía borde hor [-] | 0.0120 | | 0.0140 | |
| Cuantía borde ver [-] | 0.0220 | | 0.0220 | |
| ϵ_y | 0.0025 | | 0.0025 | |
| Recubrimiento [mm] | 15 | | 15 | |
| f'_c [MPa] | 39.65 | 38.50 | 32.25 | 30.85 |
| ϵ_{c0} | 0.004 | | | |

Tabla 6.3: Continuación Tabla 6.2.

| Parámetro | M3 | | M4 | |
|------------------|---------|----|-----|----|
| | FP | ME | FP | ME |
| ϵ_{cr} | 0.00008 | | | |
| Carga Axial [kN] | 558 | | 518 | |

6.2 Respuesta global

Para caracterizar el comportamiento o respuesta global de los muros mediante elementos finitos, se calcula el ciclo de histéresis y se compara con los resultados obtenidos experimentalmente con sensores LVDT's.

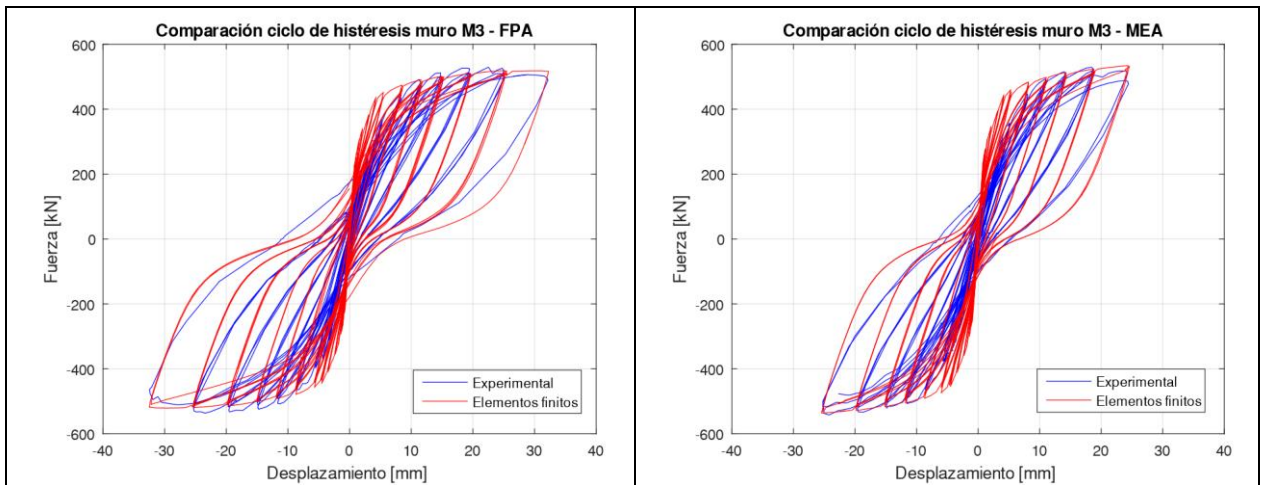


Figura 6.3: Comparación entre modelo de elementos finitos y resultados experimentales de muro M3 – FPA y muro M3 – MEA.

Se modela el muro M3 a partir de los desplazamientos obtenidos en la probeta M3 FPA, debido a que esta probeta alcanza los mayores desplazamientos y resiste mayor cantidad de ciclos. En la Figura 6.3 se aprecia que la respuesta numérica calculada mediante SAFE-TB predice una carga 4% menor de lo que el muro experimenta para desplazamientos mayores a 5 [mm]. Para desplazamientos menores a 5 [mm] el modelo numérico estima que se requiere una carga aproximadamente 50% mayor a la que experimentalmente requiere el muro M3.

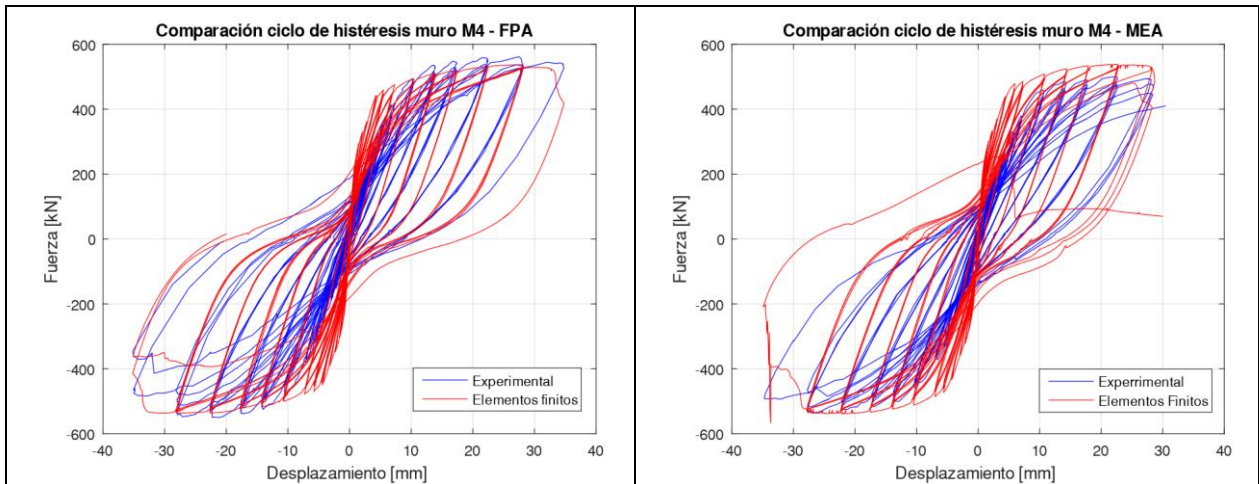


Figura 6.4: Comparación entre modelo de elementos finitos y resultados experimentales de muro M4 – FPA.

Se utiliza el resultado experimental del muro M4 – FPA para caracterizar el comportamiento del muro M4, debido a que esta probeta alcanza el desplazamiento mayor y resiste más ciclos que las demás probetas M4. En la Figura 6.4 se aprecia que el modelo de elemento finitos difiere en un 4% de la carga experimental para desplazamientos mayores a 5 [mm]. En el caso de los desplazamientos menores a 5 [mm] el modelo de elementos finitos estima que se requiere una carga mayor a la que se obtiene experimentalmente. Se destaca que para el último ciclo de carga el modelo numérico predice que el muro pierde resistencia de alrededor de un 30% aproximadamente.

6.3 Estudio de deformaciones unitarias

A continuación, se presenta la deformación y desplazamientos máximos para la probeta M3 y M4, tal como se muestra en la Figura 6.5 y Figura 6.7 respectivamente.

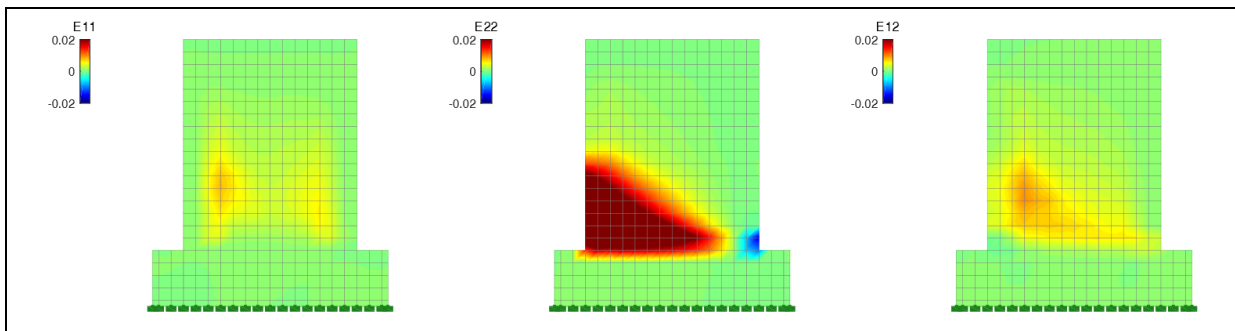


Figura 6.5: Deformación máxima muro M3 – FPA.

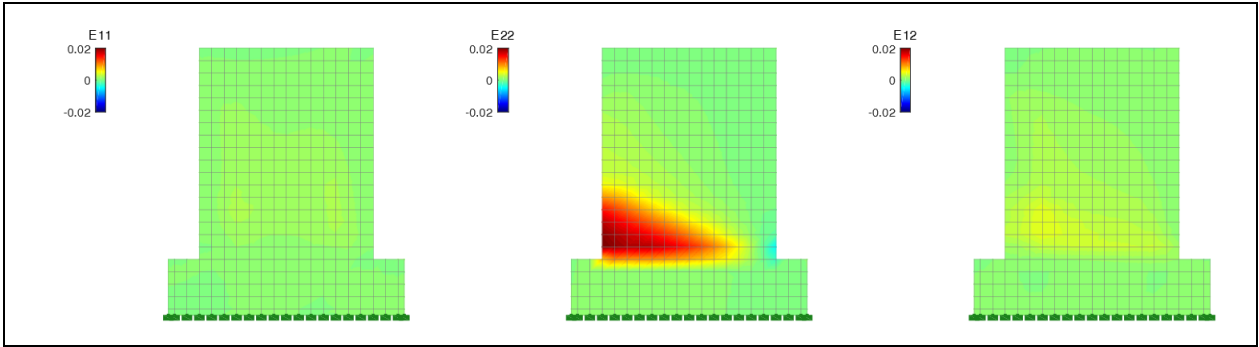


Figura 6.6: Deformación máxima muro M3 – MEA.

La Figura 6.5 y Figura 6.6 se aprecia que las deformaciones verticales se concentran en el tercio inferior del muro. A diferencia de los resultados por fotogrametría, el modelo numérico no muestra la presencia de una fisura principal en 45° .

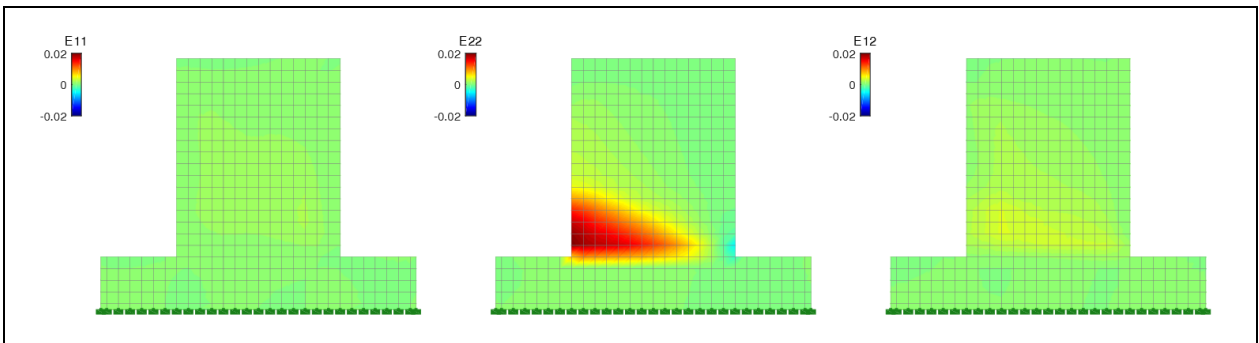


Figura 6.7: Deformación máxima muro M4 – FPA.

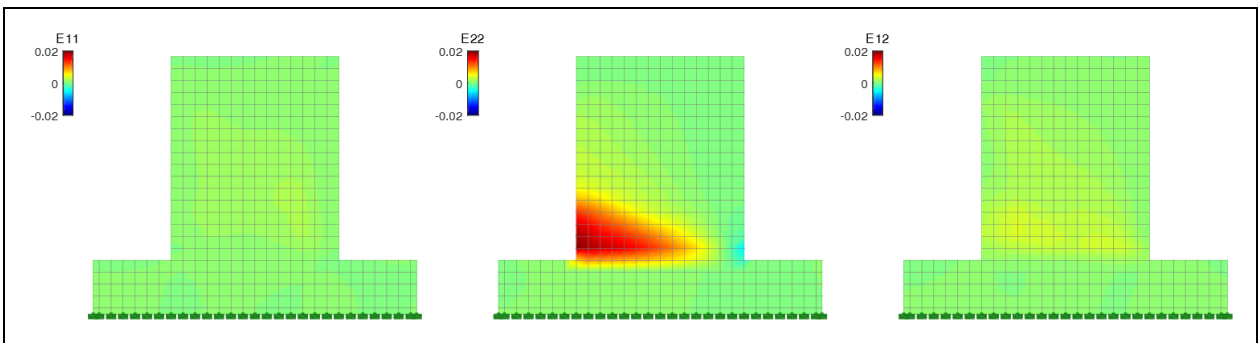


Figura 6.8: Deformación máxima muro M4 – MEA.

Del mismo modo que en la probeta M4 el modelo numérico muestra una concentración de deformaciones verticales en el tercio inferior del muro, pero no representa las grietas principales que se originan en el muro ensayado a carga cíclica.

6.3.1 Deformación vertical

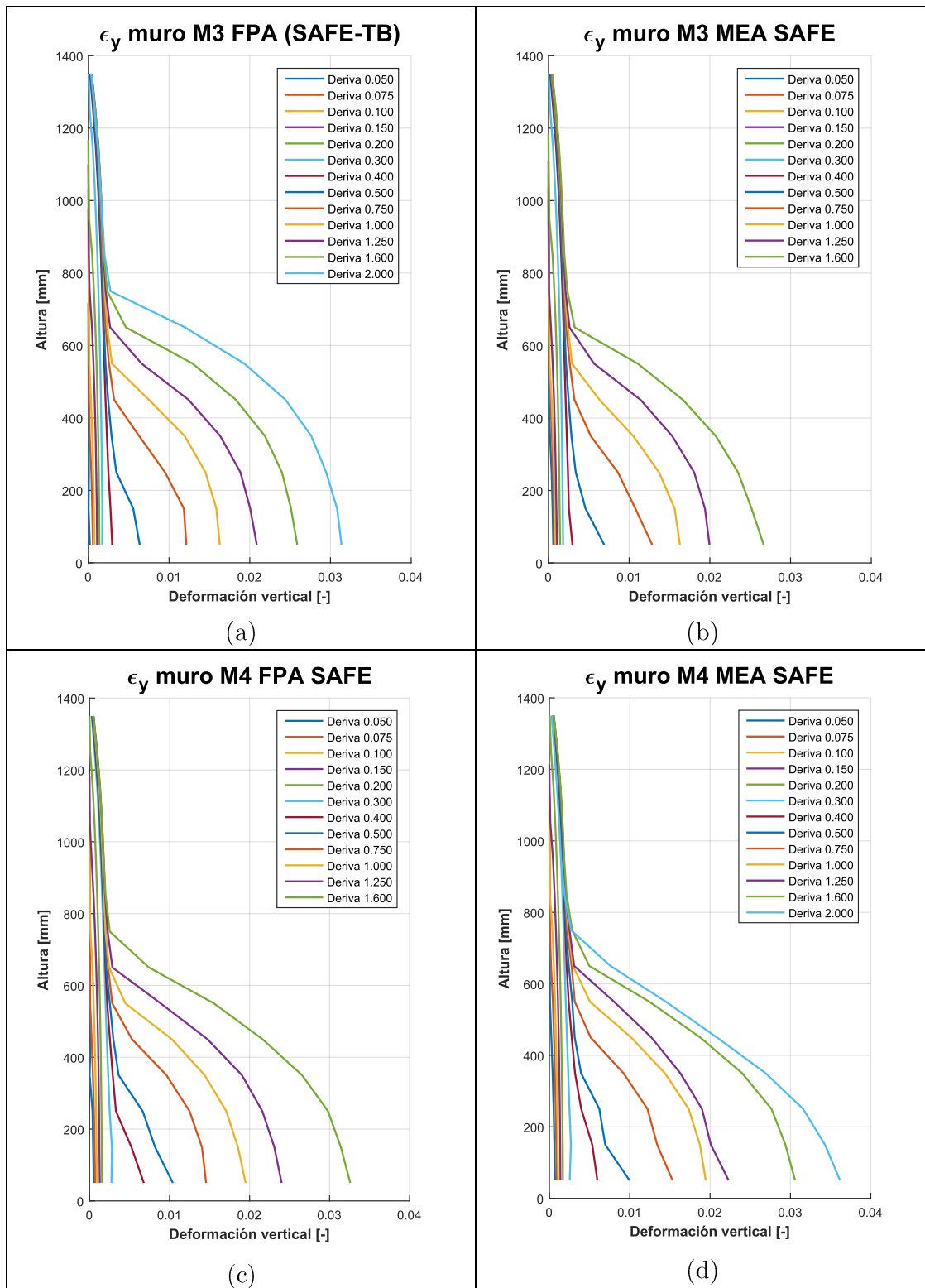


Figura 6.9: Deformación vertical calculado con Safe-TB: (a) Probeta M3 FPA; (b) Probeta M3 MEA, (c); Probeta M4 FPA; (d) Probeta M4 MEA.

En la Figura 6.9 se muestra la deformación vertical promedio para cada drift que se desarrolla con sus 3 peaks completos. Tal como se ha de esperar la deformación vertical a una misma altura de muro es mayor conforme avanza el nivel de drift.

Capítulo 7

Conclusiones

Al analizar el ciclo de histéresis se obtiene que en el muro M3 las probetas construidas con malla electrosoldada requieren alrededor de 10% más carga para alcanzar el mismo nivel de desplazamiento, debido a que el acero utilizado corresponde a A630S en vez de A630. En consecuencia, las probetas del muro M3 construidas con fierro preparado logran resistir desplazamientos 20% mayores. En el caso de los muros M4 el comportamiento de las probetas construidas con fierro preparado y las construidas con malla electrosoldada son similares en cuanto a nivel de carga. En cuanto a los desplazamientos, los muros construidos con fierro preparado y malla electrosoldada alcanzan el mismo nivel de desplazamiento, pero las probetas construidas con fierro preparado resisten un ciclo más que las probetas construidas con malla electrosoldada.

Se validan los resultados de fotogrametría al compararlos con los desplazamientos registrados con sensores LVDT's, se concluye que los resultados de desplazamientos son consistentes con lo esperado y por ende sirven, siempre y cuando al momento de realizar el análisis por fotogrametría el elemento de interés sea iluminado con una fuente de luz constante, para que la correlación entre pixeles sea adecuada.

La precisión de los resultados medidos con fotogrametría está determinada por la calidad de las fotografías y la distancia a la cual se encuentra la cámara de la estructura que se desea analizar, esto se traduce en la cantidad de pixeles por unidad de largo. Además, depende del radio de análisis de cada vecindad.

El desplazamiento horizontal en los muros M3 registrados con fotogrametría en el borde del muro presentan un error mayor con respecto al desplazamiento nominal para pequeños desplazamientos, esto se puede deber a la sensibilidad del método de análisis, además se aprecia que el error de desplazamiento es mayor en el caso de las probetas construidas con malla electrosoldada. En el caso de los muros M4 el error respecto al desplazamiento nominal es constante para los distintos niveles de desplazamiento. En promedio los desplazamientos horizontales asociados a las probetas construidas con malla electrosoldada tienen mayor error con respecto al desplazamiento nominal que las probetas construidas con fierro preparado.

El aporte del corte en el desplazamiento horizontal es aproximadamente 5% mayor en el caso del muro M4 que en el muro M3.

Las deformaciones verticales en el borde del muro tanto para los muros M3 como M4, las probetas construidas con malla electrosoldada presentan una concentración de fisuras en la base del muro, a diferencia de las probetas de fierro preparado distribuyen las fisuras a lo largo del muro, esto repercute en que los muros construidos con fierro preparado resisten más desplazamiento.

El agrietamiento avanza a lo ancho del muro de forma diagonal, se aprecia una grieta principal de 45° aproximadamente, acompañada de fisuras paralelas a esta, en el caso de las probetas construidas con fierro preparado la grieta principal es menor puesto que hay mayor cantidad de fisuras distribuidas diagonalmente.

Tal como se menciona anteriormente, al analizar las fisuras en el muro mediante la deformación horizontal y vertical en todo el muro se aprecia que en las probetas construidas con malla electrosoldada las deformaciones verticales se encuentran concentradas hacia la base del muro y presentan una fisura diagonal sobresaliente y preponderante.

El modelamiento numérico mediante la plataforma SAFE-TB falla en solo un 4% con respecto a la carga observada experimentalmente para desplazamientos mayores a 5 [mm]. Pero para desplazamientos menores a 5 [mm] el modelo numérico es poco conservador y predice que se requiere mayor nivel de carga para los desplazamientos especificados, esto puede conllevar a errores de cálculo ingenieril y al estar en un país sísmico dichos errores pueden tener consecuencias fatales.

Bibliografía

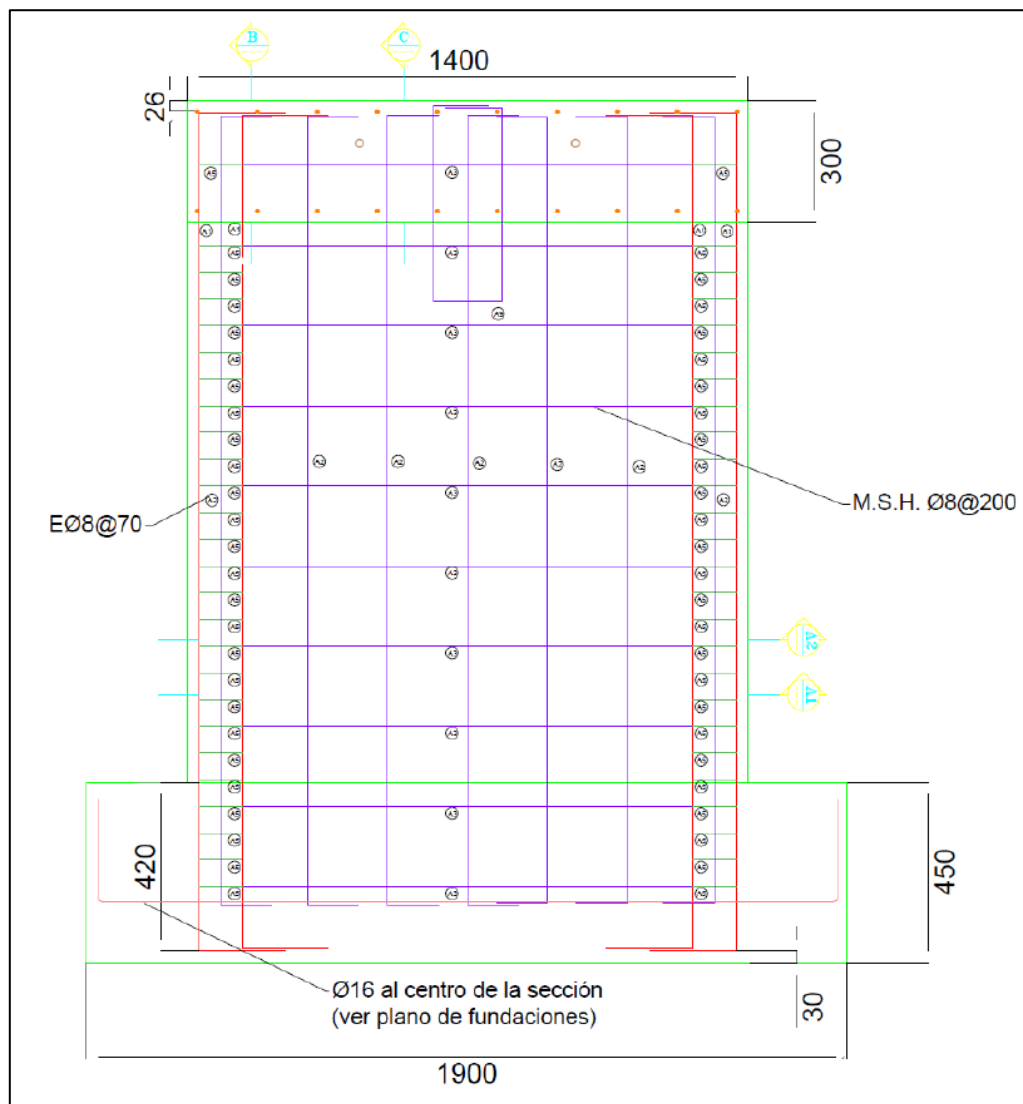
- Blaber, J., & Antoniou, A. (2014). *Instruction Manual Ncorr*. Georgia.
- Castro, F. (2017). *Comparación de la respuesta experimental y analítica de muros rectangulares de hormigón armado*. Santiago de Chile.
- Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. (2018). *Estudio experimental de malla electrosoldada ACMA® A630S en muros y losas de H.A. .*
- Inzunza, E. (2014). *Uso de fotogrametría en elementos de hormigón armado*. Santiago de Chile.
- Manríquez, I. (2016). *Ensayo de muros bandera de hormigón armado con carga lateral cíclica medido por fotogrametría y comparado con modelo puntal-tensor*. Santiago de Chile.
- Muñoz, G. (2017). *Estudio experimental-teórico de muros de hormigón armado con discontinuidad central en la base e influencia de la presencia de losas*. Santiago de Chile.
- NCh204. (2006). *Acero - Barras laminadas en caliente para hormigón armado*.
- NCh3334. (2014). *Acero - Barras laminadas en caliente soldables para hormigón armado - Requisitos*.
- NCh3335. (2014). *Acero - Mallas electrosoldadas de barras laminadas en caliente soldables para hormigón armado - Requisitos*.
- Ncorr. (2019). *Ncorr v1.2*. Obtenido de DIC Algorithms: <http://www.ncorr.com/index.php/dic-algorithms>
- Peña, E. (2016). *Implementación del programa de elementos finitos "SafePy" para análisis no lineal dinámico con factor de convergencia de carga .* Santiago de Chile.

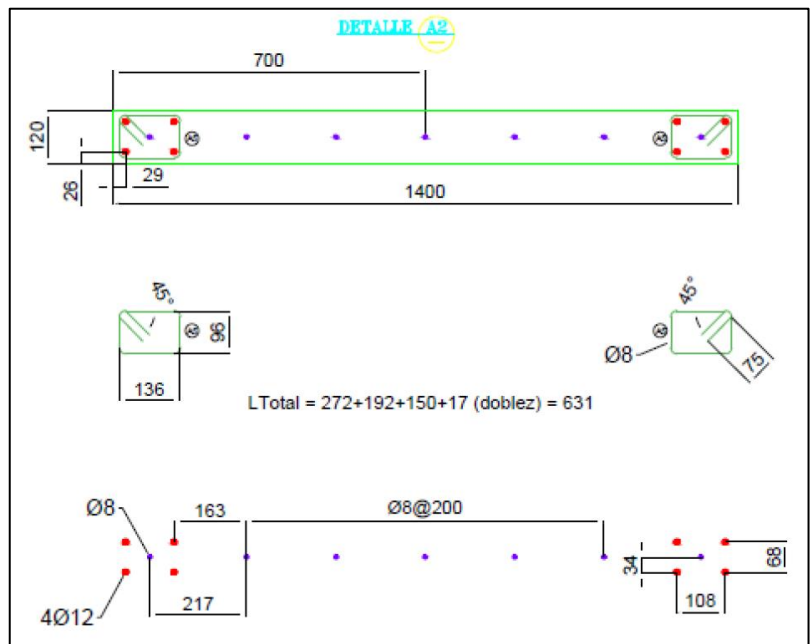
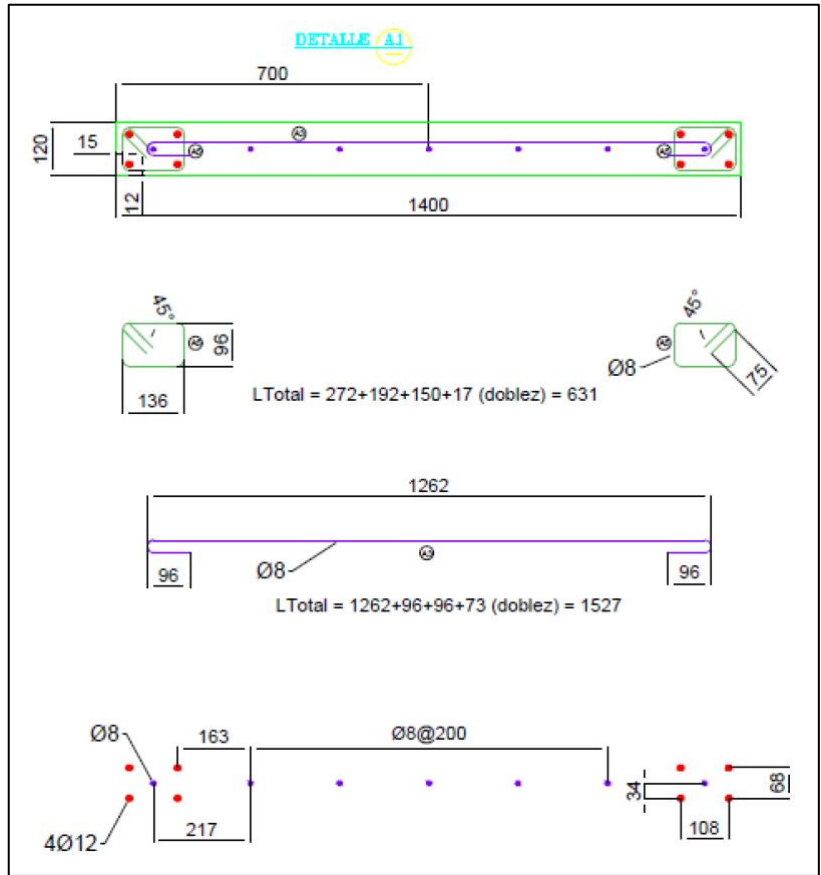
- Rodríguez, M. (2011). *Comportamiento a fuerza cortante de muros de concreto con ductilidad limitada con 8 cm de espesor*. Lima.
- Rojas, F. (2016). *Development of a nonlinear quadrilateral layered membrane element with drilling degrees of freedom and a non linear quadrilateral thin flat layered shell element for the modeling of reinforced concrete walls*. California: University of Southern California.
- Ruiz, M. (2018). *Estudio experimental de muros T de hormigón armado mediante fotogrametría*. Santiago de Chile.

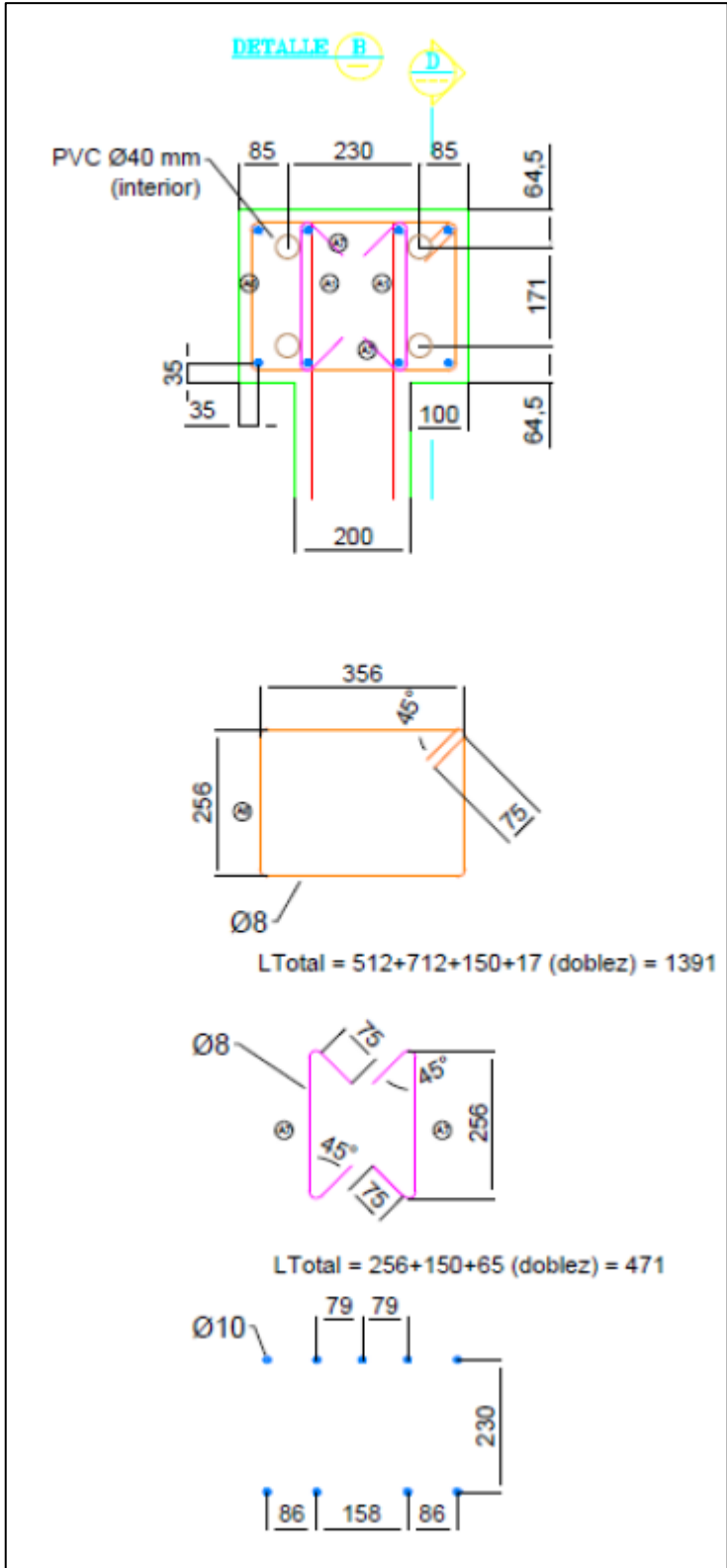
Anexos

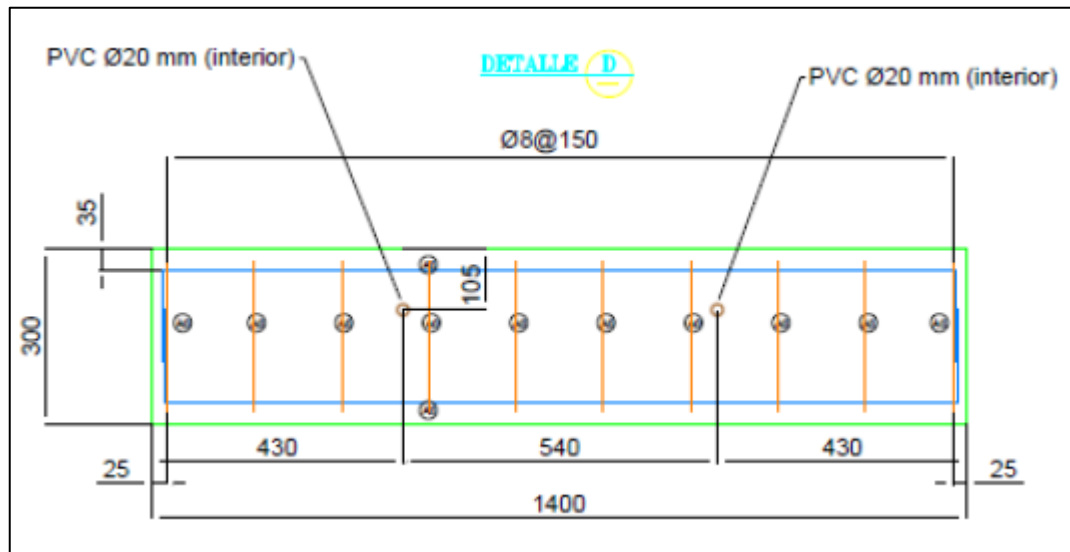
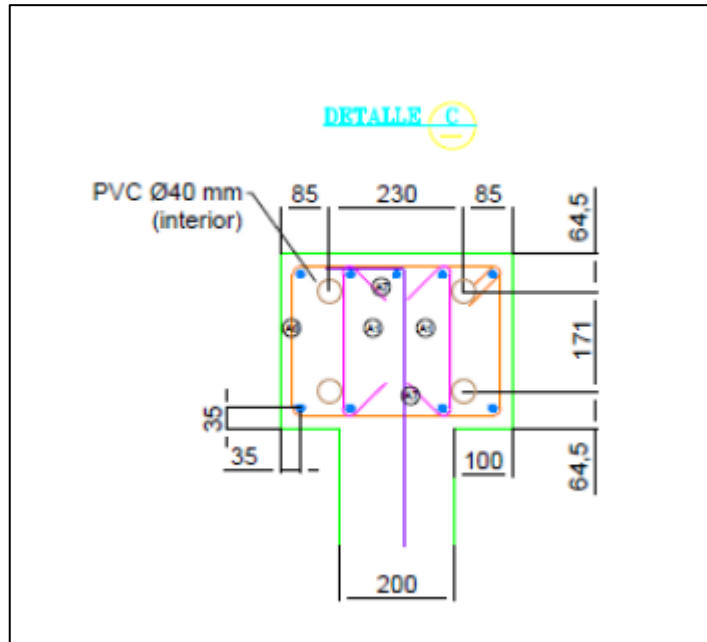
Anexo A: Planos

Muro M3

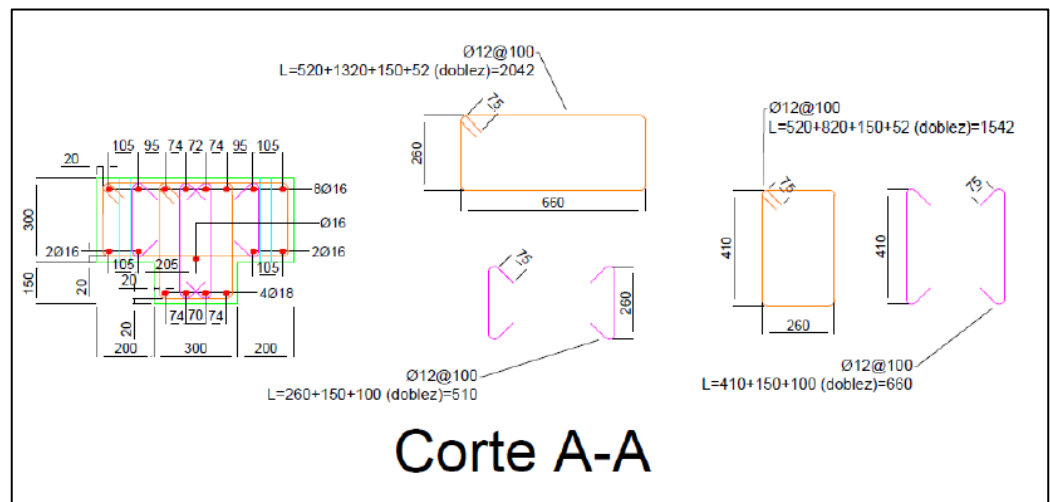
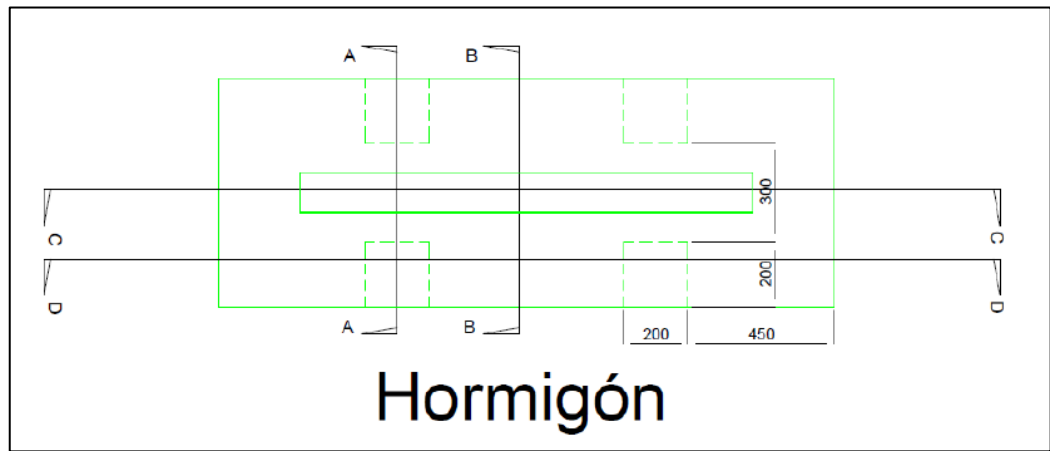
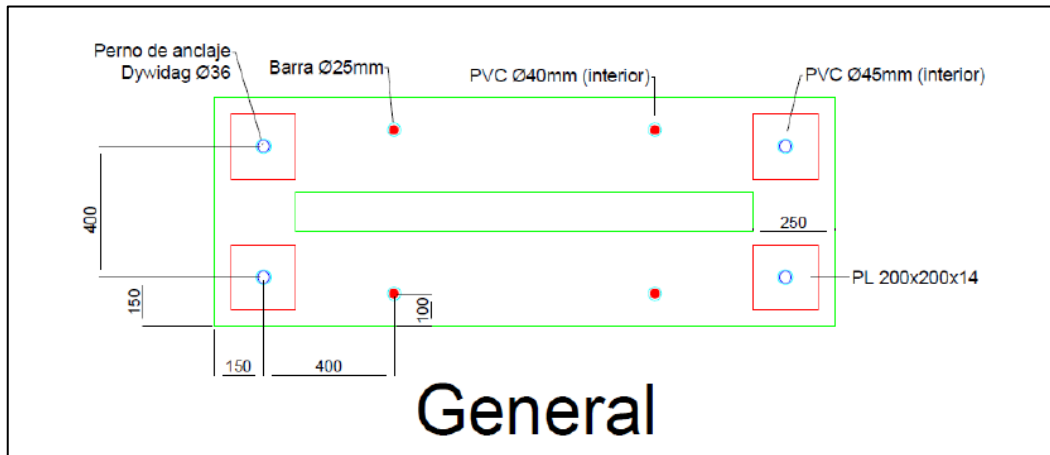


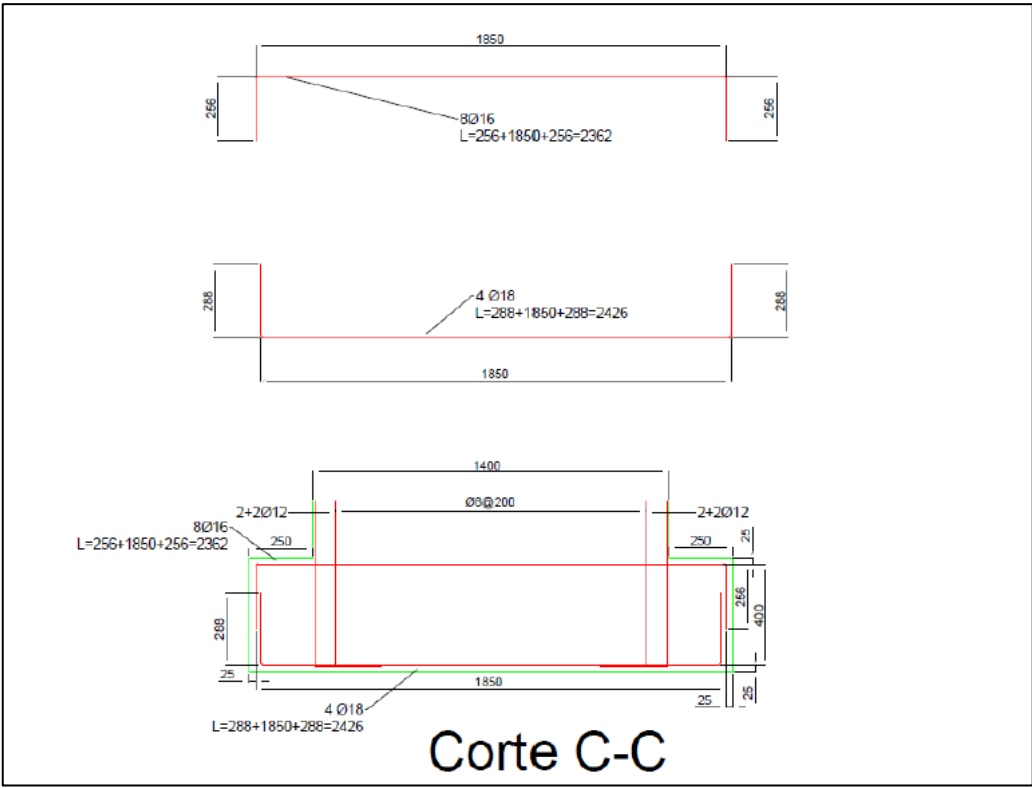
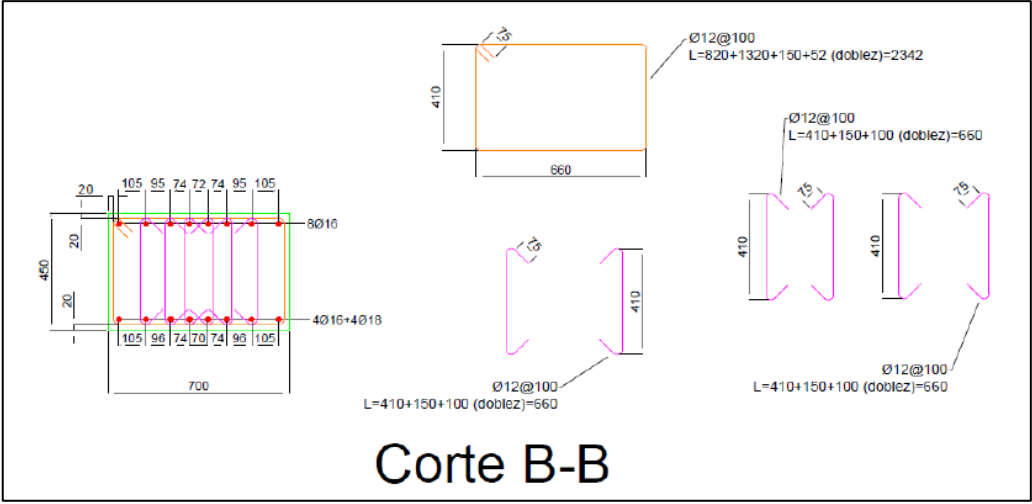


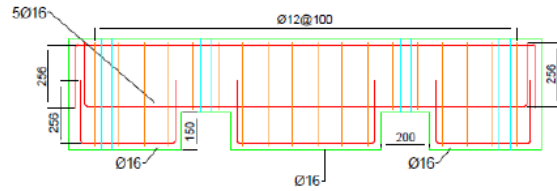
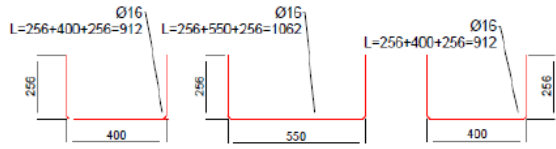
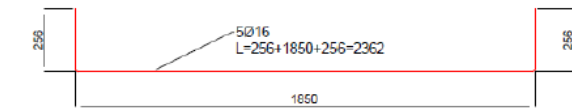




Fundación muro M3

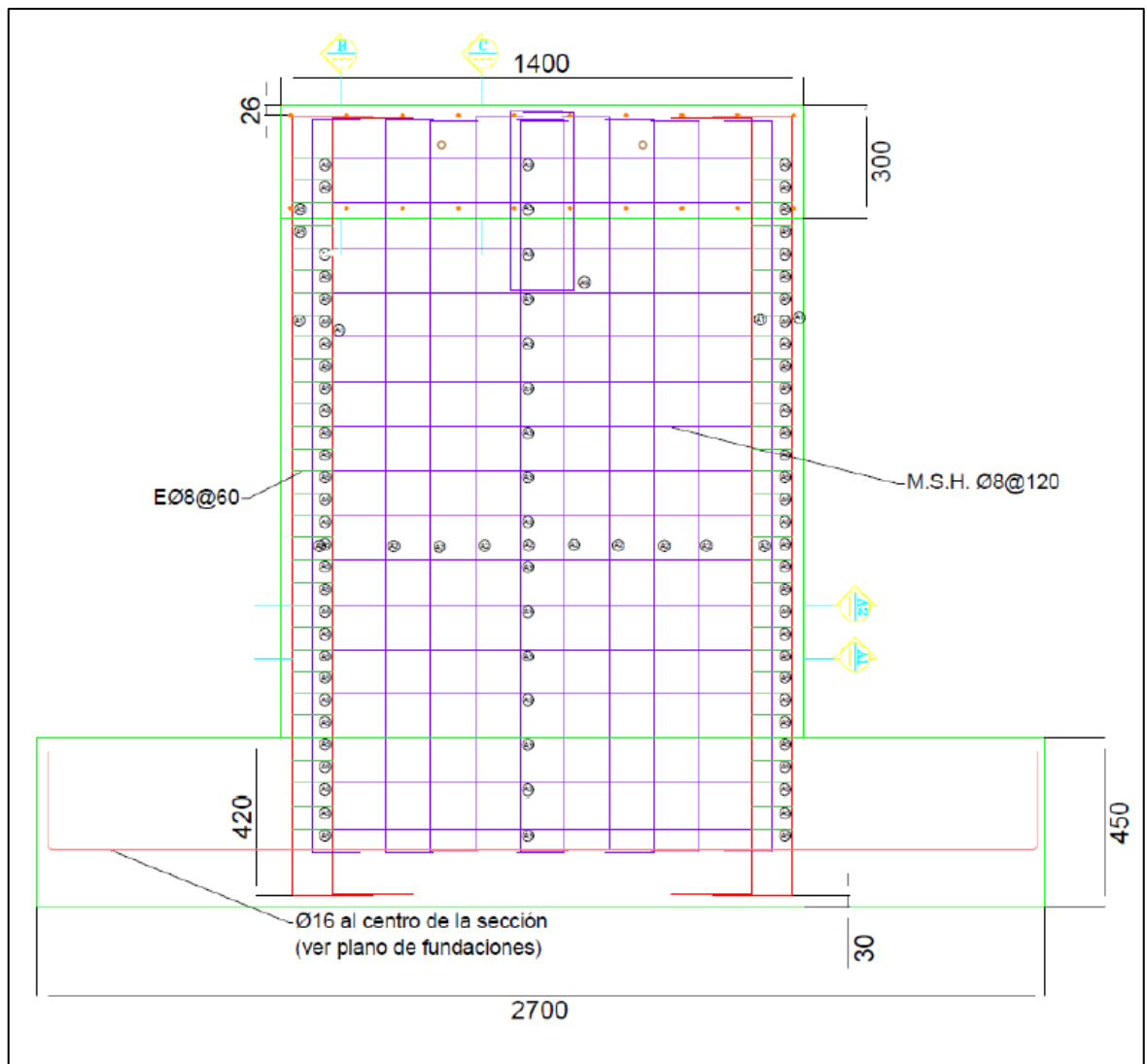




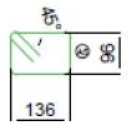
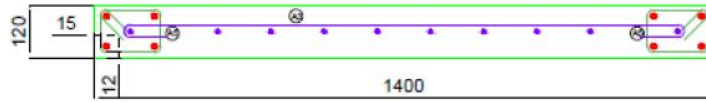


Corte D-D

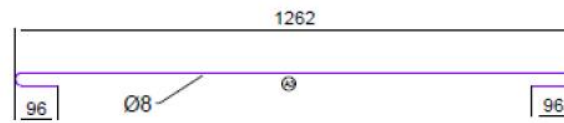
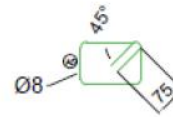
Muro M4



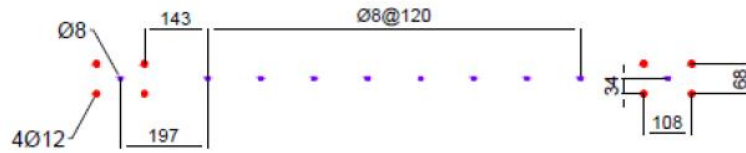
DETALLE A1



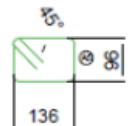
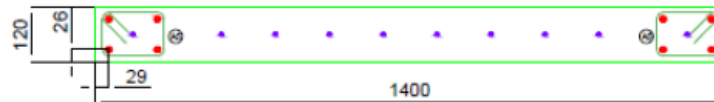
$L_{Total} = 272 + 192 + 150 = 614$



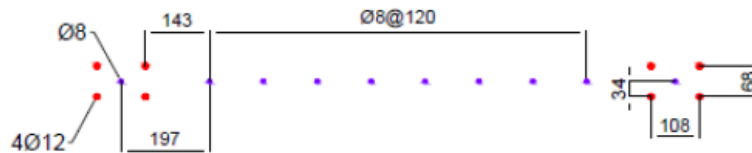
$L_{Total} = 1262 + 96 + 96 + 73 \text{ (doblez)} = 1527$

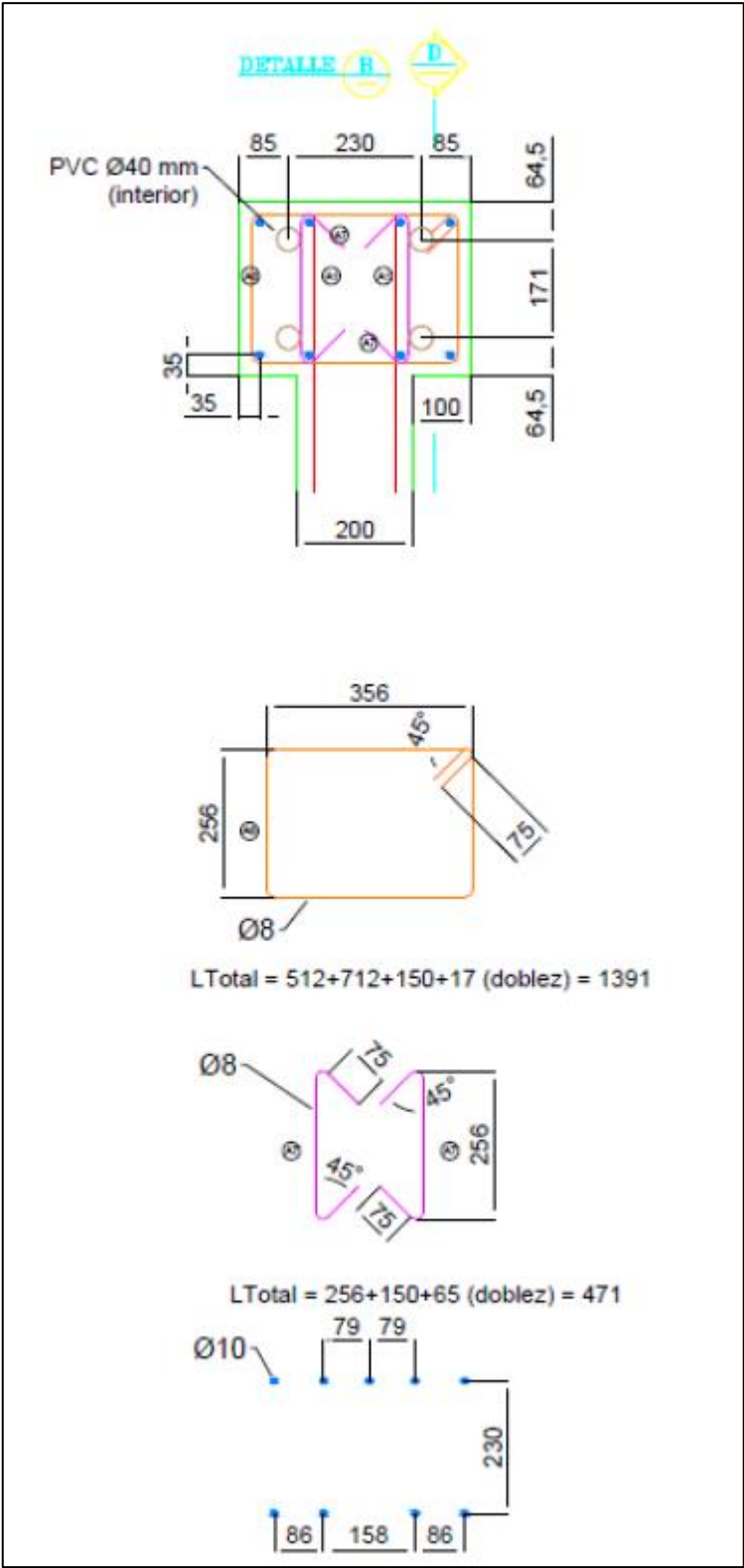


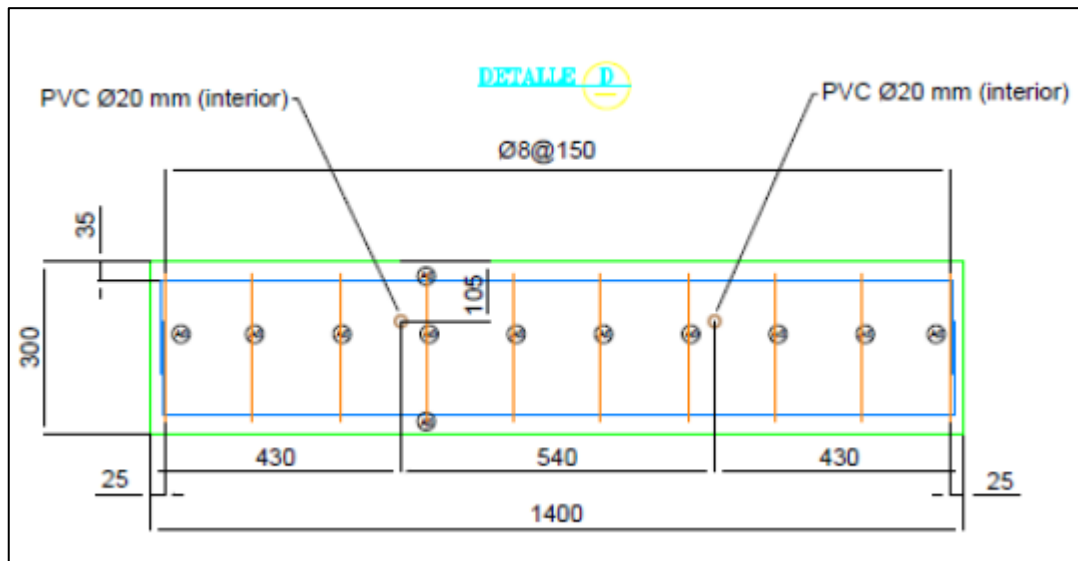
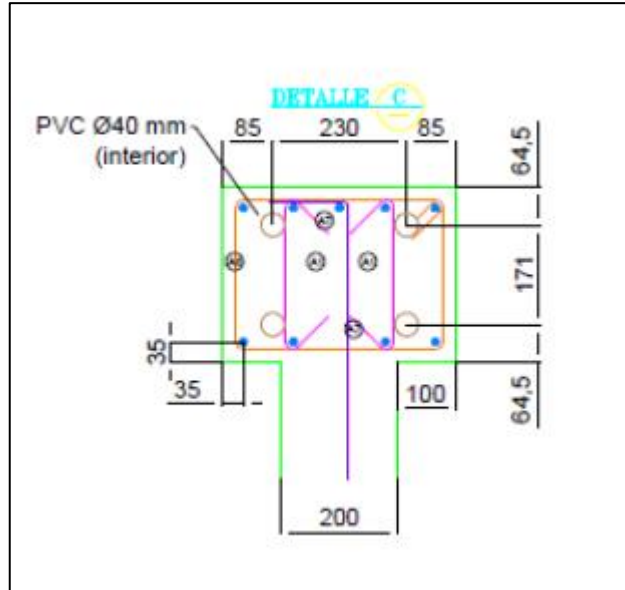
DETALLE A2



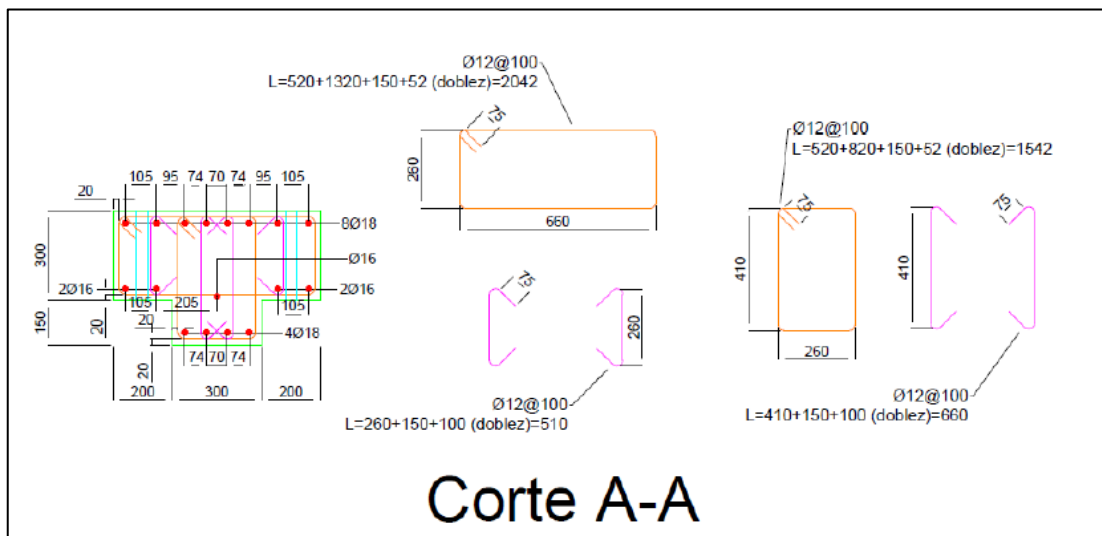
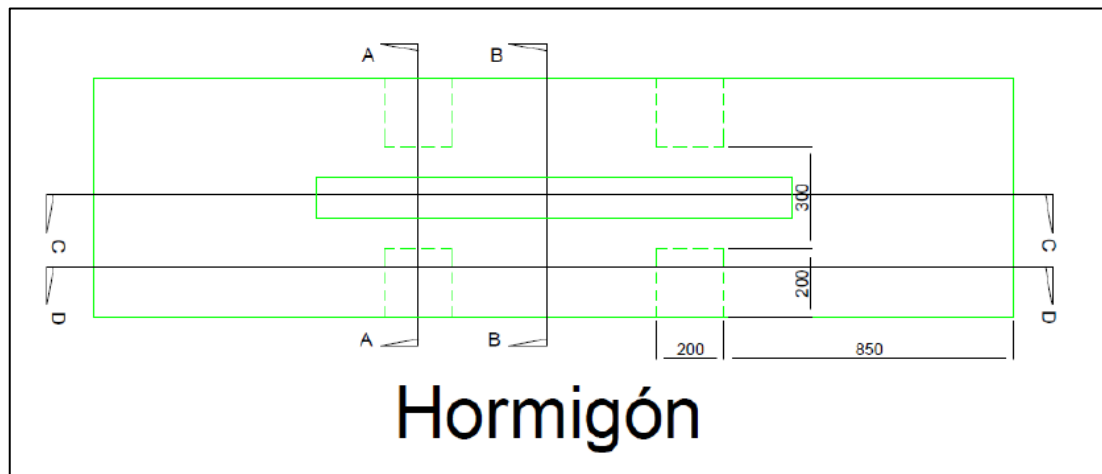
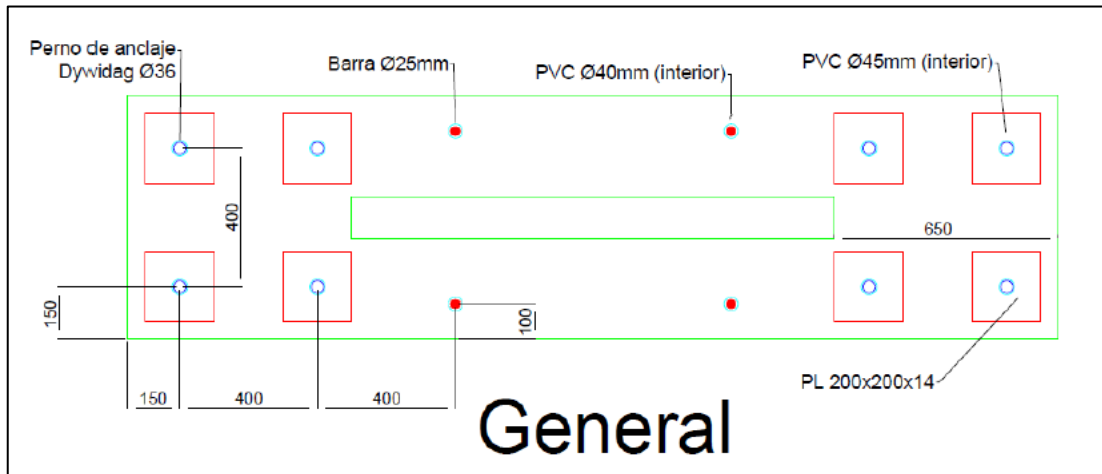
$L_{Total} = 272 + 192 + 150 = 614$

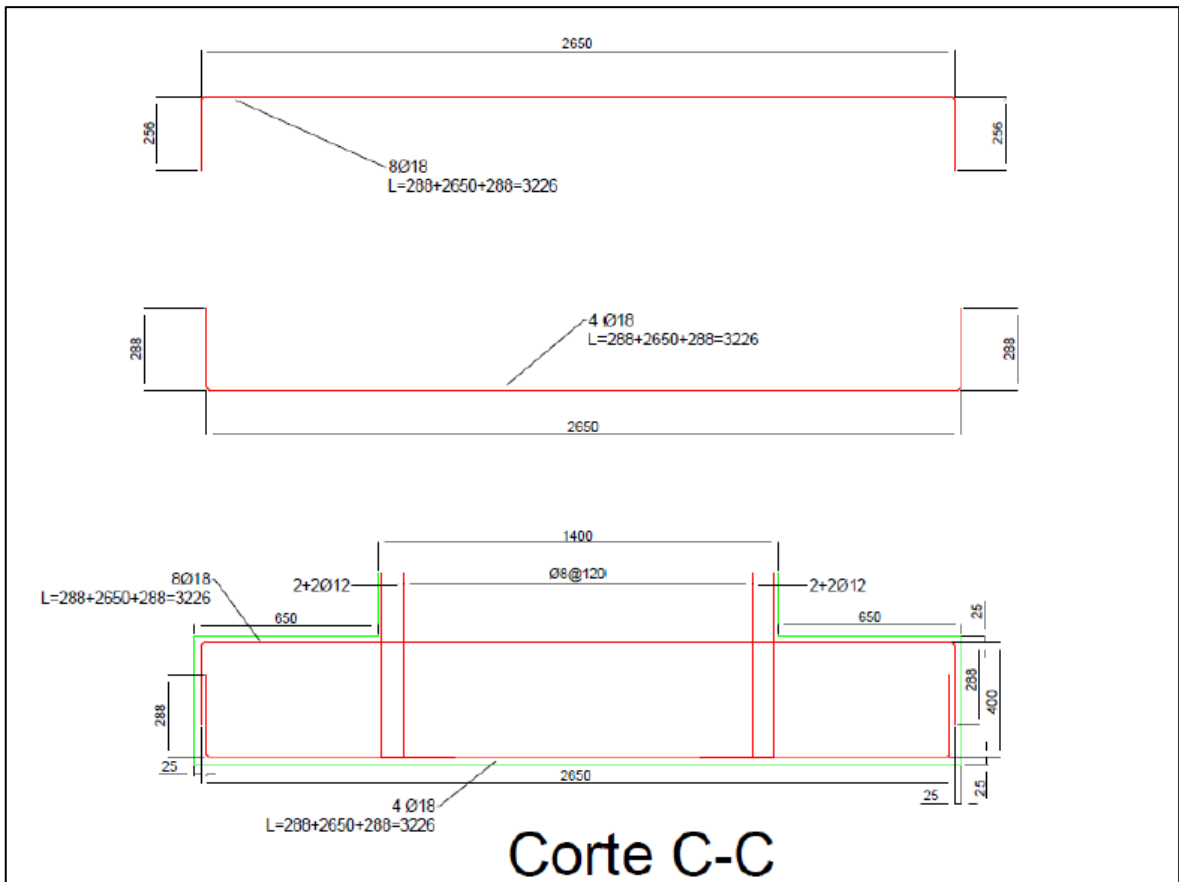
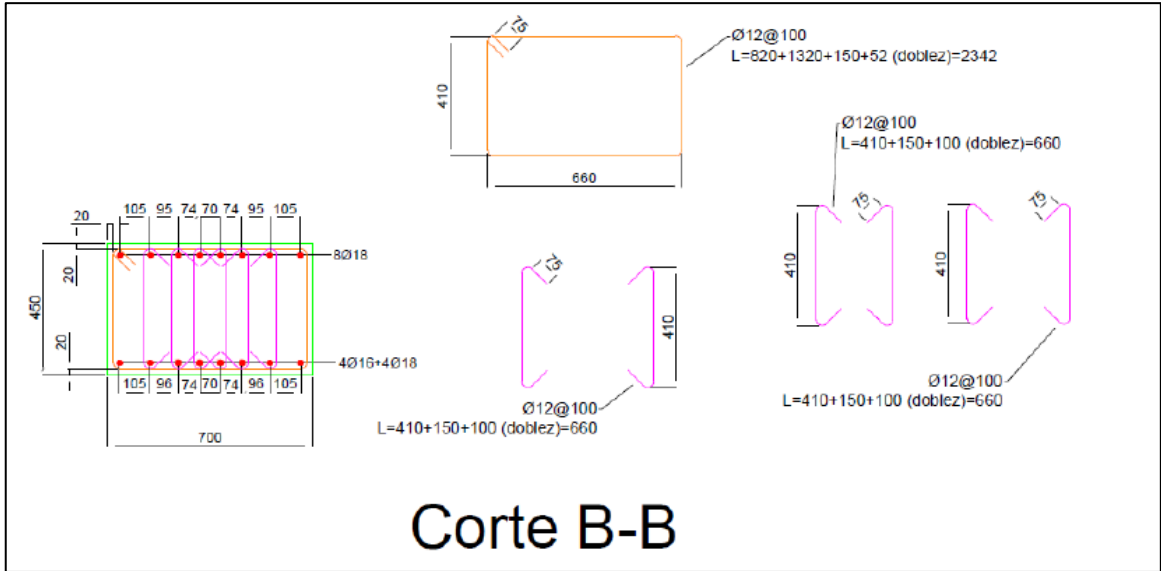


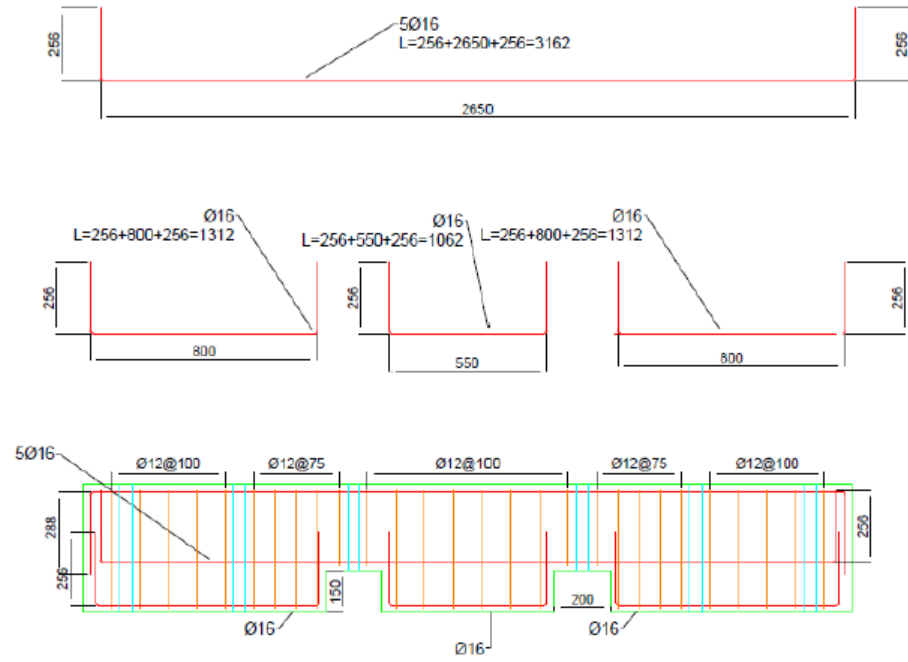




Fundación muro M4







Corte D-D