



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

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

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MATÍAS IGNACIO CÁCERES QUEZADA

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 INGENIERO CIVIL
POR: MATIAS IGNACIO CACERES QUEZADA
FECHA: 2019
PROFESOR GUÍA: FABIÁN ROJAS BARRALES

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

En el presente trabajo se estudia la respuesta de muros de hormigón armado con malla preparada A630 y malla electrosoldada dúctil A630S, con el objetivo de comparar el comportamiento de ambas soluciones constructivas ante cargas cíclicas.

Con el objetivo de contar con muros donde se observen fallas a flexión y otros donde el esfuerzo de corte sea crítico es que las cuatro probetas estudiadas del muro 1 son esbeltas con relación de aspecto 1:2 y las cuatro probetas estudiadas del muro 2 son chatas con relación de aspecto 1:1.

La respuesta de los muros es procesada a través de la herramienta de fotogrametría con la cual se obtiene información de deformaciones y desplazamientos utilizando el software Ncorr. Posteriormente los resultados de fotogrametría son comparados con los datos de los sensores LVDT's, con el fin de validar esta metodología.

Dentro de los resultados obtenidos con fotogrametría se encuentran perfil de deformación en altura en el borde del muro, perfil de desplazamiento de techo en altura, penetración de fisuras. Además, se muestran las distribuciones de deformaciones en el muro a través de mapas de colores.

Finalmente se realiza un análisis numérico no lineal de elementos finitos de los muros mediante cuadriláteros con capa tipo membrana, con la finalidad de predecir la respuesta cíclica mostrada en los experimentos.

Para los cuatro pares de probetas estudiadas el esfuerzo principal corresponde al de flexión, haciendo que la armadura de borde y el refuerzo vertical de la malla sean los más solicitados. Los resultados muestran que la respuesta de los muros con malla electrosoldada A630S es similar a la vista en los muros con malla preparada A630, alcanzado los mismos desplazamiento y cargas. Sin embargo, la solución con malla preparada A630 presenta un largo de concentración de daño en promedio 13% mayor en el muro 1 y 20% mayor en el muro 2.

De igual manera ambas soluciones presentan alta capacidad de deformación y a diferencia de lo visto en los estudios previos de muros con malla electrosoldada no dúctiles la falla de estos muros es dúctil.

A mi familia

AGRADECIMIENTOS

A todos los que estuvieron presentes en este camino.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCION	1
1.1	MOTIVACION	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	OBJETIVOS GENERALES	2
1.2.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	2
1.3	METODOLOGIA	2
1.4	ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	2
2	REVISION BIBLIOGRAFICA	4
2.1	INTRODUCCION	4
2.2	ESTUDIOS PREVIOS	4
2.3	NORMATIVA CHILENA	10
2.4	USO DE FOTOGRAMETRIA	10
3	ANTECEDENTES GENERALES	16
3.1	INTRODUCCION	16
3.2	FOTOGRAMETRIA	16
3.3	SAFE-TOOLBOX	20
3.3.1	DESCRIPCION GENERAL	20
3.3.2	LEYES CONSTITUTIVAS	20
4	MONTAJE EXPERIMENTAL	26
4.1	INTRODUCCION	26
4.2	CARACTERIZACION DE LAS PROBETAS	26
4.3	GEOMETRIA	26
4.4	DETALLAMIENTO DE LA ARMADURA	27
4.5	PRE-DISEÑO DE MUROS	29
4.6	CONSTRUCCION DE PROBETAS	30
4.7	EJECUCION DE ENSAYOS	31
4.8	MONITOREO POR SENSORES	33
4.9	MONITOREO POR FOTOGRAFIAS	34
4.10	PROTOCOLO DE ENSAYO	34
4.11	RESISTENCIA DE LOS MATERIALES	35
4.12	RESULTADOS	36

5 FOTOGRAMETRIA	42
5.1 INTRODUCCION	42
5.2 PROCESAMIENTO Y ESTRUCTURA DE DATOS	42
5.3 ERROR DE FOTOGRAMETRIA.....	47
5.4 COMPARACION ENTRE FOTOGRAMETRIA Y LVDT´ s.....	48
5.5 RESULTADOS.....	51
5.5.1 DISTRIBUCION DE DEFORMACIONES EN LOS MUROS.....	52
5.5.2 PERFIL DE DESPLAZAMIENTO EN ALTURA.....	60
5.5.3 PERFIL DE DEFORMACION UNITARIA VERTICAL EN ALTURA.....	66
5.5.4 DESPLAZAMIENTO POR CORTE Y FLEXION	74
5.5.5 PENETRACION DE FISURAS.....	78
6 MODELACION NUMERICA	84
6.1 INTRODUCCION	84
6.2 MODELO.....	84
6.3 APLICACIÓN DE CARGAS.....	85
6.4 RESULTADOS.....	86
7 CONCLUSIONES	92
BIBLIOGRAFIA	94
ANEXOS	96
ANEXO A: DETALLE ARMADURA DE FUNDACION Y VIGA	96
ANEXO B: DETALLE ARMADURA DE MUROS	104
ANEXO C: DEFORMACION EN LOS MUROS CAMARA LOCAL	108

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1:Esquema del refuerzo muro ME1. (Cardenas & Cutipa, 2009)	5
Figura 2.2:Esquema del refuerzo RD1. (Cardenas & Cutipa, 2009).....	5
Figura 2.3:Instrumentacion empleada. (Cardenas & Cutipa, 2009)	6
Figura 2.4:Corte-desplazamiento para los muros ME1 y RD1. (Cardenas & Cutipa, 2009)	6
Figura 2.5: Corte-desplazamiento para los muros ME2 y RD2. (Cardenas & Cutipa, 2009).....	6
Figura 2.6: Configuración del ensayo. (Almeida, 2015)	8
Figura 2.7:Comparacion de los muros M1 y M5. (Almeida, 2015)	9
Figura 2.8:Comparacion de los muros M4 y M6. (Almeida, 2015)	9
Figura 2.9:Esquema de como Ncorr comienza a analizar la vecindad definida. (Blaber, Antoniou, & Adair, 2015).....	12
Figura 2.10:Deformaciones verticales para una deriva del 3%: a) Sentido negativo; b) Sentido positivo. (Manríquez, 2016).....	13
Figura 2.11:Campo deformaciones principales deriva 3% sentido negativo. (Manríquez, 2016)	14
Figura 2.12:Perfil de deformación vertical en altura. (Muñoz, 2017).....	14
Figura 2.13: Deformación de deformaciones a lo largo del muro. (Muñoz, 2017).....	15
Figura 3.1: Ventana de Ncorr con fotografías cargadas.....	16
Figura 3.2: ROI definido para el análisis de uno de los muros.....	17
Figura 3.3: Parámetros para el análisis DIC.....	18
Figura 3.4: Colocación de semillas para el análisis DIC.....	18
Figura 3.5: Ventana de Ncorr para definir escala.....	19
Figura 3.6: Ventana de Ncorr para el análisis de deformaciones.....	19
Figura 3.7: Sección compuesta por capas (Rojas, Anderson, & Massone, 2016).....	20
Figura 3.8: Modelo constitutivo del hormigón a compresión propuesto por Thorenfeldt (Rojas, Anderson, & Massone, 2016).	21
Figura 3.9: Curva tensión deformación del hormigón a tracción propuesta por Belarbi y Hsu (Rojas, Anderson, & Massone, 2016).	22
Figura 3.10: Modelo histórico del hormigón (Rojas, Anderson, & Massone, 2016).....	22
Figura 3.11: Modelo del hormigón a compresión con $f'c$ reducido (Rojas, Anderson, & Massone, 2016).	23
Figura 3.12: Modelo constitutivo del acero (Rojas, Anderson, & Massone, 2016).....	24
Figura 4.1: Esquema tridimensional de probetas de muros: izquierda Muro 1; derecha Muro 2. (ACMA, 2018)	27
Figura 4.2:Esquema armadura de muros: izquierda Muro 1; derecha Muro 2. (ACMA, 2018)	28
Figura 4.3: Construcción de encofrado y moldaje con enfierradura en su interior. (ACMA, 2018)	31
Figura 4.4: Hormigonado de probetas. (ACMA, 2018)	31
Figura 4.5: Fraguado y curado de probetas. (ACMA, 2018)	31

Figura 4.6:Actuador hidráulico utilizado en la aplicación de carga lateral. (ACMA, 2018)	32
Figura 4.7:Sistema de carga axial. (ACMA, 2018)	32
Figura 4.8:Esquema de distribución de sensores LVDT. (ACMA, 2018)	33
Figura 4.9: Pintado de muros para fotogrametría.	34
Figura 4.10:Protocolo nominal de ensayos. (ACMA, 2018)	35
Figura 4.11: Grafico Carga vs. Desplazamiento de techo muro M1, (a) FPA; (b) FPB.....	37
Figura 4.12: Grafico Carga vs. Desplazamiento de techo muro M1, (a) MEA; (b) MEB... 37	37
Figura 4.13: Grafico Carga vs. Desplazamiento de techo muro M2, (a) FPA; (b) FPB.	38
Figura 4.14: Grafico Carga vs. Desplazamiento de techo muro M2, (a) MEA; (b) MEB. .	38
Figura 4.15: Carga vs. Desplazamiento aporte corte y flexión Muro 1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.....	40
Figura 4.16: Carga vs. Desplazamiento aporte corte y flexión Muro 2: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.....	41
Figura 5.1: Selección del ROI para el filtrado.	43
Figura 5.2: Descripción grafica de la estructura de datos.....	44
Figura 5.3: Estructura de datos muro 1 FPA.	45
Figura 5.4: Estructura de datos para desplazamientos del muro 1 FPA.	46
Figura 5.5: Desplazamiento horizontal para la primera fotografía.	46
Figura 5.6: Esquema de la posición del drift de comparación.	49
Figura 5.7: Correlación entre fotogrametría y LVDT' s muro 1, (a) FPA; (b) FPB.	50
Figura 5.8: Correlación entre fotogrametría y LVDT' s muro 1, (a) MEA; (b) MEB.	50
Figura 5.9: Correlación entre fotogrametría y LVDT' s muro 2, (a) FPA; (b) FPB.	50
Figura 5.10: Correlación entre fotogrametría y LVDT' s muro 2, (a) MEA; (b) MEB.	51
Figura 5.11: Deformación ϵ_{yy} 2% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	52
Figura 5.12: Deformación ϵ_{yy} -2% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	52
Figura 5.13: Deformación ϵ_{yy} 2.5% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	53
Figura 5.14: Deformación ϵ_{yy} -2.5% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	53
Figura 5.15: Deformación ϵ_{yy} 3.2% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	53
Figura 5.16: Deformación ϵ_{yy} -3.2% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	54
Figura 5.17: Deformación ϵ_{xx} 2% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	54
Figura 5.18: Deformación ϵ_{xx} -2% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	54
Figura 5.19: Deformación ϵ_{xx} 2.5% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	55
Figura 5.20: Deformación ϵ_{xx} -2.5% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	55
Figura 5.21: Deformación ϵ_{xx} 3.2% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	55
Figura 5.22: Deformación ϵ_{xx} -3.2% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	56

Figura 5.23: Deformación ε_{yy} 2% Muro 2, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	57
Figura 5.24: Deformación ε_{yy} -2% Muro 2, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	57
Figura 5.25: Deformación ε_{yy} 2.5% Muro 2, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	57
Figura 5.26: Deformación ε_{yy} -2.5% Muro 2, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	58
Figura 5.27: Deformación ε_{xx} 2% Muro 2, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	58
Figura 5.28: Deformación ε_{xx} -2% Muro 2, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	58
Figura 5.29: Deformación ε_{xx} 2.5% Muro 2, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	59
Figura 5.30: Deformación ε_{xx} -2.5% Muro 2, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.....	59
Figura 5.31: Esquema ubicación de eje para extracción de resultados.....	60
Figura 5.32: Desplazamiento en altura Muro 1 FPA.....	61
Figura 5.33: Desplazamiento en altura Muro 1 FPB.....	61
Figura 5.34: Desplazamiento en altura Muro 1 MEA.....	62
Figura 5.35: Desplazamiento en altura Muro 1 MEB.....	62
Figura 5.36: Desplazamiento en altura Muro 2 FPA.....	64
Figura 5.37: Desplazamiento en altura Muro 2 FPB.....	64
Figura 5.38: Desplazamiento en altura Muro 2 MEA.....	65
Figura 5.39: Desplazamiento en altura Muro 2 MEB.....	65
Figura 5.40: Deformación vertical en altura muro 1 FPA, (a)cámara general; (b)cámara local.....	67
Figura 5.41: Deformación vertical en altura muro 1 FPB, (a)cámara general; (b)cámara local.....	68
Figura 5.42: Deformación vertical en altura muro 1 MEA, (a)cámara general; (b)cámara local.....	68
Figura 5.43: Deformación vertical en altura muro 1 MEB, (a)cámara general; (b)cámara local.....	69
Figura 5.44: Deformación vertical en altura muro 2 FPA, (a)cámara general; (b)cámara local.....	71
Figura 5.45: Deformación vertical en altura muro 2 FPB, (a)cámara general; (b)cámara local.....	71
Figura 5.46: Deformación vertical en altura muro 2 MEA, (a)cámara general; (b)cámara local.....	72
Figura 5.47: Deformación vertical en altura muro 2 MEB, (a)cámara general; (b)cámara local.....	72
Figura 5.48: Desplazamiento por corte y flexión muro 1: (a)FPA ;(b) FPB; (c) MEA; (d) MEB.....	75
Figura 5.49: Desplazamiento por corte y flexión muro 2: (a)FPA ;(b) FPB; (c) MEA; (d) MEB.....	76
Figura 5.50: Esquema del muro y ejes seleccionados.....	78
Figura 5.51: Penetración de fisura Muro 1 FPA.....	79
Figura 5.52: Penetración de fisura Muro 1 FPB.....	79

Figura 5.53: Penetración de fisura Muro 1 MEA.....	80
Figura 5.54: Penetración de fisura Muro 1 MEB.....	80
Figura 5.55: Penetración de fisura Muro 2 FPA.....	81
Figura 5.56: Penetración de fisura Muro2 FPB.....	81
Figura 5.57: Penetración de fisura Muro 2 MEA.....	82
Figura 5.58: Penetración de fisura Muro 2 MEB.....	82
Figura 6.1: Esquema del mallado muro 1.....	85
Figura 6.2: Esquema del mallado muro 2.....	86
Figura 6.3: Comparación de la curva de histéresis modelo-muro 1: (a) Malla Preparada; (b) Malla electrosoldada.....	86
Figura 6.4: Comparación de la curva de histéresis modelo-muro 2: (a) Malla Preparada; (b) Malla electrosoldada.....	87
Figura 6.5: Deformación en el modelo del muro 1 con malla preparada.....	87
Figura 6.6: Deformación en el modelo del muro 1 con malla electrosoldada.....	88
Figura 6.7: Deformación en el modelo del muro 2 con malla preparada.....	88
Figura 6.8: Deformación en el modelo del muro 2 con malla electrosoldada.....	88
Figura 6.9: Deformación vertical en altura muro 1 con malla preparada: (a)Modelo; (b)Fotogrametría.....	89
Figura 6.10: Deformación vertical en altura muro 1 con malla electrosoldada: (a)Modelo; (b)Fotogrametría.....	89
Figura 6.11: Deformación vertical en altura muro 2 con malla preparada: (a)Modelo; (b)Fotogrametría.....	90
Figura 6.12: Deformación vertical en altura muro 2 con malla electrosoldada: (a)Modelo; (b)Fotogrametría.....	91
Figura 0.1: Planos fundación Muro 1.....	96
Figura 0.2: Plano fundación Muro 1.....	97
Figura 0.3: Plano fundación Muro 1.....	98
Figura 0.4: Plano fundación Muro 2.....	99
Figura 0.5: Plano fundación Muro 2.....	100
Figura 0.6: Plano fundación Muro 2.....	101
Figura 0.7: Plano viga de transferencia Muro 1.....	102
Figura 0.8: Plano viga de transferencia Muro 2.....	103
Figura 0.9: Plano Muro 1.....	104
Figura 0.10: Detalle enfierradura Muro 1.....	105
Figura 0.11: Plano Muro 2.....	106
Figura 0.12: Detalle enfierradura Muro 2.....	107
Figura 0.13: Deformación ε_{yy} 2% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.....	108
Figura 0.14: Deformación ε_{yy} -2% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.....	109
Figura 0.15: Deformación ε_{yy} 2.5% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.....	110
Figura 0.16: Deformación ε_{yy} -2.5% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.....	111
Figura 0.17: Deformación ε_{yy} 3.2% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.....	112
Figura 0.18: Deformación ε_{yy} -3.2% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.....	113
Figura 0.19: Deformación ε_{xx} 2% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.....	114
Figura 0.20: Deformación ε_{xx} -2% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.....	115
Figura 0.21: Deformación ε_{xx} 2.5% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.....	116
Figura 0.22: Deformación ε_{xx} -2.5% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.....	117
Figura 0.23: Deformación ε_{xx} 3.2% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.....	118
Figura 0.24: Deformación ε_{xx} -3.2% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.....	119

Figura 0.25: Deformación ε_{yy} 2% M2: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.	120
Figura 0.26: Deformación ε_{yy} -2% M2: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.	121
Figura 0.27: Deformación ε_{yy} 2.5% M2: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.	122
Figura 0.28: Deformación ε_{yy} -2.5% M2: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.	123
Figura 0.29: Deformación ε_{xx} 2% M2: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.	124
Figura 0.30: Deformación ε_{xx} -2% M2: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.	125
Figura 0.31: Deformación ε_{xx} 2.5% M2: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.	126
Figura 0.32: Deformación ε_{xx} -2.5% M2: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.	127

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1:Características de los muros.	5
Tabla 2.2:Resumen del propósito y armadura de cada muro.....	7
Tabla 4.1:Notación y tipo de Muros.	26
Tabla 4.2:Dimensiones de los componentes de las probetas.	27
Tabla 4.3:Especificaciones de armadura.	29
Tabla 4.4: Cuantía de muros.	29
Tabla 4.5:Descripcion de LVDT´ s.	34
Tabla 4.6:Resumen de resistencia a compresión obtenida en ensayos.	35
Tabla 4.7:Resumen de resistencia a tracción obtenida en ensayos de barras.....	36
Tabla 5.1: Resumen de selección de fotos.	43
Tabla 5.2: Escala Muro 1.....	47
Tabla 5.3: Escala Muro 2.	47
Tabla 5.4: Resumen de errores globales ambientales.	48
Tabla 5.5: Resumen R^2 y $ m - 1 $ por muro.	51
Tabla 5.6: Valores para análisis en Ncorr.	51
Tabla 5.7:Resumen desplazamientos muro 1.....	63
Tabla 5.8:Resumen desplazamientos muro 2.....	66
Tabla 5.9: Resumen largo de concentración de daño.....	70
Tabla 5.10: Resumen largo de concentración de daño.	74
Tabla 5.11:Resumen desplazamiento lateral producido por corte muro 1.....	77
Tabla 5.12: Resumen desplazamiento lateral producido por corte muro 2.	78
Tabla 6.1: Parámetros de modelación.	85

CAPÍTULO 1

INTRODUCCION

1.1 MOTIVACION

La industria de la construcción es uno de los sectores de mayor importancia en la economía del país. Mientras que el hormigón armado es el principal material de construcción, y la mayoría de las construcciones en altura utilizan muros de este material como su elemento básico resistente. Es por esto que al momento de buscar mejorar los procesos constructivos para edificaciones en altura, tanto en tiempo como en costos, lo lógico indica apuntar a un cambio en la forma de construir los muros de hormigón armado. Una de las opciones para dicha mejora es el uso de mallas electrosoldadas en reemplazo del actual sistema de mallas amarradas tradicionales, esto significaría una reducción del tiempo de ejecución de las obras, economía en mano de obra, material y como consecuencia de lo anterior una reducción en los costos. En el caso de la malla electrosoldada, esta se entrega prefabricadas a obra en donde solo se deben instalar, mientras que en el caso de malla tradicionales es el obrero quien debe cortar, doblar y amarrar la armadura en la obra misma.

Por otro lado, Chile se encuentra en la zona de subducción entre la placa de nazca y la placa sudamericana, esto lo convierte en un país que se ve enfrentado a sismos de mediana y gran intensidad de forma reiterada. Sin ir más lejos, el 27 de febrero del 2010 se produjo un sismo que alcanzó una magnitud de 8,8 Mw en la escala de momento. Debido a lo anterior, cualquier cambio en la manera de construir debe ser debidamente estudiada frente a cargas sísmicas, para esto en los ensayos se utilizan cargas cíclicas, ya que al someter los muros a ciclos de cargas y descargas en distintas direcciones permiten replicar los efectos de un sismo.

Existen varios estudios de muros de hormigón armado con mallas preparadas por lo que se conoce su buen comportamiento frente a sismos, mientras que en el caso de los muros con malla electrosoldada existen menos estudios y la gran parte de ellos no utiliza acero dúctil.

Es bajo este contexto que nace la motivación del presente trabajo, con el cual se busca estudiar la respuesta de muros de hormigón armado utilizando doble malla preparada y electrosoldadas dúctiles frente a cargas cíclicas, con la finalidad de comparar el comportamiento de los dos tipos de mallas. Además de observar si el uso de soldadura genera un cambio en la respuesta de muros frente a cargas sísmicas.

Para el estudio de las respuestas en los muros se utiliza fotogrametría, con el que se obtiene información de deformaciones y desplazamientos en los muros. Finalmente se generan modelos numéricos que repliquen el comportamiento visto en los ensayos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVOS GENERALES

El trabajo tiene como finalidad el estudio de la respuesta de 4 pares de ensayos, ya realizados, de muros de hormigón armado, usando doble mallas preparadas A630 y electrosoldadas dúctiles A630S, con el fin de evaluar y comparar el comportamiento de ambos tipos de mallas.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Procesar la respuesta de muros de hormigón armado a través de la herramienta de fotogrametría e instrumentación estándar (LVDT's).
- Obtener información de deformaciones, desplazamientos y altura de la concentración de daño en muros de hormigón armado.
- Estudiar la distribución de fisuras en muros y comparar ambos tipos de mallas.
- Comparación de resultados con los obtenidos con modelos numéricos.

1.3 METODOLOGIA

- Revisión bibliográfica: Mediante la bibliografía existente, se pretende recopilar información para ser utilizada en este trabajo.
- Procesamiento de datos: A través de la herramienta de fotogrametría e instrumentación estándar (LVDT's) se procesará la respuesta de los muros.
- Generación de modelos: Se realizarán modelos numéricos no lineales en la plataforma SAFE-TB.
- Análisis y Comparación de resultados: Se analizarán los resultados obtenidos mediante los modelos numéricos y posteriormente se compararán las respuestas de los muros con mallas amarradas y electrosoldadas.
- Recomendación en el uso de mallas electrosoldadas A630S: Posterior al análisis se desarrollarán recomendaciones para el uso de mallas electrosoldadas A630S dúctil en muros.

1.4 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

CAPITULO 1: INTRODUCCION

Se da a conocer la motivación que impulsa este estudio, los objetivos que se desean alcanzar y la metodología para lograrlos. Además, se presentan los capítulos de esta memoria.

CAPITULO 2: REVISION BIBLIOGRAFICA

Se recopila información de trabajos anteriores similares que son de utilidad para esta memoria, se describe el funcionamiento del programa Ncorr y se estudian trabajos que utilicen fotogrametría en muros de hormigón armado.

CAPITULO 3: ANTECEDENTES GENERALES

Se presentan los pasos a seguir para el análisis por fotogrametría mediante correlación de imágenes y se explican las principales características del programa SAFE-ToolBox con el cual se realizan los modelos de elementos finitos de los muros.

CAPITULO 4: MONTAJE EXPERIMENTAL

Se describe la geometría, detallamiento y construcción de los muros ensayados. Se detalla la instrumentación, el protocolo y ejecución del ensayo. Además, se presenta la resistencia de los materiales.

CAPITULO 5: FOTOGRAMETRIA

Se da a conocer el proceso de selección, filtrado y validación de los datos obtenidos a través de fotogrametría. Además se muestran los resultados obtenidos a través de esta técnica.

CAPITULO 6: MODELACION NUMERICA

Se da a conocer la metodología de modelación de los muros en el programa SAFE, y se muestran los resultados obtenidos.

CAPITULO 7: CONCLUSIONES

Se presentan las conclusiones del trabajo realizado, se discuten los resultados obtenidos y se dan recomendaciones sobre el uso de mallas electrosoldadas dúctil A630S y para futuras investigaciones.

CAPÍTULO 2

REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 INTRODUCCION

Como punto de partida para esta memoria se realiza una recopilación bibliográfica de trabajos anteriores sobre ensayos de muros de hormigón armado con mallas electrosoldadas y el uso de fotogrametría para la obtención de datos en la respuesta de muros frente a cargas cíclicas. En esta sección se presenta un resumen de estos trabajos, junto con sus principales resultados y conclusiones, con el fin de establecer el estado de las investigaciones sobre estos temas.

Por otro parte, se muestra un resumen de la normativa vigente para el diseño estructural de muros de hormigón armado con acero electrosoldado y una pequeña descripción del método de análisis del software Ncorr.

2.2 ESTUDIOS PREVIOS

Algunos autores que han estudiado la respuesta de muros de hormigón armado con mallas electrosoldadas frente a cargas sísmicas son Cardenas & Cutipa (2009), Almeida (2015), Bartolome, Muñoz, Villagarcia & Acuña (2007), entre otros.

Cardenas & Cutipa (2009) realizan un estudio de investigación experimental para comprender el comportamiento sísmico de muros delgados de hormigón armado con mallas electrosoldadas reforzados en su zona central, y posteriormente compararlo con el comportamiento de muros de hormigón armado con mallas tradicionales (dúctil). Para la realización de lo anterior se construyen cuatro muros de igual geometría y refuerzo vertical tradicional dúctil colocado en los extremos, variándose el refuerzo interior con cuantías de $\rho = 0.0025$ y $\rho = 0.005$. En cada caso se utilizó malla electrosoldada (muros ME1 y ME2) y refuerzo tradicional (muros RD1 y RD2). Teóricamente se espera que los muros ME1 y RD1 fallen por corte y los muros ME2 y RD2 fallen por flexión. La Figura 2.1 y Figura 2.2 muestra un esquema del refuerzo correspondiente para el muro RD1 y ME1, mientras que la Tabla 2.1 detalla el refuerzo para cada muro.

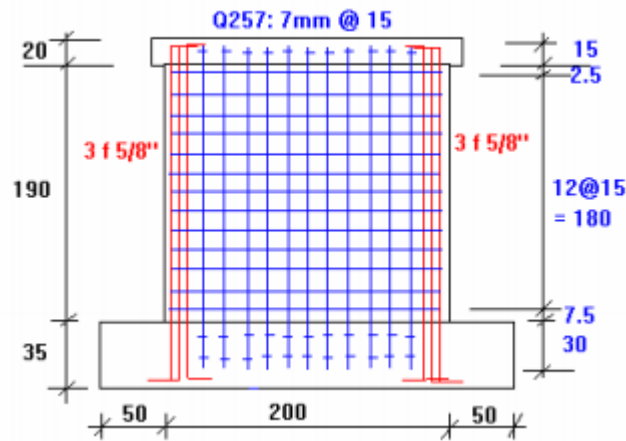


Figura 2.1:Esquema del refuerzo muro ME1. (Cardenas & Cutipa, 2009)

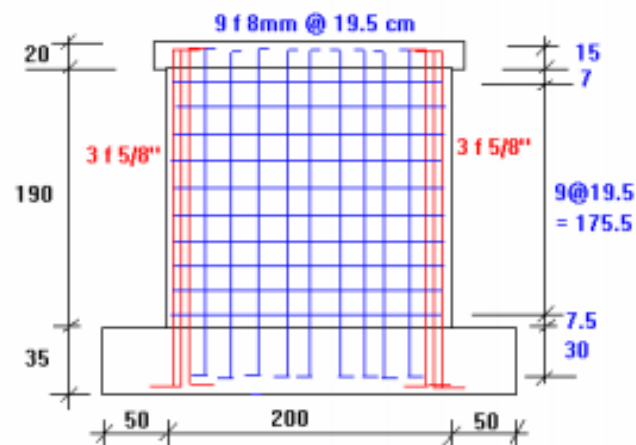


Figura 2.2:Esquema del refuerzo RD1. (Cardenas & Cutipa, 2009)

Tabla 2.1:Características de los muros.

Muro	Dimensiones (cm)	Refuerzo vertical dúctil en extremos	Cuantía de refuerzo interno
ME1	200x190x10	3 ϕ 5/8"	0.0025: Q257 (7mm @ 15 cm)
RD1	200x190x10	3 ϕ 5/8"	0.0025: 8 mm @ 19.5 cm (dúctil)
ME2	200x190x10	3 ϕ 5/8"	0.0050: Q503 (8mm @ 10 cm)
RD2	200x190x10	3 ϕ 5/8"	0.0050: 8 mm @ 10 cm (dúctil)

Para la instrumentación del ensayo se utilizaron un total de 7 LVDT's y una celda de carga con la cual se midió la carga lateral que imprimió la gata hidráulica, como se observa en la Figura 2.3. El ensayo consistió en una carga lateral monótonicamente creciente hasta que se formó la primera fisura diagonal importante, posteriormente se controló el desplazamiento lateral D_1 (Ver Figura 2.3). Cabe señalar que los muros no presentan carga vertical en ningún momento del ensayo.

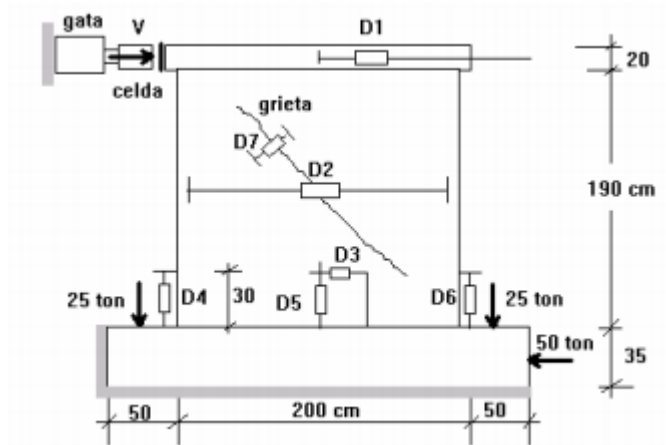


Figura 2.3: Instrumentación empleada. (Cardenas & Cutipa, 2009)

Respecto al comportamiento de los muros durante el ensayo los muros ME1 y RD1 se comportaron de acuerdo con lo esperado teóricamente, presentando una falla principal por corte, mientras que los muros ME2 y RD2 no se comportaron de acuerdo con lo esperado ya que presentaron una falla más bien mixta por corte y flexión. Los resultados gráficos obtenidos del comportamiento de los muros se pueden observar en la Figura 2.4 y Figura 2.5, en donde se muestra Fuerza cortante vs desplazamiento.

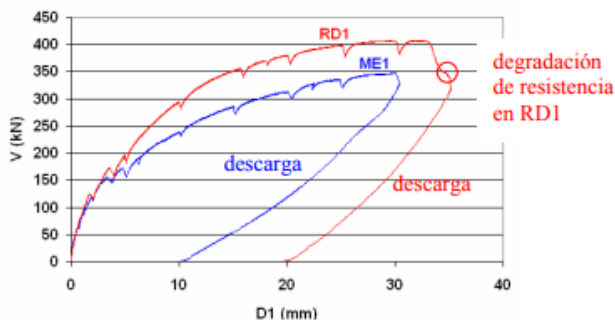


Figura 2.4: Corte-desplazamiento para los muros ME1 y RD1. (Cardenas & Cutipa, 2009)

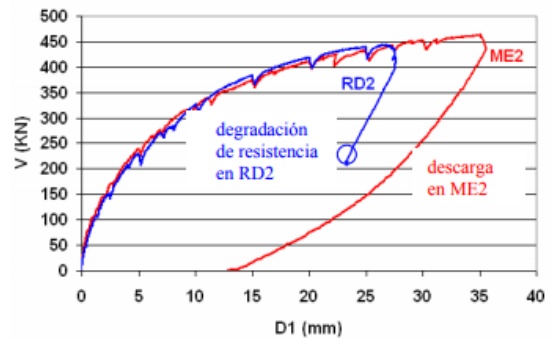


Figura 2.5: Corte-desplazamiento para los muros ME2 y RD2. (Cardenas & Cutipa, 2009)

En vista de los resultados los autores concluyen que, ante una falla por esfuerzos de corte en los muros, el comportamiento sísmico fue similar, tanto en el muro reforzado con malla tradicional dúctil como en el reforzado con malla electrosoldada. En lo referente a la mayor resistencia que tuvo el muro RD1 respecto a ME1, esta se atribuyó a la mayor resistencia de los materiales en el primero. Para una falla mixta por flexión y fuerza cortante, el comportamiento sísmico también fue similar, ya sea que el muro se encontrase reforzado con malla tradicional o electrosoldada. Por lo tanto, tras lo visto en esta investigación, los autores concluyen que el comportamiento sísmico de los muros que fueron reforzados con malla electrosoldada resultó similar al caso con malla tradicional en las mismas cuantías, para falla por corte, mixta y flexión.

En tanto Almeida (2015) busca analizar el comportamiento sísmico de muros delgados de hormigón armado con malla de refuerzo central única; además de evaluar el tipo de acero (malla electrosoldada o malla tradicional), la cuantía de refuerzo de la malla, la cantidad de armadura vertical de borde y el espesor de muros, esto enfocado en el uso de muros en viviendas de baja altura en Chile. Para esto se ensayan 6 muros de hormigón armado con malla electrosoldada central y cuantía normal (mínima requerida por el código ACI), cuantía alta y reducida. Adicionalmente, se ensayan muros diseñados con barras tradicionales con las mismas cuantías para poder comparar su desempeño con los muros con malla electrosoldada.

Todos los muros tienen una geometría de espesor de 100 mm, un alto de 1600 mm y un largo de 1600 mm. Estos fueron construidos con una viga superior de hormigón armado (1600 mm de largo, 425 mm de alto y espesor de 300mm) para la aplicación de la carga horizontal y con una base inferior (2100 mm de largo, 425 mm de alto y 400 mm de espesor) para anclar el muro al suelo.

Los muros para la investigación fueron diseñados para fallar al corte, por lo que se les colocó armadura de borde elevada para evitar la falla por flexión. Para el muro M1 se disponen seis barras $\varphi 16$ mm en cada extremo del muro y estribos de $\varphi 6$ mm cada 150 mm. Esta misma armadura de borde se consideró para todos los muros, excepto para el muro M2, en que se colocó solamente dos barras $\varphi 16$ mm a cada extremo.

El muro M1 se diseñó con una malla electrosoldada central ACMA C196 ($\varphi_t=5$ mm a 100 mm, $A_{st}=1.96$ cm²/m). El muro M2 se diseñó con la misma malla de muro M1. El muro M3 se diseñó con una malla electrosoldada central ACMA C257 ($\varphi_t=7$ mm a 150 mm, $A_{st}=2.57$ cm²/m). El muro M4 se diseñó con una malla electrosoldada central 17 ACMA C139 ($\varphi_t=4.2$ mm a 100 mm, $A_{st}=1.39$ cm²/m). El acero de las mallas es AT560-500. Para el muro M5 la armadura vertical y horizontal distribuida (ρ_l, ρ_v), se utilizaron barras $\varphi 8$ mm espaciadas 250 mm ($\varphi_t=8$ mm $A_{st}=2.01$ cm²/m). Para el diseño del muro M6 se utilizaron barras $\varphi 8$ mm espaciadas 360 mm ($\varphi_t=8$ mm $A_{st}=1.40$ cm²/m). El acero de las barras es A630-420M. En la Tabla 2.2 se hace un resumen del propósito del ensayo y la armadura de cada muro.

Tabla 2.2: Resumen del propósito y armadura de cada muro.

Muro	Propósito de Ensayo	Tipo de Acero	Malla	l_w [mm]	t_w [mm]	h_w [mm]	h_w/l_w	$\rho_t = \rho_v$
M1	Muro de referencia	AT 560-500	C196 $\varnothing 5@100$ mm	1600	100	1600	1.0	0.0020
M2	Cuantía de borde	AT 560-500	C196 $\varnothing 5@100$ mm	1600	100	1600	1.0	0.0020
M3	Efectos de cuantía de refuerzo alta	AT 560-500	C257 $\varnothing 7 @100$ mm	1600	100	1600	1.0	0.0026
M4	Efectos de cuantía de refuerzo reducida	AT 560-500	C139 $\varnothing 4.2@100$ mm	1600	100	1600	1.0	0.0014
M5	Efectos de tipo de acero	A630-420 M	$\varnothing 8@250$ mm	1600	100	1600	1.0	0.0020
M6	Efectos de tipo de acero y cuantía de refuerzo reducida	A630-420 M	$\varnothing 8@360$ mm	1600	100	1600	1.0	0.0014

Para la configuración del ensayo se aplicó una fuerza lateral con un actuador hidráulico de 500 kN al lado este del muro. Los muros no son sometidos a cargas verticales y para evitar el desplazamiento fuera del plano de la viga superior de hormigón armado, se colocaron dos vigas de acero de sección doble T con rodillos, como se muestra en la Figura 2.6.

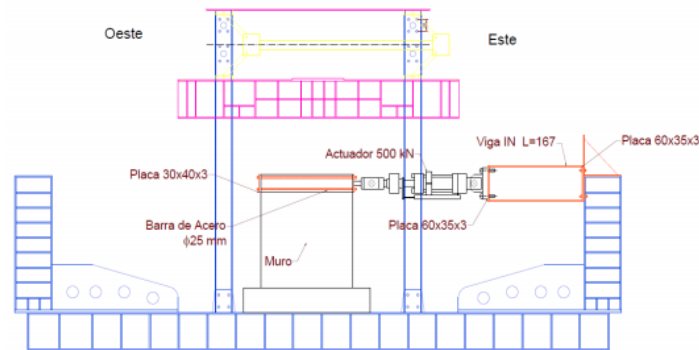


Figura 2.6: Configuración del ensayo. (Almeida, 2015)

Los muros fueron instrumentados con una celda de carga, 14 transductores de desplazamiento, y una cámara fotográfica de alta resolución la cual tomó fotos para luego calcular las deformaciones utilizando el método de correlación de imágenes.

La carga horizontal se aplicó mediante el control de desplazamiento del actuador. El protocolo de aplicación de carga horizontal se hizo de manera incremental, se aplicaron dos ciclos de la misma amplitud de desplazamiento para cada uno. La amplitud de los desplazamientos fue elegida con el objetivo de alcanzar una cierta deriva, la deriva objetivo que se eligió para cada ciclo de carga fueron entre 0.05% y 1.6%.

Dentro de los resultados obtenidos y que son de interés para esta memoria se encuentra la comparación del muro M1 con M5 y M4 con M6.

En la Figura 2.7 podemos ver la comparación de las curvas fuerza- desplazamiento y las curvas envolventes del muro M1 y M5, los cuales tienen la misma cuantía, pero con diferente tipo de malla, M1 tiene malla electrosoldada ACMA y M5 tiene una malla de refuerzo tradicional. Se observa que el muro M5 tiene un comportamiento más dúctil que el muro M1. Sin embargo, ambos muros presentan una resistencia similar.

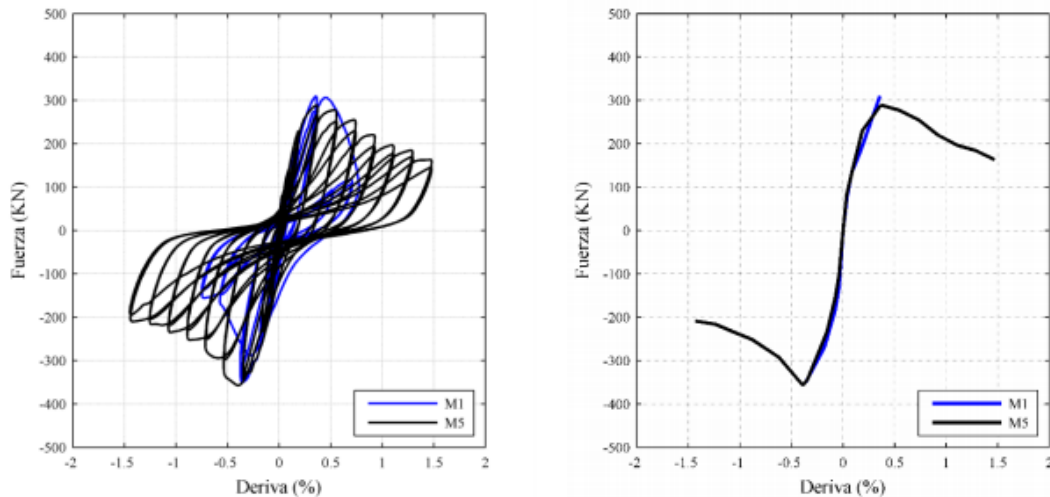


Figura 2.7: Comparación de los muros M1 y M5. (Almeida, 2015)

La Figura 2.8 compara las curvas fuerza-desplazamiento y las curvas envolventes del muro M4 y muro M6, los cuales tienen la misma cuántica de 0.0014. Sin embargo, el muro M4 tiene una malla de refuerzo ACMA C139 y el muro M6 tiene barras de refuerzo tradicionales espaciadas a 360 mm.

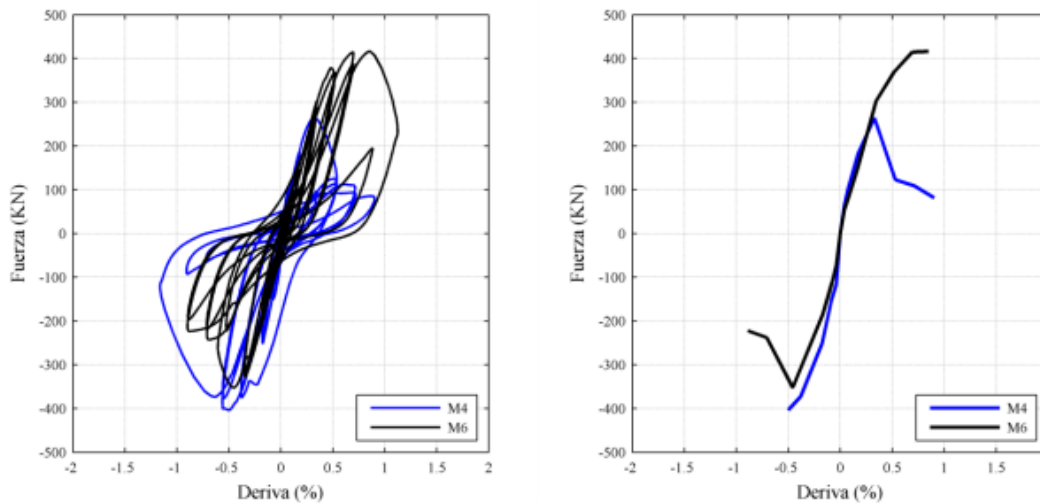


Figura 2.8: Comparación de los muros M4 y M6. (Almeida, 2015)

Con los resultados obtenidos el autor concluye que la falla observada en los muros de hormigón armado con mallas de alambre electrosoldado fue frágil debido a que la capacidad de elongación de esta malla es limitada. Esta limitada capacidad implicó la fractura de la malla horizontal y vertical de los muros. Por lo que, para la evaluación del desempeño sísmico de muros con este tipo de refuerzo de corte, la deriva última debiese ser considerada igual a la deriva de la resistencia al corte máximo. Además, se observa que el tipo de refuerzo (mallas de alambre soldado y barras tradicionales) afecta significativamente la capacidad de desplazamiento de los muros de hormigón armado.

En cuanto a la comparación del muro M1 con malla electrosoldada y el muro M5 con malla tradicional se concluye que el segundo tuvo un comportamiento más dúctil que el

primero. Sin embargo, ambos muros presentaron prácticamente la misma resistencia máxima.

Por último, y al igual que la investigación de Cardenas & Cutipa, se recomienda el uso de muros con malla central electrosoldada para la construcción de viviendas de baja altura, salvo que el diseño requiera mayor ductilidad y capacidad de deformación alta, en cuyo caso se sugiere armadura convencional.

2.3 NORMATIVA CHILENA

En Chile el diseño estructural de muros de hormigón armado está regulado por los decretos supremos 60 (DS60, 2011) y 61 (DS61, 2011). El DS60 establece que los elementos y estructuras de hormigón armado se deben diseñar según los requisitos del ACI 318 (ACI 318-08).

El capítulo 14 del ACI 318 establece que la cuantía de refuerzo mínima para la armadura vertical es $\rho_t = 0.0012$ para mallas de alambre electrosoldado (liso o estriado) no mayor que 16 mm de diámetro. En cuanto a la cuantía de refuerzo mínima para la armadura horizontal es $\rho_t = 0.0020$ para malla electrosoldada de alambre (liso o estriado) no mayor que 16 mm de diámetro.

La malla electrosoldada ACMA A630S cumple las normas chilenas NCh 3334 Acero – barras laminadas en caliente, soldables, para hormigón armado – Requisitos (NCh 3334, 2014) en donde se establecen los requisitos mecánicos, geométricos y de composición química que deben cumplir las barras laminadas en caliente soldables y la norma NCh 3335 Acero – Mallas Electrosoldada de barras laminadas en caliente, soldable, para hormigón armado – Requisitos (NCh 3335, 2014) en ella se establecen los requisitos que deben cumplir las mallas electrosoldadas para ser usadas en hormigón armado.

Además las propiedades mecánicas del acero A630S cumplen con la norma chilena NCh 204 Acero – Barras laminadas en caliente para hormigón armado (NCh 204, 2006).

2.4 USO DE FOTOGRAMETRIA

En los últimos años diversos estudios han utilizado la correlación de imágenes como metodología para la obtención de datos de desplazamientos y deformaciones, por lo que existen diferentes programas con los cuales se puede realizar esta técnica. Dentro de los programas disponibles se encuentra el software VIC-2D, Ncorr, GeoPIV-RG y el programa desarrollado por Inzunza en su memoria (Inzunza, 2014), para seleccionar cual se utilizará en esta memoria es necesario conocer las ventajas y desventajas de cada uno. GeoPIV-RG es un software que enfoca su estudio principalmente en suelos, por lo que no funciona de buena manera en elementos de hormigón armado, VIC-2D es un software desarrollado para elementos de hormigón armado pero que para grandes deformaciones no logra medir de manera efectiva las deformaciones, el programa desarrollado por Inzunza, él especifica que si se desea obtener un bajo error en los desplazamientos es necesario que el espaciamiento entre puntos sea grande por lo que se pierden zonas de interés, por último se encuentra el software Ncorr el cual es capaz de mostrar las zonas de mayor deformación y desplazamiento identificando el agrietamiento, además de tener una interfaz de fácil uso. Es por estas razones que en esta memoria la obtención de datos por fotogrametría se realizará en el programa Ncorr desarrollado por J. Blaber et al. (Blaber, Antoniou, & Adair, 2015) y a continuación se describen sus principales características.

Ncorr es un software gratuito desarrollado en Matlab que utiliza el método de correlación de imágenes Digitales (DIC). El objetivo de este método es obtener campos de desplazamientos y deformaciones dentro de una región de interés (ROI), en este caso para los muros que se están ensayando, estos campos pueden reducirse o interpolarse para formar un campo de desplazamiento y deformación continuo. El método DIC utiliza el procesamiento de imágenes fotográficas para la resolución del problema. Básicamente, se busca una correspondencia uno a uno entre la fotografía inicial de referencia (de muro sin deformar) y las fotografías actuales (fotografías deformadas subsiguientes). Para lograr esto DIC toma pequeños subconjuntos (pequeñas subsecciones) de la fotografía de referencia y determina sus ubicaciones respectivas en la configuración de la fotografía actual. Para cada subconjunto, se obtiene información de desplazamiento y tensión a través de la transformada utilizada para coincidir con la ubicación del subconjunto en la configuración de la fotografía actual. Como resultado final se obtiene una cuadrícula que contiene información sobre el desplazamiento y la deformación con respecto a la fotografía de referencia.

Antes de explicar el algoritmo con el que trabaja Ncorr es necesario entender los conceptos de subconjunto y vecindad, el primero se define como la agrupación de una cantidad de píxeles (unidad básica de una imagen) definida en dirección horizontal y vertical, mientras que el segundo es un grupo de subconjuntos creada para identificar en las imágenes deformadas, una posición específica de la imagen de referencia.

El programa Ncorr contiene un algoritmo que comienza otorgándole una posición (x_{ref} , y_{ref}) de referencia a cada subconjunto en la imagen inicial, y dado una vecindad de un tamaño ingresada por el usuario, encontrar las coordenadas en las imágenes siguientes a través de las ecuaciones (2.1) y (2.2).

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

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

Donde \hat{x}_{cur_i} e \hat{y}_{cur_j} son las coordenadas de cada subconjunto de la nueva foto. x_{ref_c} e y_{ref_c} son las coordenadas del centro de la vecindad de la foto de referencia inicial, los índices (i, j) son utilizados para la ubicación relativa de los puntos del subconjunto con respecto al centro de este. El subíndice “rc” significa que la transformada es en referencia al sistema de coordenadas actual. Por último, es posible calcular (u, v) respecto a la foto de referencia.

Para definir la ubicación correcta en las imágenes deformadas primero se calcula un factor de correlación llamado “normalized Cross Correlation (NCC)”, que consiste en una normalización cruzada en función de la intensidad de escalada de grises de cada imagen, mientras más cercano a uno, se identifica de mejor manera la posición de la vecindad.

Posteriormente, existe una segunda iteración llamada “least square Correlation (LSC)”, que realiza una normalización a través de mínimos cuadrados en función de la intensidad de escala de grises de cada imagen, mientras más cercano a 0 el valor del coeficiente mejor será la correlación. Para la obtención del coeficiente de correlación LSC el programa calcula las deformaciones mediante una optimización no lineal llamada “inverse Compositional Gauss-Newton”.

En la Figura 2.9 se muestra gráficamente cómo funciona el algoritmo antes descrito, en verde se tiene el subconjunto iterado. También se observa que el algoritmo avanza en la dirección del menor valor del coeficiente de correlación obtenido con LSC (C_{ls}) hasta cubrir todo campo de interés.

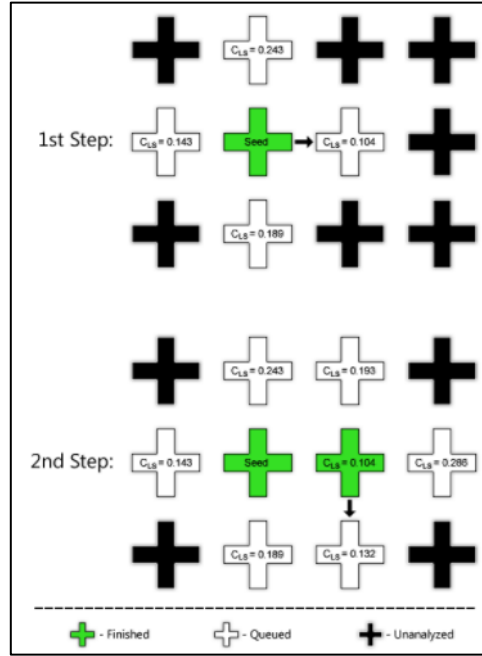


Figura 2.9: Esquema de como Ncorr comienza a analizar la vecindad definida. (Blaber, Antoniou, & Adair, 2015)

Finalmente, las deformaciones y desplazamientos son calculados a través de las siguientes ecuaciones. En el caso de los desplazamientos se utiliza el método de mínimos cuadrados lineales sobre un plano para así suavizar el ruido.

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

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

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

$$u(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y \quad (2.6)$$

$$v(x, y) = b_0 + b_1 x + b_2 y \quad (2.7)$$

Algunos estudios de la respuesta de muros frente a cargas cíclicas que utilizan Ncorr para la obtención de datos son los realizados por Manríquez (Manríquez, 2016) y Muñoz (Muñoz, 2017).

Manríquez (Manríquez, 2016) usa el sistema de fotogrametría para determinar deformaciones y desplazamientos en el ensayo de cuatro muros bandera de hormigón armado que son sometido a carga axial constante y cargas lateral cíclicas. Primeramente, él realizó una comparación de los datos obtenidos por sensores de movimiento LVDT's y los obtenidos mediante fotogrametría, donde obtiene que la similitud de los datos por ambos métodos es aceptable para grandes desplazamientos; sin embargo, para pequeños desplazamientos (cercaos al error establecido por el programa) las distorsiones crecen.

Manríquez concluye que al comparar los resultados obtenidos por los LVDT's que se encuentran dentro del muro y los resultados obtenidos con fotogrametría, existe una correlación que valida el uso de fotogrametría como método de obtención de desplazamientos y deformaciones. Además de que el uso de fotogrametría entrega mayor cantidad de información que los sensores LVDT's, por lo que posteriormente los resultados son obtenidos mediante este método.

Dentro los resultados obtenidos con fotogrametría por Manríquez se tiene el perfil de deformaciones verticales y el campo de deformaciones principales en el muro para una cierta deriva como se muestra en la Figura 2.10 y Figura 2.11 respectivamente.

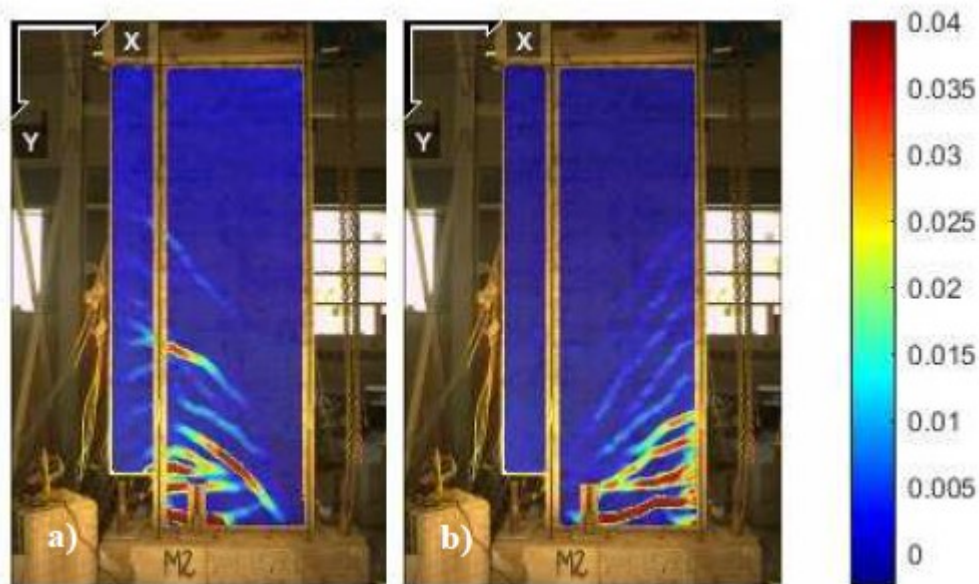


Figura 2.10: Deformaciones verticales para una deriva del 3%: a) Sentido negativo; b) Sentido positivo. (Manríquez, 2016)

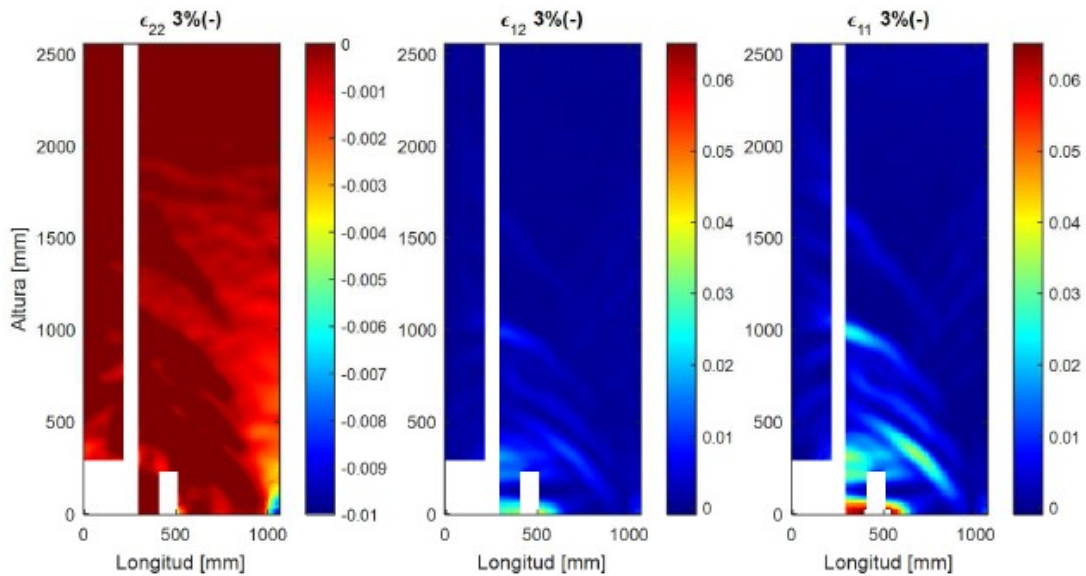


Figura 2.11: Campo deformaciones principales deriva 3% sentido negativo. (Manríquez, 2016)

Por otro lado, Muñoz (Muñoz, 2017) utiliza el sistema de fotogrametría para obtener información sobre desplazamientos y deformaciones en el ensayo de cuatro muros de hormigón armado con discontinuidad central en la base con presencia o ausencia de losas en la zona de la discontinuidad, sometidos a carga lateral variable.

Una de las ventajas de utilizar Ncorr en el análisis por fotogrametría es que el programa entrega como resultado una matriz con los desplazamientos y deformaciones para cada fotografía añadida, y con esto permite al usuario procesar los datos de la manera más adecuada para el estudio que realice. Algunos de los resultados que Muñoz obtuvo mediante fotogrametría se encuentra el perfil de deformación unitaria vertical en la altura que se muestra en la Figura 2.12 y el perfil de deformaciones vertical a lo largo del muro para una capa de muro que se observa en la Figura 2.13.

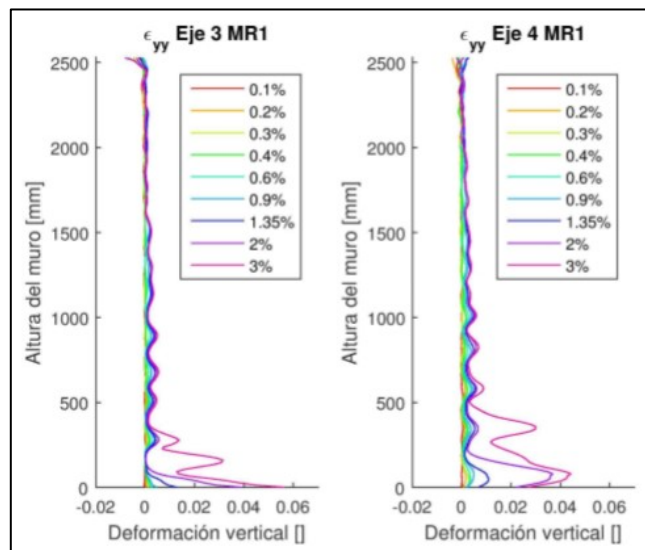


Figura 2.12: Perfil de deformación vertical en altura. (Muñoz, 2017)

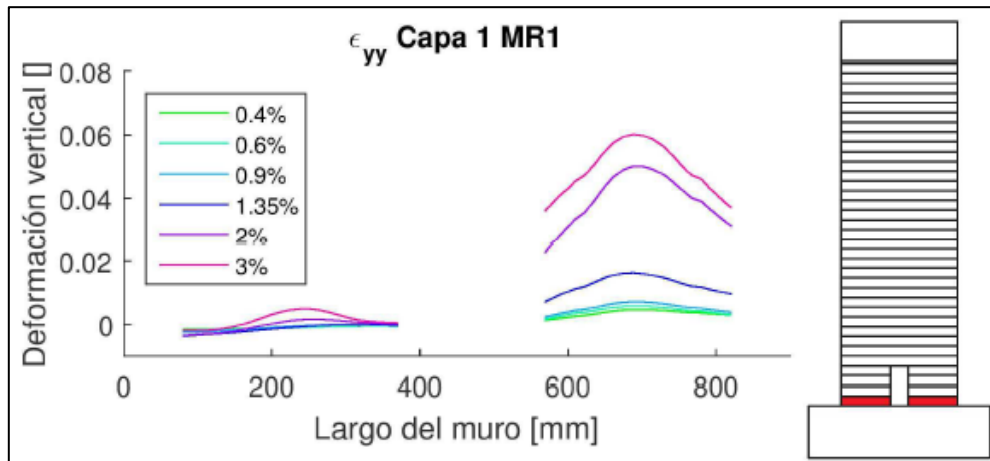


Figura 2.13: Deformación de deformaciones a lo largo del muro. (Muñoz, 2017)

CAPÍTULO 3

ANTECEDENTES GENERALES

3.1 INTRODUCCION

En este capítulo se presentan los pasos a seguir para realizar el análisis por fotogrametría en el programa Ncorr con el fin de obtener los desplazamientos y deformaciones de los muros ensayados. Además, se explican las principales características del programa SAFE-ToolBox, con el cual se realizan los modelos de elementos finitos de los muros.

3.2 FOTOGRAMETRIA

Ncorr posee una interfaz de fácil uso, ya que muestra el estado del análisis en cada momento. Antes de comenzar el análisis es necesario seleccionar las fotografías a utilizar, las que deben estar en una misma carpeta con nombres enumerados y correlativos.

Luego de seleccionar las imágenes, se debe cargar la imagen referencial en el programa a partir de la cual se calcula la posición inicial del muro. Posteriormente se cargan las demás fotos a analizar. En la Figura 3.1 se muestra la ventana de Ncorr con la fotografía referencial y las fotos del ensayo cargadas.

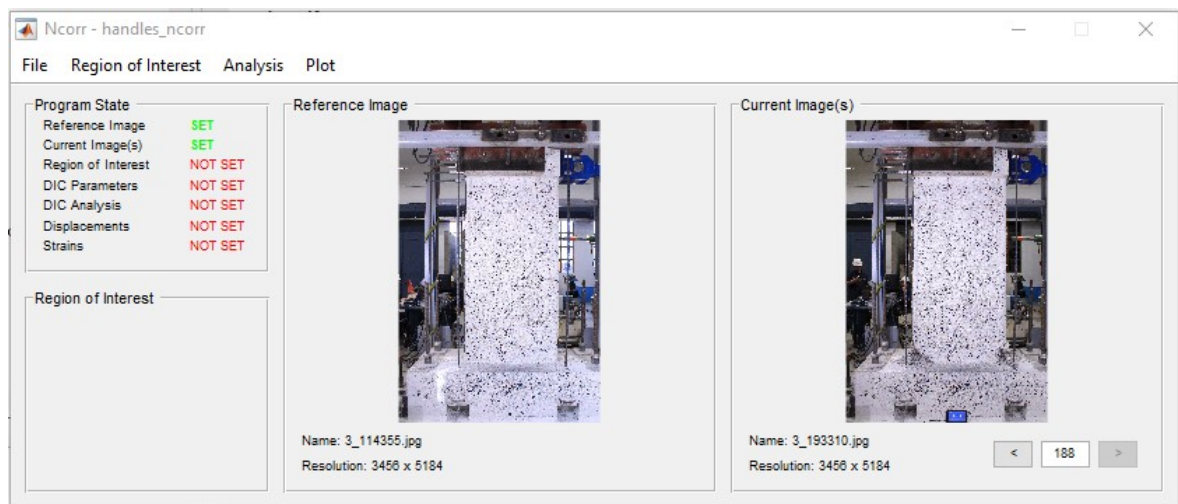


Figura 3.1: Ventana de Ncorr con fotografías cargadas.

A continuación, se debe definir la región de interés, ROI (Region of interest, en inglés), con esto se determina el área donde se realizarán los cálculos para obtener desplazamientos y deformaciones. En la Figura 3.2 se muestra la ROI definida para uno de los muros estudiados.

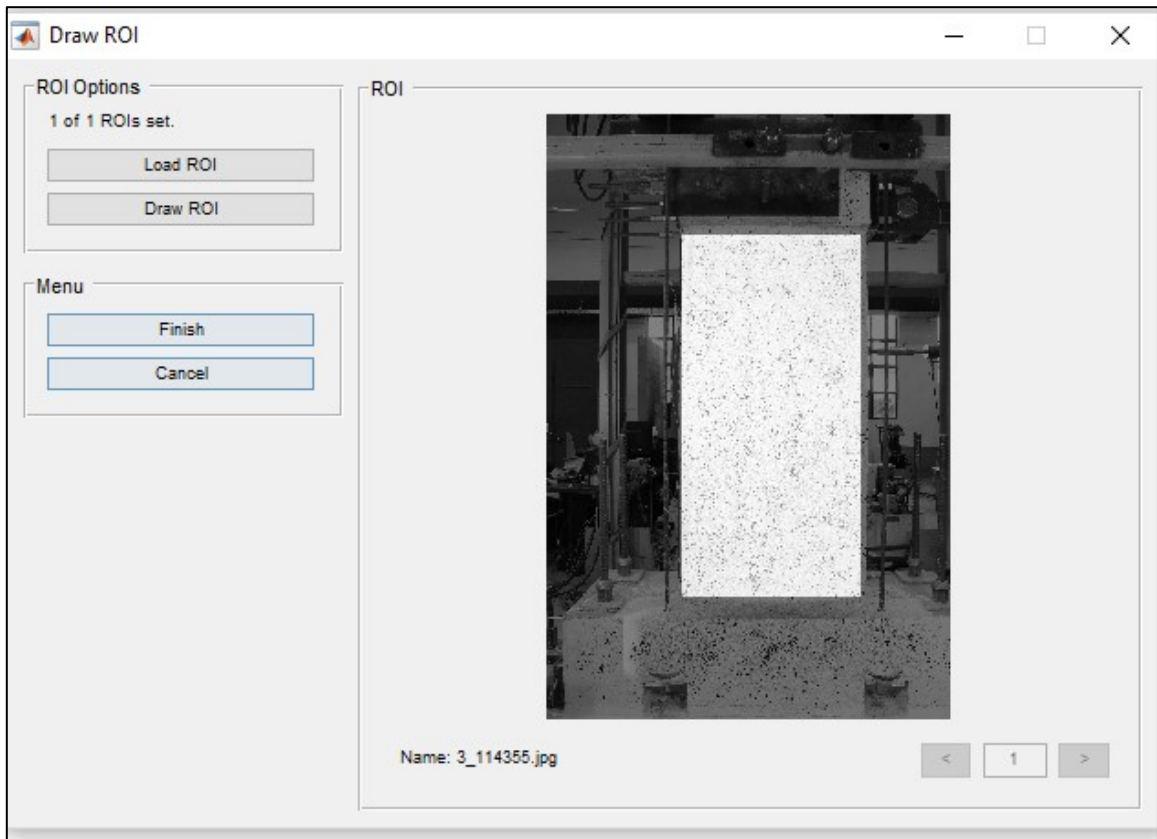


Figura 3.2: ROI definido para el análisis de uno de los muros.

Luego de seleccionar la ROI, se deben ingresar los parámetros de análisis, estos parámetros son determinantes en la calidad de los resultados obtenidos. Primero se debe definir el radio de pixeles que serán considerados como subconjunto. Luego se define el espaciamiento que tendrán los subconjuntos definidos en el paso anterior. Posteriormente se ingresan los parámetros para el término de convergencia (norma y número de iteraciones máximas). Por último, se consideran las opciones de realizar análisis de altas deformaciones (este va actualizando la fotografía de referencia y la ROI) y de realizar un análisis discontinuo (el cual considera que se separa el material a estudiar, como ocurre al generarse grietas en el hormigón). En la Figura 3.3 se muestra la ventana en la cual se deben ingresar los parámetros de análisis.

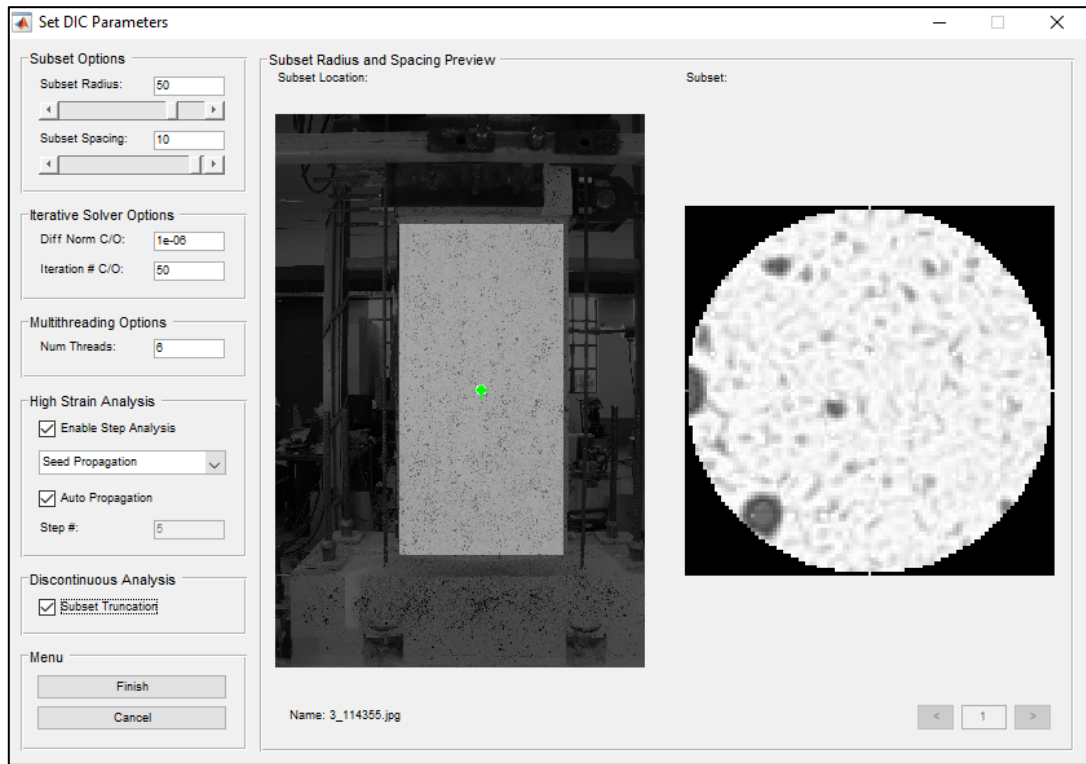


Figura 3.3: Parámetros para el análisis DIC.

El siguiente paso es el análisis de las fotografías, para esto se definen la cantidad de semillas, que son el punto inicial de la convergencia y a donde se realiza la primera correlación, lo que se muestra en la Figura 3.4.



Figura 3.4: Colocación de semillas para el análisis DIC.

Para finalizar el análisis se debe establecer una relación entre píxeles y una unidad de longitud para estimar los desplazamientos. Para esto, se ingresa una foto con un elemento rectangular metálico de medidas conocidas colocado sobre el muro con el que se calcula la relación mm/píxel. En la Figura 3.5 se muestra este paso.

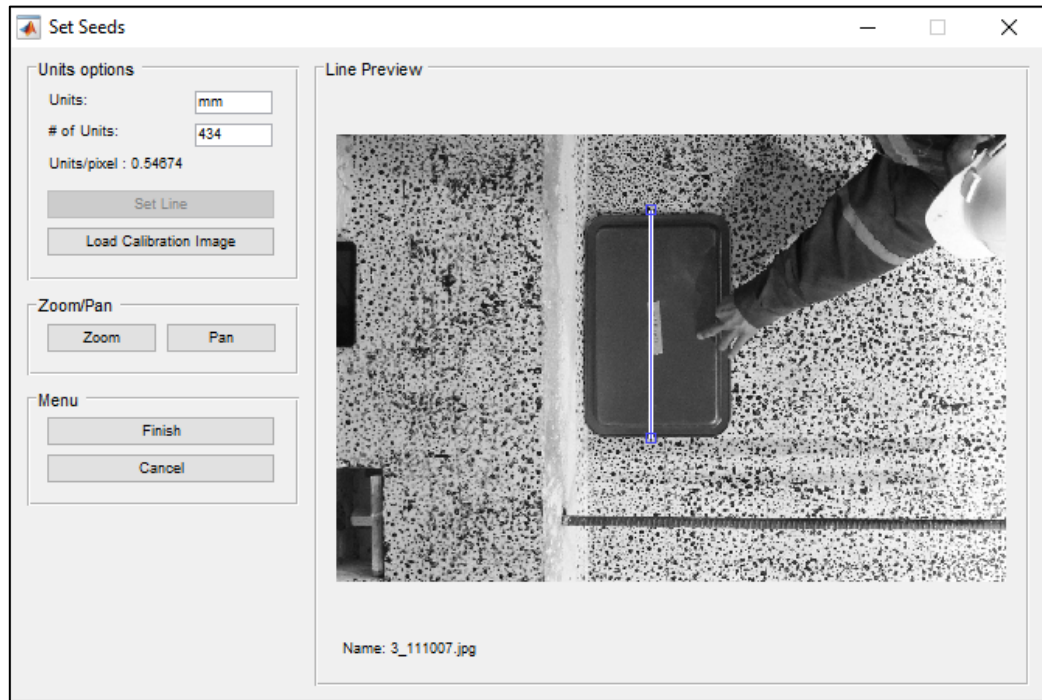


Figura 3.5: Ventana de Ncorr para definir escala.

Para el análisis de deformaciones, se debe seleccionar un radio de subconjunto a partir del cual se define un plano que represente dicha vecindad de puntos y con esto obtener las deformaciones. Ncorr da la opción de mostrar los resultados usando un enfoque lagrangiano o euleriano y la opción de realizar un análisis discontinuo. La Figura 3.6 muestra la ventana en la que se ingresa lo anteriormente descrito.

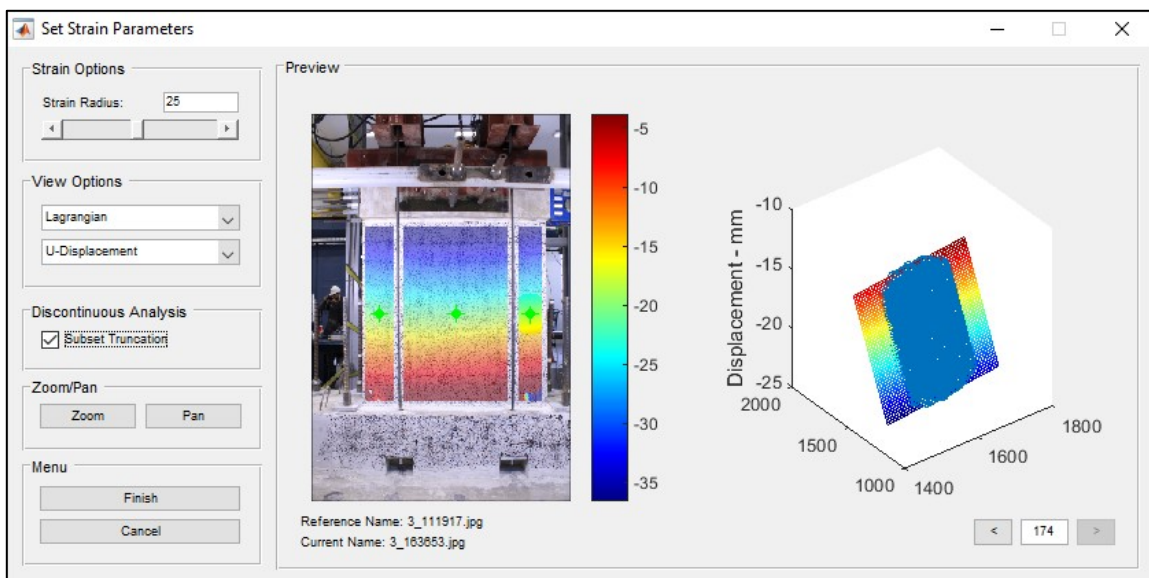


Figura 3.6: Ventana de Ncorr para el análisis de deformaciones.

Como se menciona al inicio, antes de realizar el análisis con Ncorr es necesario primero seleccionar las fotografías a utilizar, para esto se realiza un filtrado de las fotos el cual se describe más adelante en el capítulo 5.2.

3.3 SAFE-TOOLBOX

SAFE- ToolBox es un framework de elementos finitos programado en MATLAB, desarrollado por Rojas (Rojas, 2016). El programa reproduce el comportamiento no lineal de estructuras de hormigón armado frente a cargas cíclicas y estáticas.

3.3.1 DESCRIPCION GENERAL

El programa utiliza elementos cuadriláteros tipo membrana de cuatro nodos, nueve puntos de cuadratura y seis grados de libertad por cada nodo: tres giros y tres desplazamientos. Para la representación del comportamiento del hormigón armado se crea una sección compuesta por capas de hormigón y acero los cuales poseen adherencia completa.

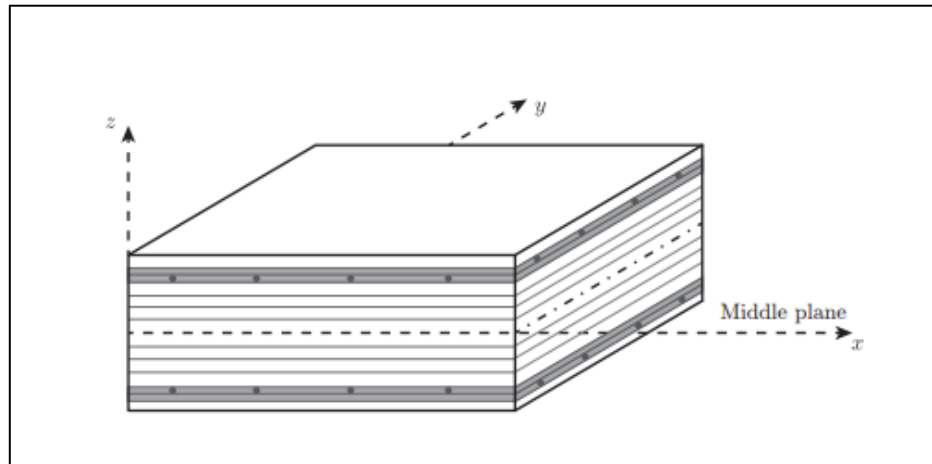


Figura 3.7: Sección compuesta por capas (Rojas, Anderson, & Massone, 2016).

SAFE permite variar la geometría del elemento analizado además de las propiedades del hormigón, el acero.

3.3.2 LEYES CONSTITUTIVAS

3.3.2.1 HORMIGON

Para el hormigón se utiliza un modelo ortotrópico el cual tiene un enfoque de deformación promedio. El comportamiento del hormigón utiliza el modelo propuesto por Massone et al. (Massone, Orakcal, & Wallace, 2009).

El comportamiento del hormigón a compresión está definido por la curva de Thorenfeldt et al. (Thorenfeldt, Tomaszewicz, & Jensen, 1987) determinada por la ecuación (3.1).

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

Donde f'_c es la resistencia máxima a compresión del hormigón, ϵ_{c0} la deformación del hormigón para su resistencia máxima, n y k son parámetros calibrados por Carreira y Kuang-Han para hormigones con resistencia normal. La curva se muestra en la Figura 3.8.

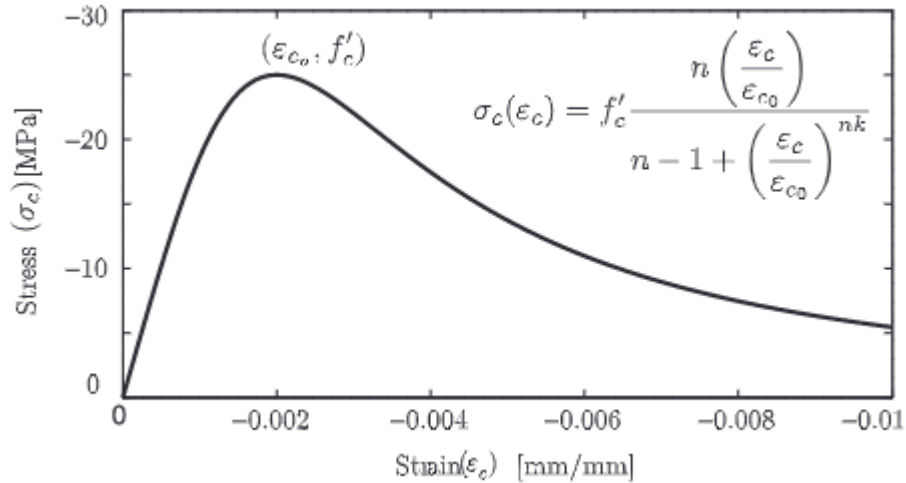


Figura 3.8: Modelo constitutivo del hormigón a compresión propuesto por Thorenfeldt (Rojas, Anderson, & Massone, 2016).

La curva del hormigón sometido a tracción utiliza la curva propuesta por Belarbi y Hsu (Belarbi & Hsu, 1994) descrita por la ecuación (3.2), la cual se divide en dos partes: previo y posterior al agrietamiento.

$$\sigma_c(\epsilon_c) = \begin{cases} \left(\frac{f_{cr}}{\epsilon_{cr}} \right) \epsilon_c & \text{if } \epsilon_c \leq \epsilon_{cr} \\ f_{cr} \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_c} \right)^b & \text{if } \epsilon_c > \epsilon_{cr} \end{cases} \quad (3.2)$$

Donde f_{cr} corresponde a la tensión de fisura, ϵ_{cr} la deformación a ese valor de tensión y b es un parámetro que controla la caída de resistencia en la segunda rama de la ecuación y toma valores de 0.4 y 0.6 para hormigón no confinado y confinado respectivamente. En la Figura 3.9 se muestra la curva del hormigón a tracción, además de las expresiones para f_{cr} y ϵ_{cr} .

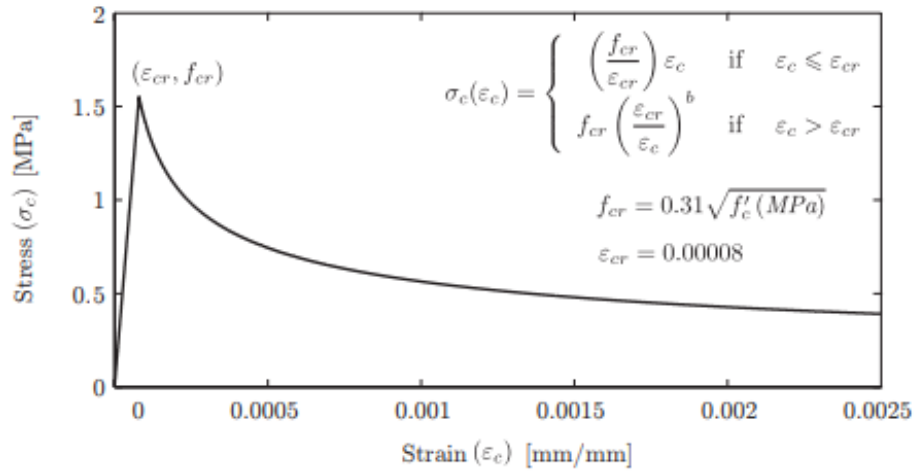


Figura 3.9: Curva tensión deformación del hormigón a tracción propuesta por Belarbi y Hsu (Rojas, Anderson, & Massone, 2016).

En cuanto al comportamiento cíclico del hormigón se propone un modelo con tramos lineales en las zonas de carga y descarga, una pendiente inicial igual a la rigidez inicial del hormigón y para la descarga se utiliza una pendiente del 71% de la rigidez inicial del hormigón. La deformación plástica en compresión y tracción se definen en las ecuaciones (3.3) y (3.4).

$$\varepsilon_p^c = \varepsilon_m^c (1 - e)^{-\left(\frac{\varepsilon_m^c}{\varepsilon_{co}^c}\right)\alpha_c} \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_p^t = \varepsilon_m^t (1 - e)^{-\left(\frac{\varepsilon_m^t}{\varepsilon_{co}^t}\right)\alpha_t} \quad (3.4)$$

Donde ε_m^c y ε_m^t son las deformaciones máximas alcanzadas en el ciclo anterior para compresión y tracción respectivamente, los parámetros α_c y α_t determinan la cantidad de deformación plástica del hormigón, Rojas propone el valor de 0.32 para α_c y 0.08 para α_t . La Figura 3.10 muestra el modelo histórico del hormigón.

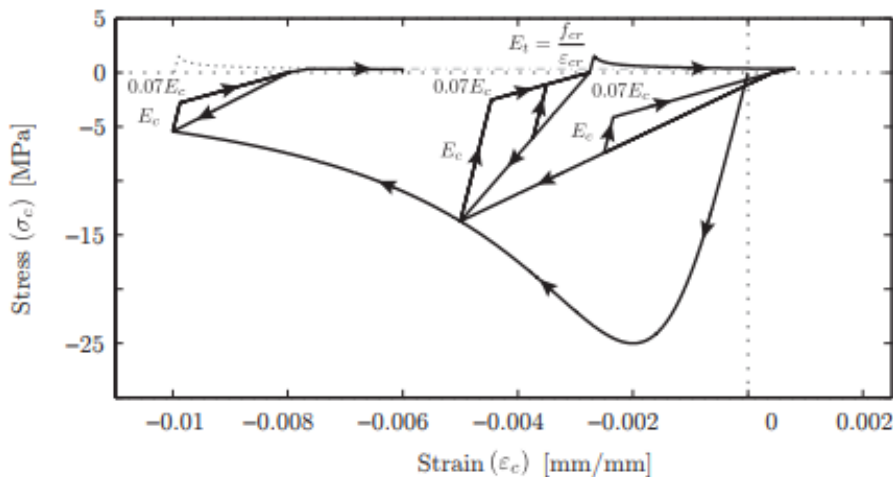


Figura 3.10: Modelo histórico del hormigón (Rojas, Anderson, & Massone, 2016).

El modelo de hormigón incorpora coeficientes que modifican la capacidad máxima del hormigón en compresión, lo cual se muestra en la Figura 3.11 y se describen a continuación.

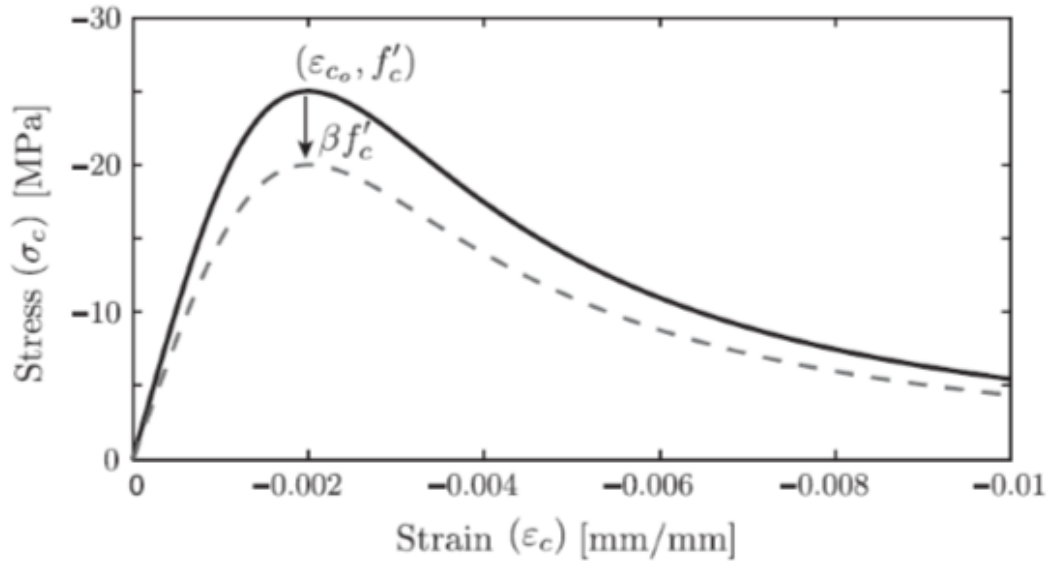


Figura 3.11: Modelo del hormigón a compresión con f'_c reducido (Rojas, Anderson, & Massone, 2016).

- Coeficiente de ablandamiento

Se produce una reducción en la resistencia a la compresión del hormigón por tracción en la dirección transversal. Belarbi y Hsu (Belarbi & Hsu, 1995) proponen la expresión (3.5) para modelar este efecto.

$$\beta_s = \frac{k}{\sqrt{1 + k_\sigma \varepsilon_t}} \quad (3.5)$$

Donde ε_t es la deformación unitaria a tracción del hormigón, k_σ toma el valor de 250 en carga secuencial y 400 para carga proporcional. Por simplicidad k toma el valor de 1.0.

- Coeficiente de aumento por confinamiento del hormigón

Se considera un factor debido a la mejora por confinamiento, este se aplica sobre la resistencia máxima a compresión al inicio del análisis. La ecuación (3.6) es la que define este coeficiente.

$$\beta_{conf} = 1 + \frac{\rho_s f_y}{f'_c} \quad (3.6)$$

Donde ρ_s es la cuantía de acero.

- Coeficiente de mejora de la fuerza de compresión

Corresponde a un aumento en el esfuerzo máximo a compresión producido por un estado de tensión biaxial de compresión o por el confinamiento producido por los estribos. En la ecuación (3.7) se define este coeficiente.

$$\beta_{e_{ij}} = 1 + 0.92 \cdot \left(\frac{\sigma_{c_j}}{f'_c}\right) - 0.76\left(\frac{\sigma_{c_j}}{f'_c}\right) \quad (3.7)$$

Donde i es la dirección que mejora su resistencia a compresión, σ_{c_j} la tensión normal y j la dirección normal a i.

- Coeficiente de daño debido a la carga cíclica

El deterioro del hormigón por efecto de carga y descarga se denomina daño por carga cíclica. Palermo y Vecchio (Palermo & Vecchio, 2003) proponen la ecuación (3.8) y (3.9).

$$\beta_d = \frac{1}{1 + \alpha_1 \left(\frac{\varepsilon_{rec}}{\varepsilon_{c0}}\right)^{\alpha_2}} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_{rec} = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min} \quad (3.9)$$

Donde ε_{c0} es la deformación unitaria correspondiente al esfuerzo máximo de compresión, el parámetro α_1 es igual a 0.5 antes del agrietamiento y 0.6 después del agrietamiento y α_2 es igual a 0.1 antes del agrietamiento y 0.175 después del agrietamiento.

3.3.2.2 ACERO

Para la descripción del comportamiento del acero se utiliza el modelo propuesto por Menegotto y Pinto (Menegotto & Pinto, 1973), modificado posteriormente por Filippou et al. (Filippou, Popov, & Bertero, 1983) para considerar el endurecimiento post fluencia. El modelo de Menegotto esta descrito por las ecuaciones(3.10),(3.11),(3.12) y se muestra en la Figura 3.12.

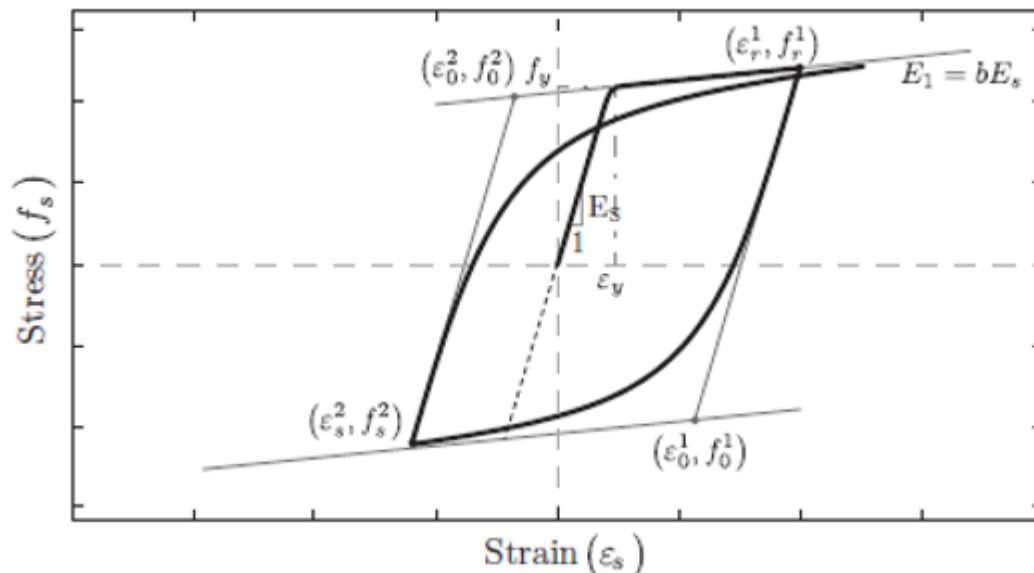


Figura 3.12: Modelo constitutivo del acero (Rojas, Anderson, & Massone, 2016).

$$f_s^*(\varepsilon_s^*) = b\varepsilon_s^* + \frac{(1-b)\varepsilon_s^*}{(1+(\varepsilon_s^*)^R)^{1/R}} \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_s^* = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r} \quad (3.11)$$

$$f_s^* = \frac{f_s - f_r}{f_0 - f_r} \quad (3.12)$$

Donde f_r y ε_r son la tensión y deformación en la última posición de cambio de deformación, f_0 y ε_0 corresponden a la intersección de las asíntotas y el parámetro R incluye el efecto de Baushinger y se define como:

$$R = R_0 - \frac{\alpha_1 \xi}{\alpha_2 + \xi} \quad (3.13)$$

Para este caso, los valores fueron calibrados experimentalmente y son $R_0 = 18$, $\alpha_1 = 16.2$ y $\alpha_2 = 0.15$. El parámetro ξ se define como:

$$\xi = \left| \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_0}{\varepsilon_y} \right| \quad (3.14)$$

Donde ε_m es el máximo o mínimo valor de deformación del ciclo de carga-descarga y ε_y es la deformación para la fluencia.

Además, Belarbi y Hsu proponen una reducción de la tensión de fluencia y un aumento del endurecimiento, según las ecuaciones (3.15) y (3.16)

$$f_y^{average} = (0.91 - 2B)f_y \quad (3.15)$$

$$b_{average} = (0.02 + 0.25B) \quad (3.16)$$

Donde B se calcula según:

$$B = \frac{1}{\rho} \left(\frac{f_{cr}}{f_y} \right)^{1.5} \quad (3.17)$$

Con ρ como la cuantía de la sección.

CAPÍTULO 4

MONTAJE EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUCCION

En el presente capítulo se describe la geometría, armadura, diseño, construcción, ejecución y protocolo de ensayo de los de muros de hormigón armado estudiados. El conjunto de especímenes está compuesto por 8 estructuras de muros, donde la mitad de ellos utiliza armadura convencional A630 y la otra mitad armadura electrosoldada A630S. Además de esto se especifica la resistencia de los materiales utilizados.

4.2 CARACTERIZACION DE LAS PROBETAS

Las probetas a ensayar están compuestas por 4 pares de muros de hormigón armado, donde se tiene dos tipos de muros con dos tipos de enfierradura cada uno.

Tabla 4.1:Notación y tipo de Muros.

Muro	Enfierradura	Notación	Total	Total de Muros
1	Fierro Preparado	M1 FPA	2	8
		M1 FPB		
	Malla Electrosoldada	M1 MEA	2	
		M1 MEB		
2	Fierro Preparado	M2 FPA	2	
		M2 FPB		
	Malla Electrosoldada	M2 MEA	2	
		M2 MEB		

Como muestra la Tabla 4.1 cada configuración de muro está compuesta por 4 probetas, donde dos están formadas con mallas preparadas (FP) A630 y dos con malla electrosoldada (ME) A630S en el refuerzo distribuido. La variación en muros se debe a que se pretende capturar el comportamiento de los elementos con distinta esbeltez y cuantía. Además, cada configuración de probeta se encuentra repetida para así tener a disposición más de un antecedente del caso estudiado.

4.3 GEOMETRIA

Las probetas se componen de tres elementos:

- **Fundación:** Se ubica en la parte inferior del muro permitiendo anclar la probeta a una losa de reacción, produciendo que el muro posea la condición de empotramiento en la base.

- Muro: Es el elemento estructural que se desea estudiar, ambos muros poseen un espesor de 20 cm brindando el espacio suficiente para proyectar una malla doble. Además, se utilizan relaciones de aspecto 1:1 y 1:2.
- Viga de transferencia: Se ubica en la parte superior del muro y permite transmitir al muro la carga aplicada.

Las dimensiones y un esquema tridimensional de las probetas se muestran en la Tabla 4.2 y Figura 4.1 respectivamente.

Tabla 4.2: Dimensiones de los componentes de las probetas.

Probeta	Fundación			Muro			Viga		
	Largo [cm]	Ancho [cm]	Altura [cm]	Largo [cm]	Ancho [cm]	Espesor [cm]	Largo [cm]	Ancho [cm]	Altura [cm]
M1	190	70	45	90	180	20	90	40	30
M2	270	70	45	140	140	20	140	40	30

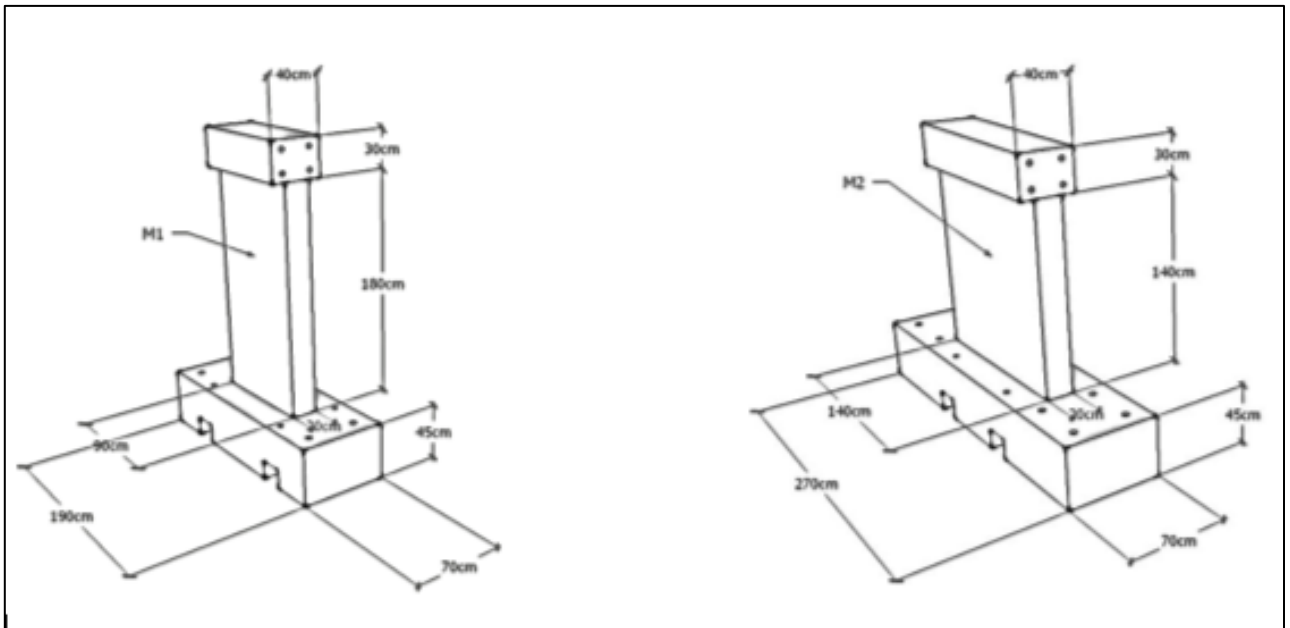


Figura 4.1: Esquema tridimensional de probetas de muros: izquierda Muro 1; derecha Muro 2. (ACMA, 2018)

4.4 DETALLAMIENTO DE LA ARMADURA

Es importante conocer la ubicación y distribución de la armadura, ya que esta influye en el comportamiento de los elementos ante las solicitaciones. Para mayor claridad se presenta la Figura 4.2 con la armadura presente en los muros.

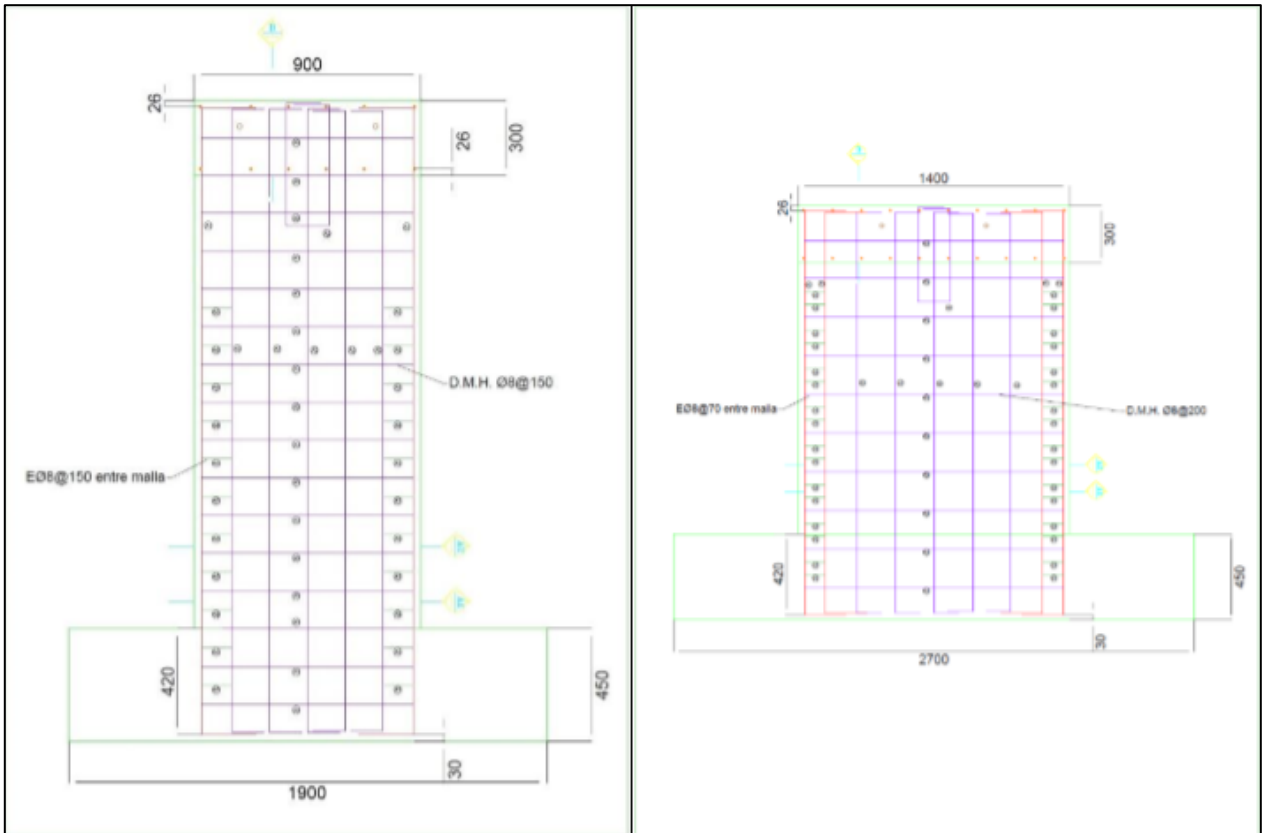


Figura 4.2:Esquema armadura de muros: izquierda Muro 1; derecha Muro 2. (ACMA, 2018)

En lo referente a la solución constructiva de las probetas, la única diferencia se encuentra en las uniones y el material que compone la doble malla, es decir, el elemento “FP” posee acero de calidad A630 y uniones amarradas con alambre, mientras que el elemento “ME” posee acero de calidad A630S con uniones soldadas entre los fierros longitudinales y transversales del refuerzo distribuido. Es necesario tener en cuenta que las mallas solo son una parte de la armadura total de las probetas, por lo que el resto de la enfierradura es de calidad A360. Es importante indicar que las probetas con malla electrosoldada A630S replican los ganchos y dobleces utilizados en el montaje de los fierros preparados.

Debido a la diferencia de longitud de los muros, se estima que M2 alcanzará niveles de carga máxima mayores que M1, por lo que, con el fin de limitar desplazamientos y levantes de los especímenes la longitud de la fundación de M2 se define con 80 [cm] adicionales a la de M1, esto permite contar con cuatro barras de anclaje adicionales que aumentaran la resistencia al deslizamiento y al momento volcante. Salvo esta diferencia, la armadura que forma parte de fundaciones y vigas es la misma en todos los casos. Estos dos elementos son de gran importancia ya que cumplen un rol específico en los ensayos, el cual consiste en ofrecer las condiciones de borde, anclaje y transmisión de carga solicitante externa para que se estudie el comportamiento del muro.

En términos generales, la viga de transferencia solo cumple el rol de transmitir la carga desde la zona aplicada al muro en su totalidad y de resistir el sistema de carga axial. Por otro lado, la fundación es una zona que concentra altos niveles de esfuerzo ya que convergen la carga lateral aplicada durante el ensayo, la carga axial a la que se encuentra

sometida la probeta y las cargas de anclaje que sujetan el elemento a la losa de reacción. Por ello, la cantidad de armadura es alta. Para ambos casos se puede ver el detalle de armado en la sección de ANEXOS.

Para la zona de muro, las 8 probetas están construidas con mallas de diámetro $\phi 8\text{mm}$ y elementos de borde de diámetro $\phi 12\text{mm}$. Es importante mencionar que todas las probetas poseen confinamiento en los bordes de muro conferido por barras de diámetro $\phi 8\text{mm}$. Además, existe presencia de estribos, trabas y ganchos provenientes de la malla horizontal, en la sección ANEXOS se muestran planos que detallan lo descrito para cada muro.

Las especificaciones de armadura y cuantías para ambos muros se muestran en la Tabla 4.3 y Tabla 4.4. Como estas disposiciones influyen en el comportamiento de los elementos, han sido verificadas previamente por cálculo estructural para que se cumpla la normativa chilena.

Tabla 4.3: Especificaciones de armadura.

	M1	M2
Malla horizontal	$\phi 8@15$ doble	$\phi 8@20$ doble
Malla vertical	$\phi 8@15$ doble	$\phi 8@20$ doble
Estribos de confinamiento	$\phi 8@15$ entre malla	2E $\phi 8@15$ entre malla (s=6.7 cm)
Trabas	$\phi 8@15$ en malla	$\phi 8@15$ en malla
Elementos de borde	2 $\phi 12$	4 $\phi 12$

Tabla 4.4: Cuantía de muros.

	M1	M2
ρ_t	0.0034	0.0025
ρ_l	0.0034	0.0025
Estribos conf.	0.0033	0.0035
ρ borde	0.0160	0.0130

4.5 PRE-DISEÑO DE MUROS

En esta sección se establecen las características óptimas de las probetas para llevar a cabo el estudio, tomando en cuenta la capacidad de los equipos, dimensiones y características del laboratorio de ensayos, entre otras cosas.

Una de las variables que se determina es el espesor de los muros, la elección de este fue influenciada por las dimensiones usadas habitualmente en la construcción. Por ello se opta por un espesor de 20 [cm].

Por otro lado, se debe definir la relación de aspecto a utilizar. En este caso el objetivo es contar con casos donde el esfuerzo de corte sea más crítico en el muro, pero que también se observen fallas a flexión. Por ellos se define la relación de aspecto a utilizar como 1:1 y 1:2.

En este caso se tiene un muro con relación de aspecto 1:2, donde al ser el muro más esbelto la falla crítica es predominantemente por flexión, por lo que la malla no tomaría un rol tan importante. El otro caso es diseñado con relación de aspecto 1:1, donde el tipo

de falla también es por flexión, pero dado el espaciamiento de la malla y la relación la participación de la doble malla será mayor.

Por último, por temas de compatibilidad geométrica con el laboratorio se definen las dimensiones finales mostradas en la Tabla 4.2.

4.6 CONSTRUCCION DE PROBETAS

A continuación, se describen las principales etapas del proceso de construcción de las probetas, como la enfierradura y hormigonado.

En una primera etapa se elabora el prefabricado de la enfierradura de las probetas, replicando lo especificado en los planos, el material utilizado para las 8 probetas pertenece a un solo rollo según el diámetro, por esto las características del acero para un diámetro son representativas para todos los elementos. Salvo la armadura ocupada en las mallas donde la con fierro preparado utiliza A630 y las con acero electrosoldado utilizan A630S.

Posteriormente se construyen los moldajes, se verifica que no existan interferencias entre la armadura y las perforaciones requeridas, y se colocan las armaduras en el interior del encofrado para realizar el cierre y el apuntalamiento.

Luego se procede a hormigonar las probetas, esto se realiza en dos instancias, en la primera se hormigona el muro 2 y en la segunda el muro 1. El método utilizado para esto es a través de carretillas que extraen el concreto desde la rampa del camión y se llevan a la zona de interés. Durante el vaciado se utilizan vibradores para evitar la formación de nidos.

En esta etapa se extraen muestras del hormigón, para así obtener información representativa del hormigón utilizado, por lo que se sacan cuatro cilindros de cada muro. Las probetas cumplen con los requerimientos especificados en las normas chilenas.

Durante un periodo de siete días se cura el hormigonado, regando los elementos diariamente y tapándolos con arpillera para conservar la humedad.

Finalmente se descimbran las probetas y luego de que se alcanza un mínimo de 28 días de fraguado, se trasladan los elementos estructurales a la Facultad de ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile para ser ensayadas. Cabe mencionar que se efectúa una revisión posterior al traslado para corroborar que las probetas no presenten daños. En la Figura 4.3, Figura 4.4 y Figura 4.5 se observan algunas de las etapas descritas.



Figura 4.3: Construcción de encofrado y moldaje con enfierradura en su interior. (ACMA, 2018)



Figura 4.4: Hormigonado de probetas. (ACMA, 2018)



Figura 4.5: Fraguado y curado de probetas. (ACMA, 2018)

4.7 EJECUCION DE ENSAYOS

Los muros son anclados a una losa de reacción por medio de su fundación, y son conectados a un actuador hidráulico, a través de la viga de transferencia, el cual aplicara la carga lateral de forma cíclica al muro.

Para generar la condición de empotramiento en la base, se utilizan barras de acero de alta resistencia, las que son postensadas para conectar la losa de reacción con la fundación. La función de estas barras es restringir el deslizamiento de la probeta y su volcamiento o levantamiento en los extremos. Las barras son tensadas en una secuencia que permiten limitar posibles tensiones en la fundación y conferir una carga estable a cada elemento.

En cuanto a la carga lateral, esta se aplica utilizando un actuador hidráulico, con capacidad de 100 [tonf] y rango de desplazamiento de 470 [mm], que se conecta al muro de reacción en un extremo y a la probeta como tal en el otro. Las conexiones se

materializan por medio de rotulas que se unen a través de un pasador macizo. El actuador es operado por medio de una central hidráulica la que permite controlar la dirección del flujo y con esto, la dirección de la carga aplicada. La Figura 4.6 muestra el equipo utilizado en la aplicación de carga lateral.



Figura 4.6: Actuador hidráulico utilizado en la aplicación de carga lateral. (ACMA, 2018)

Las probetas además se encuentran cargas axialmente a una magnitud constante durante todo el ensayo, esto se realiza con la finalidad de simular la condición de servicio de estos elementos estructurales, los que se encuentran resistiendo las cargas verticales de forma permanente. La carga axial se materializa por medio de la acción constante de 4 gatos hidráulicos que tensan 4 barras de acero de alta resistencia.

Adicionalmente se utiliza una estructura compuesta de perfiles de acero sobre la viga de transferencia, sobre la que se colocan los 4 gatos hidráulicos y la celda de carga. En la Figura 4.7 se observa el sistema de carga axial descrito anteriormente.

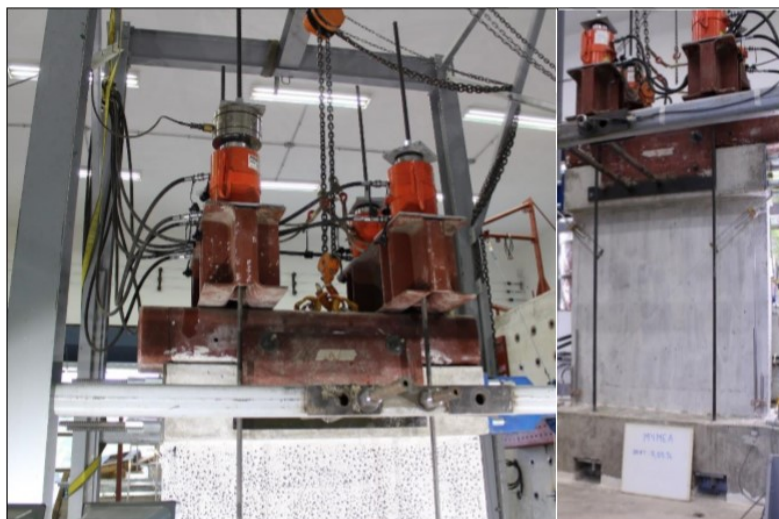


Figura 4.7: Sistema de carga axial. (ACMA, 2018)

Los valores de la carga axial varían para cada muro ya que dependen de la sección de este y del valor de f'_c . La carga axial para el muro 1 se calcula mediante la ecuación (4.1) y toma el valor de 32 [tonf] y para el muro 2 se calcula mediante la ecuación (4.2) y toma el valor de 72 [tonf].

$$Carga\ axial = 0.05 \cdot f'_c \cdot Ag \quad (4.1)$$

$$Carga\ axial = 0.1 \cdot f'_c \cdot Ag \quad (4.2)$$

Para asegurar las condiciones ideales de sujeción de la base y la estabilidad en el plano del muro, se cuenta con topes de deslizamiento lateral y un marco de acero anclado a la losa de reacción que rodea la estructura y mantiene la estabilidad del muro fuera del plano en el que se aplica la carga lateral.

4.8 MONITOREO POR SENSORES

Para el monitoreo de la respuesta del elemento estructural durante la realización del ensayo se disponen de diez sensores LVDT's que tienen el objetivo de medir los desplazamientos tanto en la superficie del muro, como en la zona de aplicación de la carga y anclaje a la losa de reacción. En la Figura 4.8 se muestra un esquema de la ubicación de cada sensor con su respectiva enumeración utilizada en el sistema de adquisición de datos.

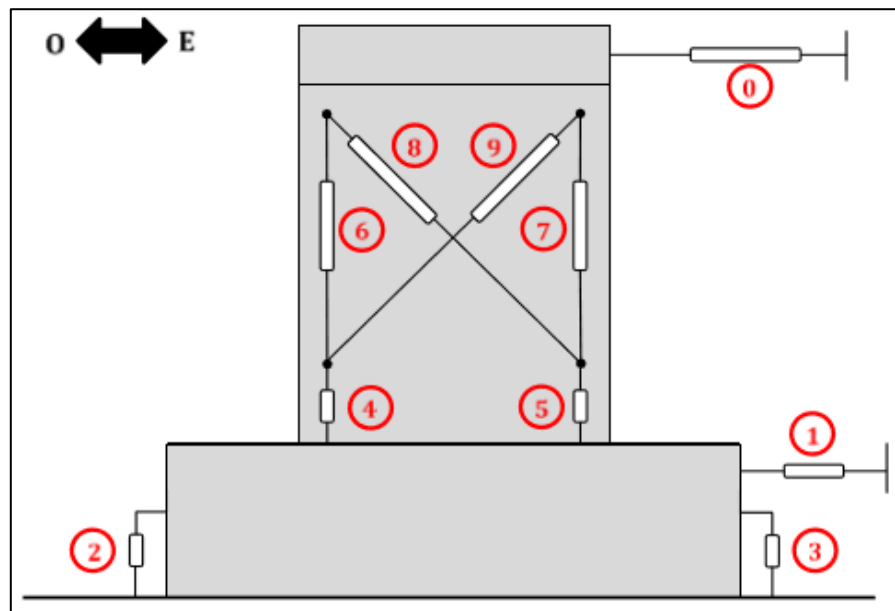


Figura 4.8: Esquema de distribución de sensores LVDT. (ACMA, 2018)

Los LVDT utilizados tienen dos funciones, por un lado, se encuentran los que capturan el desplazamiento de la probeta respecto a un sistema de referencia externo y estático y por otro se encuentran los que buscan caracterizar desplazamientos sobre la superficie del muro. Los sensores encargados de la primera función corresponden a los enumerados del 0 al 3 y los encargados de la segunda función son los enumerados del 4 al 9. En la Tabla 4.5 se señala la función de cada sensor.

Tabla 4.5: Descripción de LVDT's.

Numero	Función
0	Medir el desplazamiento a nivel de techo
1	Medir el deslizamiento de la fundación
2	Medir el levantamiento del extremo oeste de la fundación
3	Medir el levantamiento del extremo este de la fundación
4	Medir el desplazamiento entre el hilo inferior oeste y la fundación
5	Medir el desplazamiento entre el hilo inferior este y la fundación
6	Medir el desplazamiento entre el hilo inferior oeste y el hilo superior oeste
7	Medir el desplazamiento entre el hilo inferior este y el hilo superior este
8	Medir el desplazamiento entre el hilo superior oeste y el hilo inferior este
9	Medir el desplazamiento entre el hilo superior este y el hilo inferior oeste

4.9 MONITOREO POR FOTOGRAFIAS

Para poder obtener una correcta toma de datos mediante fotogrametría es necesario generar una textura sobre la superficie del muro. Para esto se aplica cal sobre el muro y posteriormente se pintan aleatoriamente puntos negros de distintos tamaños sobre la cal (Figura 4.9).

La toma de fotografías se realiza con dos cámaras, una con un enfoque general que registra el muro entero y otra con un enfoque local que registra la mitad inferior de los muros.

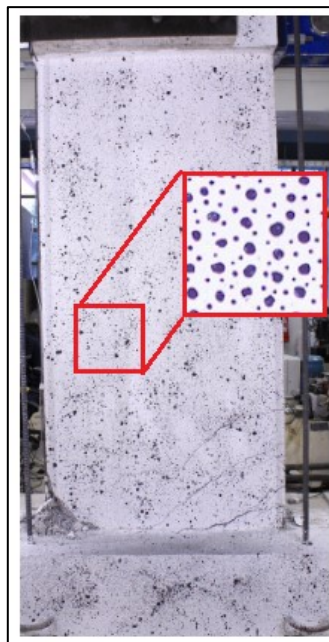


Figura 4.9: Pintado de muros para fotogrametría.

4.10 PROTOCOLO DE ENSAYO

El ensayo sigue un protocolo de carga nominal que es controlado por desplazamiento. En la Figura 4.10 se puede observar el detalle de éste. El ensayo finaliza una vez que la

falla estructural del elemento sea evidente, lo que define cuando se produce un 20% de degradación de la carga máxima registrada.

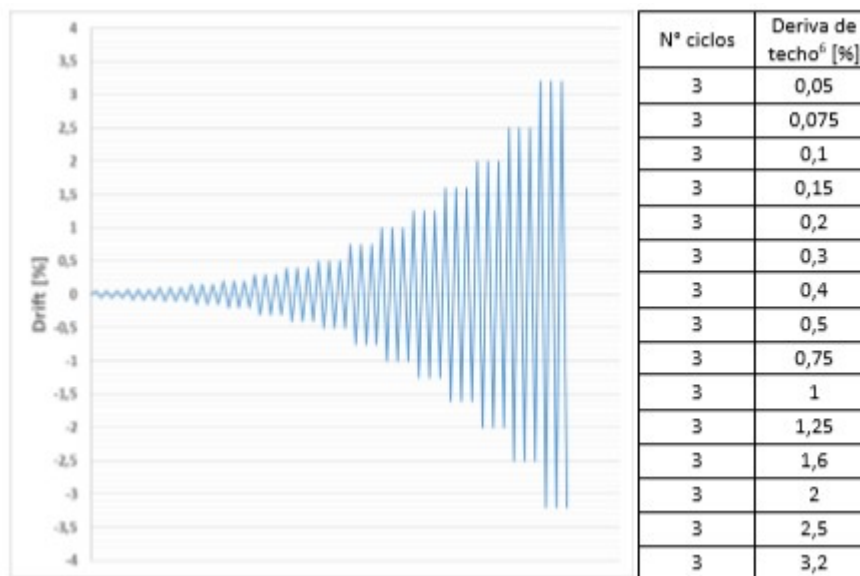


Figura 4.10: Protocolo nominal de ensayos. (ACMA, 2018)

El cálculo de la deriva de techo se realiza mediante la ecuación (4.3)

$$\Delta = \left(\frac{d}{h_m} \right) \cdot 100 \quad (4.3)$$

Donde Δ [%] es la deriva de techo, d es el desplazamiento horizontal medido a nivel de techo y h_m la altura del muro.

4.11 RESISTENCIA DE LOS MATERIALES

La caracterización mecánica del hormigón fue realizada mediante ensayos de compresión y los resultados se muestran en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Resumen de resistencia a compresión obtenida en ensayos.

Probeta	Tipo	f'_c [MPa]						
		21 días		28 días		día ensayo		
		Valor ensayo	Promedio	Valor ensayo	Promedio	Valor ensayo	Promedio	
M1	FPA	26.5	27.1	30.0	30.8	33.0	34.4	35.3
	MEA	26.1		30.7		36.2	35.8	
	FPB	25.8		31.9		38.8	34.7	
	MEB	30.1		30.4		39.8	36.2	
M2	FPA	24.5	23.6	24.4	24.9	29.0	29.9	30.0
	MEA	21.9		25.0		29.3	30.3	
	FPB	23.9		23.3		31.5	31.1	
	MEB	23.9		26.8		31.1	28.7	

Por otro lado, la caracterización del acero utilizado en las probetas se realizó mediante un ensayo de tracción simple para los diámetros 8 para ambos tipos de acero (A630 y A630S) y diámetro 12 para acero A630, ya que los muros están compuestos por acero de estas dimensiones en la zona de interés. Los resultados se resumen en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Resumen de resistencia a tracción obtenida en ensayos de barras.

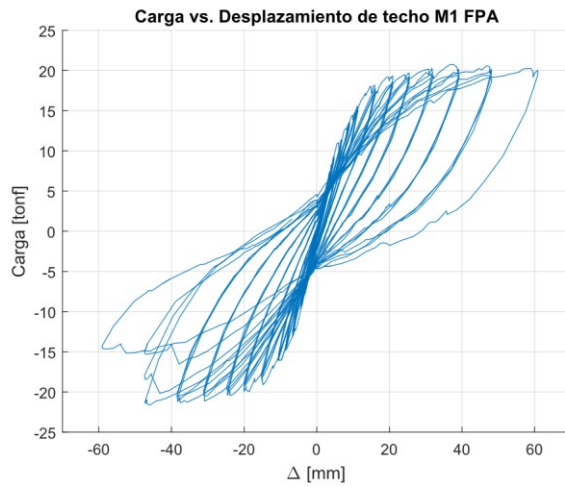
Diámetro [mm]	Calidad	F_y [MPa]	F_u [MPa]	Alargamiento [%]	Relación F_u/F_y
8	A630	570	832	10.0	1.5
		627	888	10.0	1.4
		492	738	10.0	1.5
8	A630s	652	871	12.5	1.3
		662	891	8.0	1.4
		656	851	10.0	1.3
12	A630	470	765	15.0	1.6
		501	780	13.5	1.6
		530	799	13.5	1.5

A la soldadura en las mallas presentes en una de las soluciones constructivas de este estudio, se les realizó una revisión del procedimiento de la soldadura calificada de las mallas, inspección en terreno y ensayos de laboratorio a la unión soldada (perfil de micro dureza y metalografía), y, en conclusión, la calidad de la soldadura satisface los requerimientos establecidos en la normativa vigente respecto a las propiedades mecánicas y calidad de la soldadura.

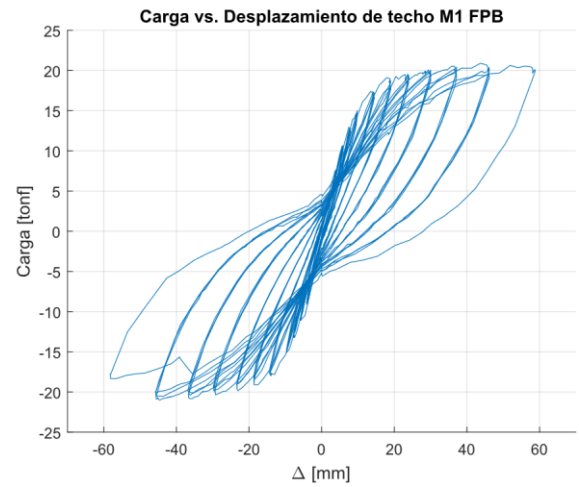
4.12 RESULTADOS

En la presente sección se mostrarán los principales resultados experimentales para los 8 muros estudiados. En las siguientes figuras se muestra la respuesta carga-desplazamiento del muro 1 y del muro 2 con el fin de conocer el comportamiento global de ellos. Para todos los casos, el desplazamiento de techo corresponde al medido con el sensor 0 (Figura 4.8) y corregido por deslizamiento y rotación en la base. Mientras que la carga corresponde a la registrada por la celda y no sufre correcciones.

La Figura 4.11 y Figura 4.12 muestran los gráficos carga-desplazamiento de techo para el muro 1, la primera figura corresponde a las probetas con fierro preparado y la segunda a las probetas con malla electrosoldada. En ellas se observa que en ambas soluciones constructivas la capacidad de carga máxima alcanzada es de 21 [tonf] para ambos sentidos y los desplazamientos máximos alcanzados son de 59 [mm].

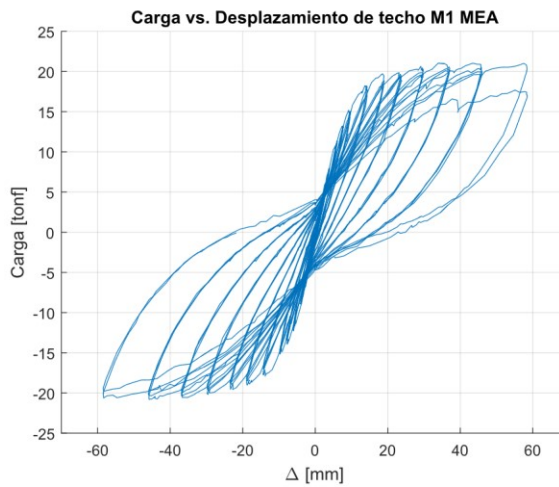


(a)

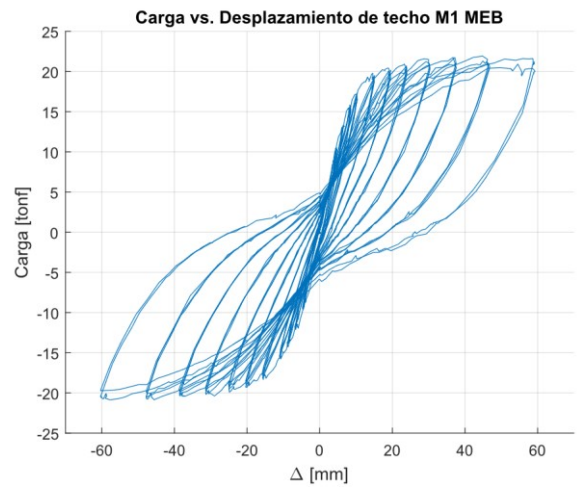


(b)

Figura 4.11: Grafico Carga vs. Desplazamiento de techo muro M1, (a) FPA; (b) FPB.



(a)



(b)

Figura 4.12: Grafico Carga vs. Desplazamiento de techo muro M1, (a) MEA; (b) MEB.

Los gráficos carga-desplazamiento de techo del muro 2 se muestran en la Figura 4.13 y Figura 4.14. Al igual que en el caso anterior la primera figura corresponde a las probetas con fierro preparado y la segunda a las probetas con malla electrosoldada. Todas las probetas alcanzan valores similares en capacidad y desplazamiento para ambos sentidos. En lo referente a la capacidad máxima, se observa que las probetas FPA, FPB y MEA registran valores de 63 [tonf], en tanto, en la probeta MEB se observa una capacidad 10 [tonf] superior llegando a las 73 [tonf]. En cuanto a los desplazamientos máximos, las probetas FPA y MEA alcanzan valores de 50 [mm] de deriva de techo, mientras que la probeta FPB y MEB registran magnitudes menores alcanzando los 37 [mm] y 46 [mm] respectivamente.

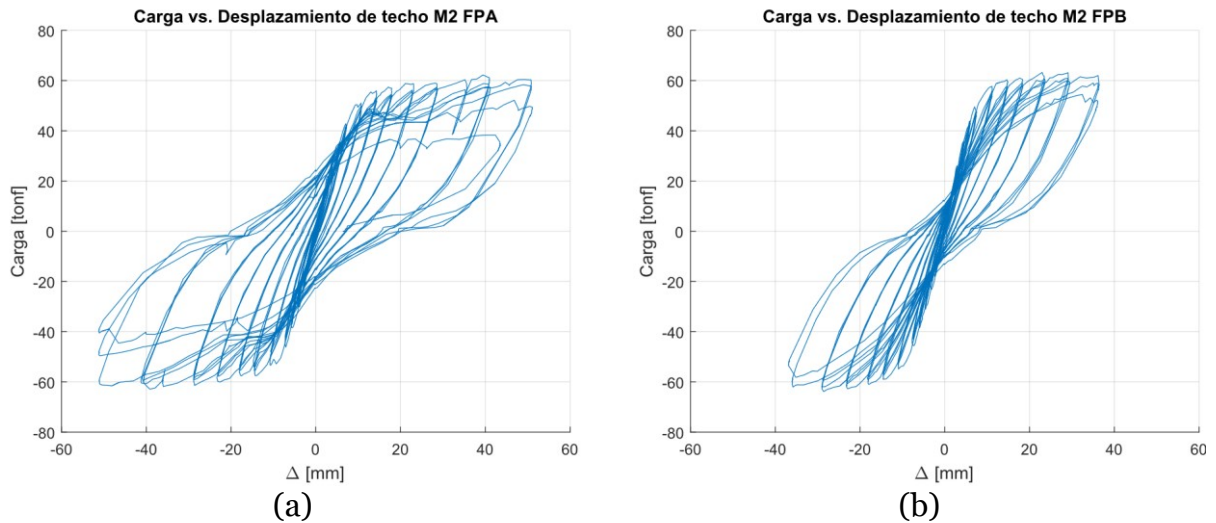


Figura 4.13: Grafico Carga vs. Desplazamiento de techo muro M2, (a) FPA; (b) FPB.

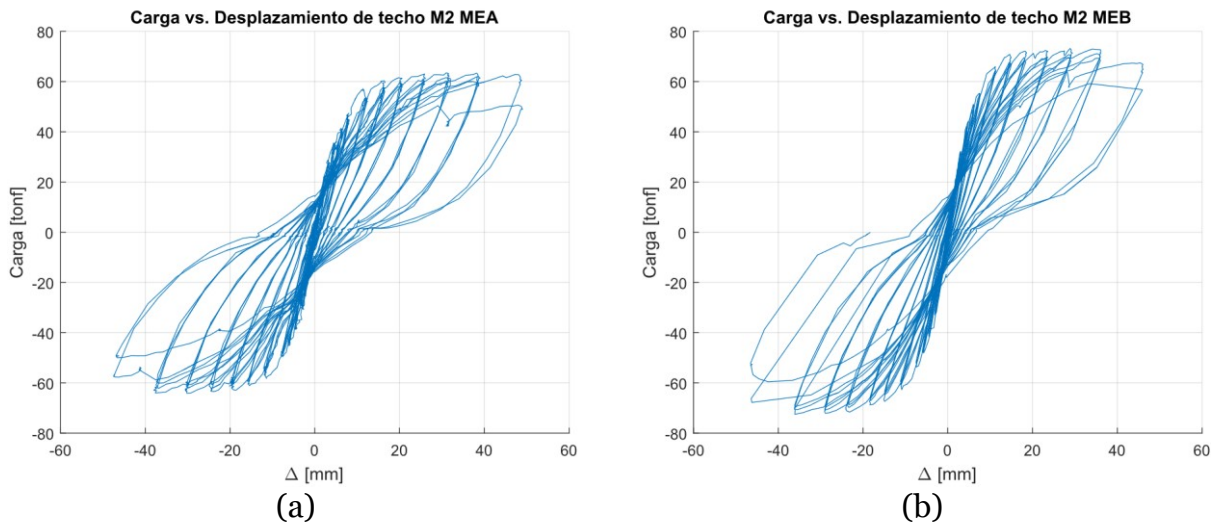


Figura 4.14: Grafico Carga vs. Desplazamiento de techo muro M2, (a) MEA; (b) MEB.

A continuación, se determina el desplazamiento generado producto del esfuerzo de corte y flexión, para esto se utilizan las ecuaciones descritas por Massone y Wallace (Massone & Wallace, 2004). El aporte a la deriva de techo total por deformación de corte se obtiene mediante la ecuación (4.4) y (4.5)

$$D = \sqrt{l^2 + h_{sup}^2} \quad (4.4)$$

$$\Delta_c = \frac{D \cdot (d_{s9} - d_{s8})}{2l} \quad (4.5)$$

Donde l es la distancia entre hilos sin fin, h_{sup} es la distancia vertical entre hilos sin fin, D es la distancia diagonal entre hilos sin fin, d_{s9} y d_{s8} son el desplazamiento medido por el sensor 8 y 9 respectivamente, y Δ_c es el desplazamiento producto del esfuerzo de corte.

El aporte a la derivada de techo total por deformación de flexión se obtiene a través de las ecuaciones (4.6), (4.7), (4.8), (4.9) y (4.10).

$$\theta_{inf} = \frac{(d_{s5} - d_{s4})}{l} \quad (4.6)$$

$$\theta_{sup} = \frac{(d_{s7} - d_{s6})}{l} \quad (4.7)$$

$$\Delta_{f\ inf} = \theta_{inf} \cdot (\alpha_{inf} \cdot h_{inf} + h_{sup}) \quad (4.8)$$

$$\Delta_{f\ sup} = \theta_{sup} \cdot \alpha_{sup} \cdot h_{sup} \quad (4.9)$$

$$\Delta_f = \Delta_{f\ sup} + \Delta_{f\ inf} \quad (4.10)$$

Donde d_{s4} , d_{s5} , d_{s6} y d_{s7} son el desplazamiento medido por los sensores 4, 5, 6 y 7 respectivamente. θ_{inf} y θ_{sup} , $\Delta_{f\ inf}$ y $\Delta_{f\ sup}$ son los desplazamientos inferior y superior producto de la flexión. Δ_f es el desplazamiento total producto de la deformación por flexión.

En la Figura 4.15 se muestran los desplazamientos producto del esfuerzo de corte y flexión para el muro 1. Se observa que en ambas soluciones los desplazamientos se deben mayormente a esfuerzos de flexión, alcanzando aproximadamente el 80% de la deriva total. Esta respuesta es similar para ambos tipos de mallas.

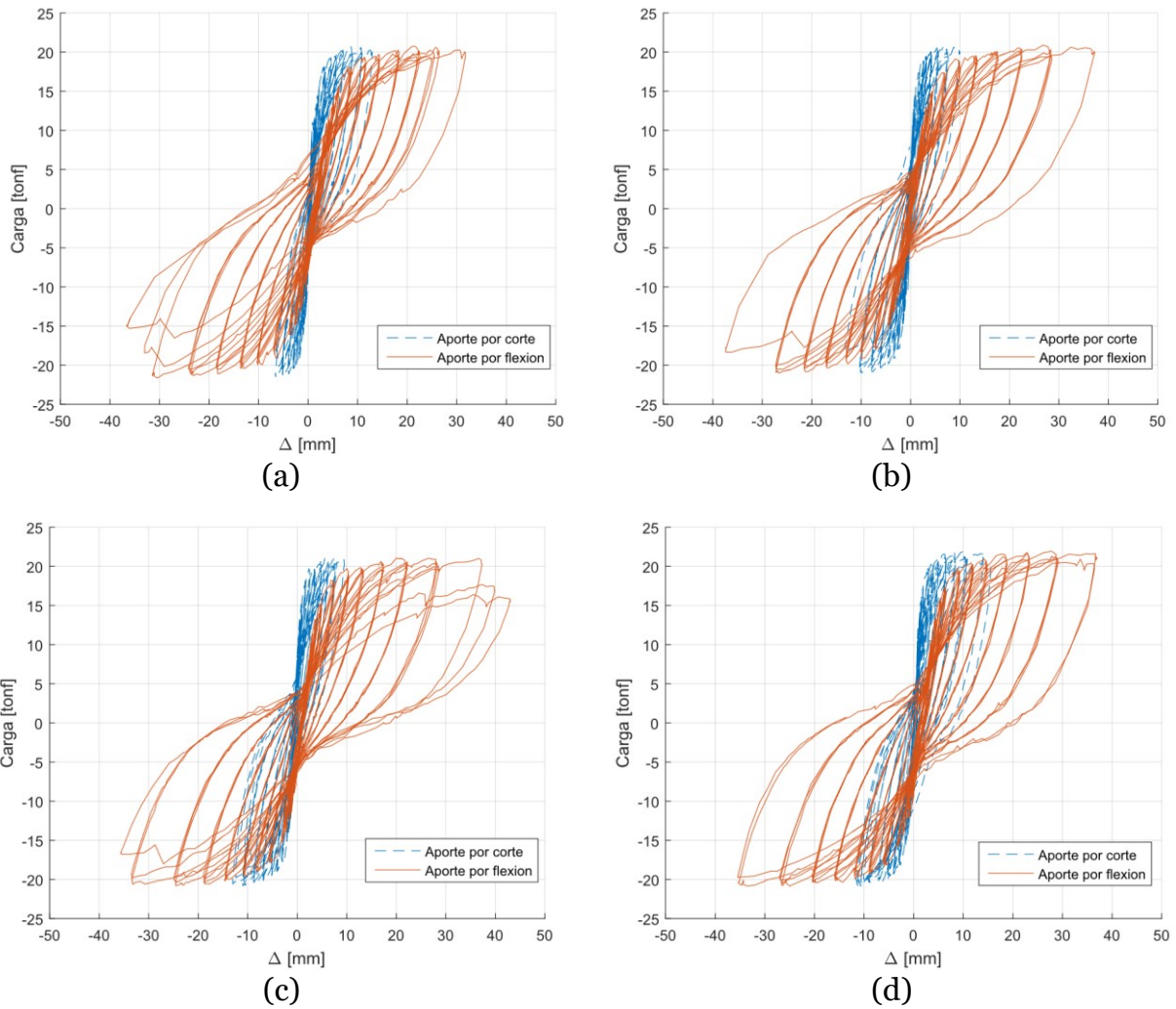


Figura 4.15: Carga vs. Desplazamiento aporte corte y flexión Muro 1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.

La Figura 4.16 muestra los desplazamientos producto del esfuerzo de corte y flexión para el muro 2. Se observa que en los muros con malla preparada y malla electrosoldada los desplazamientos se deben mayormente a esfuerzos de flexión. A pesar de que el desplazamiento total es mayor en los muros FPA y MEA el aporte producto del esfuerzo de flexión es similar en los cuatro casos, alcanzando aproximadamente un 70% de la deriva total.

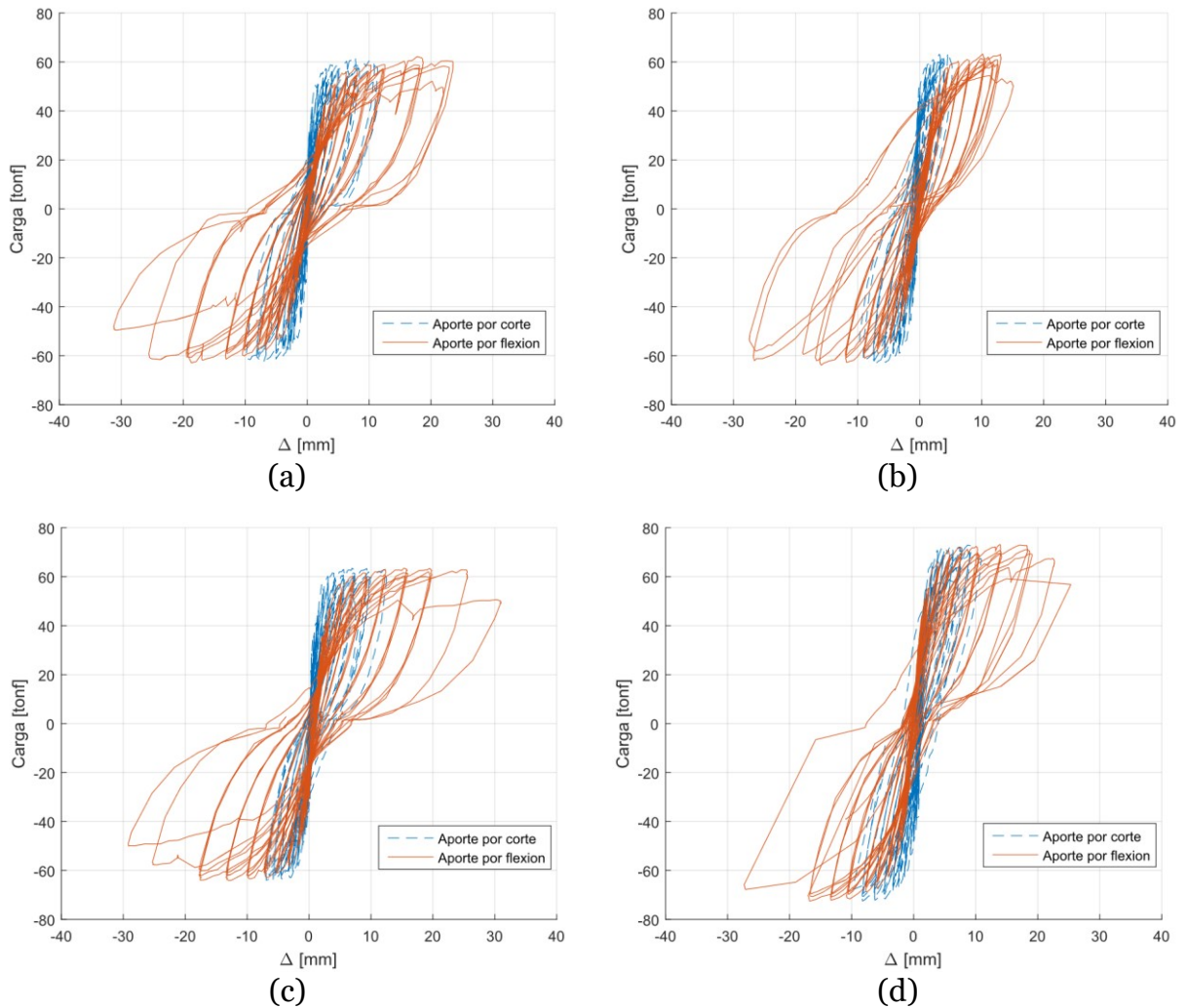


Figura 4.16: Carga vs. Desplazamiento aporte corte y flexión Muro 2: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.

Por último, si se compara el comportamiento del muro esbelto (M1) con el del muro chato (M2) se observa que en el primero presenta un comportamiento altamente flexural donde el 80% del desplazamiento de techo total es producto de los esfuerzos de flexión, mientras que el segundo los esfuerzos de corte toman mayor relevancia llegando a que el 30% del desplazamiento de techo total es producto de este esfuerzo. Al comparar los desplazamientos y cargas máximas alcanzadas, el primer muro alcanza derivas de techo 15% mayores y cargas 67% menores al segundo muro. Este comportamiento concuerda con lo esperado dada el prediseño de los muros.

CAPÍTULO 5

FOTOGRAMETRIA

5.1 INTRODUCCION

En este capítulo se detalla el proceso de selección y filtrado de fotografías, comparación de los datos obtenidos por fotogrametría y LVDT, el error asociado al uso de esta técnica y los resultados obtenidos a través de ella.

Los resultados obtenidos a través de fotogrametría son: el perfil de desplazamiento en altura, el perfil de deformación unitaria vertical en altura, distribución de deformaciones en los muros, desplazamiento producto del esfuerzo de corte, penetración de fisura y largo de la concentración de daño.

5.2 PROCESAMIENTO Y ESTRUCTURA DE DATOS

Uno de los problemas de usar fotogrametría es la gran cantidad de memoria RAM que se necesita, es por lo que para optimizar los recursos computacionales se realiza una selección y filtrado de fotografías.

Para este estudio se ensayan 8 muros, cada uno utiliza dos cámaras y cada cámara toma alrededor de 4000 fotos durante el ensayo. Por esta razón se realiza un filtrado de las fotografías de la siguiente manera:

- A través de Ncorr se realiza un análisis de todas las fotografías seleccionando una región de interés (ROI) en la parte superior de muro, como se muestra en la Figura 5.1.
- Posteriormente, se extraen los resultados de desplazamientos de la región analizada y con ellos se construye un gráfico tiempo versus desplazamiento de techo, donde el tiempo corresponde a la duración del ensayo.
- A continuación, se seleccionan los puntos de interés, que corresponden a los puntos cercanos a cero y los puntos de máximos y mínimos desplazamiento para cada ciclo.
- Finalmente, se extraen las imágenes que se relacionan a los puntos seleccionados anteriormente.

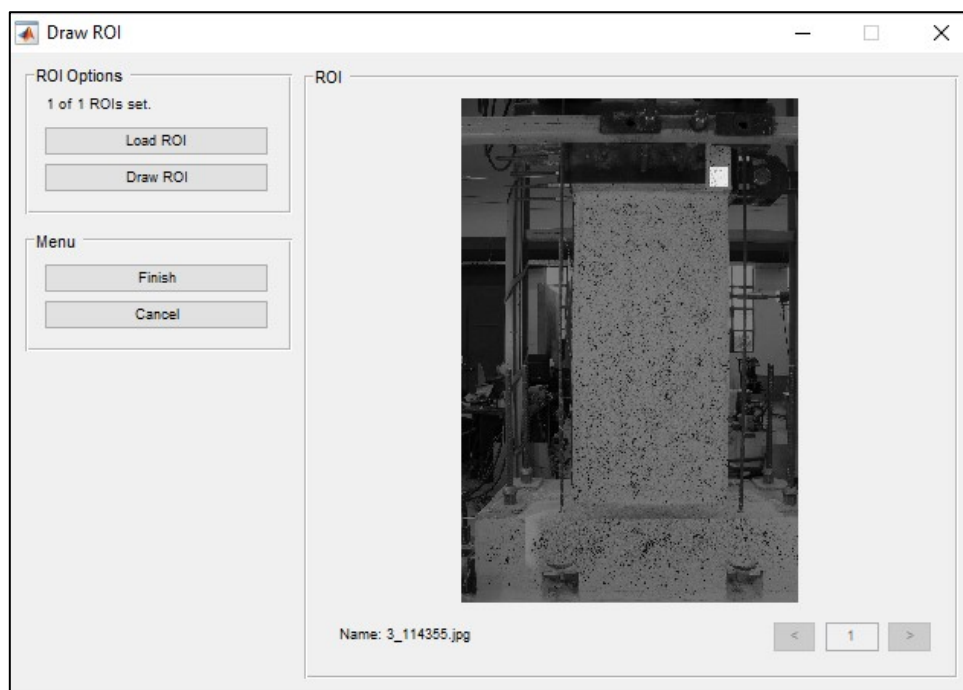


Figura 5.1: Selección del ROI para el filtrado.

Este filtrado se realiza para las dos cámaras de los 8 muros ensayados, en la Tabla 5.1 se muestra un resumen con el número de final de fotografías en cada caso. Es a estas fotografías a las que se les realiza el análisis descrito en el capítulo 3.2.

Tabla 5.1: Resumen de selección de fotos.

		Cámara local	Cámara general
M1	FPA	189	189
	FPB	140	140
	MEA	191	191
	MEB	139	139
M2	FPA	180	181
	FPB	175	175
	MEA	177	177
	MEB	175	177

Ncorr entrega los resultados de desplazamientos y deformaciones en matrices de tamaños que dependen de los pixeles que tengan las fotos y el espaciamiento seleccionado en el programa. En este caso, las imágenes son de 3456 x 5184 pixeles de ancho y alto respectivamente, y el espaciamiento seleccionado en Ncorr es de 10 pixeles por lo que la matriz con los resultados de cada fotografía será de aproximadamente 345 de ancho y 518 de alto. Esto hace que sea necesario disminuir la memoria RAM utilizada por los resultados y para eso se crea una estructura de datos que solo guarda los datos relevantes para los análisis posteriormente descritos en esta memoria.

La estructura de datos se crea utilizando como referencia la estructura de datos optimizada desarrollada por Ruiz (Ruiz, 2018) y se describe gráficamente en la Figura 5.2. A continuación, se detallan los 5 atributos que contiene.

- Desplazamientos (displacements): contiene la matriz de desplazamientos verticales y horizontales respecto a la fotografía de referencia (vertical_ref, horizontal_ref), la matriz de desplazamientos verticales y horizontales respecto a la fotografía deformada (vertical_cur, horizontal_cur) y los errores asociados a la convergencia del programa (error).
- Deformaciones (strains): contiene la matriz de deformaciones respecto a la fotografía no deformada (exx_ref, eyy_ref, exy_ref) y la matriz de deformaciones respecto a la fotografía deformada (exx_cur, eyy_cur, exy_cur).
- Datos generales del análisis (datos): contiene la unidad en que se encuentran los desplazamientos(unidad), relación entre distancia real y numero de pixeles dentro del ROI de análisis(escala) y el espaciamiento de pixeles se desea hacer el análisis de las fotografías(espaciamiento).
- Información sobre fotografías (información_fotos): entrega información sobre si la fotografía es un peak o un cero con su deriva de techo(type) correspondiente, nombre de la fotografía(name).
- Identificador de la zona de análisis del muro (name_camara).

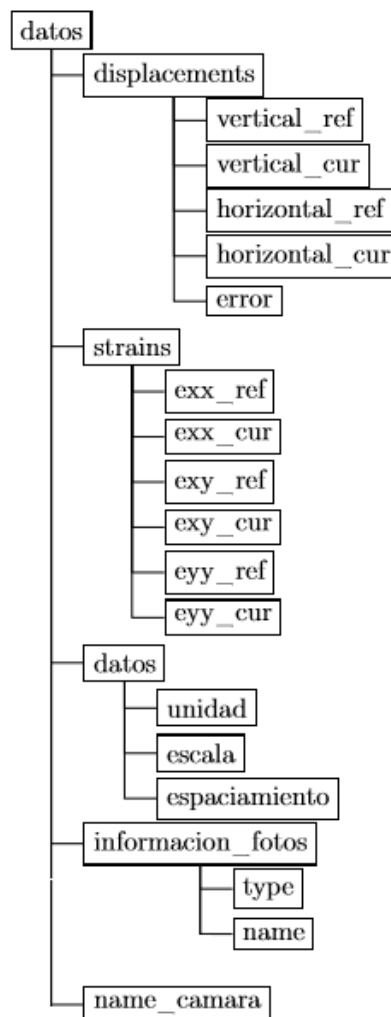


Figura 5.2: Descripción grafica de la estructura de datos.

Además, es necesario mencionar que las matrices de desplazamiento y deformaciones son guardadas en la estructura de datos como matrices “sparse”, lo que significa que la matriz completa se convierte en una dispersa comprimiendo los elementos iguales a cero. Esta conversión genera un ahorro de memoria RAM.

En la Figura 5.3 y Figura 5.4 se muestra la estructura de datos con los atributos antes mencionados para el muro 1 FPA, en la primera figura se observa la estructura más general y en la segunda se muestran los desplazamiento, donde el numero de campos corresponde al número de fotografías para la cámara seleccionada. En tanto, la Figura 5.5 muestra los desplazamientos horizontales respecto a la fotografía de referencia para la primera foto guardado con la función “sparse”, los números entre paréntesis corresponden a la posición (fila y columna) del píxel analizado y el numero a su derecha corresponde al desplazamiento de dicho píxel. La estructura para las deformaciones es igual a la de los desplazamientos para todas las cámaras y muros.

Fields	displacements	strains	informacion_fotos	datos	name_camara
1	1x188 struct	1x188 struct	1x188 struct	1x1 struct	'Muro general'
2	1x188 struct	1x188 struct	1x188 struct	1x1 struct	'Muro lateral'
3	1x188 struct	1x188 struct	1x188 struct	1x1 struct	'Muro local'
4	1x188 struct	1x188 struct	1x188 struct	1x1 struct	'Seccion borde'
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					

Figura 5.3: Estructura de datos muro 1 FPA.

The screenshot shows a table with 16 rows and 6 columns. The columns are labeled 'horizontal_ref', 'vertical_ref', 'error', 'horizontal_cur', and 'vertical_cur'. Each cell contains a truncated text string '472x315 sparse d...'. Row 3 has a small empty rectangular box in the 'error' column.

Fields	horizontal_ref	vertical_ref	error	horizontal_cur	vertical_cur
1	472x315 sparse d...	472x315 spars...	472x315 spa...	472x315 sparse d...	472x315 spars...
2	472x315 sparse d...	472x315 spars...	472x315 spa...	472x315 sparse d...	472x315 spars...
3	472x315 sparse d...	472x315 spars...	472x315 spa...	472x315 sparse d...	472x315 spars...
4	472x315 sparse d...	472x315 spars...	472x315 spa...	472x315 sparse d...	472x315 spars...
5	472x315 sparse d...	472x315 spars...	472x315 spa...	472x315 sparse d...	472x315 spars...
6	472x315 sparse d...	472x315 spars...	472x315 spa...	472x315 sparse d...	472x315 spars...
7	472x315 sparse d...	472x315 spars...	472x315 spa...	472x315 sparse d...	472x315 spars...
8	472x315 sparse d...	472x315 spars...	472x315 spa...	472x315 sparse d...	472x315 spars...
9	472x315 sparse d...	472x315 spars...	472x315 spa...	472x315 sparse d...	472x315 spars...
10	472x315 sparse d...	472x315 spars...	472x315 spa...	472x315 sparse d...	472x315 spars...
11	472x315 sparse d...	472x315 spars...	472x315 spa...	472x315 sparse d...	472x315 spars...
12	472x315 sparse d...	472x315 spars...	472x315 spa...	472x315 sparse d...	472x315 spars...
13	472x315 sparse d...	472x315 spars...	472x315 spa...	472x315 sparse d...	472x315 spars...
14	472x315 sparse d...	472x315 spars...	472x315 spa...	472x315 sparse d...	472x315 spars...
15	472x315 sparse d...	472x315 spars...	472x315 spa...	472x315 sparse d...	472x315 spars...
16	472x315 sparse d...	472x315 spars...	472x315 spa...	472x315 sparse d...	472x315 spars...

Figura 5.4: Estructura de datos para desplazamientos del muro 1 FPA.

The screenshot shows a list of values for horizontal displacement. The list starts with 'val =' and contains 16 entries, each with a coordinate pair and a numerical value.

Coordinate	Value
(96, 111)	0.2177
(97, 111)	0.2234
(98, 111)	0.2193
(99, 111)	0.2322
(100, 111)	0.2327
(101, 111)	0.2427
(102, 111)	0.2477
(103, 111)	0.2650
(104, 111)	0.2626
(105, 111)	0.2620
(106, 111)	0.2671
(107, 111)	0.2652
(108, 111)	0.2536
(109, 111)	0.2591
(110, 111)	0.2663
(111, 111)	0.2640
(112, 111)	0.2642

Figura 5.5: Desplazamiento horizontal para la primera fotografía.

5.3 ERROR DE FOTOGRAMETRIA

La extracción de información a través de fotogrametría trae consigo errores que dependen de la calidad de la fotografía, la distancia entre cámara-muro y las condiciones de la toma de datos.

Para cuantificar el error para desplazamiento primero se debe mencionar que la unidad básica de una imagen es el píxel y que la mínima distancia medible en una imagen es entre dos pixeles, por lo tanto, el error en la precisión de desplazamiento será la relación entre milímetros y pixeles. Mientras mayor sea la relación, mayor será el error. En la Tabla 5.2 y Tabla 5.3 se muestra la relación [mm/píxel] para la cámara general y local para el muro 1 y 2 respectivamente.

Tabla 5.2: Escala Muro 1.

	Relación [mm/píxel]	
	General	Local
FPA	0.5669	0.3087
FPB	0.5682	0.3673
MEA	0.5651	0.3344
MEB	0.5712	0.3409

Tabla 5.3: Escala Muro 2.

	Relación [mm/píxel]	
	General	Local
FPA	0.5644	0.3538
FPB	0.5467	0.3368
MEA	0.5406	0.3533
MEB	0.5386	0.3281

Debido a que la cámara con enfoque local presenta una distancia menor al muro (solo se enfoca la parte inferior) se tiene un menor error en comparación a la cámara general.

En tanto, el error en las deformaciones depende de la vecindad y el espaciamiento ingresado por el usuario a Ncorr y se define como la cantidad de pixeles sobre la que se mide el movimiento de un píxel. En la ecuación (5.1) se presenta el error por cálculo de deformaciones, donde S_s es el espaciamiento del subconjunto y R_s es el radio de la vecindad de la deformación.

$$e_s = \frac{1 \text{ [pixel]}}{(S_s + 1)(2R_s + 1)} \quad (5.1)$$

En este caso para ambas cámaras el espaciamiento del subconjunto (S_s) es 10 y radio de la vecindad (R_s) es 25. Con esto el error por cálculo de deformación para ambas cámaras es igual a $e_s = 0.0017$.

También existe el error en las condiciones iniciales de la toma de fotografías. Para poder cuantificar este error se capturan dos imágenes consecutivas con el muro en reposo y luego se analizan en Ncorr, como no hubo variación entre una foto y otra los desplazamiento y deformaciones debiesen ser nulos, por lo que los valores distintos de cero en los resultados entregados por el programa corresponden a imprecisiones en las condiciones iniciales

(pequeñas vibraciones de las cámaras, movimientos de las probetas, entre otras.). En la Tabla 5.4 se muestra un resumen del error máximo global (e_{\max}), mínimo global (e_{\min}), promedio global (e_{prom}) y la desviación estándar global (e_{desv}) obtenida para las dos cámaras en todos los muros.

Tabla 5.4: Resumen de errores globales ambientales.

		u [mm]	v [mm]	$\varepsilon_{xx} \left[\frac{mm}{mm}\right]$	$\varepsilon_{xy} \left[\frac{mm}{mm}\right]$	$\varepsilon_{yy} \left[\frac{mm}{mm}\right]$	
Muro 1	General	e_{\max}	0,137	0,068	1,0E-03	7,7E-04	3,0E-04
		e_{\min}	-0,219	-0,117	-1,7E-03	-6,2E-04	-3,3E-04
		e_{prom}	0,108	0,024	3,6E-05	6,2E-06	1,6E-05
		e_{desv}	0,012	0,011	1,1E-04	4,5E-05	2,6E-05
	Local	e_{\max}	0,130	0,175	1,5E-03	1,5E-03	1,9E-03
		e_{\min}	-0,258	-0,266	-3,5E-03	-3,5E-03	-3,4E-03
		e_{prom}	0,028	0,012	1,1E-05	1,1E-05	1,7E-05
		e_{desv}	0,006	0,009	1,8E-04	1,8E-04	1,0E-04
Muro 2	General	e_{\max}	0,263	0,152	1,3E-04	2,4E-04	9,9E-05
		e_{\min}	-0,234	-0,160	-1,9E-04	-7,5E-05	-9,5E-05
		e_{prom}	0,192	0,021	6,6E-06	4,2E-06	1,0E-05
		e_{desv}	0,065	0,025	2,3E-05	2,1E-05	3,0E-05
	Local	e_{\max}	0,131	0,293	1,3E-04	1,5E-03	1,5E-04
		e_{\min}	-0,087	-0,232	-2,1E-04	-2,4E-03	-2,4E-04
		e_{prom}	0,044	0,074	6,3E-07	4,9E-06	5,6E-05
		e_{desv}	0,152	0,244	1,0E-03	1,0E-03	1,0E-03

Una vez cuantificado los errores de fotogrametría, se obtiene que el máximo error absoluto para desplazamientos es de 0.571 [mm] para la cámara general y 0.036 para la cámara local. En el caso de las deformaciones el mayor error absoluto es de 0.0035 para la cámara local y 0.001 para la cámara general.

5.4 COMPARACION ENTRE FOTOGRAMETRIA Y LVDT's

Con el fin de validar los resultados obtenidos a través de fotogrametría, se comparan los valores de derivas de techo medidas con los sensores LVDT's (sensor o de la Figura 4.8) y fotogrametría en el punto extremo del muro (Figura 5.1). Para realizar la comparación primero se debe tener la misma dimensión de tiempo para ambos métodos.

Los tiempos para fotogrametría se obtienen transformando a unidad de tiempo (en este caso segundos) el nombre de cada fotografía, ya que este corresponde a la hora en que fueron tomadas, fijando como tiempo 0 la hora de la primera foto, en el caso de los LVDT's el tiempo se obtiene mediante la ecuación (5.2), donde 20 corresponde a la frecuencia de adquisición de datos.

$$Tiempo(LVDT_i) = \frac{i}{20} \quad (5.2)$$

Una vez realizado lo anterior se procede a corregir las derivas de techo por deslizamiento y giro del pedestal, tanto para los valores obtenidos con los sensores LVDT's como para los obtenidos con fotogrametría, la corrección se realiza con los datos que entregan los sensores colocados en las fundaciones de los muros. Para el caso de la corrección por deslizamiento se usan los datos del sensor 1 (Figura 4.8), para la corrección por giro se utiliza la ecuación (5.3). Por último, el valor final de la deriva de techo corregida se calcula mediante la ecuación (5.4).

$$corr_{giro} = \frac{(d_{s3} - d_{s2}) \cdot h_M}{L_F} \quad (5.3)$$

$$\Delta_{corr} = \Delta_{sc} - corr_{desl} - corr_{giro} \quad (5.4)$$

Donde d_{s3} y d_{s2} son los datos medidos con los sensores 2 y 3 (Figura 4.8), h_M es la altura del muro, L_F es el largo de la fundación, Δ_{corr} es la deriva corregida en [mm] y Δ_{sc} es la deriva de techo en [mm] medida directamente.

Luego de esto se comparan los valores de derivas de techo obtenidas. A continuación, se muestra la correlación para las 8 probetas, en el eje vertical se tienen los drift obtenidos con LVDT's y en el horizontal los Drift obtenidos con fotogrametría, para ambos casos los drift corresponden al desplazamiento de techo del muro esquematizado en la Figura 5.6. Mientras más cerca de 1 se encuentre la pendiente de la nube de datos menor será el error. En la Tabla 5.5 se muestra un resumen de R^2 y la diferencia de inclinación de la pendiente con respecto a la diagonal $|m - 1|$ para cada muro.

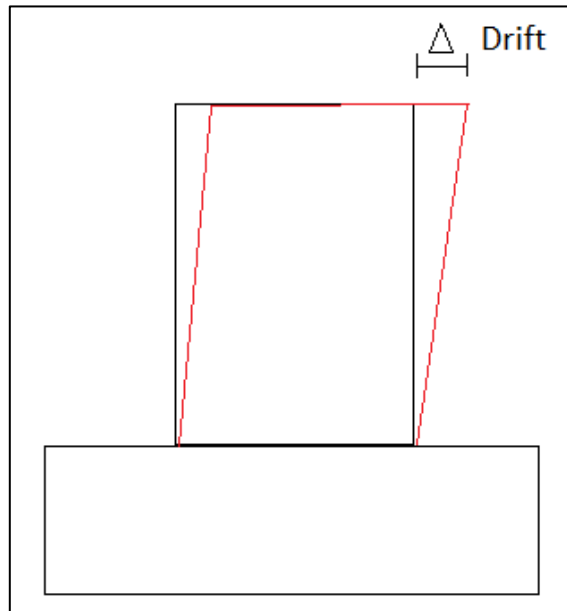
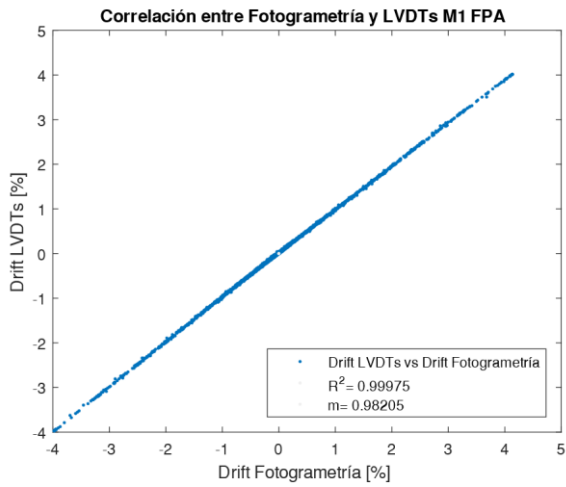
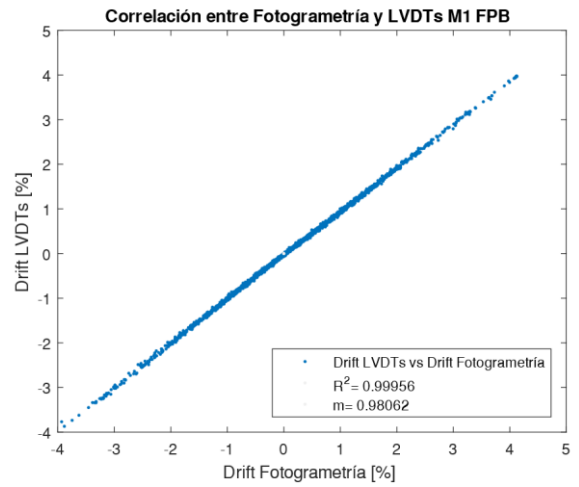


Figura 5.6: Esquema de la posición del drift de comparación.

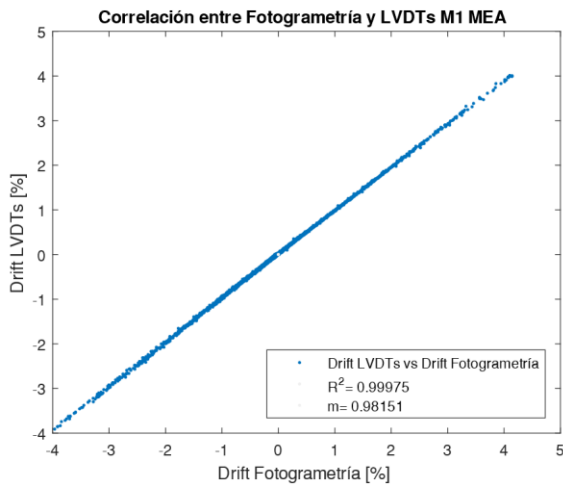


(a)

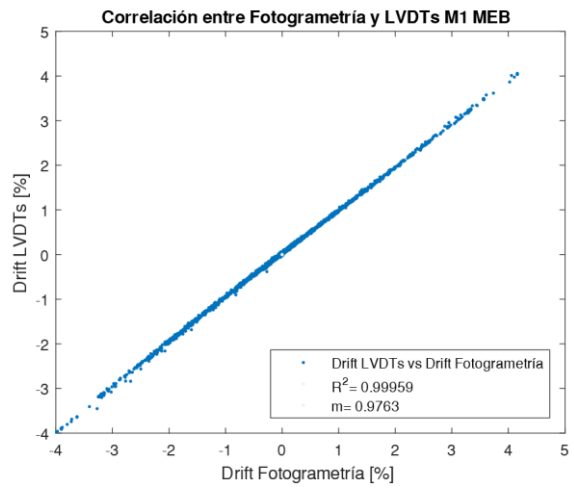


(b)

Figura 5.7: Correlación entre fotogrametría y LVDT's muro 1, (a) FPA; (b) FPB.

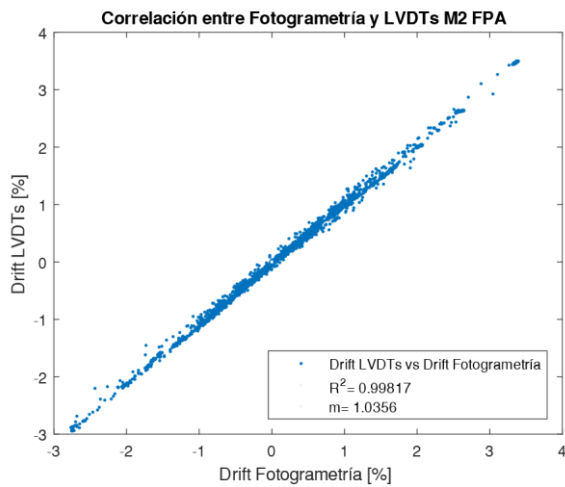


(a)

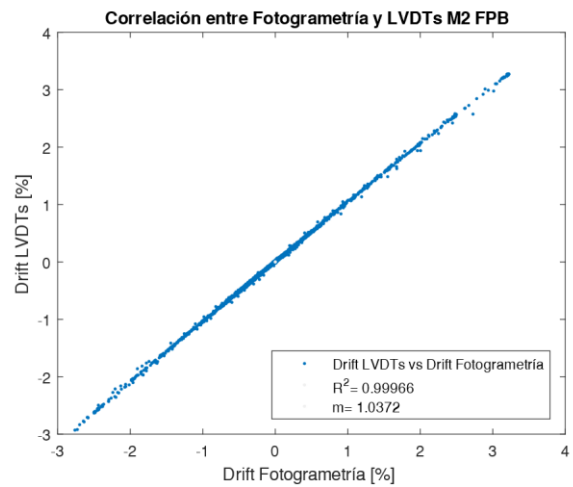


(b)

Figura 5.8: Correlación entre fotogrametría y LVDT's muro 1, (a) MEA; (b) MEB.



(a)



(b)

Figura 5.9: Correlación entre fotogrametría y LVDT's muro 2, (a) FPA; (b) FPB.

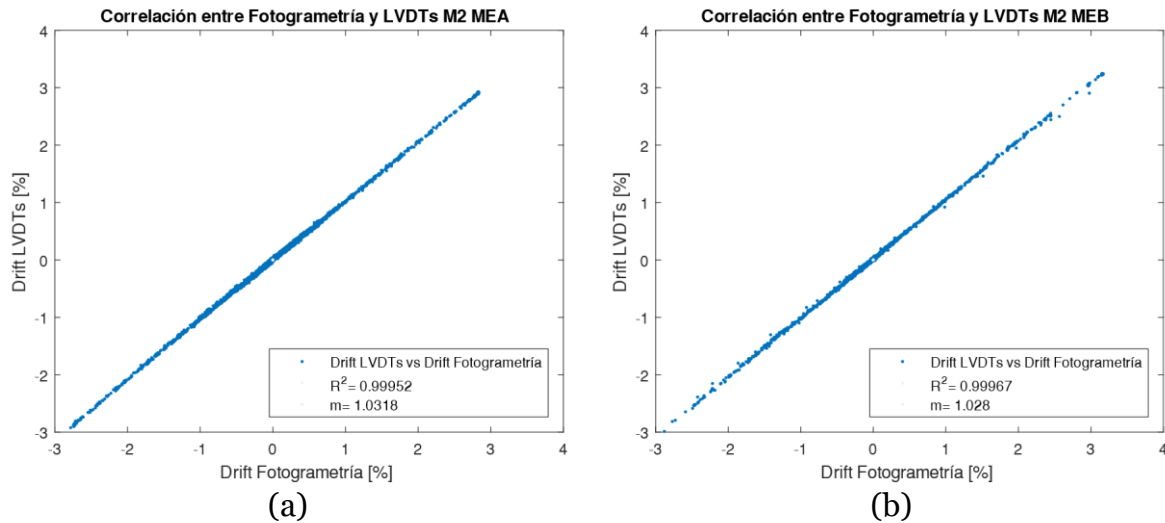


Figura 5.10: Correlación entre fotogrametría y LVDT's muro 2, (a) MEA; (b) MEB.

Tabla 5.5: Resumen R^2 y $|m - 1|$ por muro.

	Muro 1				Muro 2			
	FPA	FPB	MEA	MEB	FPA	FPB	MEA	MEB
R^2	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	0.999	0.999
$ m - 1 $	0.017	0.019	0.018	0.023	0.035	0.037	0.031	0.028

El mayor error se presenta en el muro 2 FPA con un valor de 0.0018, los errores presentados por los demás muros se encuentran entre 0.0002 y 0.0004. Esto se debe a que en el ensayo del muro 2 FPA se utilizó una distribución de sensores distinta a la de los demás casos, con mayor error nominal. De todas formas, se tiene una correlación de 0.999 en todos los casos validando la fotogrametría como método para obtener resultados.

5.5 RESULTADOS

Como se mencionó en los antecedentes para el uso de fotogrametría se deben ingresar los parámetros usados para el análisis DIC. En la Tabla 5.6 se muestran los valores ingresados para el estudio de desplazamientos y deformaciones en las 8 probetas.

Tabla 5.6: Valores para análisis en Ncorr.

Parámetro	Valor
Subset Radius	50
Subset Spacing	10
Diff Norm C/O	1e-06
Iteration C/O	50
Strain Radius	25

Para todos los ensayos se hablará de derivas positivas cuando el lado derecho del muro se encuentre en compresión y derivas negativas cuando el lado derecho se encuentre en tracción.

5.5.1 DISTRIBUCION DE DEFORMACIONES EN LOS MUROS

Dado que la cámara general muestra el comportamiento completo del muro y la cámara local solo la mitad inferior, además de que el error absoluto en deformaciones es menor para la cámara general es que en esta sección se presentan solo los resultados del enfoque general. No obstante, en los ANEXOS se muestran los resultados de las deformaciones para la cámara local.

A través de un mapa de colores que varía entre $[-0.02, 0.02]$ para ε_{yy} y entre $[-0.005, 0.005]$ para ε_{xx} se presentan las deformaciones en los muros obtenidas mediante fotogrametría para la cámara general. Con colores cálidos y valores positivos se representa la tracción, mientras que la compresión se representa con colores fríos y valores negativos. Para el muro 1 se muestran las derivas desde 2% al 3.2% y para el muro 2 se muestran las derivas de 2% y 2.5%. En todos los casos los resultados corresponden al tercer ciclo de cada deriva.

- Muro 1

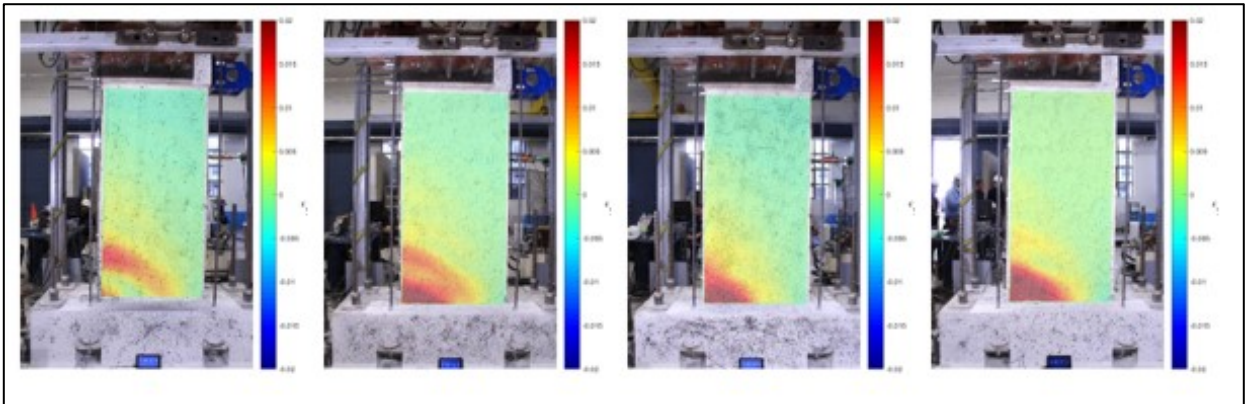


Figura 5.11: Deformación ε_{yy} 2% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

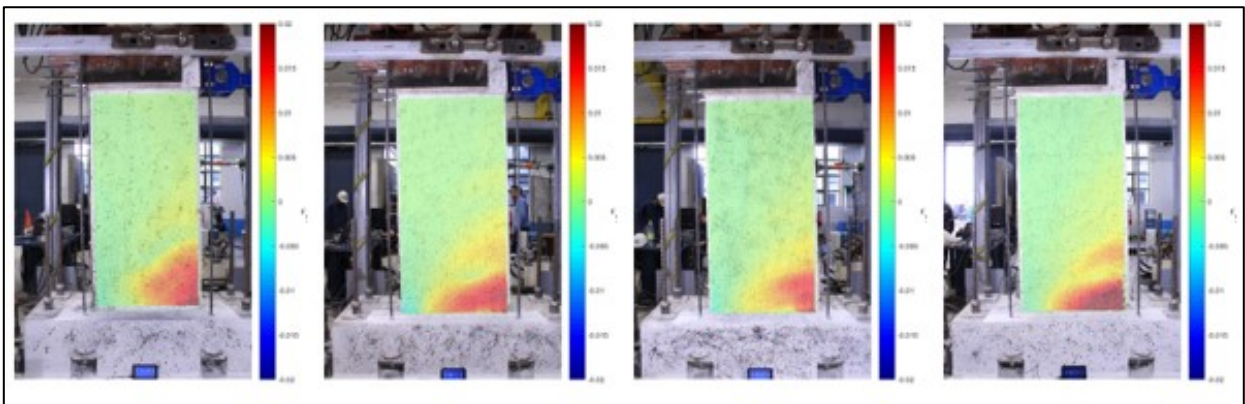


Figura 5.12: Deformación ε_{yy} -2% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

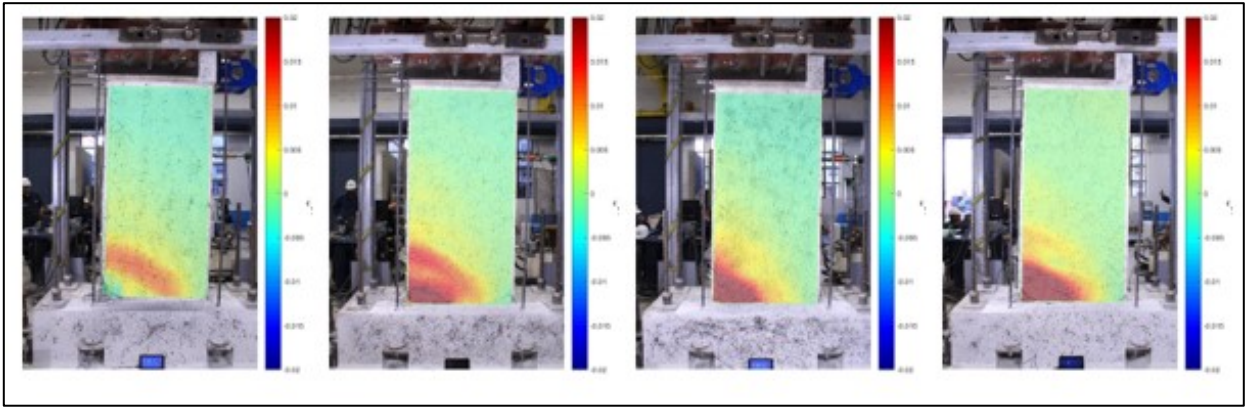


Figura 5.13: Deformación ε_{yy} 2.5% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

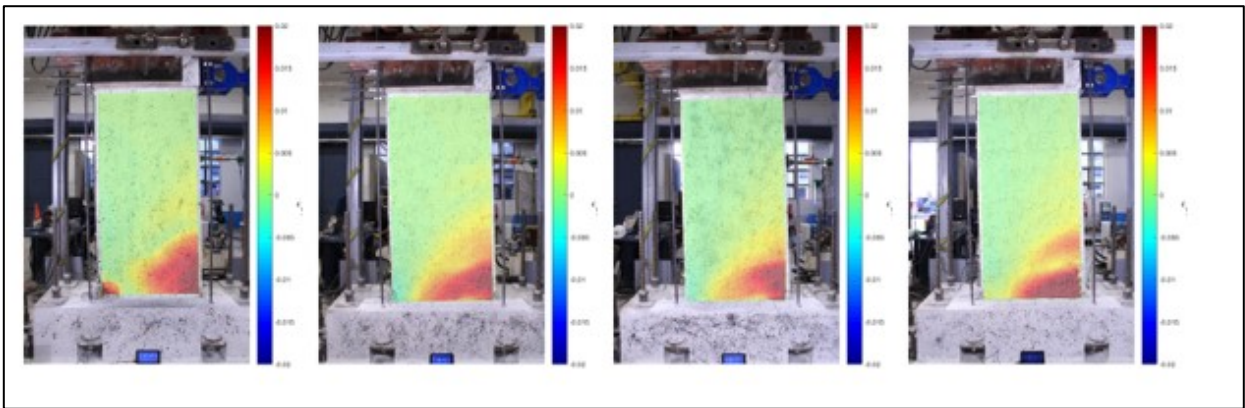


Figura 5.14: Deformación ε_{yy} -2.5% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

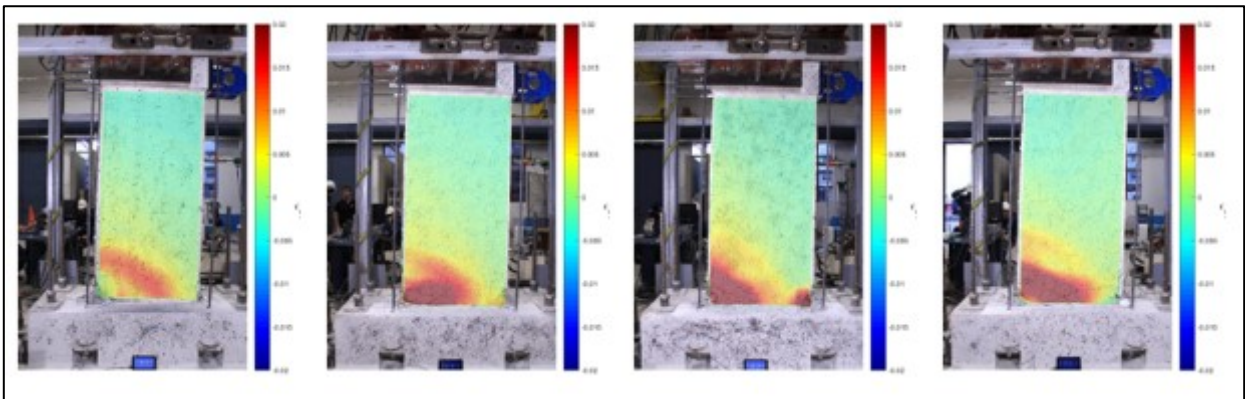


Figura 5.15: Deformación ε_{yy} 3.2% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

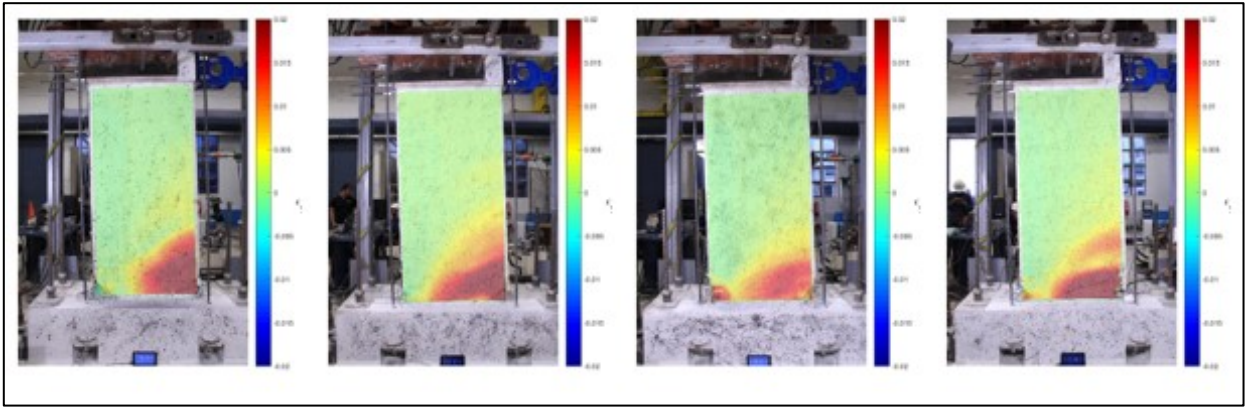


Figura 5.16: Deformación ε_{yy} -3.2% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

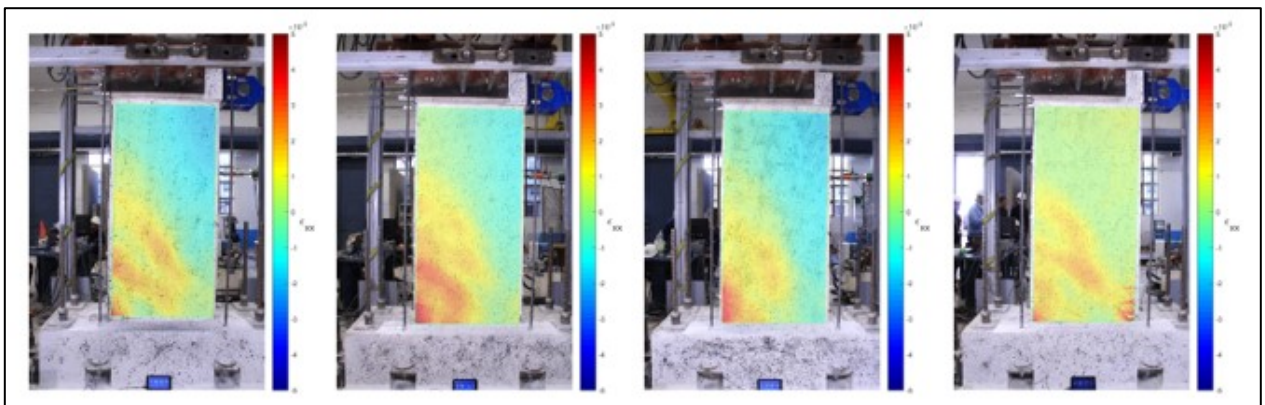


Figura 5.17: Deformación ε_{xx} 2% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

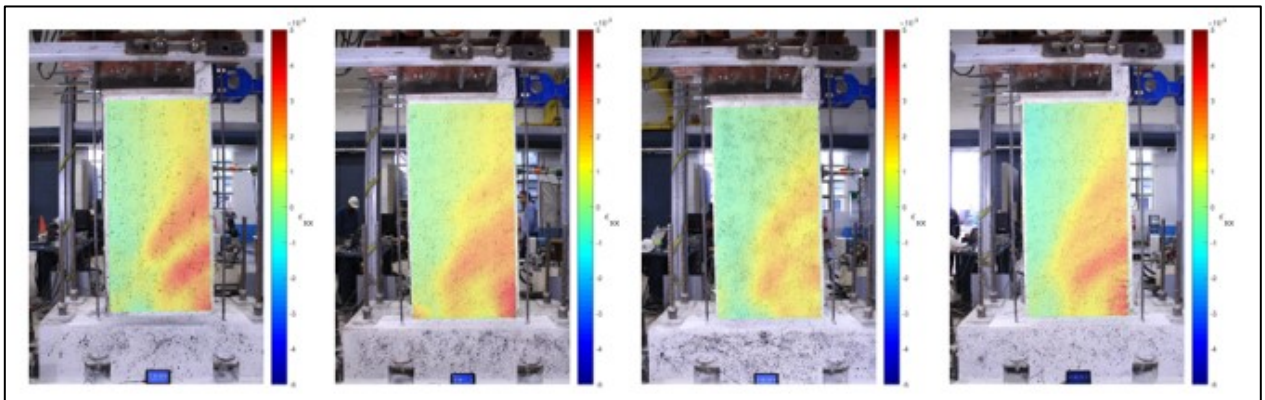


Figura 5.18: Deformación ε_{xx} -2% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

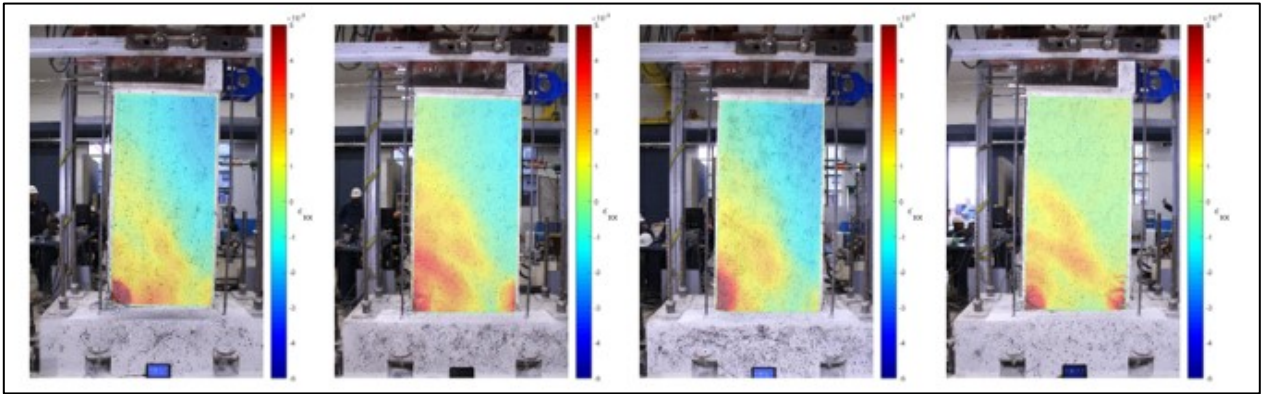


Figura 5.19: Deformación ε_{xx} 2.5% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

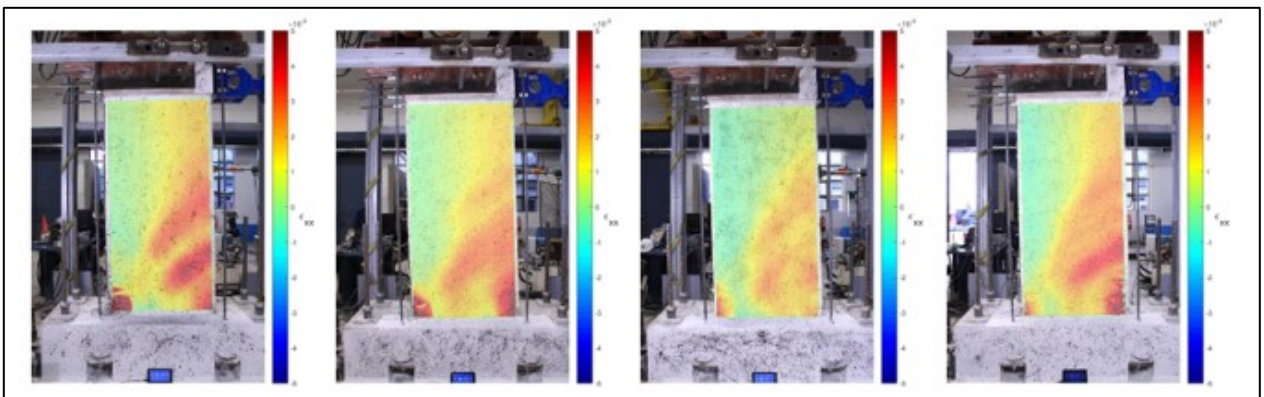


Figura 5.20: Deformación ε_{xx} -2.5% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

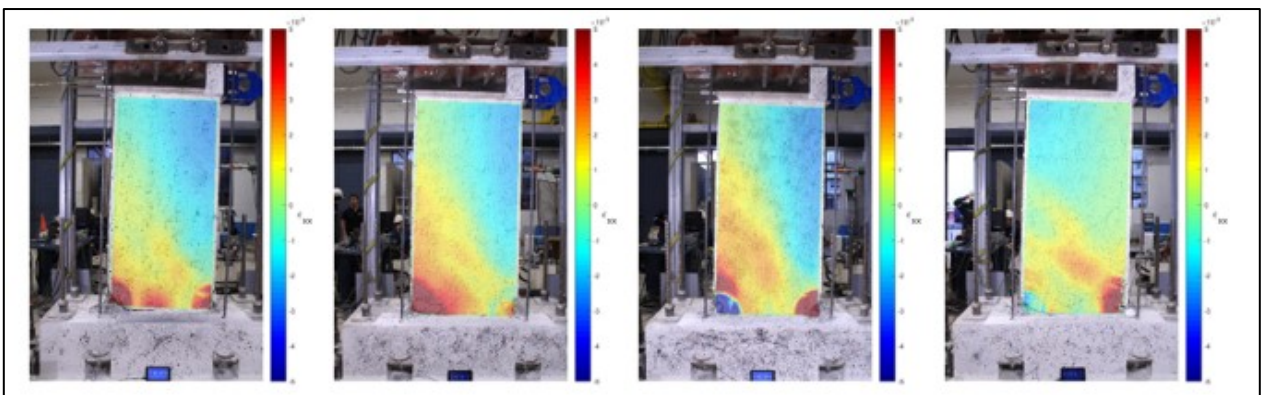


Figura 5.21: Deformación ε_{xx} 3.2% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

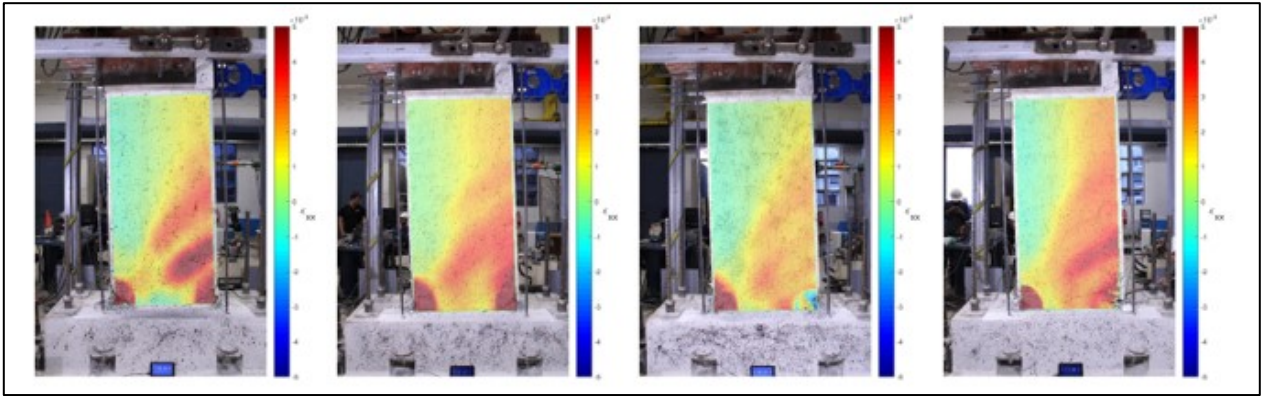


Figura 5.22: Deformación ε_{xx} -3.2% Muro 1, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

En las primeras 6 figuras (Figura 5.11, Figura 5.12, Figura 5.13, Figura 5.14, Figura 5.15 y Figura 5.16) se muestran las deformaciones verticales del muro 1 para ambos sentidos. En todos los casos se observa una concentración de deformaciones en el tercio inferior de la altura, para el caso de malla electrosoldada (MEA y MEB) esta concentración se ve ligeramente más abajo que en los casos de malla tradicional (FPA y FPB) en las derivas positivas. En todos los casos al aumentar la deriva de techo los colores se vuelven más cálidos, pero la concentración de deformaciones mantiene su altura. En cuanto a las grietas, estas son mayormente horizontales y van desde el borde al centro del muro aproximadamente. Se observa pérdida de recubrimiento desde la deriva 2.5%. En los desplazamientos de techo positivos el muro FPA muestra la concentración de tracciones en una franja sobre el la parte inferior del muro, diferente al comportamiento de los otros tres muros donde las concentraciones comienzan desde el inicio del muro hasta el tercio inferior. Este comportamiento no ocurre en las derivas negativas donde en todos los muros las máximas tracciones comienzan desde la base. En el muro MEB al ir subiendo en altura ocurre una disminución y posterior aumento en las tracciones, diferente al comportamiento en los otros muros en donde las tracciones disminuyen en la altura.

En las siguientes 6 figuras (Figura 5.17, Figura 5.18, Figura 5.19, Figura 5.20, Figura 5.21 y Figura 5.22) se muestran las deformaciones horizontales del muro 1. Al igual que en el caso anterior, al aumentar la deriva de techo los colores se vuelven más cálidos. Al tener esfuerzos de corte menores a los de flexión, es que se utiliza una escala más pequeña en este caso. Se observan algunas grietas diagonales poco marcadas. Por otro lado, se logra observar de mejor manera la pérdida de recubrimiento en las esquinas inferiores desde la deriva de 2.5%.

El comportamiento de los muros se encuentra dentro de lo esperado, ya que, dada la relación de aspecto, las fuerzas de flexión deben predominar frente a las de corte lo que se traduce en que las deformaciones verticales serán mayores a las horizontales, tal como se observa en las figuras antes presentadas.

Por último, se aprecia que tanto los muros con malla preparada como los con malla electrosoldada presentan deformaciones similares, tanto verticales como horizontales.

- Muro 2

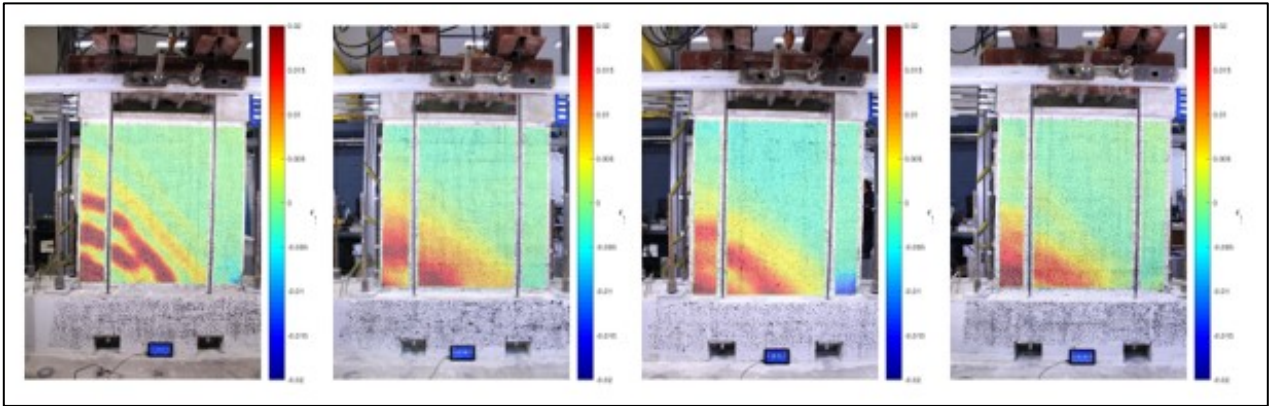


Figura 5.23: Deformación ε_{yy} 2% Muro 2, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

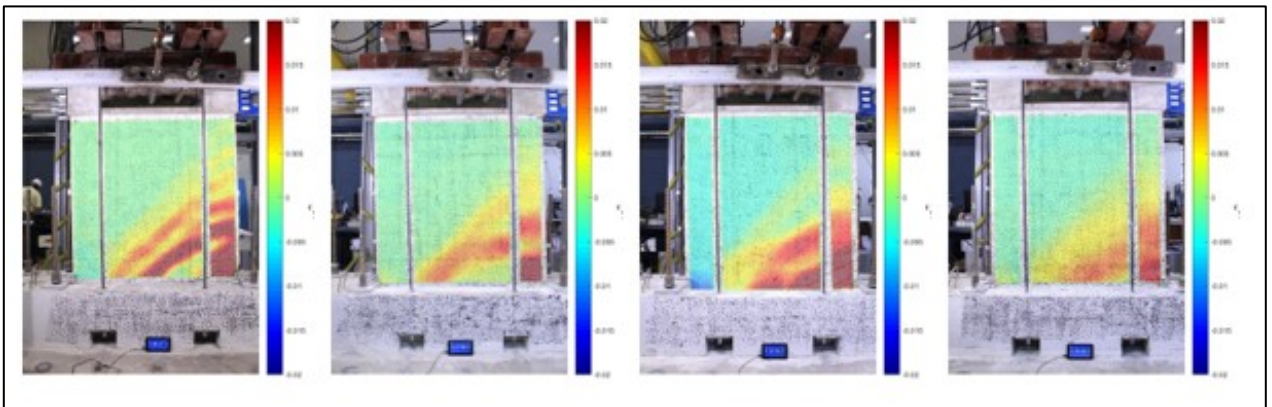


Figura 5.24: Deformación ε_{yy} -2% Muro 2, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

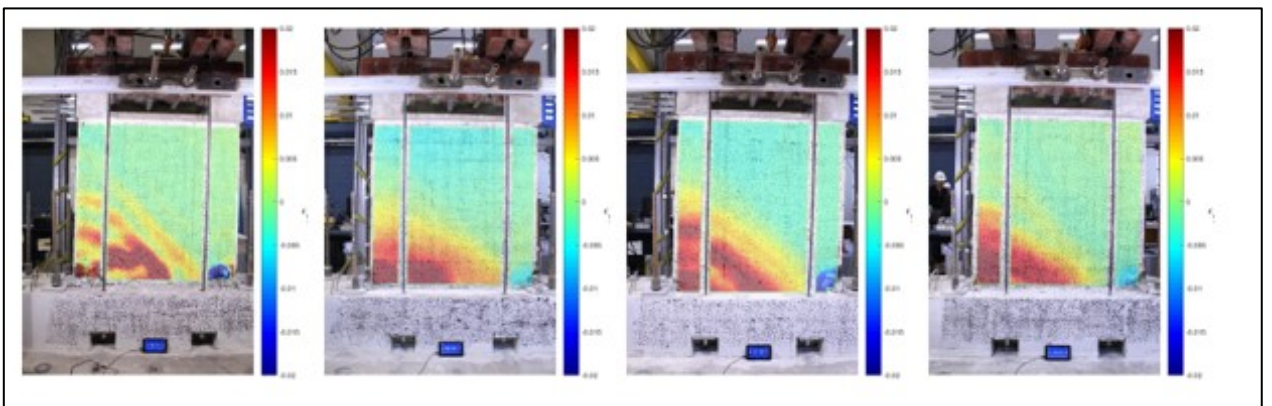


Figura 5.25: Deformación ε_{yy} 2.5% Muro 2, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

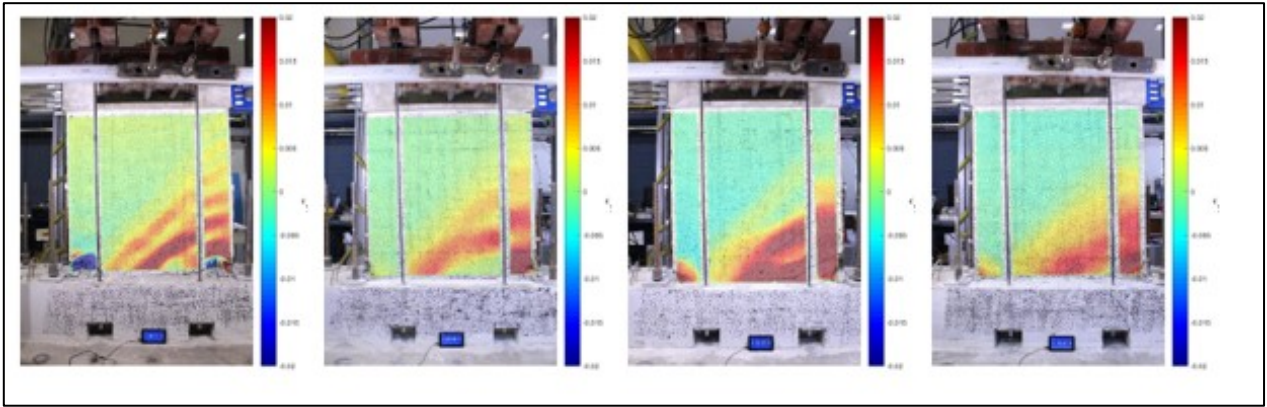


Figura 5.26: Deformación ε_{yy} -2.5% Muro 2, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

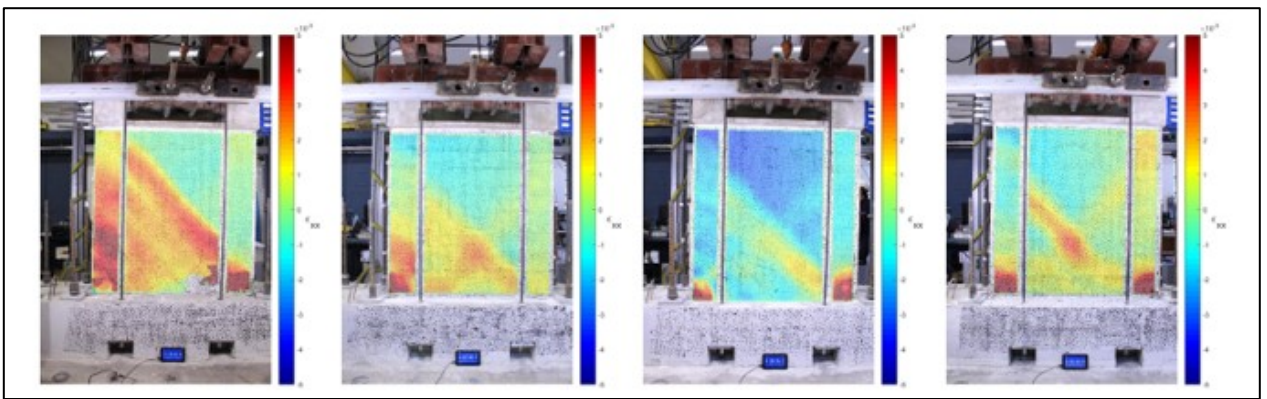


Figura 5.27: Deformación ε_{xx} 2% Muro 2, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

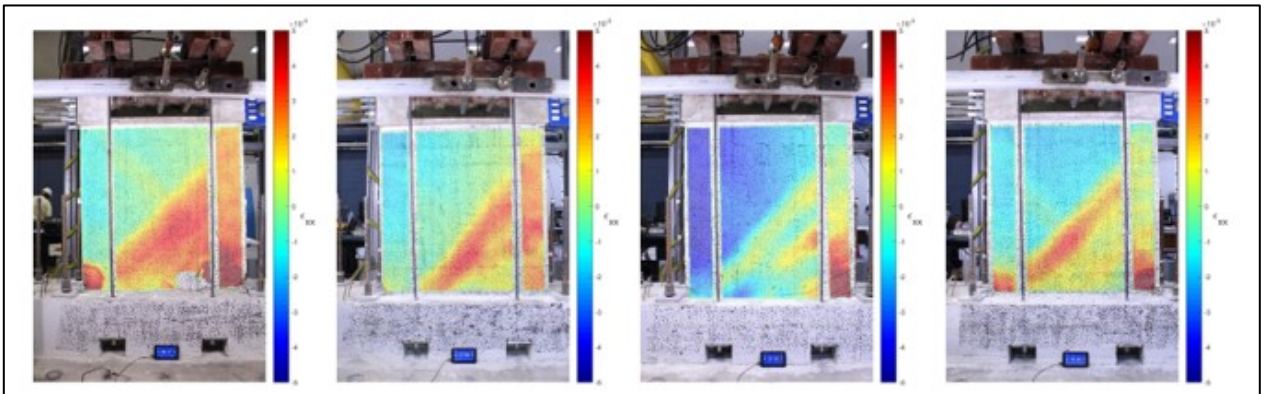


Figura 5.28: Deformación ε_{xx} -2% Muro 2, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

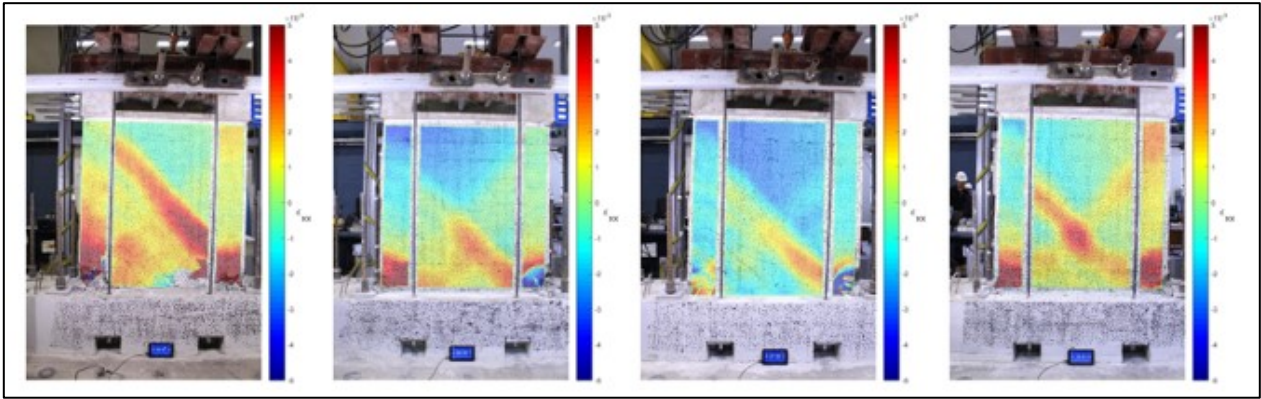


Figura 5.29: Deformación ε_{xx} 2.5% Muro 2, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

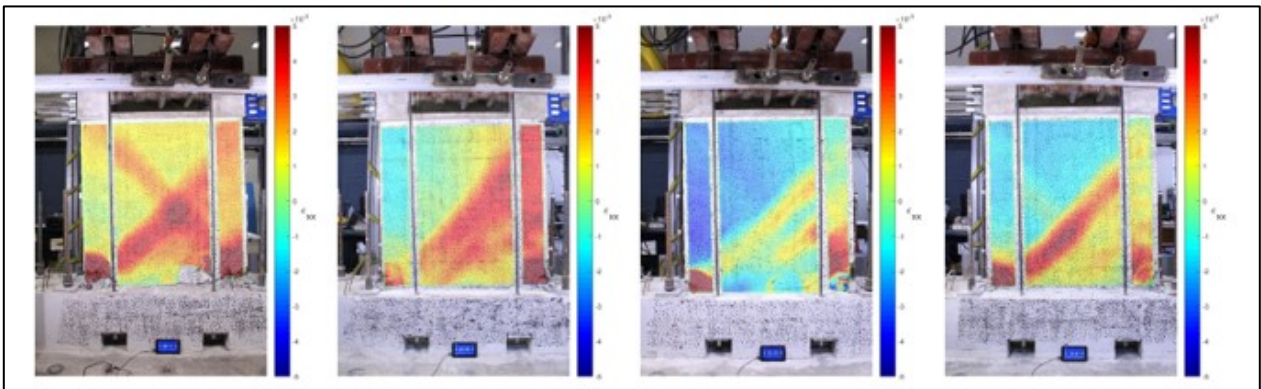


Figura 5.30: Deformación ε_{xx} -2.5% Muro 2, de izquierda a derecha: FPA, FPB, MEA Y MEB.

En la Figura 5.23, Figura 5.24, Figura 5.25 y Figura 5.26 se muestran las deformaciones verticales en el muro 2 para las derivas del 2% y 2,5% en ambos sentidos. En los cuatro muros se observa que la concentración de deformaciones se ubica en la parte inferior y llega hasta un punto ligeramente por sobre la mitad del alto de los muros. Por otro lado, con el aumento de deriva de techo los colores se vuelven más cálidos, sin embargo, las deformaciones no aumentan en la altura. Las grietas se distribuyen en la mitad inferior del muro y se vuelven más notorias con el aumento en la deriva de techo. Existe pérdida de recubrimiento en las esquinas inferiores en la deriva de 2%, mientras que para la deriva del 2.5% la pérdida de recubrimiento aumenta extendiéndose hacia el centro del muro. Para la deriva del 2% el muro FPA muestra un rojo intenso en las deformaciones para toda la altura mientras que en los otros muros esa intensidad solo se observa en la base. Con el aumento de deriva es el muro MEA es quien muestra los colores más cálidos. Además, el muro MEB presenta colores menos cálidos para las derivas negativas, lo que significa que sus deformaciones son menores a los demás muros. Por otro lado, en el muro MEA se distinguen tonos celestes en la parte diagonal superior para el 2% y 2.5% de deriva en ambos sentidos, esto indica que este muro presenta mayores compresiones en esa zona. El muro FPB presenta este mismo comportamiento, pero solo en la deriva de 2.5%.

En tanto, en la Figura 5.27, Figura 5.28, Figura 5.29 y Figura 5.30 se presentan las deformaciones horizontales en el muro 2 para las mismas derivas que en el caso anterior. Se observa una concentración de tensiones diagonal que cruza todo el muro y se marca de mayor manera al aumentar la deriva de techo. Esto evidencia esfuerzos de corte mayores

que en el muro 1 y mayor participación de la doble malla en la disipación de energía. Sin embargo, los esfuerzos flexurales siguen predominando. Se observa pérdida de recubrimiento desde la deriva de 2%. En el muro FPA se distingue una línea diagonal más intensa, además, en la deriva de -2.5% es posible notar el puntal diagonal producto del corte en ambas direcciones, cosa que no ocurre en los demás muros. Esto significa que el muro FPA presenta esfuerzos de corte mayores. Esto no se observa en el muro FPB por lo que este comportamiento no se debe a la solución constructiva. Al igual que en las deformaciones verticales el muro MEA presenta mayores compresiones sobre el puntal diagonal para las dos derivas expuestas en ambos sentidos, esto se distingue con tonalidades celestes y azules en dicha zona.

Salvo por estas diferencias mencionadas anteriormente, el comportamiento de los muros con malla preparada y malla electrosoldada es similar respecto a la distribución de grietas, deformaciones verticales y horizontales, y pérdida de recubrimiento.

5.5.2 PERFIL DE DESPLAZAMIENTO EN ALTURA

En esta sección se analiza el desplazamiento lateral de los muros, los valores para cada caso corresponden al borde del muro esquematizado con una línea roja en la Figura 5.31. Todos los resultados corresponden al promedio de los tres ciclos para cada deriva.

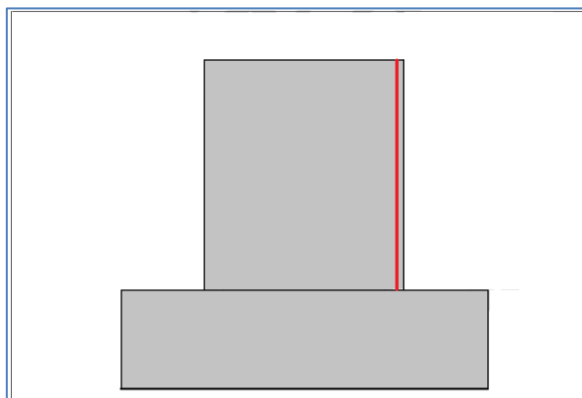


Figura 5.31: Esquema ubicación de eje para extracción de resultados.

- Muro 1

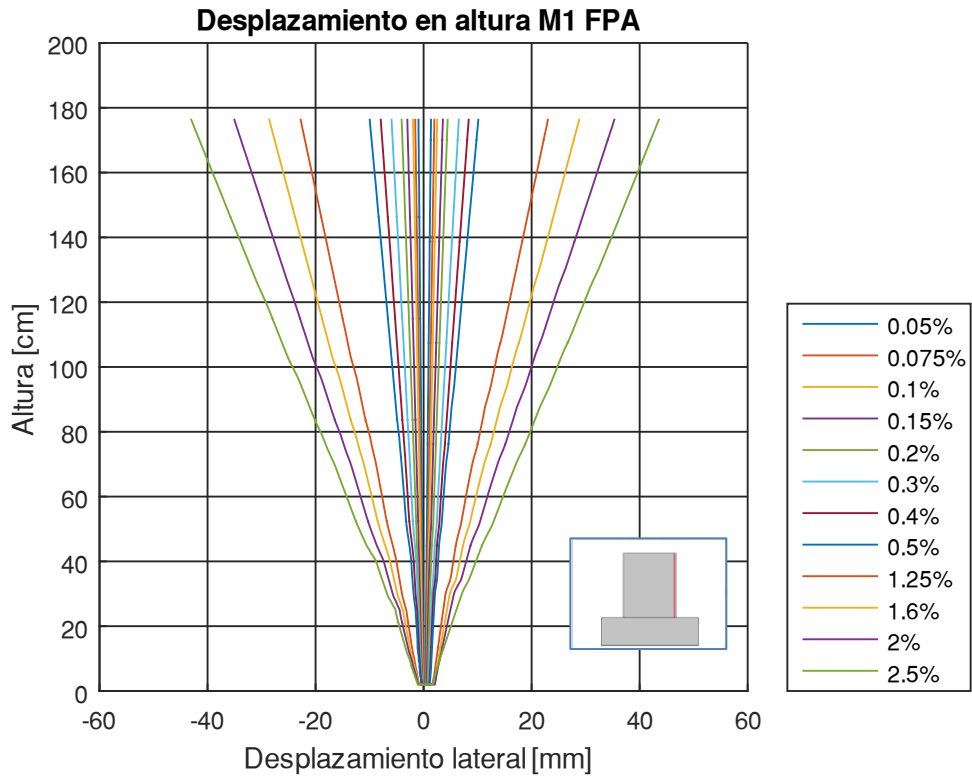


Figura 5.32: Desplazamiento en altura Muro 1 FPA.

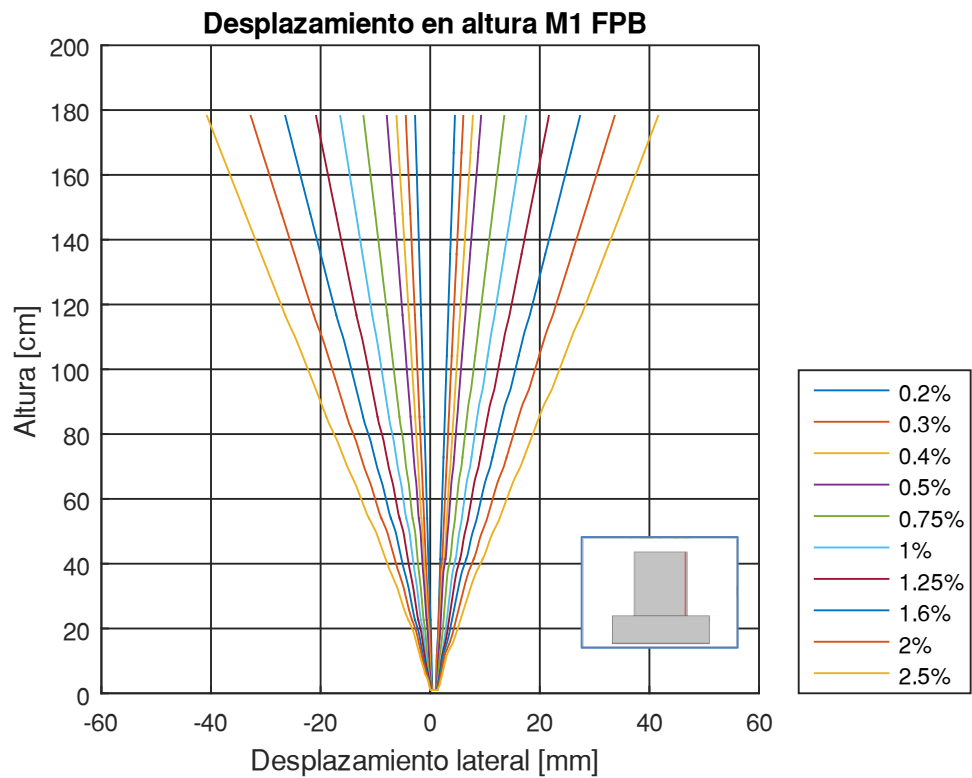


Figura 5.33: Desplazamiento en altura Muro 1 FPB.

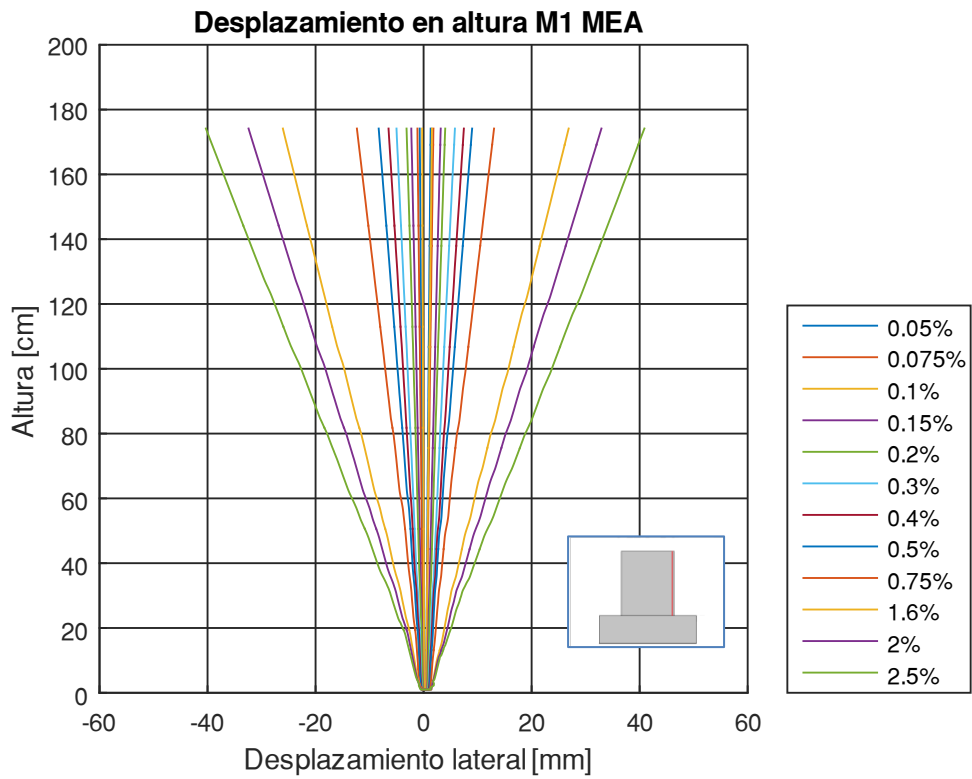


Figura 5.34: Desplazamiento en altura Muro 1 MEA.

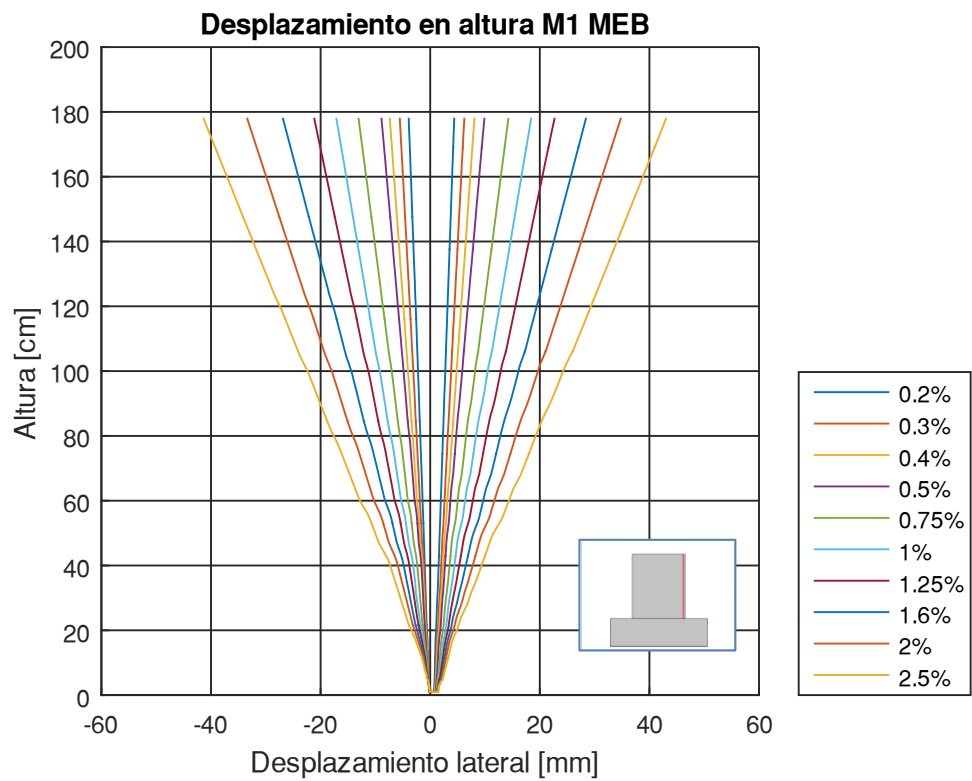


Figura 5.35: Desplazamiento en altura Muro 1 MEB.

Como se observa en la Figura 5.32, Figura 5.33, Figura 5.34 y Figura 5.35 los desplazamientos para el muro 1 son similar para las 4 probetas, tanto las con malla preparada como las con malla electrosoldada, alcanzando un desplazamiento máximo del orden de 42 [mm] para una deriva de techo de 2.5%.

En los cuatro muros existe un incremento de desplazamientos a medida que la deriva de techo aumenta. También se observa un desplazamiento simétrico en ambos sentidos de empuje lateral.

Debido a la perdida de recubrimiento en la base no es posible presentar gráficamente los resultados para la deriva de 3.2%. Por otro lado en los muros FPA y MEA, debido a errores en la toma de fotografías no se presentan gráficamente los resultados para las derivas 0.75% y 1% en el caso del primero muro y 1% y 1.25% de deriva en el caso del segundo muro. Sin embargo en todas las derivas si es posible obtener los máximos desplazamientos para estos casos y se agregan en el resumen de resultados.

En la Tabla 5.7 se presenta un resumen de los desplazamientos máximos obtenidos para cada deriva junto con el error respecto al desplazamiento nominal. En ella se observa que en todos los casos las mayores diferencias respecto al desplazamiento teórico se encuentran en los valores de desplazamiento más bajos alcanzando una diferencia (error) máxima de 0.25, esto se debe a que estos valores se encuentran más cercanos al error por uso de fotogrametría. A medida que los desplazamientos crecen la diferencia disminuye para todos los casos siendo menores que 0.10. En tanto el máximo desplazamiento obtenido por fotogrametría es 54,3 [mm] para el muro FPA, 54,2 [mm] para el muro MEB, 53,3 [mm] para el muro FPB y 51,9 [mm] para el muro MEA, presentando una diferencia del 4% entre el mayor y menor desplazamiento máximo.

Tabla 5.7:Resumen desplazamientos muro 1.

Muro 1								
Desplazamiento nominal [mm]	FPA [mm]	Error	FPB [mm]	Error	MEA [mm]	Error	MEB [mm]	Error
3.60	4.46	0.19	4.50	-0.25	4.01	-0.11	4.38	-0.22
5.40	6.52	0.17	6.05	-0.12	5.81	-0.08	6.23	-0.15
7.20	8.35	0.14	7.80	-0.08	7.47	-0.04	8.09	-0.12
9.00	10.15	0.11	9.30	-0.03	9.00	0.00	9.89	-0.10
13.50	14.35	0.06	13.53	0.00	13.07	0.03	14.28	-0.06
18.00	18.78	0.04	17.53	0.03	17.11	0.05	18.44	-0.02
22.50	23.05	0.02	21.68	0.04	21.14	0.06	22.71	-0.01
28.80	28.85	0.00	27.37	0.05	26.90	0.07	28.45	0.01
36.00	35.37	-0.02	33.71	0.06	32.98	0.08	34.83	0.03
45.00	43.62	-0.03	41.65	0.07	40.94	0.09	43.09	0.04
57.60	54.30	-0.06	53.26	0.08	51.89	0.10	54.23	0.06

- Muro 2

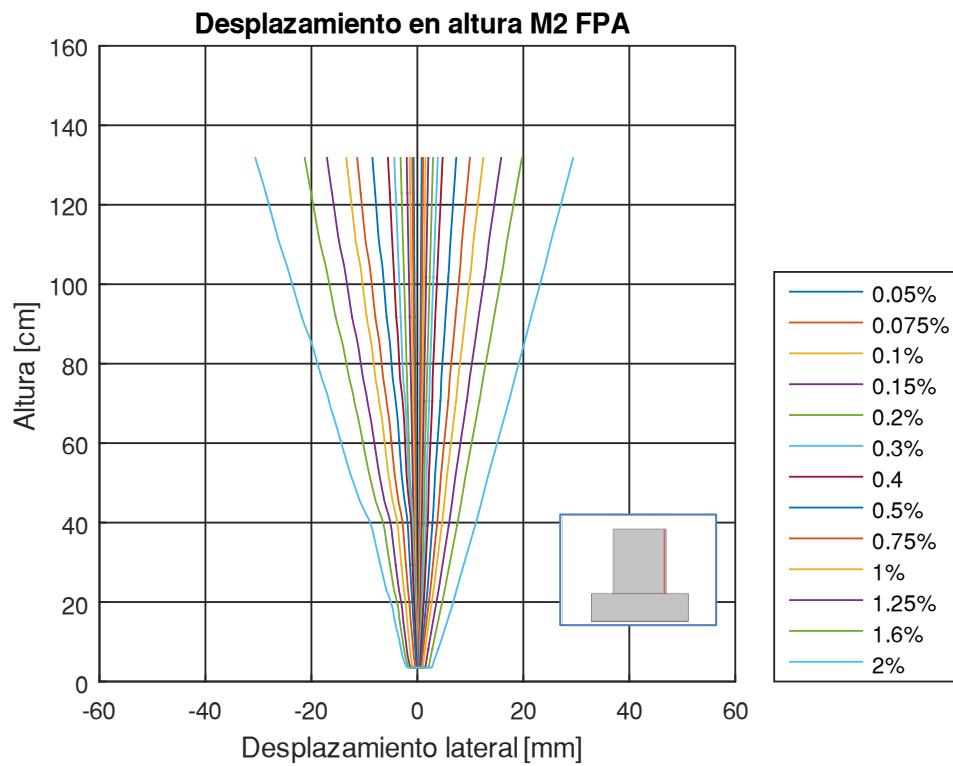


Figura 5.36: Desplazamiento en altura Muro 2 FPA.

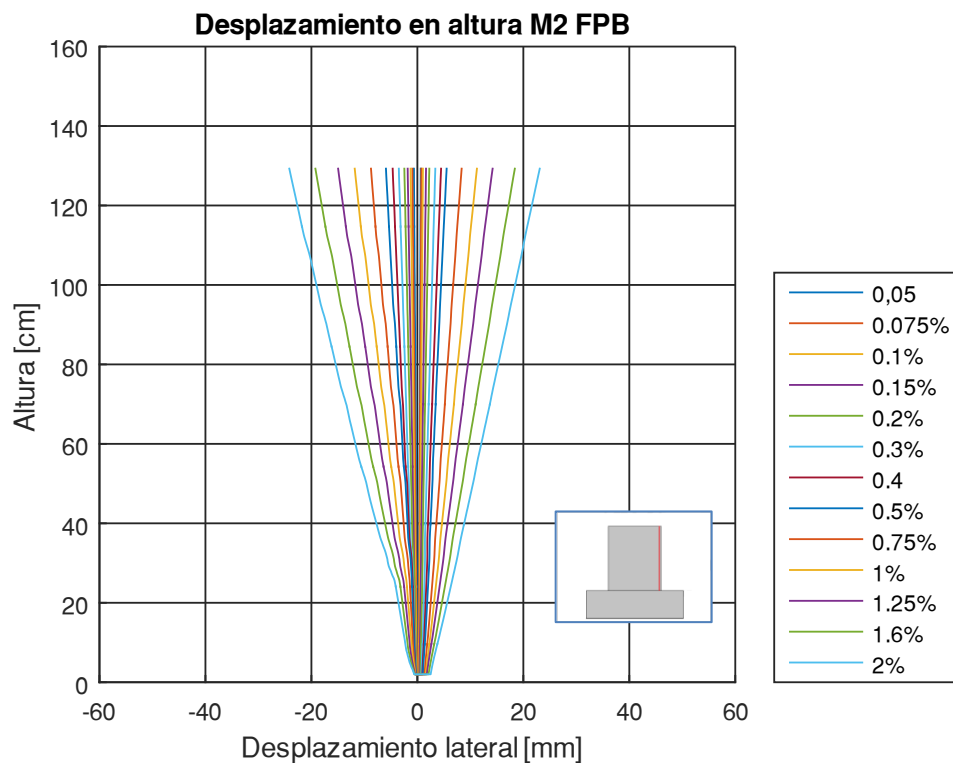


Figura 5.37: Desplazamiento en altura Muro 2 FPB.

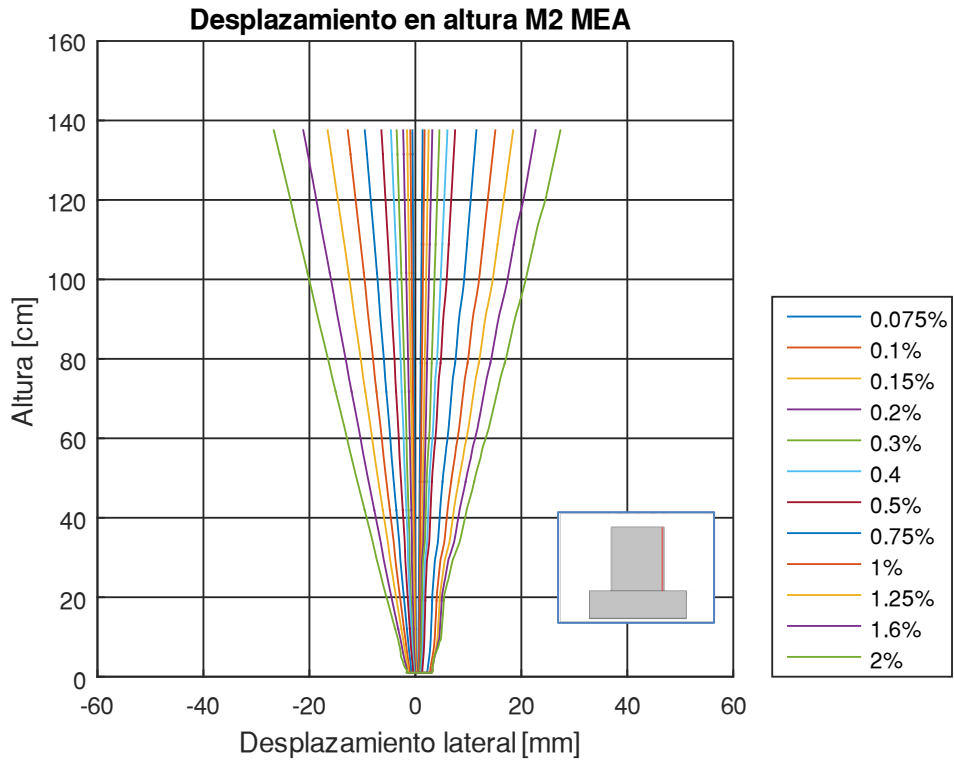


Figura 5.38: Desplazamiento en altura Muro 2 MEA.

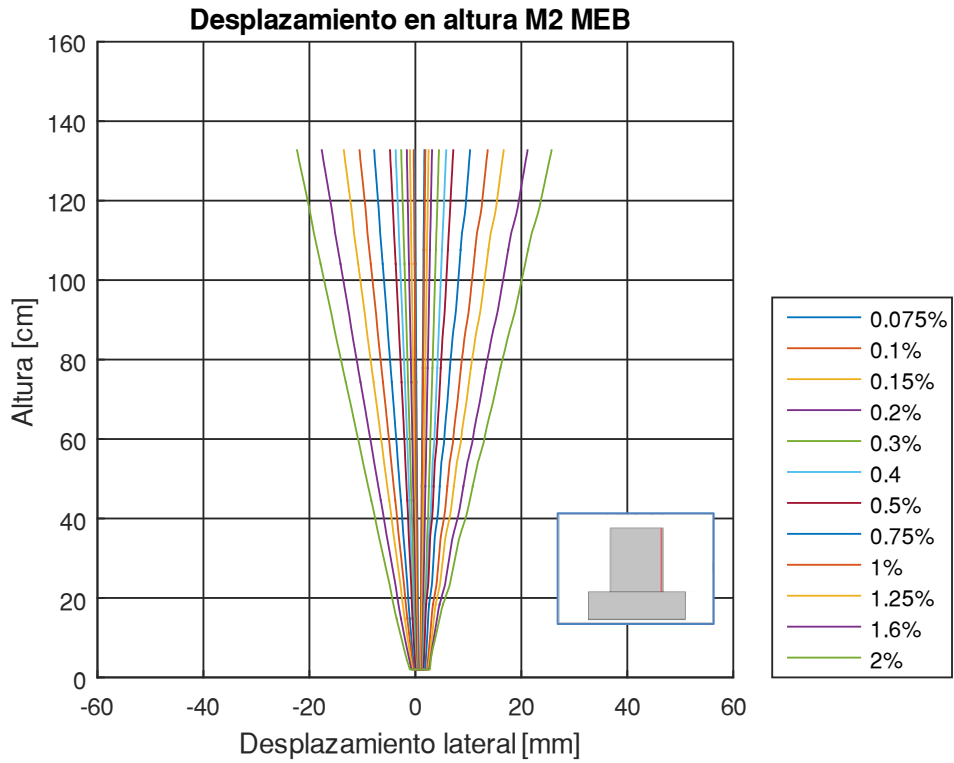


Figura 5.39: Desplazamiento en altura Muro 2 MEB.

De la Figura 5.36 a la Figura 5.39 se exponen los desplazamientos para el muro 2. Se observa que el muro FPB presentan desplazamientos menores en comparaciones a los demás muros, teniendo una diferencia de 6.32 [mm] en el desplazamiento máximo, equivalente a 21.4%, al 2% de deriva con respecto al muro FPA.

En los cuatro muros el desplazamiento lateral es mayor a medida que el desplazamiento de techo aumenta. Además, existe similitud entre los desplazamientos para las derivas positivas y negativas.

En la Tabla 5.8 se muestra un resumen de los desplazamientos máximos obtenidos para cada muro, además de la diferencia respecto al desplazamiento nominal. En ella se corrobora que el muro FPB tiene menor desplazamiento, sin embargo podemos notar que esta diferencia se mantiene durante todo el ensayo del orden del 20% con respecto al desplazamiento nominal.

Las mayores diferencias respecto al desplazamiento teórico ocurren en los desplazamientos pequeños. La máxima diferencia se encuentra en el muro MEB y es de 0.62, sin embargo a medida que aumenta el desplazamiento esta diferencia disminuye. Por lo que, al igual que en el muro 1, se debe a que los desplazamientos pequeños se encuentran más cercanos al error del uso de fotogrametría.

En cuanto a la comparación de las dos soluciones constructivas, si dejamos de lado el muro FPB, el comportamiento de ambos casos es similar alcanzando un valor máximo de 33 [mm] para la deriva de techo del 2.5%.

Tabla 5.8: Resumen desplazamientos muro 2.

Muro 2								
Desplazamiento nominal [mm]	FPA [mm]	Error	FPB [mm]	Error	MEA [mm]	Error	MEB [mm]	Error
0.70	0.83	-0.18	0.63	0.09	-	-	-	-
1.05	1.10	-0.05	0.75	0.28	1.37	-0.30	1.70	-0.62
1.40	1.56	-0.12	1.04	0.25	1.74	-0.24	1.89	-0.35
2.10	2.09	0.01	1.63	0.22	2.50	-0.19	2.49	-0.18
2.80	2.98	-0.06	2.25	0.19	3.20	-0.14	3.14	-0.12
4.20	3.88	0.08	3.39	0.19	4.54	-0.08	4.45	-0.06
5.60	4.79	0.15	4.48	0.20	6.05	-0.08	5.82	-0.04
7.00	7.36	-0.05	5.52	0.21	7.51	-0.07	7.15	-0.02
10.50	9.94	0.05	8.37	0.20	11.53	-0.10	10.33	0.02
14.00	12.47	0.11	11.26	0.20	15.11	-0.08	13.65	0.03
17.50	15.84	0.09	14.22	0.19	18.46	-0.05	16.68	0.05
22.40	19.78	0.12	18.42	0.18	22.73	-0.01	21.19	0.05
28.00	29.44	-0.05	23.12	0.17	27.41	0.02	25.73	0.08
35.00	33.56	0.04	29.20	0.17	33.29	0.05	31.70	0.09

5.5.3 PERFIL DE DEFORMACION UNITARIA VERTICAL EN ALTURA

A continuación, se presenta el perfil de deformación vertical en la altura para cada muro. Con él, se pretende estimar el largo de la concentración de daño. Los resultados son obtenidos directamente del programa Ncorr y, dado que cada punto analizado en este corresponde a una vecindad, es que solo se analiza una fila de los datos correspondientes a la fibra más traccionada del borde de muro esquematizado por la línea roja de la Figura

5.31. Al igual que en el caso anterior los resultados corresponden al promedio de los tres ciclos para cada deriva.

En todos los muros se tiene una mayor fluctuación de las deformaciones en la cámara local, esto se produce debido a que esta cámara se coloca más cerca del muro y por ende cada subconjunto de análisis toma una porción menor de este, haciendo que las curvas de deformación sean menos suaves y las grietas toman mayor relevancia. Sin embargo, en todos los casos las formas de las deformaciones son similares para ambas cámaras.

Para el muro 1 la máxima deriva analizada es la de 2.5%, ya que dada la pérdida de recubrimiento en los bordes no es posible obtener un perfil de deformaciones para la deriva de 3.2%. Además, no se colocan las derivas entre 0.5% y 1.6% puesto que, como se mencionó anteriormente, hubo problemas con la toma de fotografías y no se tienen estos resultados en todos los muros.

En tanto, para el muro 2 la máxima deriva analizada es de 2%, ya que al igual que en el caso del muro 1, dada la pérdida del recubrimiento en las derivas posteriores no es posible obtener el perfil de deformaciones.

Por último, es necesario mencionar que en este caso la altura de la concentración de daño se define como aquella en la que las deformaciones en la zona traccionada alcanzan una fluencia de 0.01. Este valor es mayor a la fluencia del acero (0.002), pero debido a que este se encuentra cercano al error de fotogrametría es que se usa el 1% de deformación.

- Muro 1

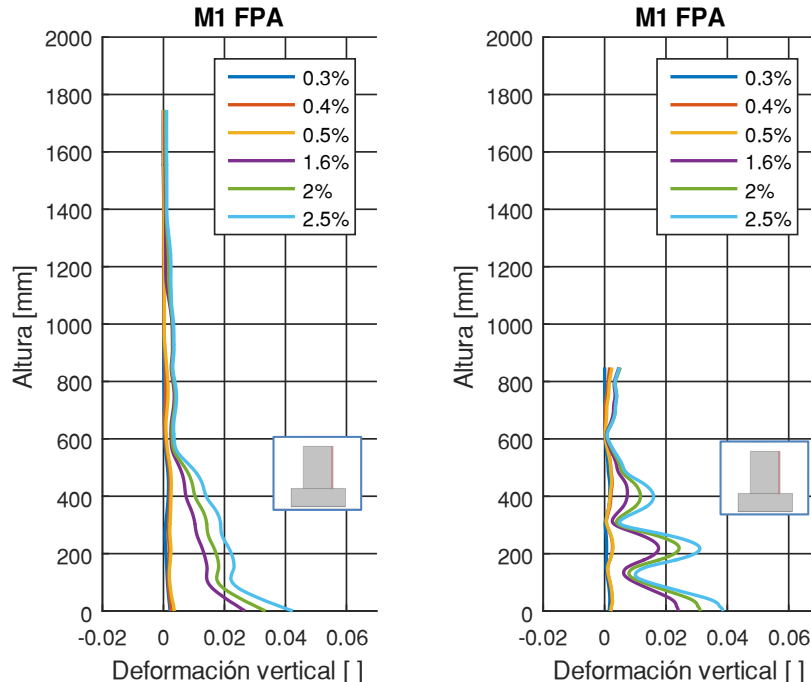


Figura 5.40: Deformación vertical en altura muro 1 FPA, (a)cámara general; (b)cámara local.

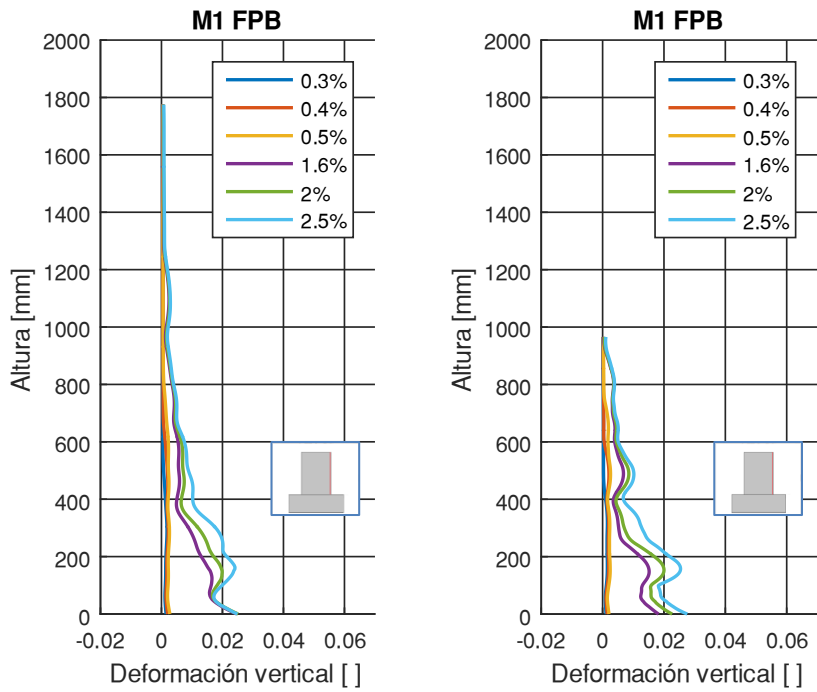


Figura 5.41: Deformación vertical en altura muro 1 FPB, (a)cámara general; (b)cámara local.

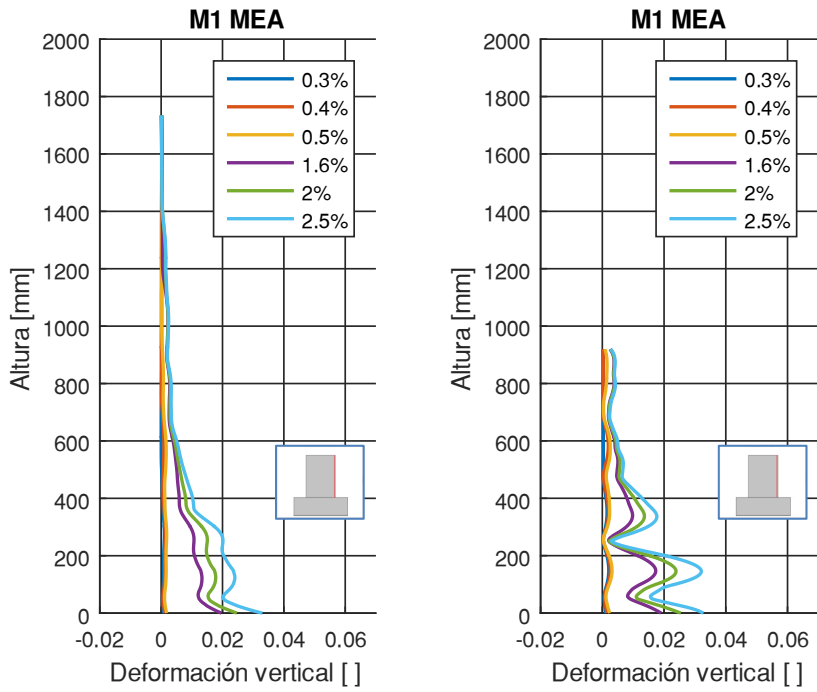


Figura 5.42: Deformación vertical en altura muro 1 MEA, (a)cámara general; (b)cámara local.

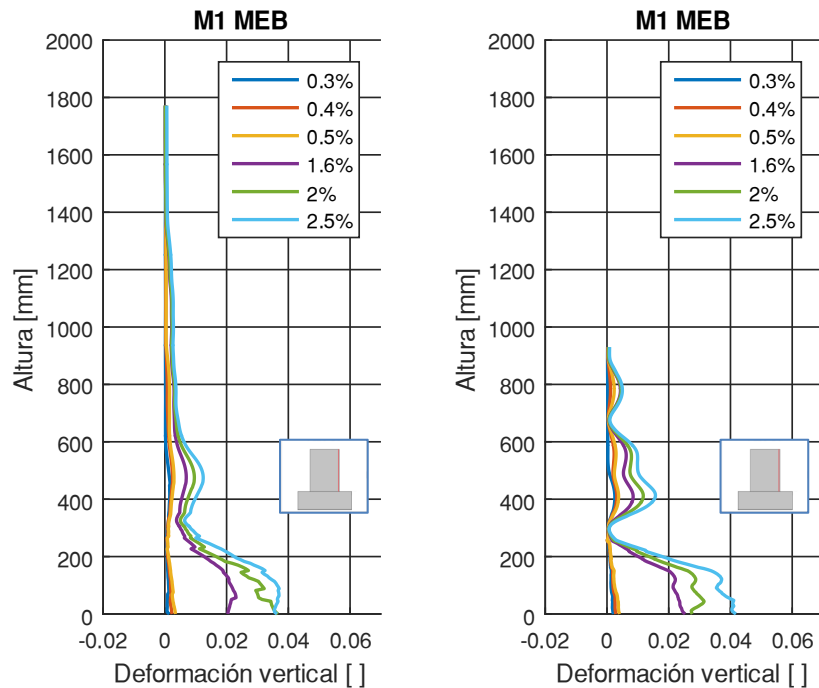


Figura 5.43: Deformación vertical en altura muro 1 MEB, (a)cámara general; (b)cámara local.

En la Figura 5.40 se muestra la deformación vertical para el muro 1 FPA, para ambas cámaras se aprecia que a partir de la deriva de 1.6% existe un aumento en la magnitud de las deformaciones a partir de la altura de 600 [mm]. La máxima deformación que se observa en ambos casos ocurre en la deriva de 2.5% y tiene un valor de 0.04 para la cámara general y la cámara local. En cuanto a la altura de concentración de daño para el ultimo nivel de deriva, en la cámara general se tiene un largo de 488 [mm] y en la cámara local se tiene un largo de 459 [mm]. En el análisis con cámara local se observan tres peak que disminuyen al aumentar la altura, el primero se genera en la base, luego a los 200 [mm] y el ultimo a los 400 [mm].

La Figura 5.41 muestra las deformaciones en el muro 1 FPB, en este caso el aumento en las deformaciones ocurre a partir de la misma deriva que en caso anterior, pero a una altura de 600 [mm] aproximadamente. La máxima deformación en la cámara local es de 0.03 al igual que para la cámara general, ambas alcanzadas en la deriva de 2.5%. El largo de la concentración de daño en la cámara general es de 458 [mm] y en la cámara local es de 500 [mm]. Si observamos el análisis con la cámara local se generan tres peak de deformaciones el primero se genera en la base del muro, luego a los 150 [mm] y el ultimo a los 500 [mm], al igual que en el caso anterior los peak disminuyen al aumentar la altura.

En la Figura 5.42 se presentan las deformaciones en el muro 1 MEA, en ella se observa un aumento en las deformaciones a la altura de los 600 [mm] a partir de la deriva de 1.6%. La máxima deformación alcanzada para la cámara local y general ocurre en la deriva 2.5% con un valor de 0.03. El largo de la concentración de daño para el caso de la cámara general es de 411 [mm] y 429 [mm] para la cámara local, en ambos casos este largo se calcula para la deriva de 2.5%. En la cámara local se generan tres peak en las deformaciones: en la base del muro, a los 150 [mm] y a los 350 [mm], en este caso el peak en la base y el que lo sigue alcanzan máximos similares mientras que el que ocurre a los 350 [mm] llega a deformaciones menores.

Por último, la deformación en el muro 1 MEB se muestra en la Figura 5.43, para ambas cámaras se observa un aumento en las deformaciones a partir de los 600 [mm]. La deformación máxima alcanza con la cámara general y local es de 0.04, en ambos casos el máximo se alcanza en la última deriva mostrada. El largo de la concentración de daño se obtiene para la deriva de 2.5% es de 410 [mm] para la cámara general y 495 [mm] para la local. En el grafico obtenido con los resultados de la cámara local se observan tres peak de deformaciones, el primero ocurre en la base del muro, luego a los 400 [mm] y el ultimo a los 550 [mm], a medida que se aumenta en la altura los valores máximos alcanzados en los peak disminuyen.

En cuanto al largo de la concentración de daño, debido a las fluctuaciones en las deformaciones en la cámara local solo se comparan los valores obtenidos con el enfoque general. Se observa que para el caso con malla preparada la altura a la que se genera, en promedio, es 13% mayor que en los casos de malla electrosoldada. A pesar de esto, en los cuatro casos la altura de la concentración de daño aumenta a medida que crece la deriva de techo. En la Tabla 5.9 se muestra un resumen con los largos.

Las cuatro probetas presentan un aumento significativo en las deformaciones a partir de los 600 [mm] para las ultimas 3 derivas de techo analizadas. Al comparar las deformaciones obtenidas con la cámara general y local los muros FPA y MEB son los que presenta la mayor deformación máxima, llegando a valores de 0.04, mientras que el muro FPB y MEA alcanzan valores máximos de 0.03, un 25% menores a los primeros.

En los cuatro casos analizados las deformaciones son similares en los muros con ambos tipos de mallas, pero el largo de la concentración de daño es mayor en el caso de la malla preparada.

Tabla 5.9: Resumen largo de concentración de daño.

Muro 1	FPA	FPB	MEA	MEB
Largo [mm]	488	458	411	410
Promedio [mm]	473		411	

- Muro 2

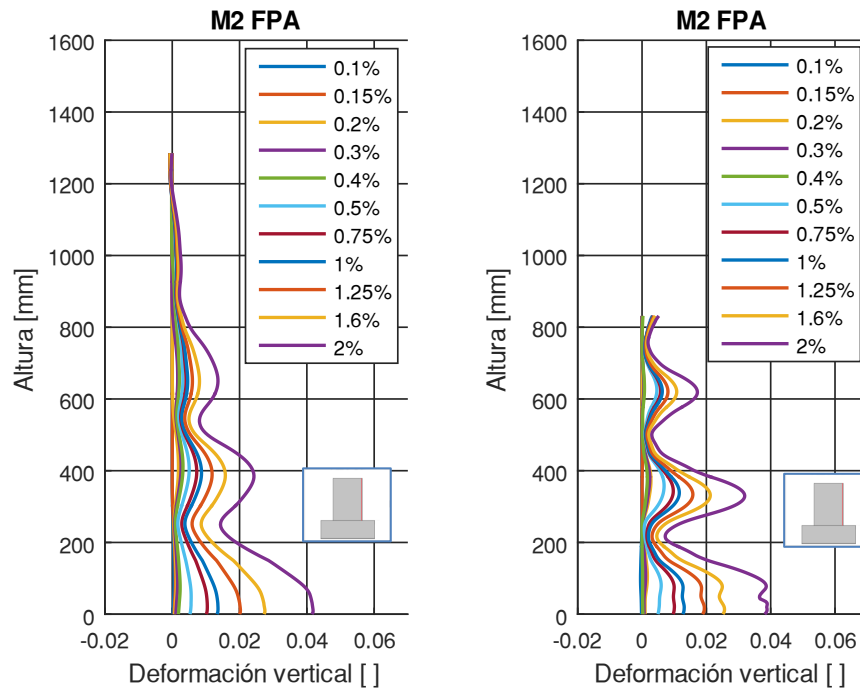


Figura 5.44: Deformación vertical en altura muro 2 FPA, (a)cámara general; (b)cámara local.

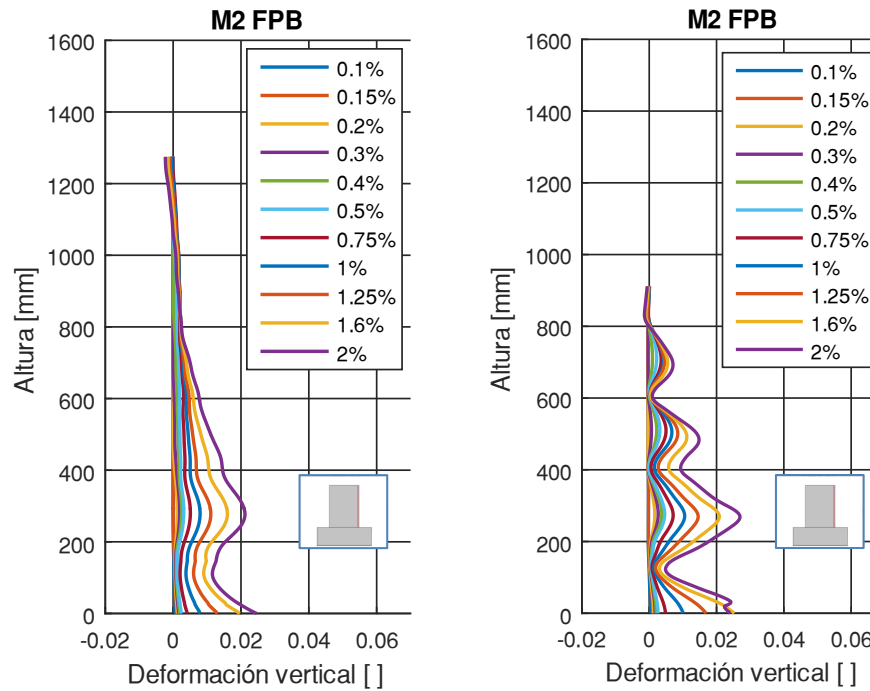


Figura 5.45: Deformación vertical en altura muro 2 FPB, (a)cámara general; (b)cámara local.

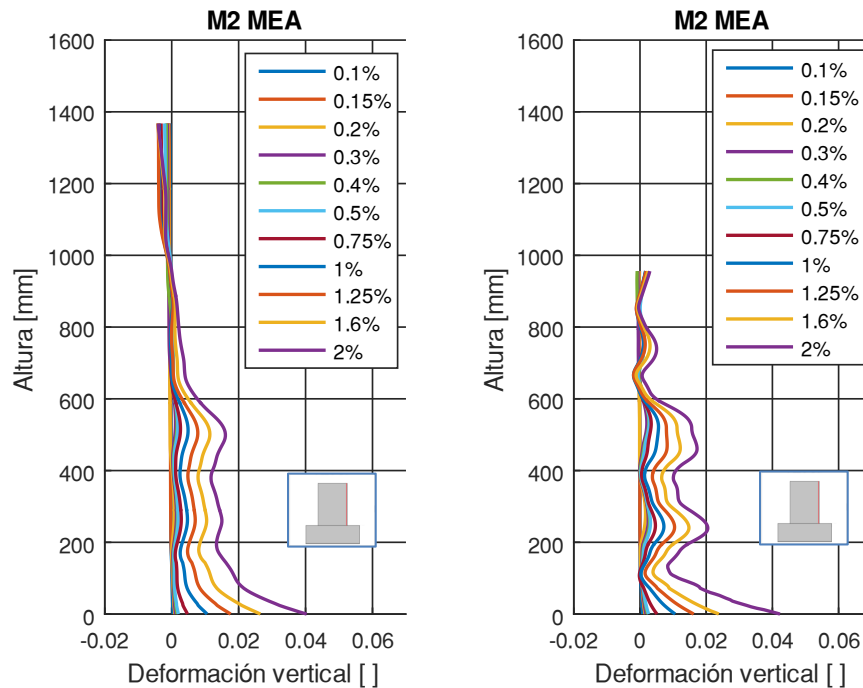


Figura 5.46: Deformación vertical en altura muro 2 MEA, (a)cámara general; (b)cámara local.

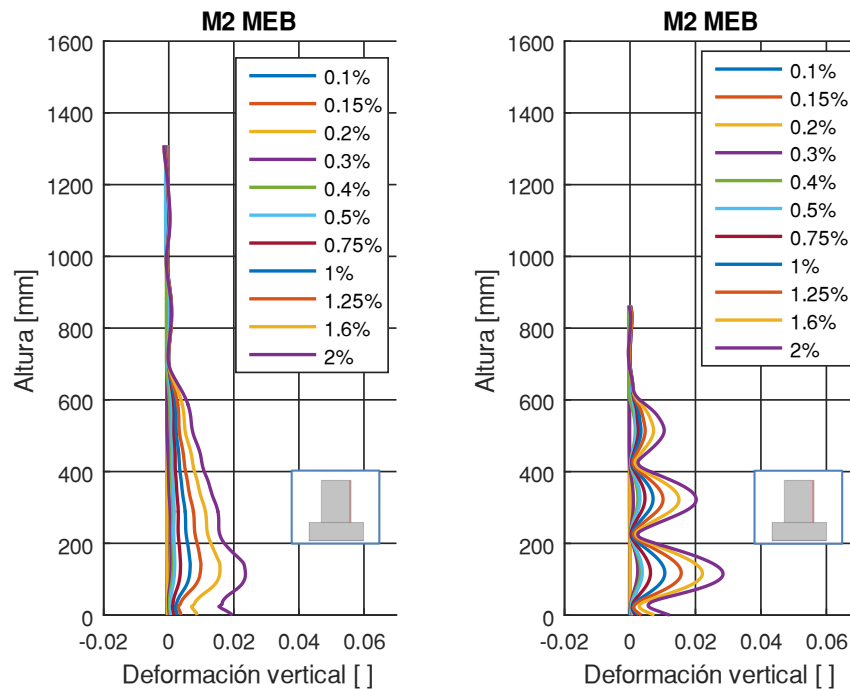


Figura 5.47: Deformación vertical en altura muro 2 MEB, (a)cámara general; (b)cámara local.

En la Figura 5.44 se muestra la deformación en el muro 2 FPA, en la cámara general se observa un aumento en la deformación a partir de alrededor de los 850 [mm]. La deformación máxima obtenida de la cámara general es de 0.05 y en la cámara local es de 0.04, en ambos casos esta se obtiene para la última deriva y en la base de los muros. La concentración de daño para la deriva de 2% tiene un largo de 736 [mm] en la cámara

general y 672 [mm] en la cámara local. Sobre la altura de 1200 [mm] se observan deformaciones negativas para la cámara general. En el gráfico con los resultados de la cámara local se generan tres peak de deformaciones, el primero en la base del muro, luego a los 350 [mm] y a los 600 [mm]. Los valores máximos alcanzados en los peak son menores a medida que se aumenta en altura.

En la Figura 5.45 se exponen las deformaciones en el muro 2 FPB, el gráfico obtenido con la cámara general se observa un aumento significativo en las deformaciones a partir de los 800 [mm]. La máxima deformación en la cámara general es de 0.02 y en la cámara local es de 0.03 en ambos casos se alcanza en la deriva de 2%, pero en el caso de la primera cámara este máximo se alcanza en la base del muro y en la segunda se alcanza en la altura de 270 [mm]. El largo de la concentración de daño para la cámara general es de 533 [mm] y en la cámara local es de 532 [mm]. En la cámara general se observan deformaciones negativas sobre la altura de 1100 [mm]. En los resultados de la cámara local se aprecian cuatro peak de deformaciones, el primero ocurre en la base del muro, el segundo a los 270 [mm], luego a los 500 [mm] y a los 700 [mm]. A diferencia del caso anterior, el segundo peak alcanza un valor de deformación mayor al primero, posteriormente los máximos alcanzados disminuyen a medida que aumenta la altura.

La Figura 5.45 corresponde a la deformación en el muro 2 MEA, en la cámara general se observa un aumento considerable en las deformaciones a partir de 850 [mm] aproximadamente. Para ambas cámaras existe una concentración de deformaciones en la base de los muros, alcanzando la máxima deformación en esa zona. Para la deriva de 2% la máxima deformación obtenida con el enfoque general y local es de 0.04. El largo de la concentración de daño para la cámara general es de 573 [mm] y para la cámara local es de 572 [mm]. Al igual que en el caso anterior, las deformaciones se vuelven negativas sobre la altura de 1000 [mm]. En la cámara local se observan cuatro peak de deformaciones, en la base del muro, a los 250 [mm], a los 500 [mm] y a los 750 [mm]. Los valores máximos alcanzados por cada peak disminuyen a medida que la altura crece.

La deformación en el muro 2 MEB se muestra en la Figura 5.46, en la cámara general se observa que el aumento en las deformaciones ocurre a una altura aproximada de 700 [mm] en la cámara general. Para ambas cámaras la máxima deformación se alcanza en la deriva de 2% y sobre los de 110 [mm] de altura, para el caso de la cámara general tiene un valor de 0.02 y un valor de 0.03 en la cámara local. El largo de la concentración de daño es de 434 [mm] y 528 [mm] para la cámara general y local respectivamente. Sobre la altura de 1200 [mm] las deformaciones toman valores negativos. En el gráfico generado con la cámara local se observan tres peak en las deformaciones, a diferencia de los otros tres casos, el primero no se genera en la base del muro sino que a los 110 [mm], el segundo a los 300 [mm] y el tercero a los 500 [mm]. En cuanto a los valores máximos alcanzados por cada peak, el comportamiento es similar, disminuyendo a medida que la altura aumenta.

Debido a que las deformaciones en el muro 2 llegan hasta sobre la mitad de la altura no es posible observar con la cámara local el cambio de pendiente que sufren las deformaciones. Al fijarnos en los resultados de la cámara general se observa que para los muros FPA, FPB y MEA este cambio en las deformaciones ocurre alrededor de los 800-850 [mm] de altura, en tanto, el muro MEB presenta este cambio a menor altura, aproximadamente a los 700 [mm].

Si comparamos las deformaciones máximas, el valor más alto lo alcanza el muro FPA seguido del muro MEA con valores de 0.05 y 0.04 respectivamente, en tanto el muro FPB

y MEB llegan a deformaciones máximas menores alcanzando valores de 0.02 en ambos casos. Al comparar las probetas con mallas preparada, el muro FPA llega a una deformación máxima 60% mayor que el muro FPB, mientras que en el caso de las probetas con malla electrosoldada el muro MEA alcanza una deformación máxima 50% mayor que el muro MEB.

Al igual que en el muro 1, debido a las fluctuaciones en los valores de las deformaciones obtenidas con la cámara local el largo de la concentración de daño solo se compara para los resultados de la cámara general. Además, dada las diferencias en las deformaciones máximas entre los muros con mismo tipo de malla, es que la comparación del largo de rótula plástica se realizará entre los muros FPA; MEA y FPB; MEB. En los primeros muros el largo de la concentración es 22% menor para la solución con malla electrosoldada. De igual manera en el segundo caso la solución con malla electrosoldada tiene un largo 18% menor que el muro con malla preparada. En la Tabla 5.10 se muestra un resumen con los largos de la concentración de daño.

En términos generales, en los muros con malla preparada la concentración de daño se genera a una mayor altura que en los muros con malla electrosoldada. A pesar de que el muro FPA y FPB tienen las mismas dimensiones, tipo de malla y cuantía el primero presenta deformaciones mayores que el segundo. Esto mismo ocurre con los muros con malla electrosoldada, donde el muro MEA presenta mayores deformaciones que el muro MEB.

Tabla 5.10: Resumen largo de concentración de daño.

Muro 2	FPA	FPB	MEA	MEB
Largo [mm]	736	538	573	434
Promedio [mm]	637		504	

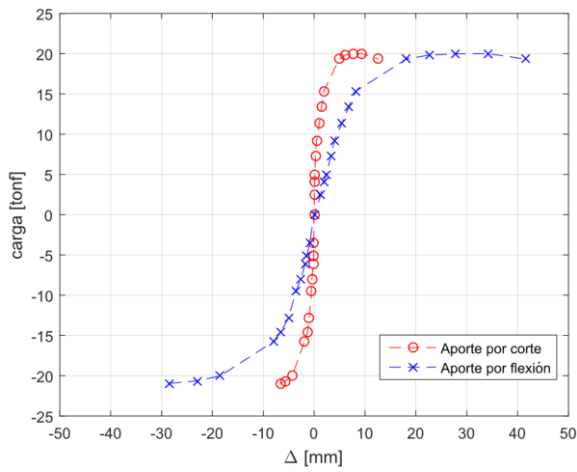
5.5.4 DESPLAZAMIENTO POR CORTE Y FLEXION

En esta sección se presenta el desplazamiento lateral producto de los esfuerzos de corte y flexión a través de la envolvente de la curva de histéresis. Los resultados son obtenidos del borde de los muros esquematizado con una línea roja en la Figura 5.31 y corresponden al promedio de los tres ciclos para cada deriva.

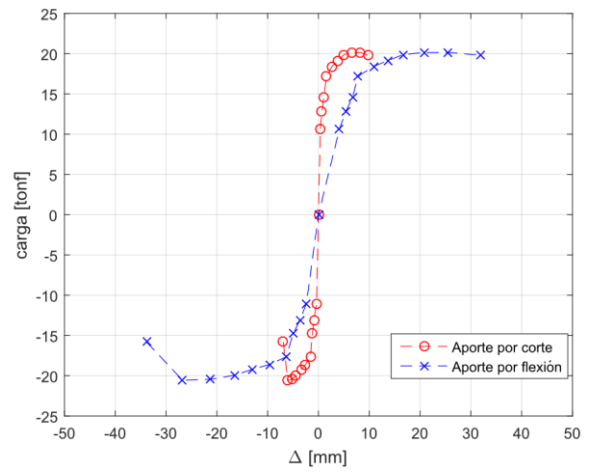
Los desplazamientos debido a esfuerzos de corte se calculan a través de la ecuación (5.5) en donde ε_{xy} corresponde al promedio de las deformaciones de corte en una pequeña región y Δh es la altura de dicha región. Los desplazamientos producto de la flexión son obtenidos mediante la resta de los desplazamientos de corte y los totales

$$Desplazamiento = \sum \varepsilon_{xy} \cdot \Delta h \quad (5.5)$$

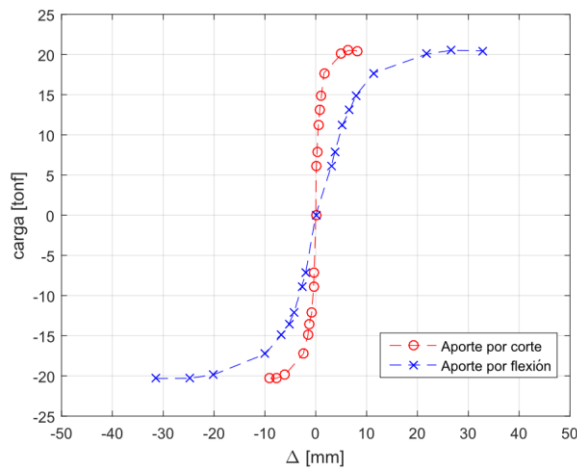
- Muro 1



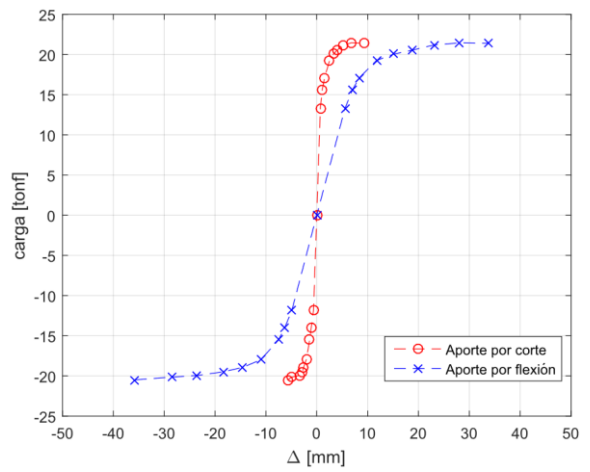
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.48: Desplazamiento por corte y flexión muro 1: (a)FPA ;(b) FPB; (c) MEA; (d) MEB

- Muro 2

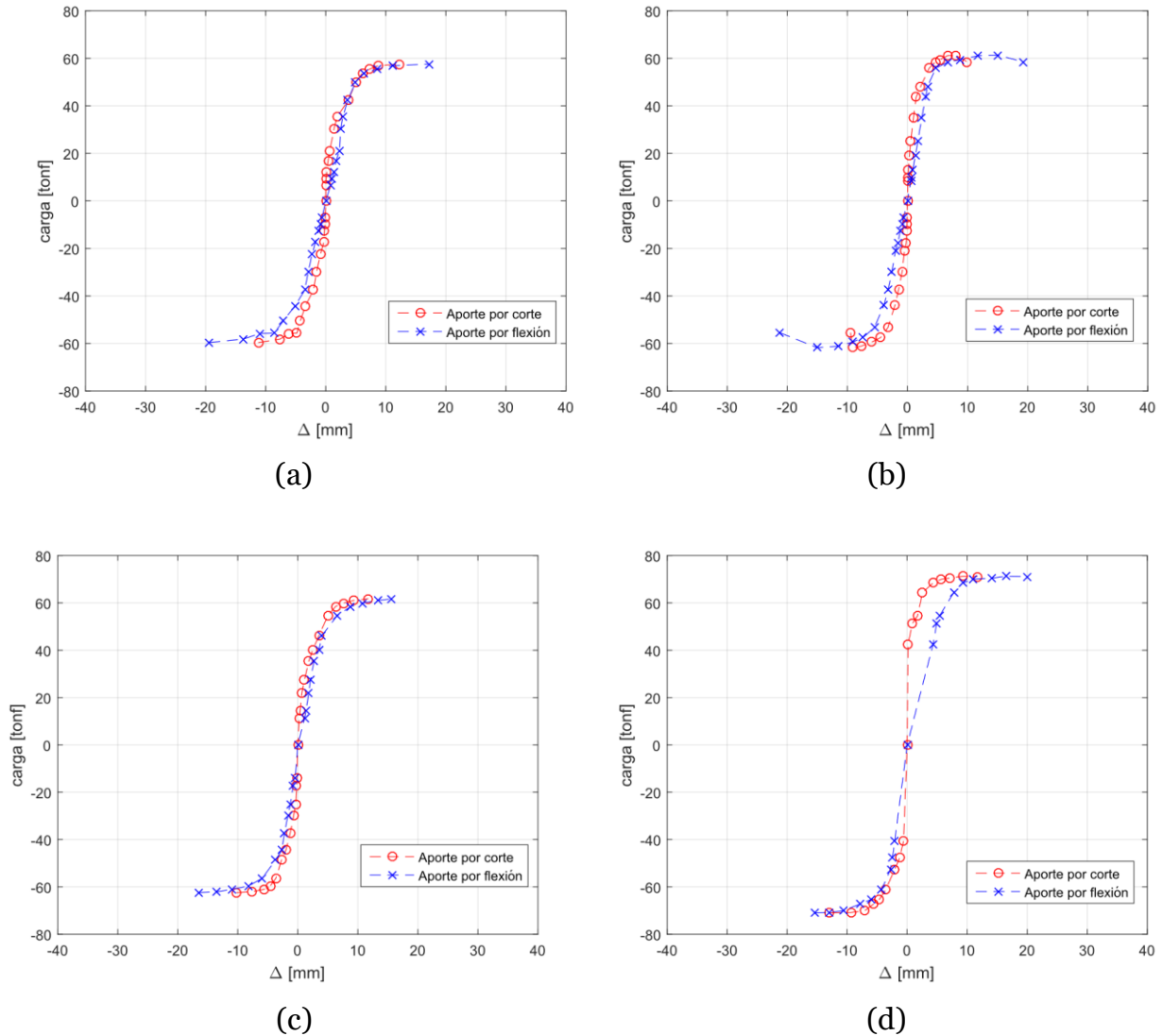


Figura 5.49: Desplazamiento por corte y flexión muro 2: (a)FPA ;(b) FPB; (c) MEA; (d) MEB

En la Figura 5.48 se presenta el desplazamiento producto del esfuerzo de corte y flexión en el muro 1. En los 4 casos el aporte del esfuerzo de corte aumenta al tener derivas de techo más grandes, llegando a valores cercanos al 20% del desplazamiento total obtenido por fotogrametría. Por lo tanto los desplazamientos este muro se deben principalmente a esfuerzos de flexión, concordando con los resultados de la sección 5.5.1.

Los muros FPA y FPB presentan desplazamientos por corte muy similares, en tanto, en los muros MEA y MEB tienen desplazamientos similares hasta la deriva de 2%, pero en la deriva de 2.5% el muro MEA presenta un desplazamiento de 1.15 [mm] menor correspondiente a un 12%.

Al comparar los muros con malla preparada y malla electrosoldada se observa un comportamiento similar, en donde los desplazamientos se deben principalmente a esfuerzo de flexión con un aporte de los esfuerzos de corte en promedio del 20% aproximadamente. El desplazamiento máximo alcanzado para la deriva de techo de 2.5% es de alrededor de los de 9 [mm] para los muros FPA, FPB y MEB, y de alrededor de los 8 [mm] para el muro MEA.

En la Figura 5.49 se muestra el desplazamiento del muro 2 producto del esfuerzo de corte y flexión. El muro FPB presenta desplazamientos menores a los otros muros, sin embargo, el aporte producido producto del esfuerzo de corte alcanza en promedio el 30%, similar al del muro FPA. En tanto, los muros MEA y MEB presenta un mayor aporte al desplazamiento producto del esfuerzo de corte alcanzando en promedio un 35%.

Para los 3 primeros muros, al aumentar la deriva de techo la contribución del esfuerzo de corte aumenta hasta llegar a un máximo y posteriormente disminuye, a diferencia del muro MEB en donde el máximo aporte ocurre para la máxima deriva.

El desplazamiento máximo alcanzado en los muros para la deriva de 2.5% es 14.35 [mm] para FPA, 9.93 [mm] para FPB, 13.29 [mm] para MEA y 11.70 [mm] para MEB.

Si bien se tienen muros en los cuales la contribución del esfuerzo de corte es mayor, este comportamiento no es propio de una solución constructiva sino que solo del muro. Por lo que al comparar los muros con malla electrosoldada y malla preparada el comportamiento es semejante, donde los desplazamientos producto del esfuerzo de corte alcanzan en promedio el 30% aproximadamente. En la Tabla 5.11 y Tabla 5.12 se muestra un resumen de los desplazamientos para cada deriva de techo junto con el porcentaje de aporte para el muro 1 y 2 respectivamente.

Tabla 5.11: Resumen desplazamiento lateral producido por corte muro 1.

Deriva	Muro 1							
	FPA [mm]	Aporte [%]	FPB [mm]	Aporte [%]	MEA [mm]	Aporte [%]	MEB [mm]	Aporte [%]
0.15	0.29	8.09	-	-	0.13	4.24	-	-
0.2	0.47	10.44	0.38	8.51	0.24	6.10	-	-
0.3	1.03	15.85	0.68	11.29	0.53	9.09	0.70	11.16
0.4	1.51	18.03	1.07	13.70	0.79	10.59	1.08	13.34
0.5	1.92	18.95	1.56	16.74	1.13	12.50	1.53	15.47
0.75	-	-	2.68	19.82	1.63	12.44	2.52	17.63
1	-	-	3.87	22.07	-	-	3.29	17.83
1.25	4.93	21.39	5.03	23.22	-	-	4.00	17.60
1.6	6.17	21.38	6.58	24.02	5.05	18.76	5.29	18.58
2	7.64	21.59	8.22	24.40	6.44	19.53	6.81	19.54
2.5	9.40	21.56	9.69	23.27	8.18	19.97	9.33	21.64

Tabla 5.12: Resumen desplazamiento lateral producido por corte muro 2.

Deriva	Muro 2							
	FPA [mm]	Aporte [%]	FPB [mm]	Aporte [%]	MEA [mm]	Aporte [%]	MEB [mm]	Aporte [%]
0.15	0.38	18.26	0.32	19.60	0.67	26.79	-	-
0.2	0.67	22.47	0.53	23.51	1.10	34.25	-	-
0.3	1.38	35.58	1.00	29.52	1.84	40.51	0.13	2.83
0.4	1.93	40.24	1.44	32.21	2.51	41.51	0.89	15.23
0.5	3.72	50.54	2.19	39.67	3.51	46.69	1.74	24.35
0.75	4.99	50.19	3.63	43.39	5.00	43.40	2.57	24.90
1	6.13	49.13	4.61	40.95	6.28	41.54	4.36	31.93
1.25	7.27	45.88	5.42	38.09	7.65	41.44	5.67	33.99
1.6	8.68	43.88	6.65	36.10	9.29	40.87	7.06	33.32
2	12.17	41.34	8.02	34.70	11.75	42.87	9.28	36.08
2.5	14.35	42.76	9.93	34.01	13.29	39.92	11.70	36.91

5.5.5 PENETRACION DE FISURAS

A continuación, se grafica la deformación vertical en altura para tres ejes, con esto se desea observar como ingresa la fisura para los diferentes muros, puesto que el abrupto aumento en las deformaciones se asocia a la formación de grietas.

Para ambos muros los resultados son obtenidos directamente de Ncorr y los ejes seleccionados corresponden a una sola columna de datos. En la Figura 5.50 se muestra un esquema del muro con los ejes seleccionados, el primero corresponde a los resultados sacados del borde del muro, el segundo corresponde a los resultados sacados de una sección a 16 cm del borde, el tercero muestra los resultados extraídos de una sección a 30 cm del borde.

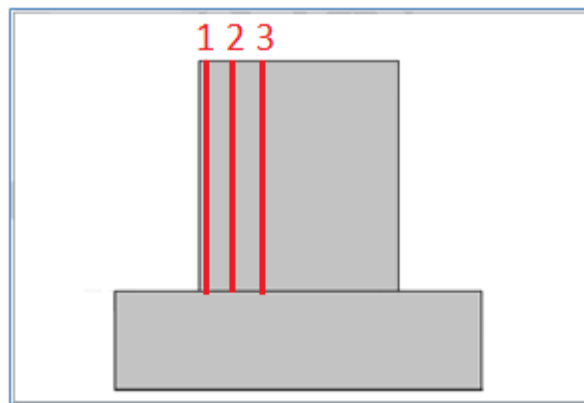


Figura 5.50: Esquema del muro y ejes seleccionados.

Para el muro 1 los resultados se extraen desde el borde hasta un tercio del ancho, por otro lado, para el muro 2 los resultados se obtienen desde el borde hasta un eje menor a un cuarto del ancho de este. Esta diferencia ocurre debido a que para el segundo muro no es necesario extraer resultados desde más al interior para observar el comportamiento de las grietas.

- Muro 1

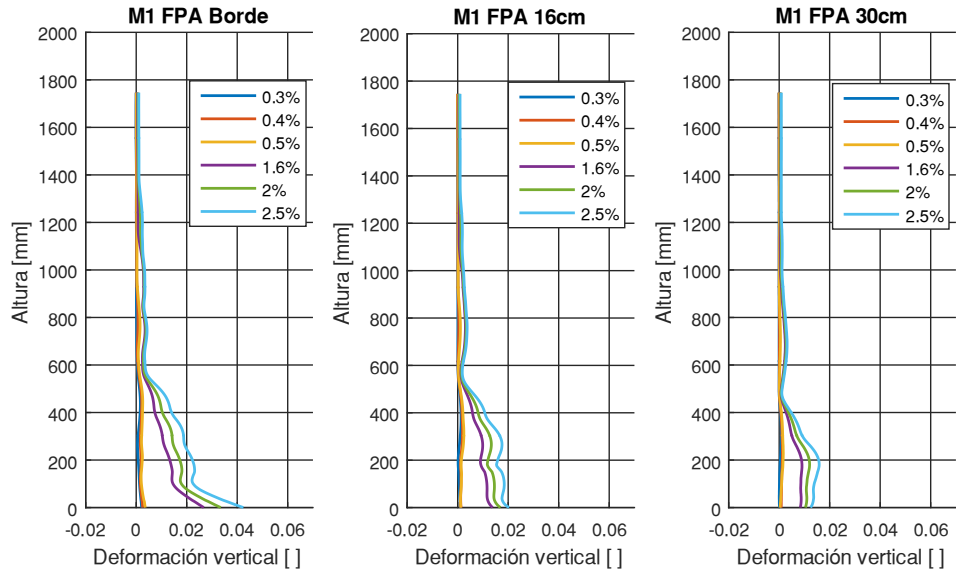


Figura 5.51: Penetración de fisura Muro 1 FPA.

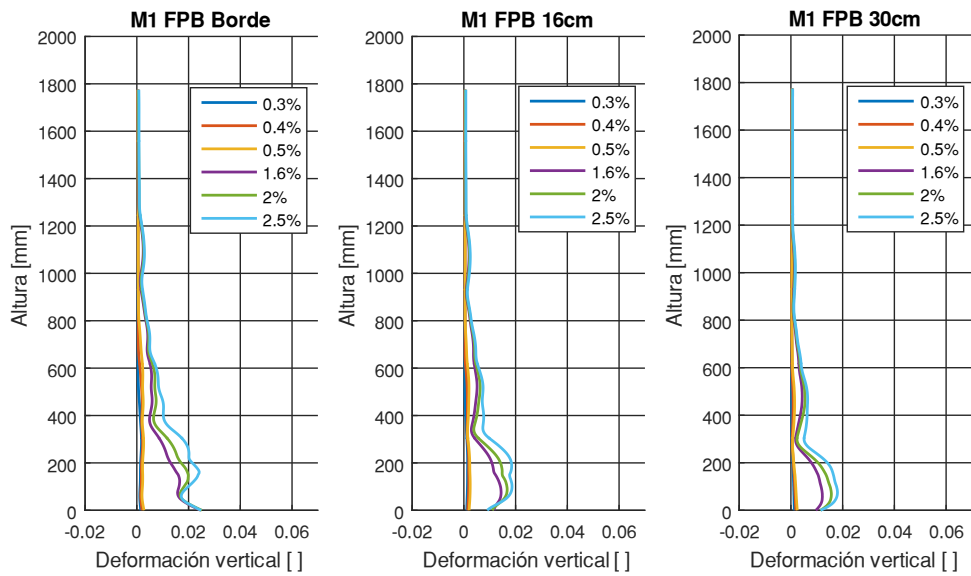


Figura 5.52: Penetración de fisura Muro 1 FPB.

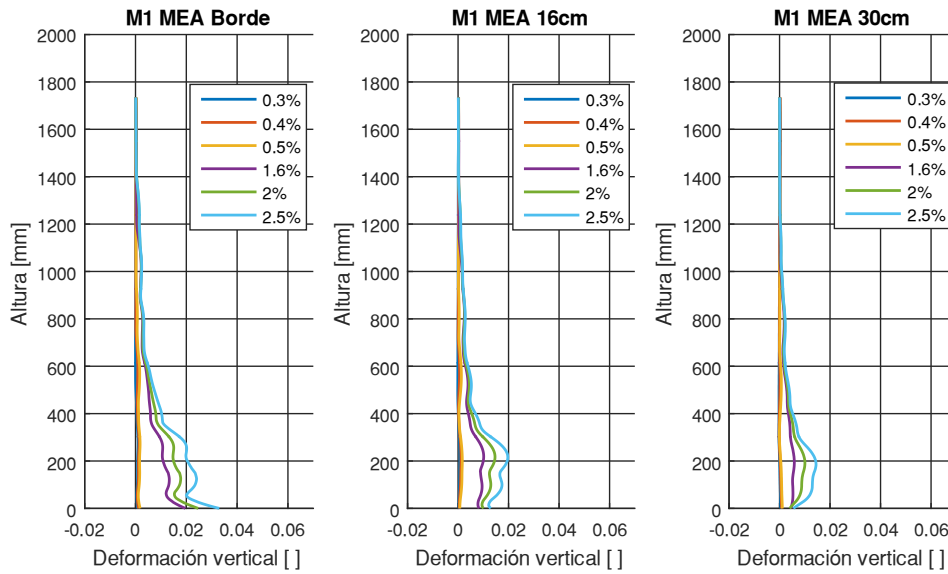


Figura 5.53: Penetración de fisura Muro 1 MEA.

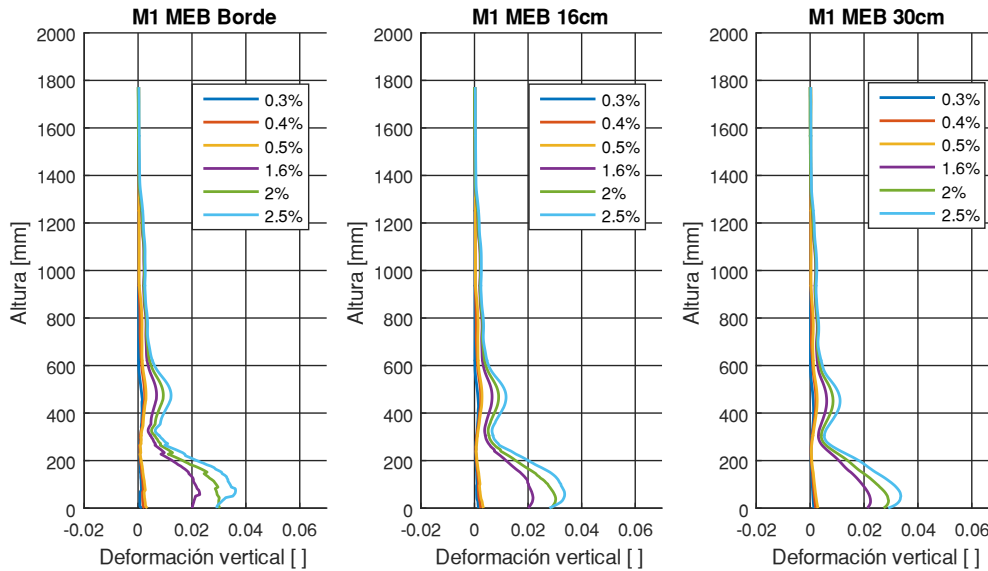


Figura 5.54: Penetración de fisura Muro 1 MEB.

De la Figura 5.51 a la Figura 5.54 se muestran los resultados para el muro 1, en ellos se observa que a medida que se ingresa al interior del muro las deformaciones se atenúan pero mantienen la forma, esto se debe a que las grietas en este muro son horizontales debido a que predominan los esfuerzos de flexión. En los 4 casos las grietas se concentran en la base de los muros, aproximadamente en los 600 [mm] de alto.

En cuanto a los valores de las deformaciones solo se compararán para las últimas tres derivas. Para el muro FPA los valores máximos de deformaciones se encuentran entre 0.02 y 0.04 en el borde, a medida que se ingresa en el muro los valores no superan 0.02 para los otros dos ejes. En tanto para el muro FPB prácticamente en ninguno de los 3 ejes seleccionados los valores superan 0.02. El muro MEA tiene un comportamiento similar al del muro FPA, en el borde los valores máximos van desde 0.02 a 0.04 y luego en los ejes de más adentro no superan el valor de 0.02. Por último, para el muro MEB en los 3 ejes

los valores máximos de deformaciones se encuentran entre 0.02 y 0.04. Esto nos dice que las fisuras son similares en los primeros tres muros y más intensas en el caso del muro MEB.

En resumen los resultados reafirman lo obtenidos en las secciones anteriores ya que las deformaciones se concentran en el tercio inferior del muro y las grietas se observan horizontales hasta un tercio del ancho del muro. Por otro lado se observa que el comportamiento general de los muros es similar para ambas soluciones constructivas.

- Muro 2

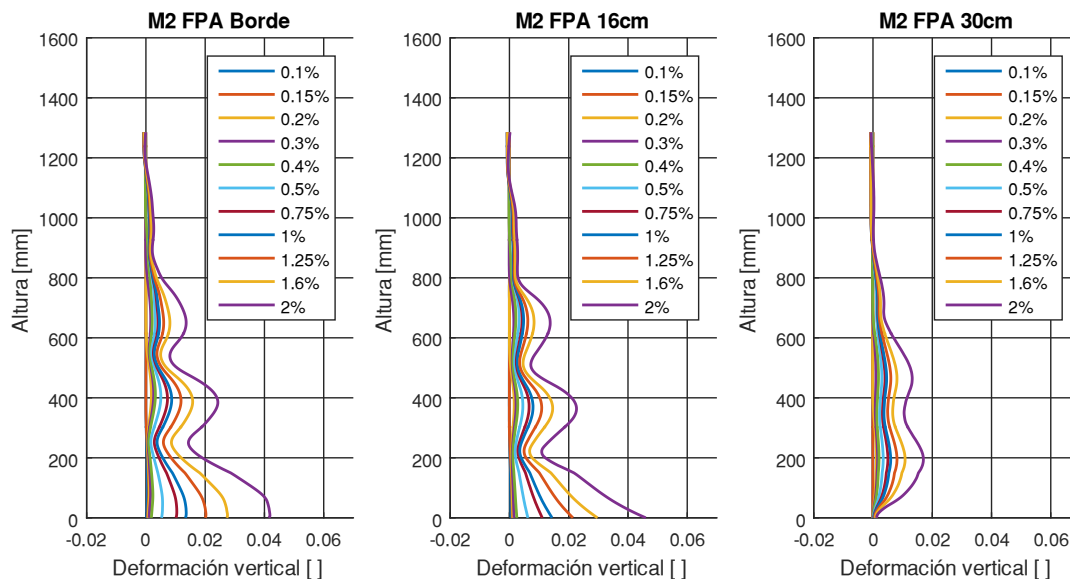


Figura 5.55: Penetración de fisura Muro 2 FPA.

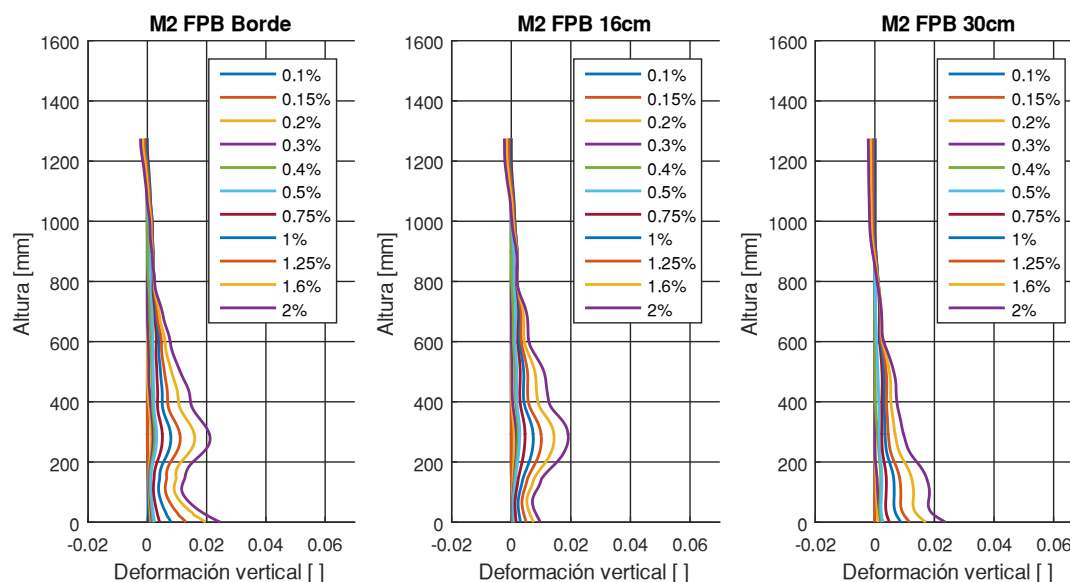


Figura 5.56: Penetración de fisura Muro2 FPB.

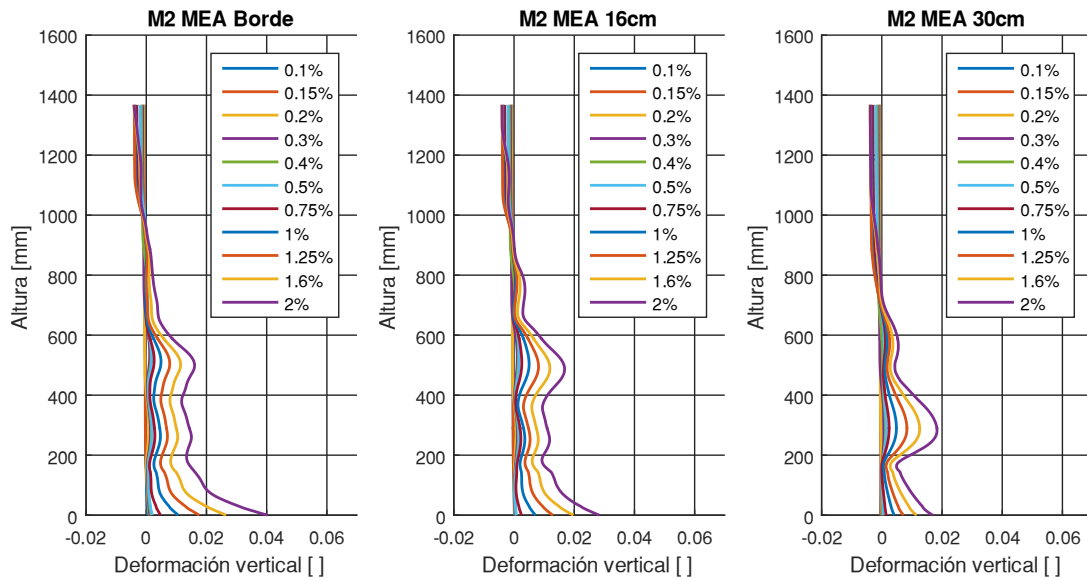


Figura 5.57: Penetración de fisura Muro 2 MEA.

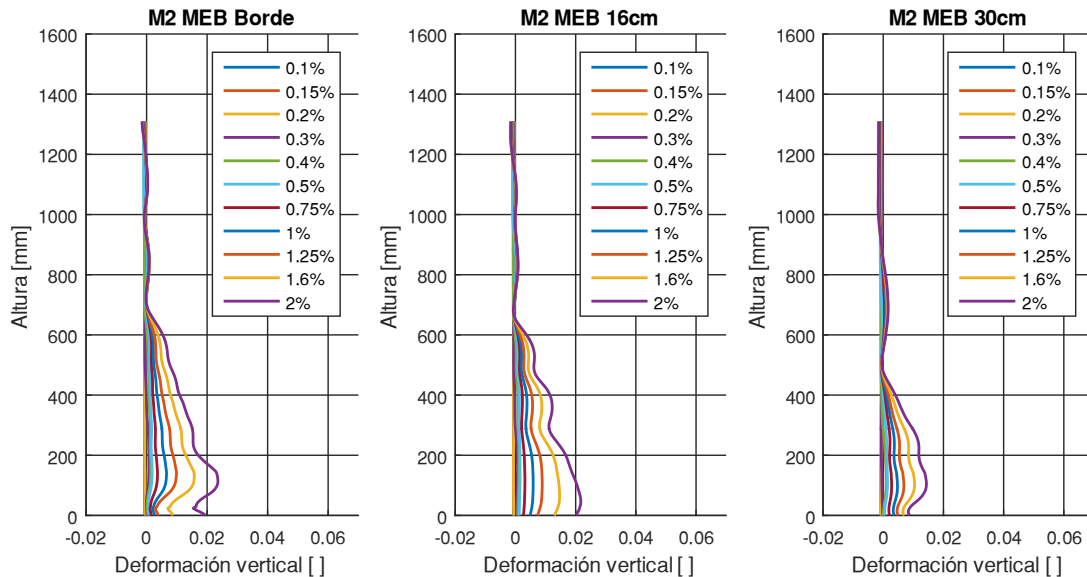


Figura 5.58: Penetración de fisura Muro 2 MEB.

En las figuras Figura 5.55, Figura 5.56, Figura 5.57 y Figura 5.58 se muestran las deformaciones para el muro 2, en las cuatro figuras se aprecia que a medida que se ingresa en el ancho del muro los peak de deformaciones ocurren a una menor altura, esto nos muestra que las grietas tienden a volverse diagonales a medida que se ingresa en el ancho del muro, evidenciando esfuerzos de corte en los muros. El hecho de que las grietas no sean ni horizontales ni diagonales en su totalidad muestra que el muro está siendo solicitado por esfuerzos de corte y flexión.

En el muro FPA se logran observar tres peak al analizar el borde del muro, sin embargo al realizar el mismo análisis 30cm en el interior solo se tienen dos. El muro FPB muestra un comportamiento similar, en este caso en el borde se observa un peak a la altura de 300 [mm] aproximadamente, pero a 30 cm del borde este peak ocurre en la base del muro cercano a los 100 [mm]. En tanto, en el borde del muro MEA se tiene un peak a los 500

[mm] y una gran concentración de deformaciones en la base, mientras que a los 30 cm del borde este peak ocurre a los 300 [mm] y la concentración de deformaciones en la base alcanza valores menores. Por último, en el borde del muro MEB se tiene un aumento en las deformaciones a partir de los 700 [mm] con un peak a los 150 [mm], a los 30 [cm] en el interior el aumento en las deformaciones ocurre a los 500 [mm] y el peak ya no se logra observar.

En resumen, se observa un comportamiento similar en los muros con malla electrosoldada y malla preparada, en donde las deformaciones mantienen la forma en los primeros dos ejes (borde de muro y a 15 [cm] de este), pero al ingresar 30 [cm] los peak y aumento de deformaciones ocurren a una menor altura, mostrando que las grietas tienden a ser diagonales.

CAPÍTULO 6

MODELACION NUMERICA

6.1 INTRODUCCION

En el presente capítulo se detalla el procedimiento de modelación en el programa SAFE, basándose en las recomendaciones hechas por Castro (Castro, 2017) para modelar muros de hormigón armado. Esto se realiza con el fin de capturar el comportamiento mostrado por los muros durante los ensayos.

6.2 MODELO

Para la realización del modelo es necesario crear una malla de elementos finitos que logre capturar el comportamiento del muro durante el ensayo.

El muro 1 se modela con una malla de 11 elementos horizontales y 12 verticales, en donde los primeros elementos de cada extremo representan la zona confinada, con ancho de 72 [mm] y 150 [mm] de alto, los otros 9 elementos centrales tienen el mismo alto y 84 [mm] de ancho. El pedestal de fundación se modela con 5 elementos verticales de 90 [mm] de alto y 21 elementos horizontales de ancho similar al dispuesto en el muro. La viga de transferencia se modela con 4 elementos verticales y 11 horizontales, cada elemento mide 75 [mm] de alto y, al igual que en el pedestal de fundación, el ancho es el mismo que el dispuesto en el muro.

El muro 2 se modela con una malla de 10 elementos horizontales y 12 verticales, los primeros elementos de cada extremo representan la zona confinada, con ancho de 175 [mm] y 140 [mm] de alto, los otros 10 elementos centrales tienen el mismo alto y 105 [mm] de ancho. El pedestal de fundación está modelado con 5 elementos verticales de 90 [mm] de alto y 22 elementos horizontales de ancho similar al dispuesto en el muro. La viga de transferencia se modela con 4 elementos verticales y 12 horizontales, cada elemento mide 75 [mm] de alto y el ancho es igual al dispuesto en el muro.

En ambos muros el pedestal de fundación y la viga de transferencia de carga son modelados como elementos elásticos. A los nodos en la base del pedestal se les aplica la condición de empotramiento. La Figura 6.2 y la Figura 6.2 muestran el mallado en forma gráfica del muro 1 y 2 respectivamente.

Las dimensiones, geometría, cuantías de refuerzo, características de los materiales y cargas utilizadas para todos los modelos corresponden a los especificados en el Capítulo 4. MONTAJE EXPERIMENTAL y en la Tabla 6.1 se muestra un resumen de alguno de ellos. Para la modelación de los muros con malla preparada y malla electrosoldada solo se varió la resistencia del acero según los resultados mostrada en el capítulo 4.

El método de resolución utilizado en el análisis es el de Newton-Raphson, el cual es un algoritmo que encuentra aproximaciones de las soluciones de una función real mediante un método iterativo. Para la convergencia del método se usa el test de máxima razón de

desplazamiento incremental, el que busca aproximar la no linealidad mediante funciones lineales.

Tabla 6.1: Parámetros de modelación.

Parámetro	M1	M2
Densidad, ρ [N/mm ³]	2.5 E-9	2.5 E-9
Coefficiente de Poisson, ν	0.2	0.2
ε_y	0.0025	0.0025
Recubrimiento [mm]	30	30
f'_c [Mpa]	42	42
E_c [Mpa]	210000	210000
ε_c	0.003	0.003
$\varepsilon_{c\ conf}$	0.0055	0.0055
ε_{cr}	0.00008	0.00008
α_1	-0.002	-0.002
α_2	1	1
Carga axial [kN]	320	720

6.3 APLICACIÓN DE CARGAS

En el muro 1 la carga axial actuante se aplica en los 8 nodos del centro de la viga de carga y en el muro 2 la carga axial se aplica en los 9 nodos del centro de la viga. En ambos muros la carga horizontal fue aplicada a los tres nodos izquierdos de la viga de carga señalados en la Figura 6.1 y Figura 6.2. El nodo con el que se monitorea el desplazamiento se muestra en verde.

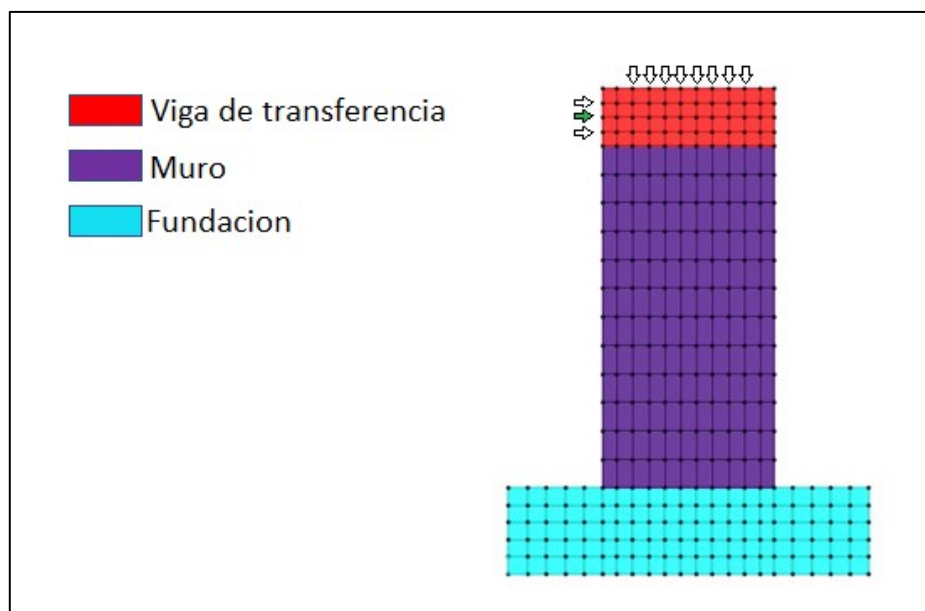


Figura 6.1: Esquema del mallado muro 1.

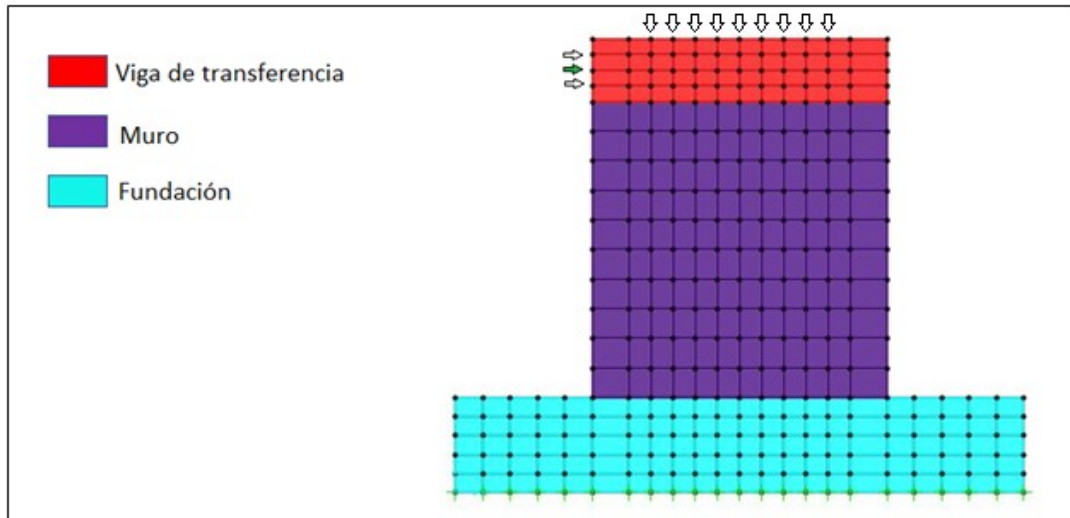


Figura 6.2: Esquema del mallado muro 2.

6.4 RESULTADOS

A continuación se muestra el comportamiento global de los muros a través de la curva de histéresis, comparando los resultados experimentales versus los del modelo.

La Figura 6.3 compara la curva de histéresis del muro 1 FPA y MEA con los resultados experimentales, en ella se observa que el modelo de fierro preparado muestra menor rigidez y resistencia sobre todo en la zona de desplazamientos negativos, mientras que en el muro con malla electrosoldada la resistencia es mayor en el modelo. A diferencia del modelo la respuesta experimental muestra una pérdida de resistencia en la deriva de 3.2% para ambos casos. A pesar de estas diferencias se aprecia una similitud entre ambas curvas logrando emular el comportamiento de los muros a lo largo de los ciclos.

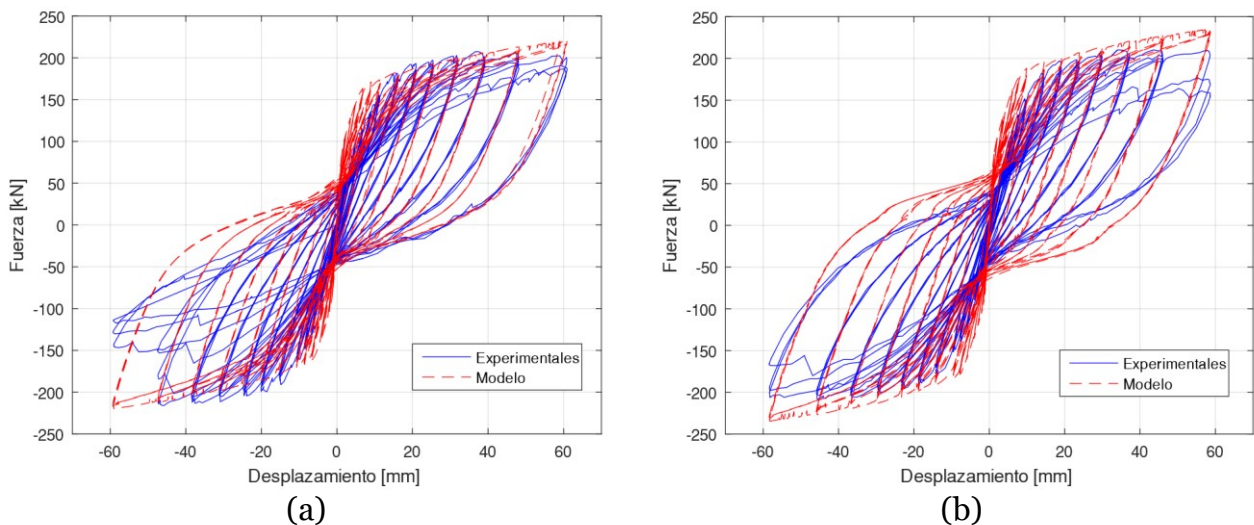


Figura 6.3: Comparación de la curva de histéresis modelo-muro 1: (a) Malla Preparada; (b) Malla electrosoldada.

La comparación de la histéresis del modelo y los resultados experimentales del muro 2 FPA y MEA se muestra en la Figura 6.4, en ella vemos que el modelo presenta mayor rigidez y resistencia, sobre todo en la zona de -10 [mm] y 10 [mm] de desplazamiento. La

respuesta experimental y el modelo presentan curvas similares logrando predecir el comportamiento del muro durante los ciclos de carga.

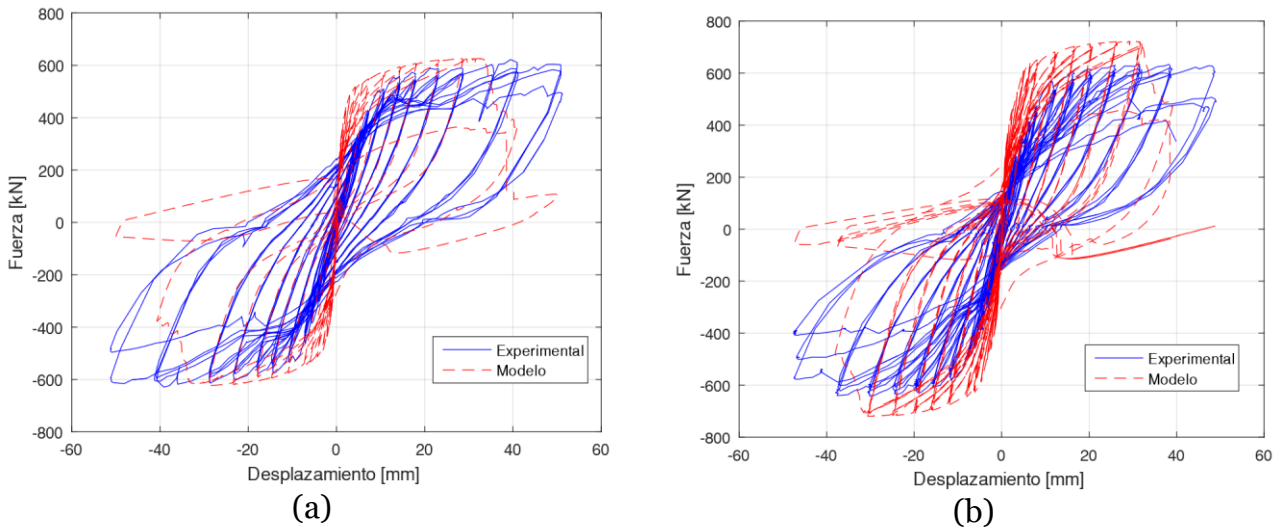


Figura 6.4: Comparación de la curva de histéresis modelo-muro 2: (a) Malla Preparada; (b) Malla electrosoldada.

También se presenta la distribución de deformaciones en los muros para el desplazamiento de techo máximo a través de un mapa de colores que varía entre $[-0.0005, 0.0005]$ para E_{11} y $[-0.02, 0.02]$ para E_{22} y E_{12} . En la Figura 6.5 se muestran las deformaciones en el modelo del muro 1 FPA, en ella se observa que en el eje E_{22} (deformaciones en eje y) las deformaciones de tracción se concentran en el tercio inferior del muro y las de compresión se ven en los dos elementos de borde de la base, en el caso del eje E_{11} (deformaciones en eje x) aparecen tracciones en el centro del muro, este comportamiento es idéntico al del modelo con malla electrosoldada lo cual se muestra en la Figura 6.6. La Figura 6.7 muestra las deformaciones en el modelo del muro 2 con malla preparada, en el eje E_{22} (deformaciones en el eje y) se concentran las tracciones en la mitad inferior del muro y las compresiones solo se ven en el elemento de borde de la base, en el eje E_{11} (deformaciones en el eje x) aparecen tracciones en el centro del muro, este comportamiento es similar al del muro con malla electrosoldada y se muestra en la Figura 6.8.

Al comparar las deformaciones obtenidos a través del modelo y de fotogrametría se ven similitudes tanta en la forma y las zonas donde aparecen las deformaciones de tracción y compresión.

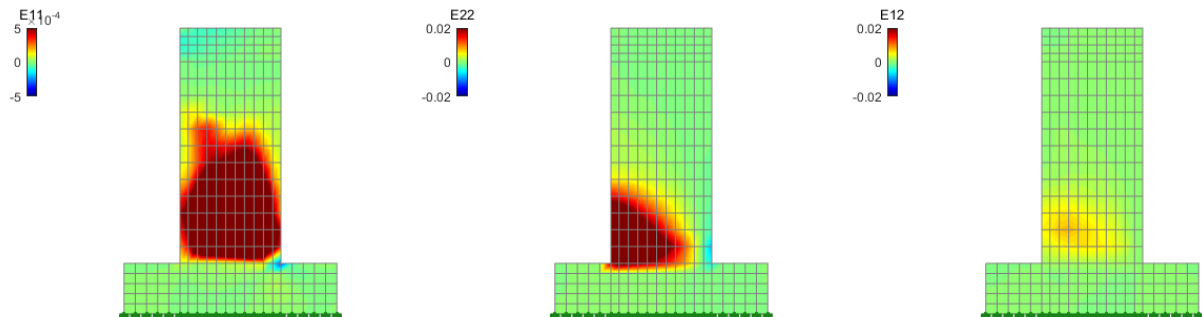


Figura 6.5: Deformación en el modelo del muro 1 con malla preparada.

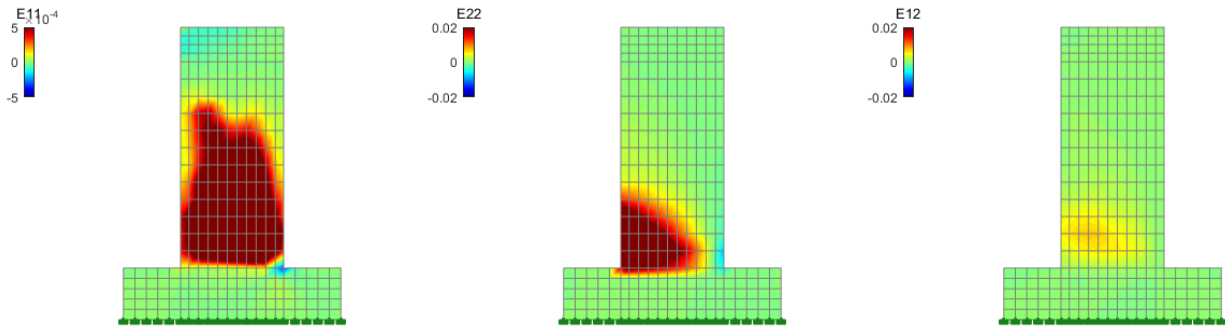


Figura 6.6: Deformación en el modelo del muro 1 con malla electrosoldada.

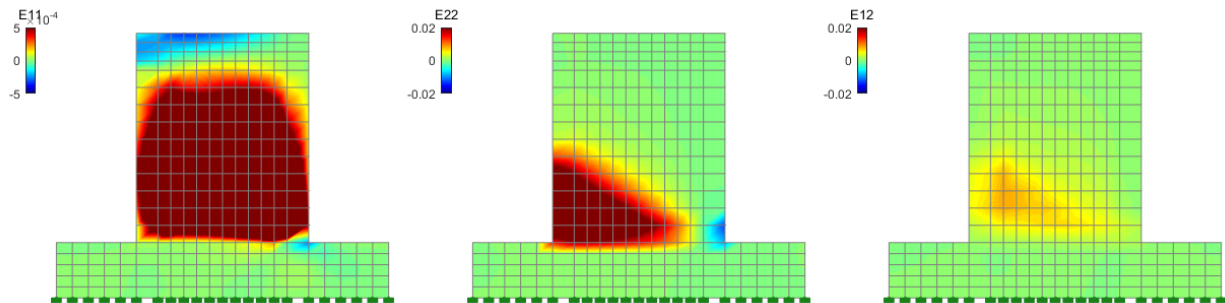


Figura 6.7: Deformación en el modelo del muro 2 con malla preparada.

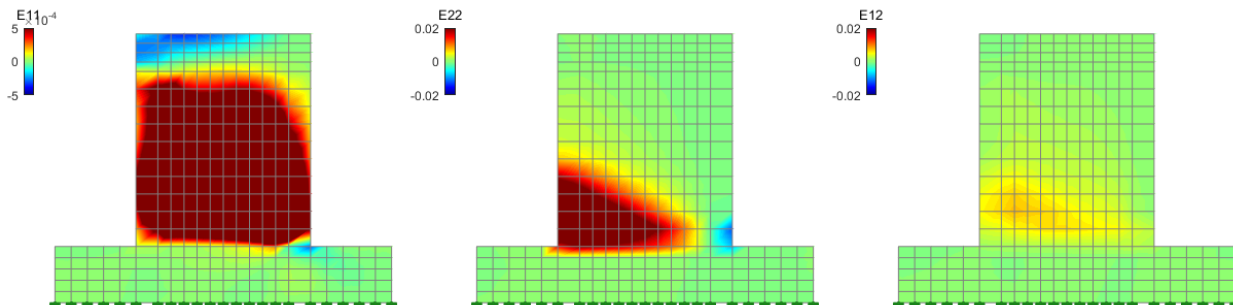


Figura 6.8: Deformación en el modelo del muro 2 con malla electrosoldada.

Por último se presenta el perfil de deformación vertical en la altura para cada muro. Con él, se pretende estimar el largo de la concentración de daño y comparar las deformaciones obtenidas mediante el modelo y fotogrametría. Los resultados del modelo son obtenidos promediando los nueve puntos de cuadratura de cada elemento de borde traccionado del muro. La Figura 5.31 muestra esquemáticamente con una línea roja el eje de extracción de los resultados.

El largo de la concentración de daño corresponde al punto en la altura en que la deformación alcanza el valor de 0.01, mayor que la fluencia del acero pero se decide utilizar el mismo criterio que en fotogrametría para poder comparar los resultados.

En la Figura 6.9 se muestra la comparación de la deformación del modelo y fotogrametría para el muro 1 con malla preparada, se observa que las deformaciones alcanzan el valor de 0.04 para la deriva de 2.5% en ambos casos. Además ambos casos muestran un cambio abrupto en las deformaciones a la altura de los 600 [mm]. En cuanto

al largo de la concentración de daño en el modelo, esta es de 618 [mm] un 23% mayor que en el caso de fotogrametría.

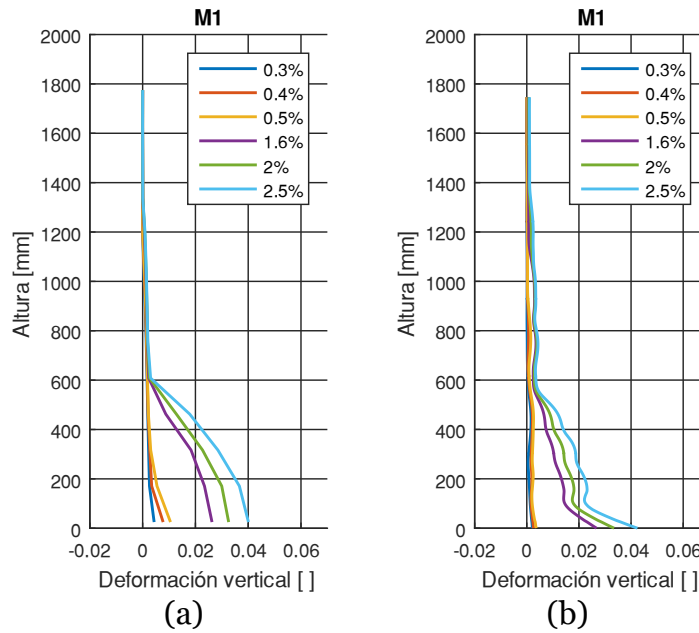


Figura 6.9: Deformación vertical en altura muro 1 con malla preparada: (a)Modelo; (b)Fotogrametría.

Las deformaciones del muro 1 con malla electrosoldada se muestran en la Figura 6.10, se observa un comportamiento similar al del muro con malla preparada, con un aumento en las deformaciones a la altura de los 600 [mm].

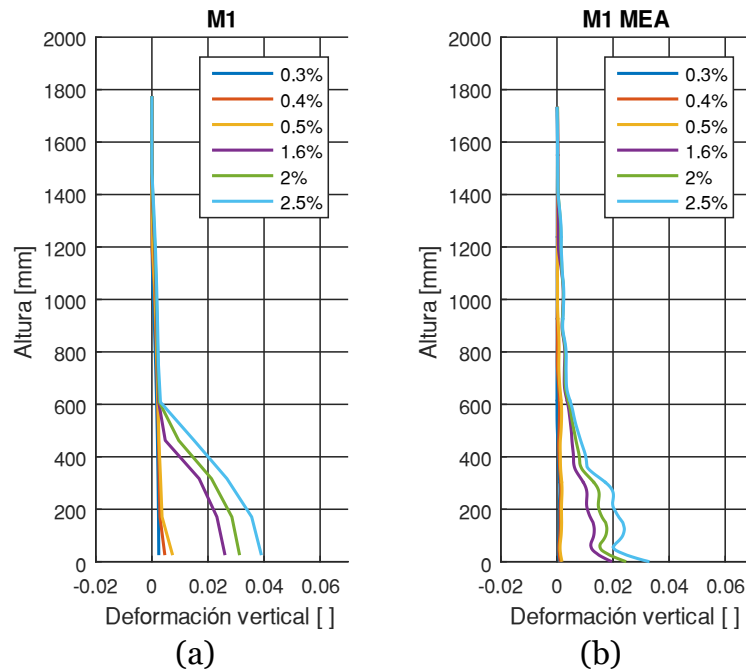


Figura 6.10: Deformación vertical en altura muro 1 con malla electrosoldada: (a)Modelo; (b)Fotogrametría.

En la Figura 6.11 se muestra la comparación de la deformación del modelo y fotogrametría para el muro 2 con malla preparada, se observa que las deformaciones para la deriva del 2% alcanzan el valor de 0.035 en el modelo y 0.040 en fotogrametría. Además ambos casos muestran un cambio abrupto en las deformaciones a la altura de los 700 [mm]. En cuanto al largo de rótula plástica en el modelo, esta es de 681 [mm] un 6% mayor que en el caso de fotogrametría.

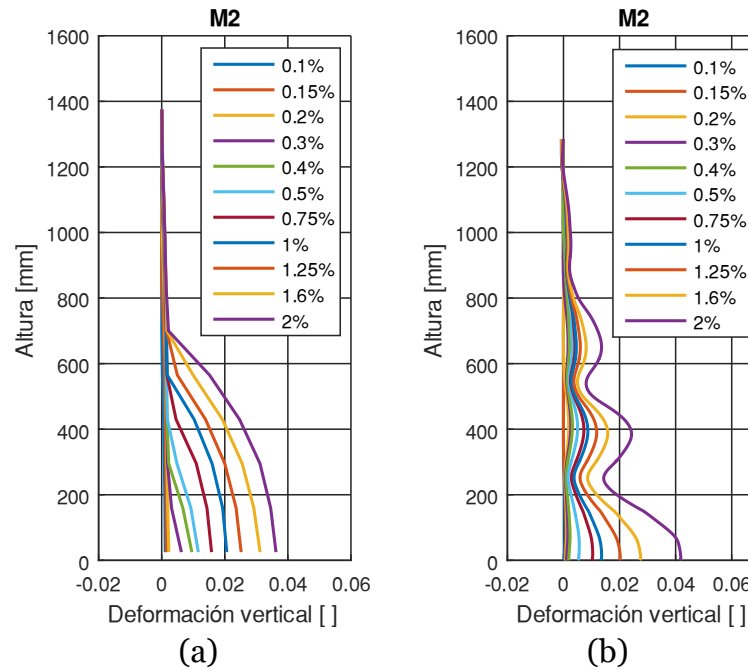


Figura 6.11: Deformación vertical en altura muro 2 con malla preparada: (a)Modelo; (b)Fotogrametría.

La Figura 6.12 muestra las deformaciones para el muro 2 con malla electrosoldada, en ella se observa un comportamiento similar entre el modelo y la fotogrametría con un aumento en las deformaciones a la altura de los 750 [mm] aproximadamente y alcanzando valores de deformaciones de 0,04.

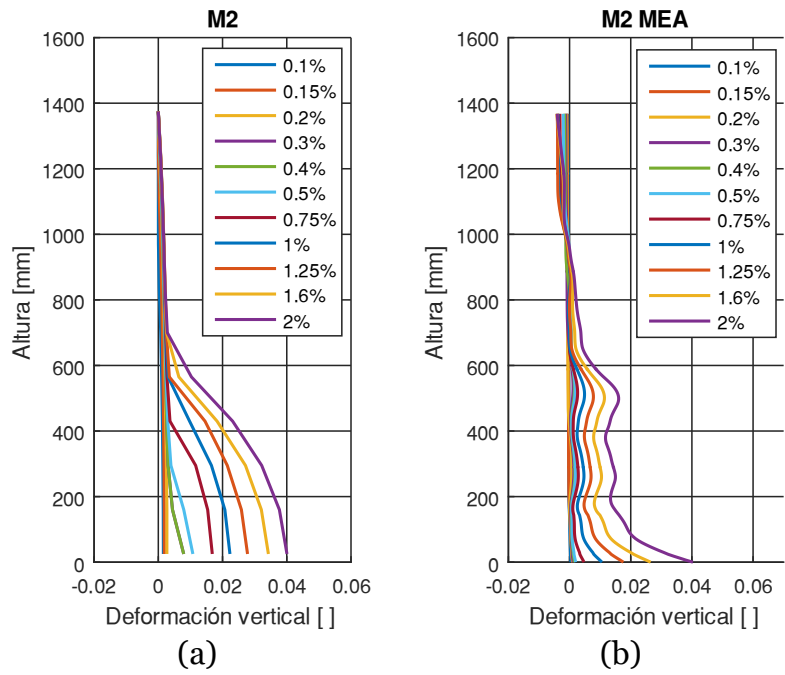


Figura 6.12: Deformación vertical en altura muro 2 con malla electrosoldada: (a)Modelo; (b)Fotogrametría.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

El objetivo del presente trabajo fue el estudio de la respuesta de dos pares de muros de hormigón armado con doble malla preparada y dos pares de muros con malla electrosoldada dúctil frente a cargas cíclicas, con la finalidad de evaluar y comparar el comportamiento de ambos tipos de mallas. Para lograr esto, se procesa la respuesta de los muros a través de la herramienta de fotogrametría mediante el software Ncorr, obteniendo información sobre desplazamientos, deformaciones y propiedades de distribución de fisuras. Además de esto, se compara la respuesta experimental de los muros a través de los datos entregados por los sensores LVDT. Finalmente, se realiza un modelo de elementos finitos de los muros mediante la plataforma SAFE-TB - “Structural Analysis and Finite Elements ToolBox”, con el fin de comparar la respuesta teórica y experimental.

La primera conclusión sobre el comportamiento de ambas soluciones constructivas se obtiene al observar los resultados experimentales. Con los datos obtenidos mediante los sensores LVDT's se mostró la respuesta global de los muros a través de los gráficos carga vs. desplazamiento. En el muro 1 se alcanzaron valores similares en ambas soluciones constructivas para cargas y desplazamientos, llegando a magnitudes de 21 [tonf] y 59 [mm] respectivamente. Por otro lado, el muro 2 mostró cargas 10 [tonf] mayores en la respuesta de la probeta MEB, sin embargo este comportamiento no se ve reflejado en la probeta MEA, que posee la misma malla, por lo que esta diferencia se asocia a dispersión en las propiedades de los materiales o a una mayor resistencia en el hormigón producto de mayor tiempo de fraguado. En tanto los desplazamientos del muro 2 fueron similares para las probetas FPA y MEA alcanzando valores de 50 [mm] de deriva de techo, la probeta MEB alcanzó valores de 46 [mm], un 8% menor, y la probeta FPB llegó a los 37 [mm], un 26% menor. Esta diferencia se asocia a una posible mayor rotación en la base. Posteriormente se separó el desplazamiento generado por los esfuerzos de flexión y corte, los resultados para el primer muro mostraron el mismo comportamiento para los dos tipos de mallas, donde los desplazamientos producto de la flexión corresponden al 80% del total. En el muro 2 los resultados mostraron que, a pesar de las diferencias en los desplazamientos totales, el porcentaje de aporte del esfuerzo de flexión es similar para las cuatro probetas alcanzando en promedio el 70% de la deriva total.

A partir de los resultados obtenidos con fotogrametría para el muro 1 se observó que los muros con malla preparada y los muros con malla electrosoldada tuvieron un comportamiento idéntico, en donde predominan los esfuerzos de flexión, dado que cerca del 80% del desplazamiento total es producto de dichos esfuerzos y solo el 20% es producto del corte. Además los muros presentaron una concentración de deformaciones verticales en los primeros 600 [mm] de altura y grietas preponderantemente horizontales. En cuanto a los desplazamientos laterales también se obtuvo uniformidad en los máximos alcanzados por ambas soluciones constructivas, llegando a valores de 54 [mm] de desplazamiento de techo para la deriva del 3,2%. La única diferencia observada entre ambos tipos de mallas es en el largo de la concentración de daño, en donde para los muros

con malla preparada esta es en promedio un 13% mayor que en los muros con malla electrosoldada.

En tanto, en los resultados conseguidos mediante fotogrametría para el muro 2, se observó similitud entre los muros con malla preparada y los muros con malla electrosoldada. De igual manera que en el muro 1, los esfuerzos de flexión predominan por sobre los de corte, pero en este caso, en promedio, el 68% del desplazamiento total es producto del primer esfuerzo, aumentando el aporte al desplazamiento producto del corte a un 32% en promedio. Estos muros presentaron una concentración de deformaciones bajo la mitad de la altura y una distribución de grietas diagonales. Para los resultados de desplazamiento lateral se advirtió que en el muro FPB estos fueron alrededor de 10% menores al de los otros muros, sin embargo este comportamiento se repite para todos los resultados por lo que se relaciona a problemas constructivos o al momento de ser ensayado. El resto de los muros presenta uniformidad en los máximos llegando a los 33 [mm] de desplazamiento de techo para la deriva del 2.5%. Respecto al largo de la concentración de daño, dadas las deformaciones máximas que se obtuvieron se compara el muro FPA con MEA y FPB con MEB, es así como el largo en los muros con malla preparada es mayor al de los muros con malla electrosoldada, en el primer caso la diferencia es de 22% y en el segundo es de 18%. Este resultado es igual al del muro 1.

Respecto al uso de fotogrametría, esta demostró ser un método efectivo para la obtención de desplazamientos y deformaciones. Además alcanzó una correlación de 0.99 con respecto a los datos obtenidos a través de sensores LVDT's, pero a diferencia de estos, a través de fotogrametría se logra una mayor cantidad de datos y en dos direcciones.

Los resultados de la modelación fueron comparados con los resultados experimentales a través de gráficos carga vs. desplazamiento, en ellos se observó que los modelos representan correctamente el comportamiento de los muros durante los ciclos de carga y descarga. Además, se obtuvo un mapa de colores con las deformaciones en los diferentes ejes, para el muro uno en el eje E22 se vio una concentración de tracciones en el tercio inferior. En tanto, el muro dos presento una concentración de tracciones en la mitad inferior de la altura para el eje E22. En ambos muros la forma y concentración de deformaciones son similares a las de fotogrametría. En conclusión se logró una adecuada representación de los muros a través de modelos de elementos finitos, replicando el comportamiento en las diferentes zonas del mallado.

En resumen, en ambos muros la principal diferencia entre ambas mallas se encontró en la altura de la concentración de daño, ya que en la malla electrosoldada esta fue menor, sin embargo esta diferencia no afectó el comportamiento estructural de estos muros y la capacidad de deformación fue considerable. Por otro lado la resistencia es la misma para ambas soluciones. Por todo esto, se recomienda el uso de mallas electrosoldadas en muros de hormigón armado en donde predominen los esfuerzos de flexión.

Las principales recomendaciones para el uso de fotogrametría son: que el desprendimiento del recubrimiento de hormigón sea mínimo, que la luz no interfiera con la textura otorgada al muro, alta calidad de fotografías y contar con cámaras con enfoque local y general ya que la primera presenta menor error y la segunda muestra el comportamiento global. Por último, en futuros trabajos se propone modelar de mejor manera los muros con malla electrosoldada mediante elementos finitos calibrándose con los resultados experimentales de esta memoria.

BIBLIOGRAFIA

- ACI 318-08. (s.f.). *Building Code Requirements for Structural Concrete*.
- ACMA. (2018). *Estudio Experimental de mallas electro soldadas con acero A630 certificado soldable en muros y losas de H.A*. Santiago de Chile.
- Almeida, F. (2015). *Analisis experimental de muros delgados de hormigon armado para viviendas de baja altura*. Santiago de Chile.
- Belarbi, A., & Hsu, T. (1994). Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete. *ACI Struct J*, 91 (4), pp. 465-474.
- Belarbi, A., & Hsu, T. (1995). Constitutive laws of softened concrete in biaxial tension compression. *ACI Struct J*, 92 (5), pp.562-573.
- Blaber, J., Antoniou, A., & Adair, B. (2015). *Instruction Manual Ncorr*. Georgia.
- Cardenas, R., & Cutipa, R. (2009). *Comportamiento sismico de placas de concreto reforzadas con mallas electrosoldadas "muros de ductilidad limitada"*. Tacna.
- Castro, F. (2017). *Comparación de la respuesta experimental y analítica de muros rectangulares de hormigon armado*. Santiago de Chile.
- DS60. (2011). *Requisitos de Diseño y Cálculo para Hormigón Armado*.
- DS61. (2011). *Diseño sismico de Edificios*.
- Filippou, F., Popov, E., & Bertero, V. (1983). *Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints*. UCB/EERC 83/19, Earthquake Engineering Research Center. California.
- 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.
- Massone, L. M., & Wallace, J. W. (2004). Load-Deformation Responses of Slender Reinforced Concrete Walls. *ACI Structural Journal*, V. 101, pp. 103-113.
- Massone, L. M., Orakcal, K., & Wallace, J. W. (2009). Modeling of squat structural walls controlled by shear. *ACI Structural Journal Title No. 106-S60*, pp. 646-655.
- Menegotto, M., & Pinto, P. (1973). *Method of analysis of cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending*. Lisboa.
- Muñoz, G. (2017). *Estudio experimental-teórico de muros de hormigón armado con discontinuidad central en la base e influencia de la presneciade losas*. Santiago de Chile.
- NCh 204. (2006). *Acero - Barras laminadas en caliente para hormigon armado*.
- NCh 3334. (2014). *Acero - Barras laminadas en caliente, soldable, para hormigon armado - Requisitos*.
- NCh 3335. (2014). *Acero - Mallas electrosoldada de barras laminadas en caliente, soldable, para hormigon armado - requisitos*.

- Palermo, D., & Vecchio, F. (2003). Compression field modeling of reinforced concrete subjected to reversed loading: formulation. *ACI Struct J*, 100 (5) , pp. 616-625.
- Rojas, F., Anderson, J., & Massone, L. (2016). *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*. Santiago de Chile.
- Ruiz, M. (2018). *Estudio experimental de muros T de hormigón armado mediante fotogrametría*. Santiago de Chile.
- Thorenfeldt, E., Tomaszewicz, A., & Jensen, J. (1987). *Mechanical properties of high-strength concrete and application in design*. Stavanger, Norway.

ANEXOS

ANEXO A: DETALLE ARMADURA DE FUNDACION Y VIGA

- Fundación Muro 1

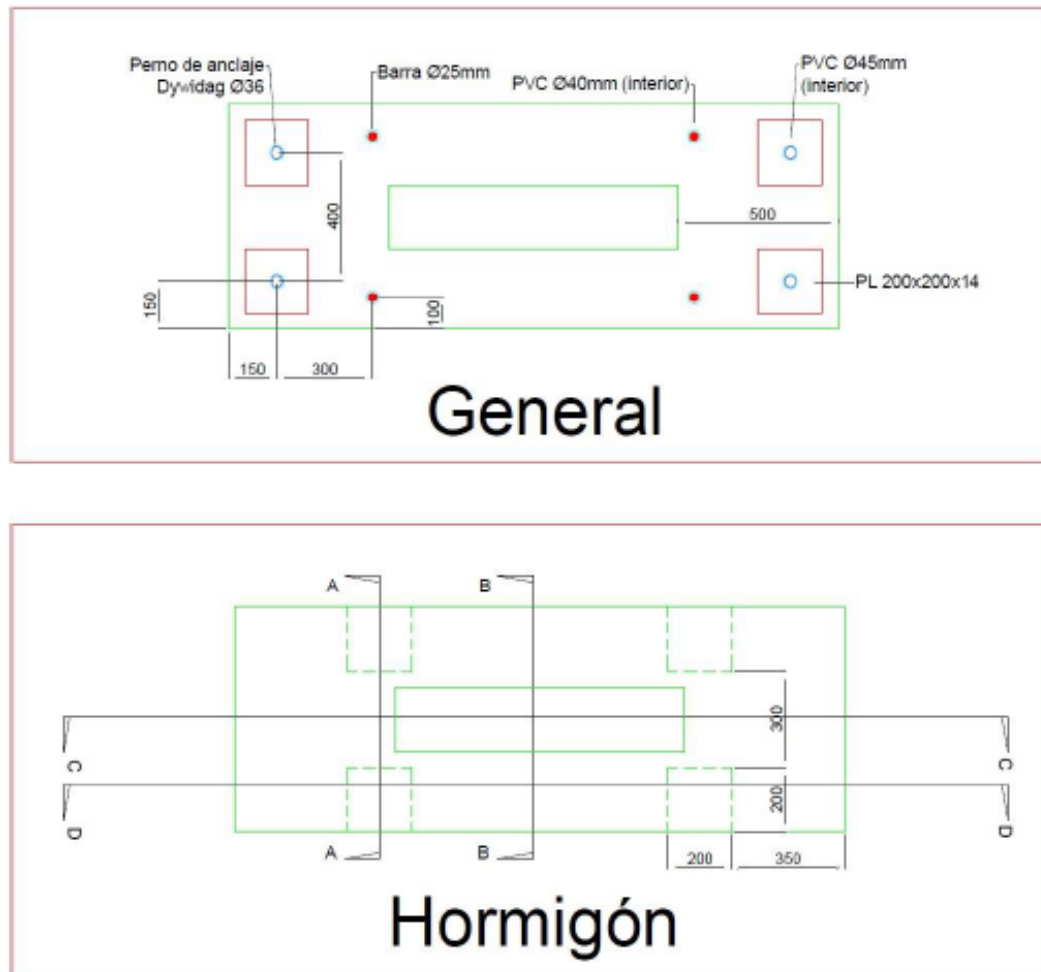


Figura 0.1: Planos fundación Muro 1.

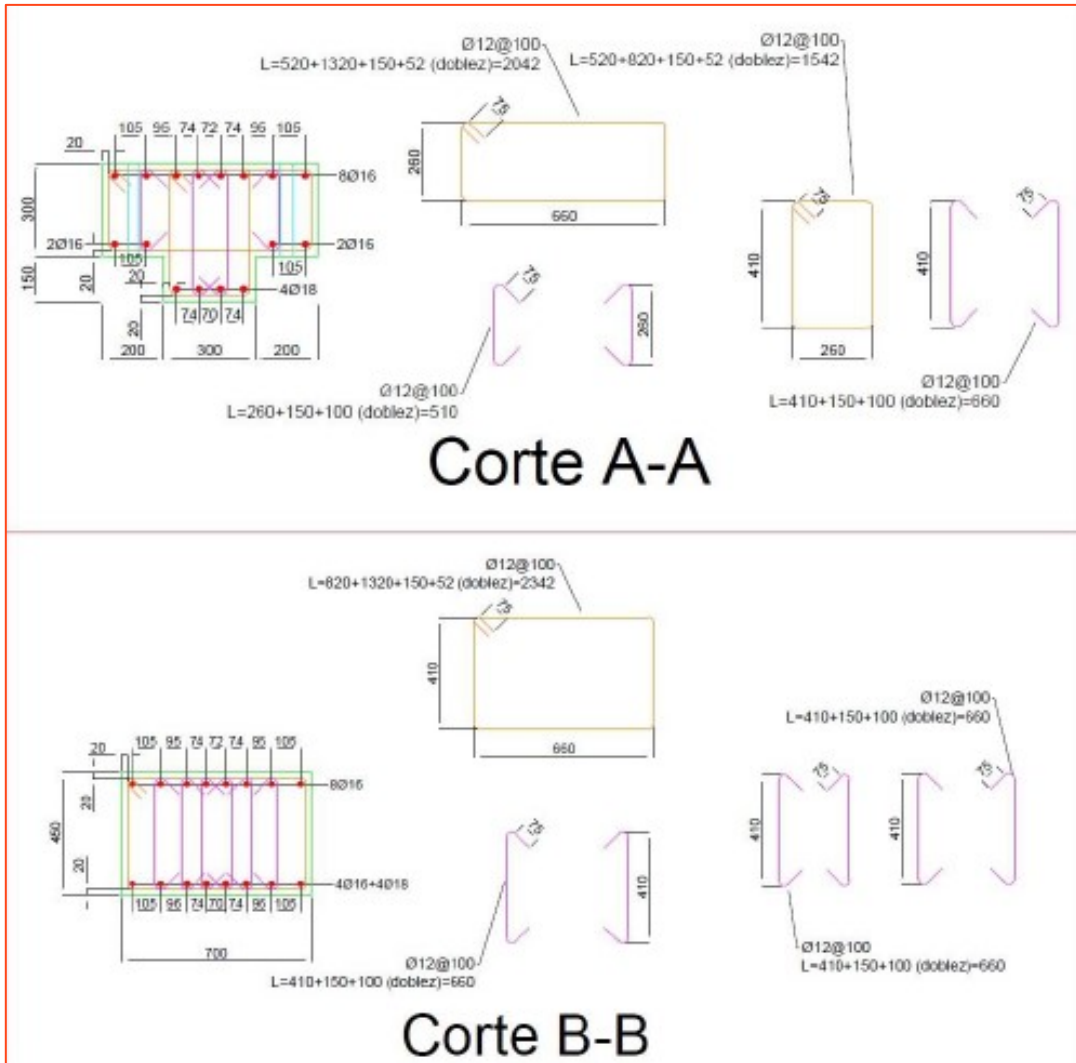


Figura 0.2: Plano fundación Muro 1.

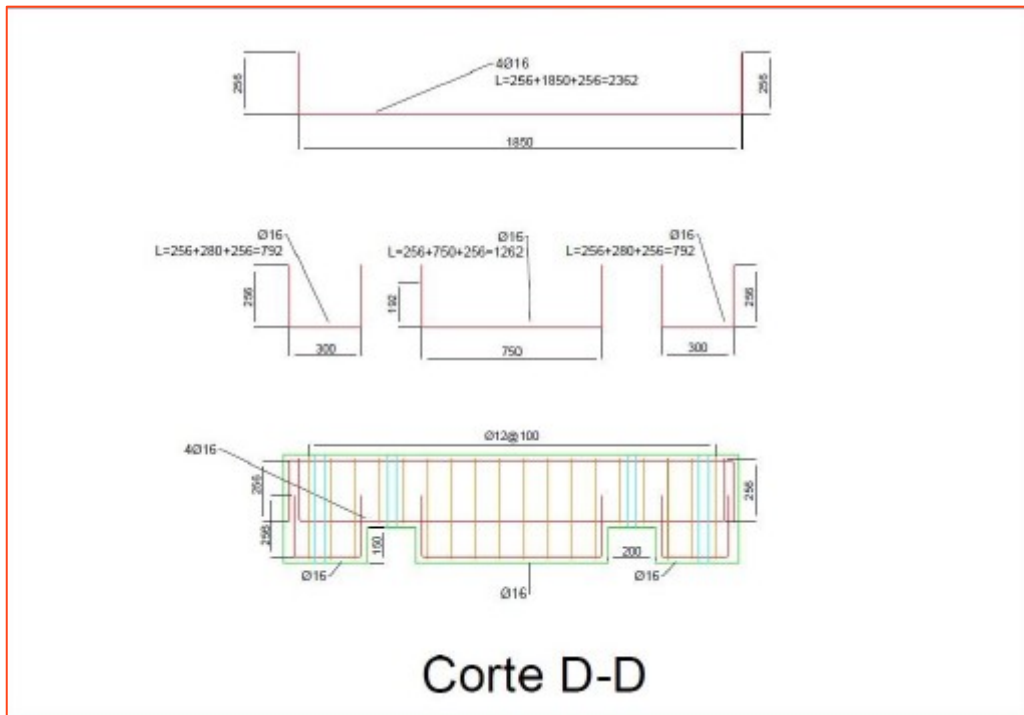
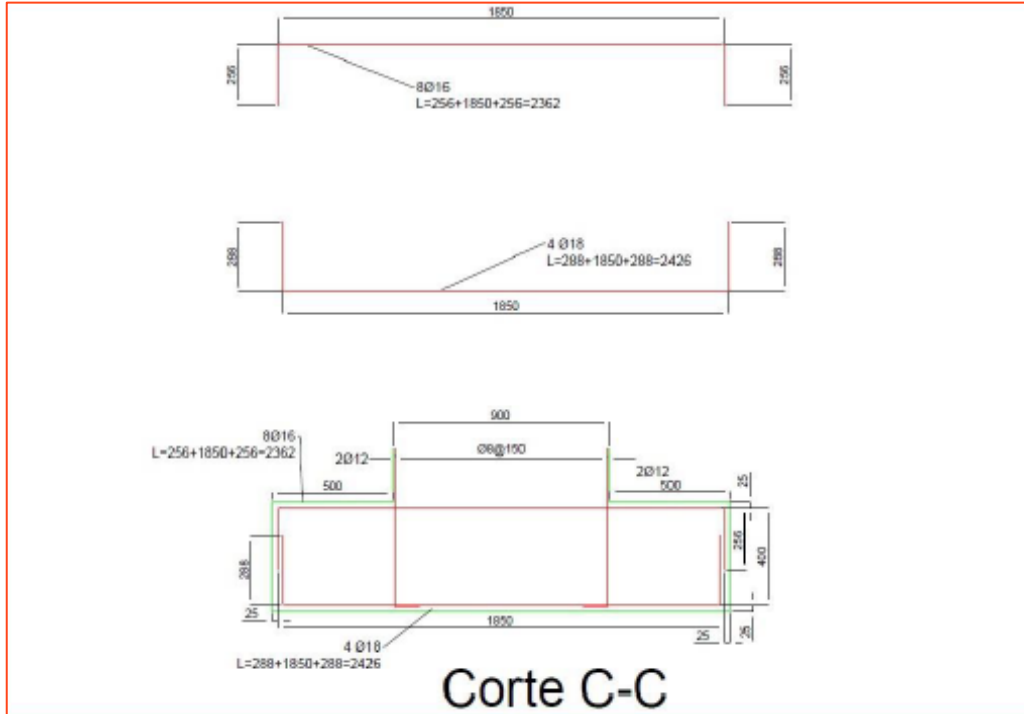


Figura 0.3: Plano fundación Muro 1.

- Fundación Muro 2

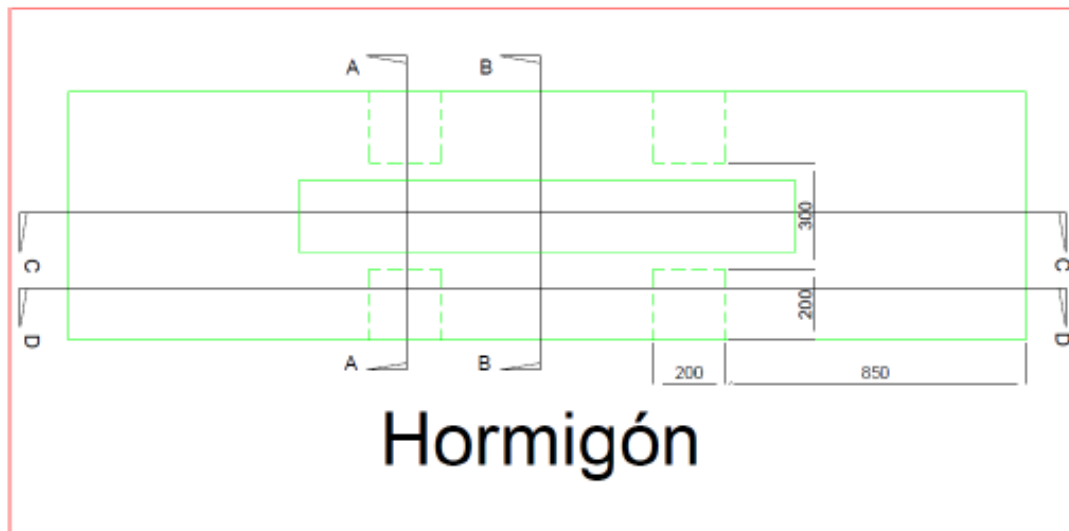
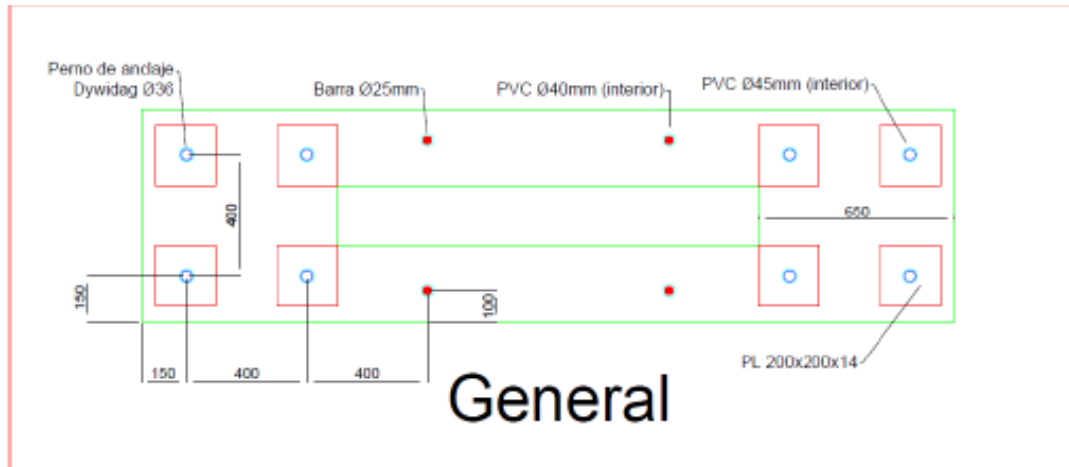


Figura 0.4: Plano fundación Muro 2.

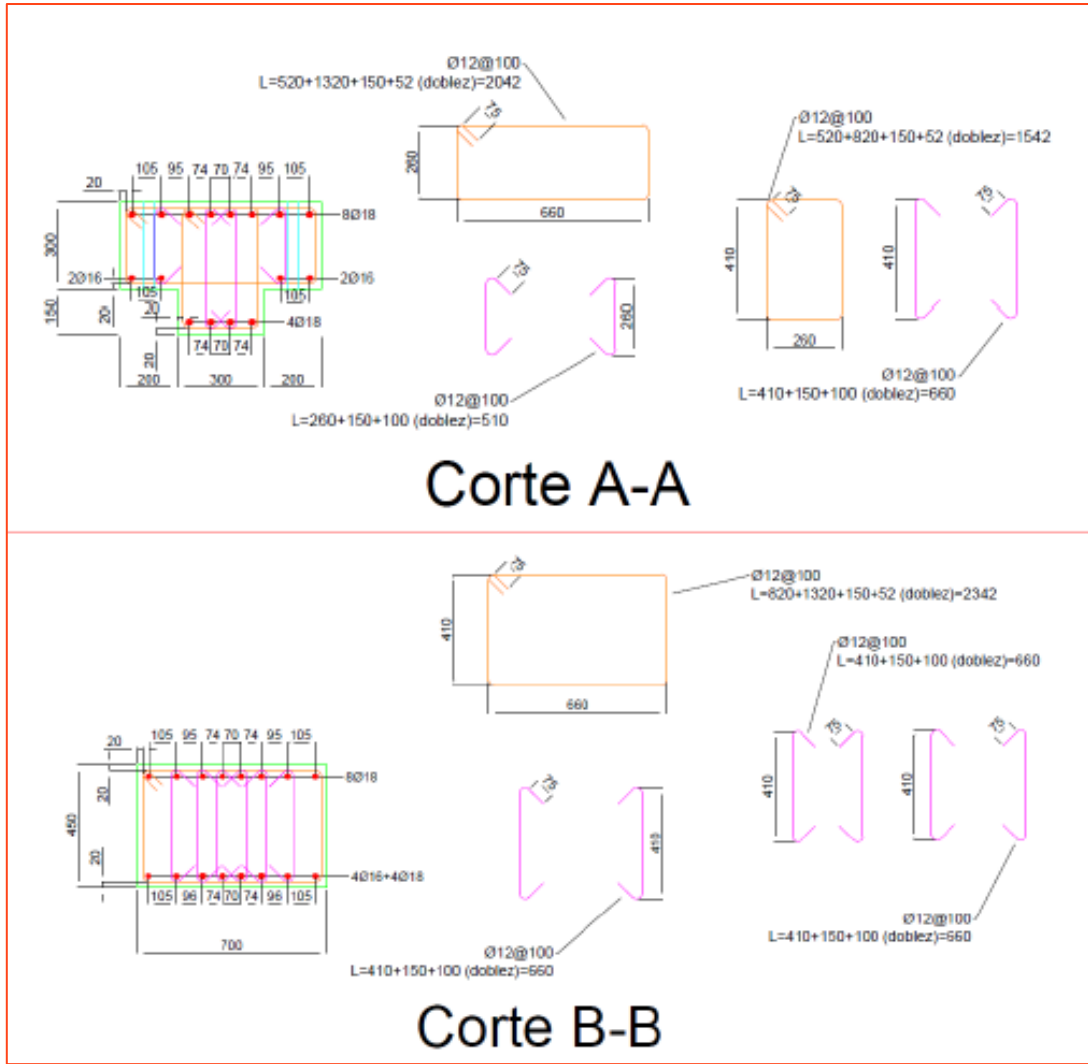


Figura 0.5: Plano fundación Muro 2.

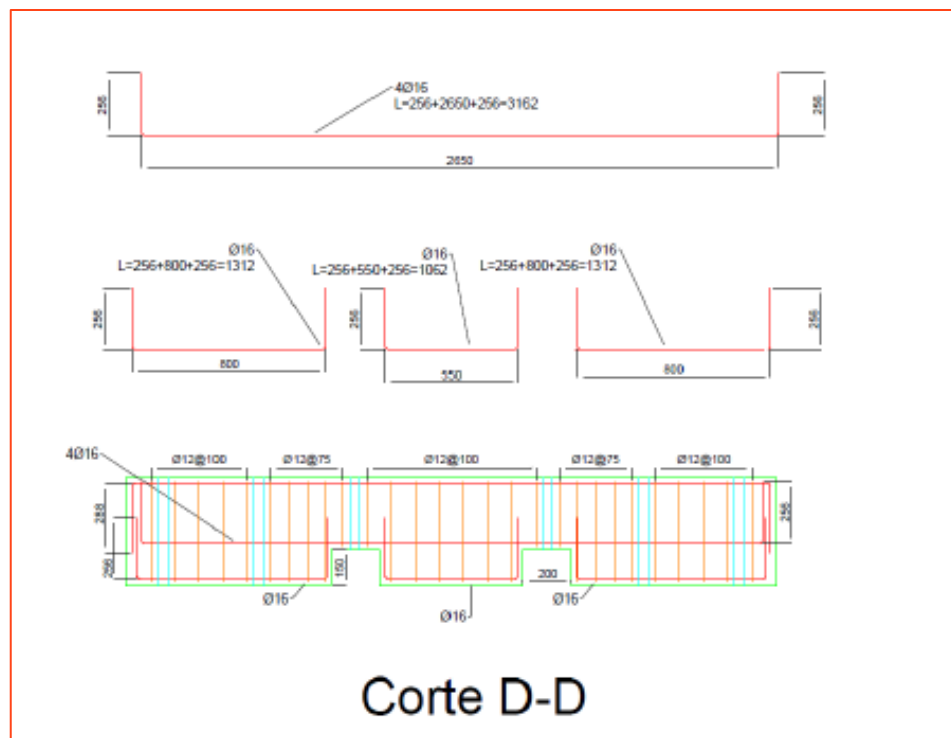
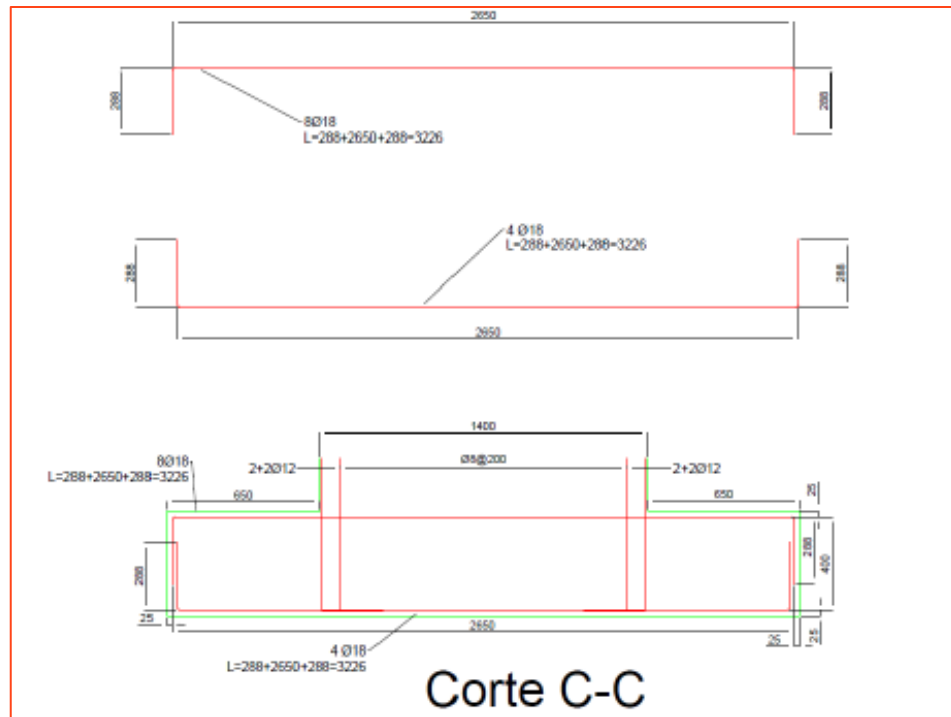


Figura o.6: Plano fundación Muro 2.

- Viga de transferencia Muro 1

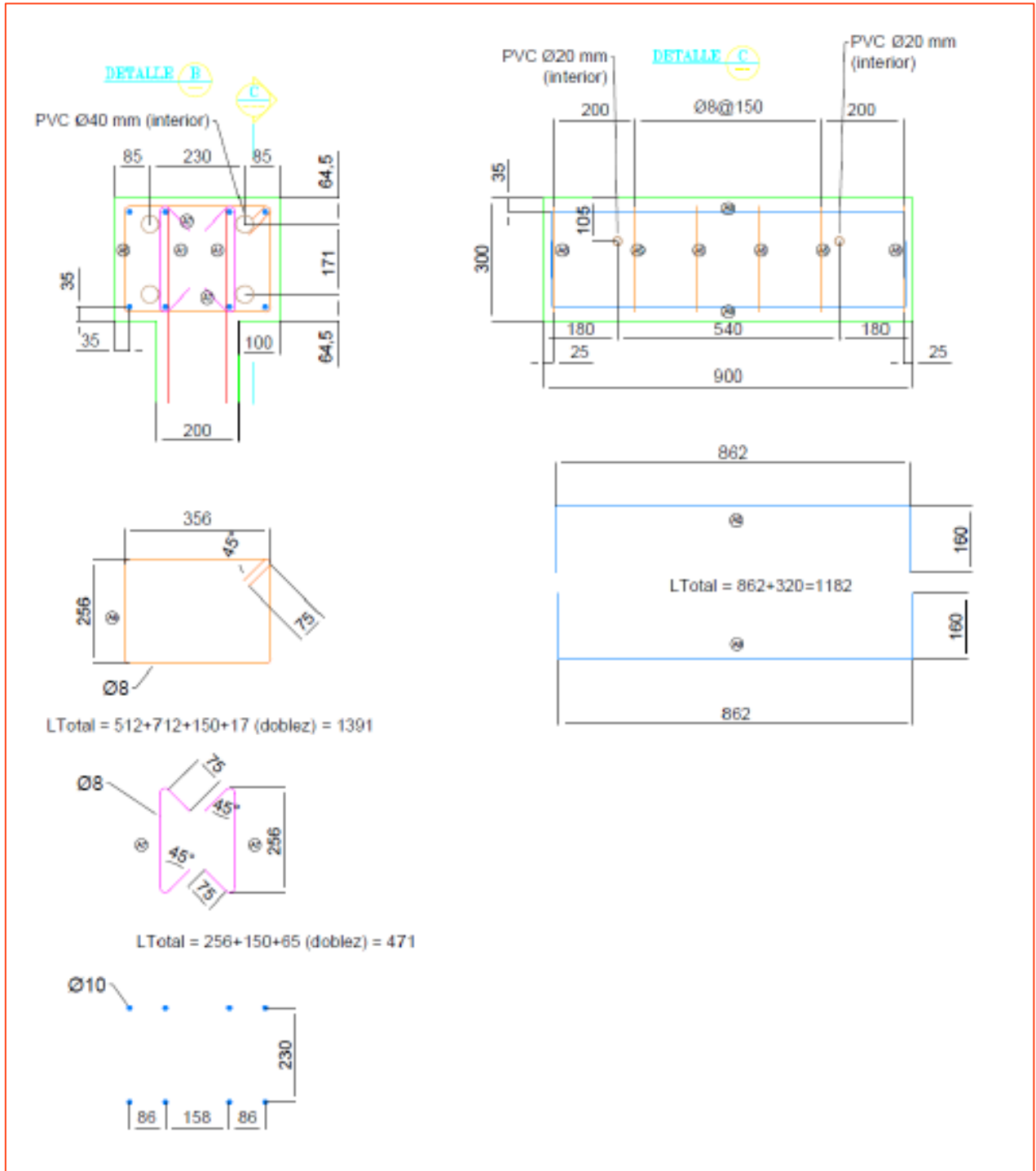


Figura 0.7: Plano viga de transferencia Muro 1

- Viga de transferencia Muro 2

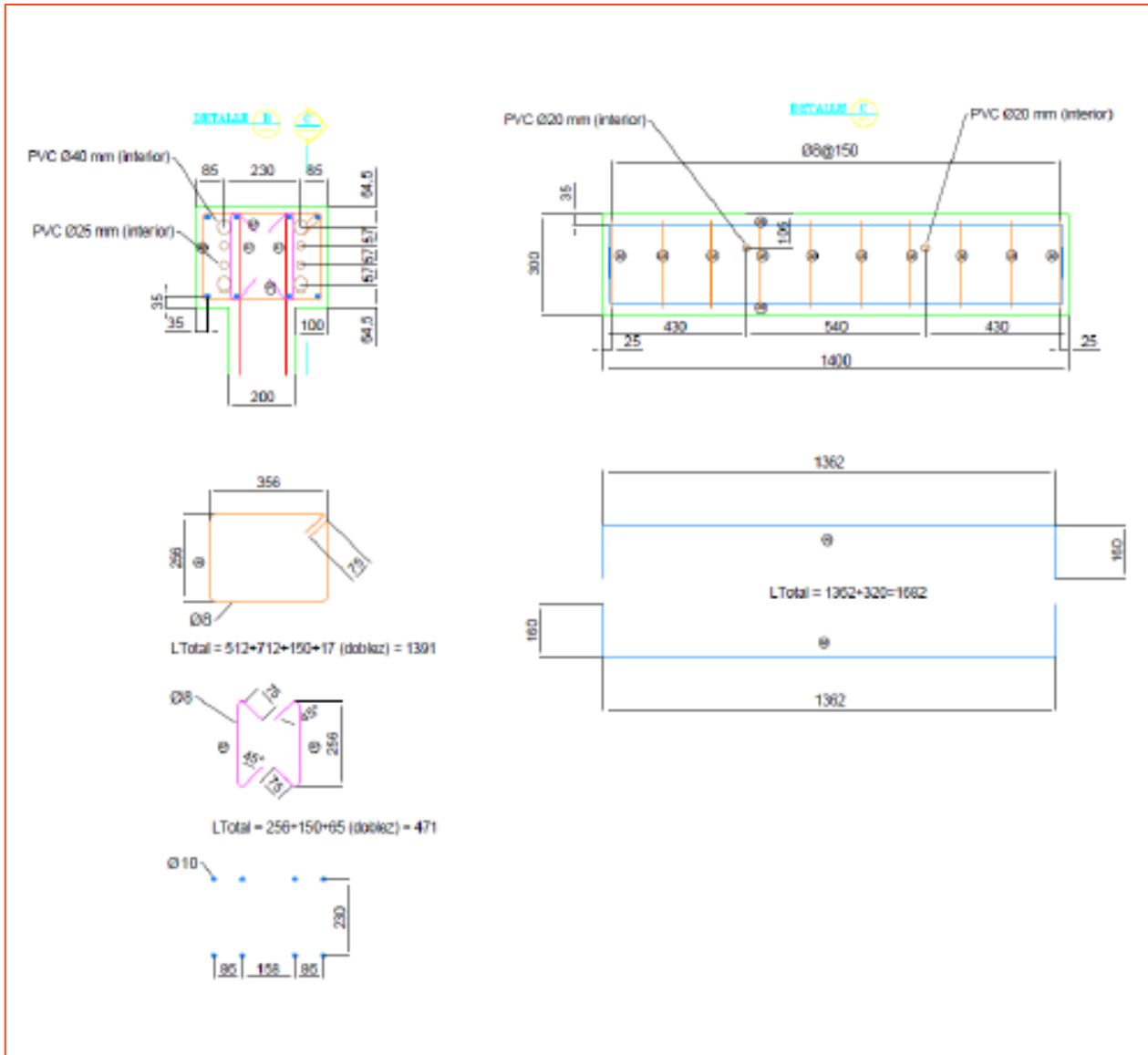


Figura 0.8: Plano viga de transferencia Muro 2.

ANEXO B: DETALLE ARMADURA DE MUROS

- Muro 1

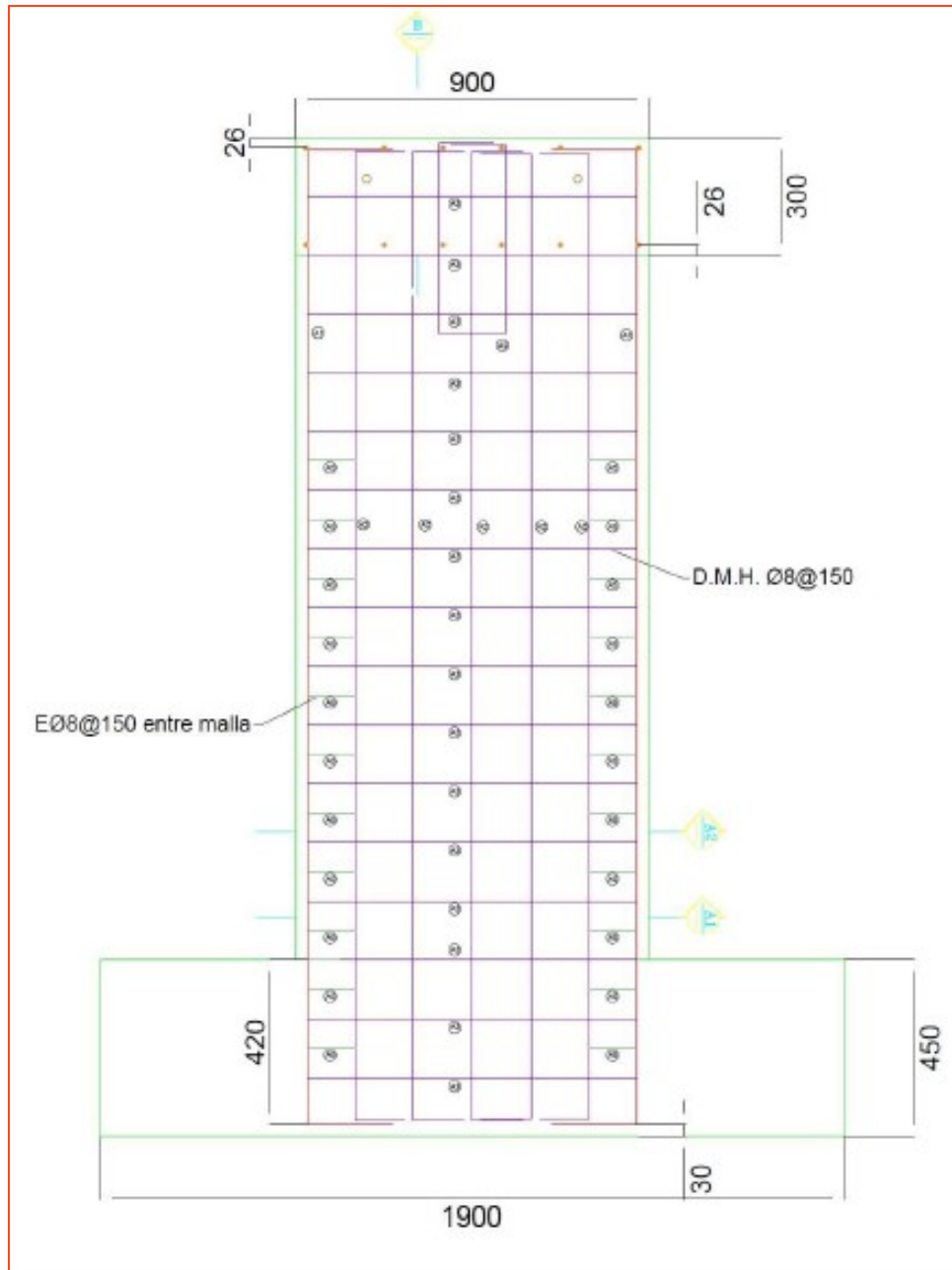


Figura 0.9: Plano Muro 1.

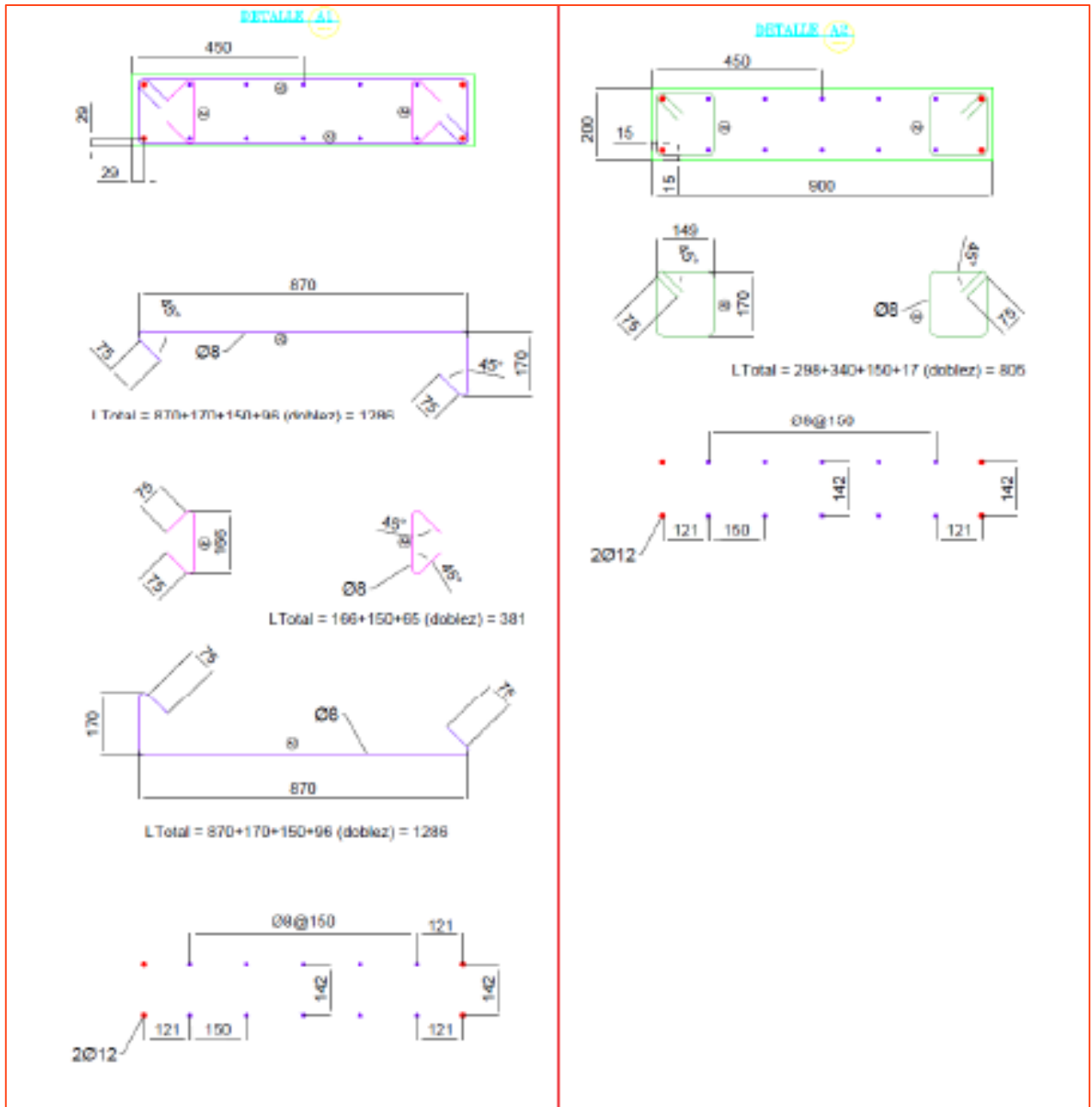


Figura 0.10: Detalle enfierradura Muro 1.

- Muro 2

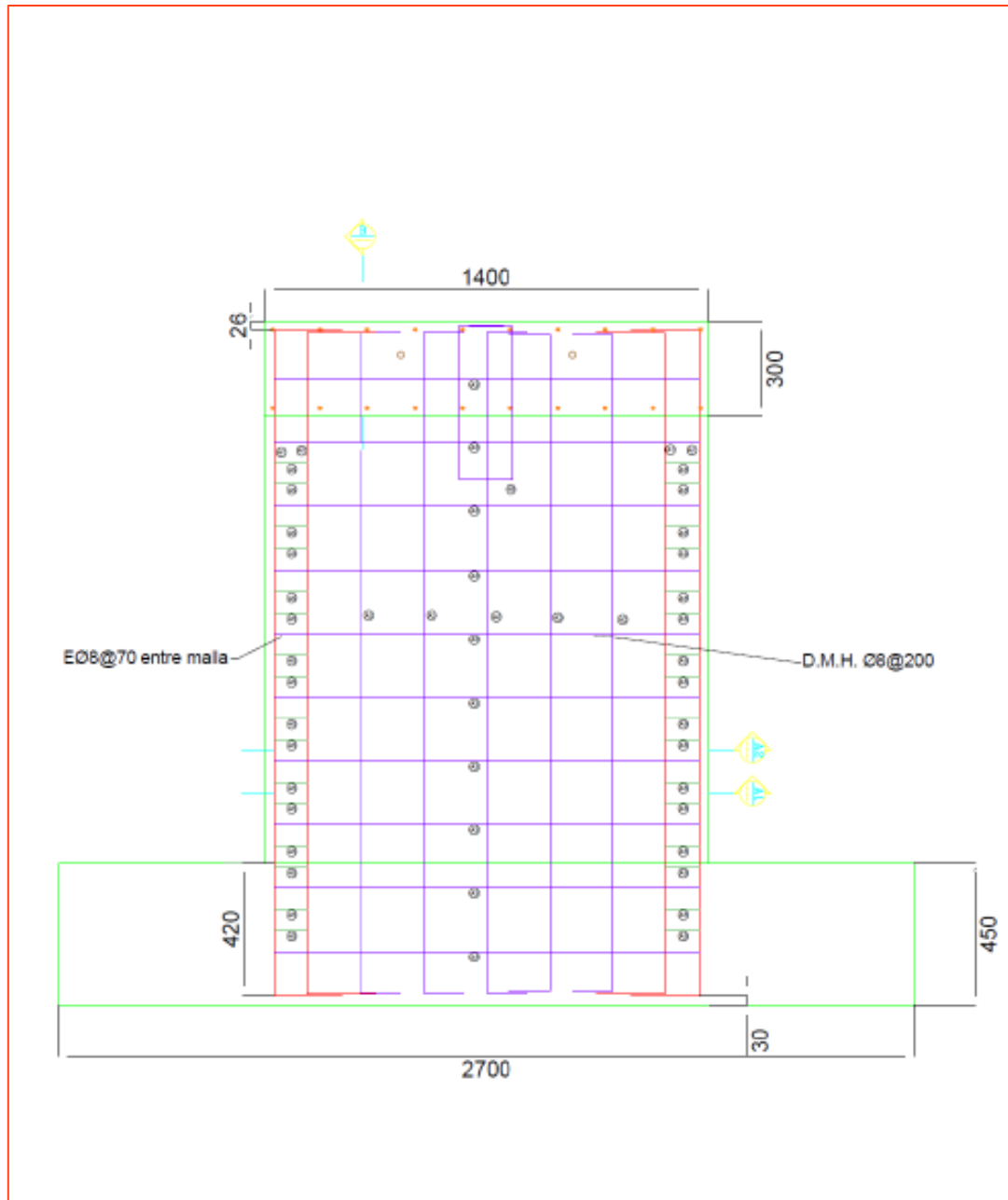


Figura 0.11: Plano Muro 2.

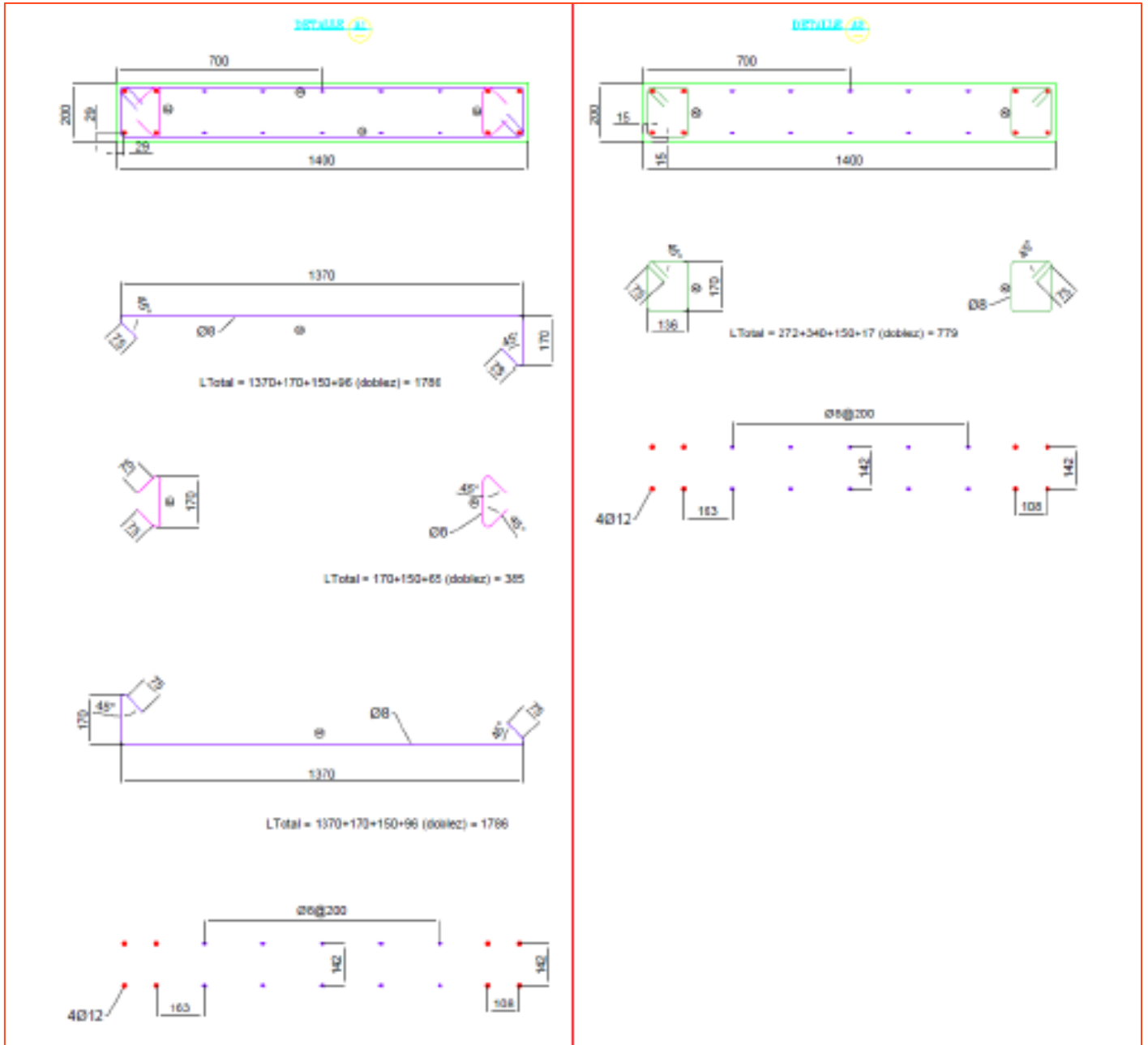


Figura 0.12: Detalle enfierradura Muro 2.

ANEXO C: DEFORMACION EN LOS MUROS CAMARA LOCAL

- Muro 1

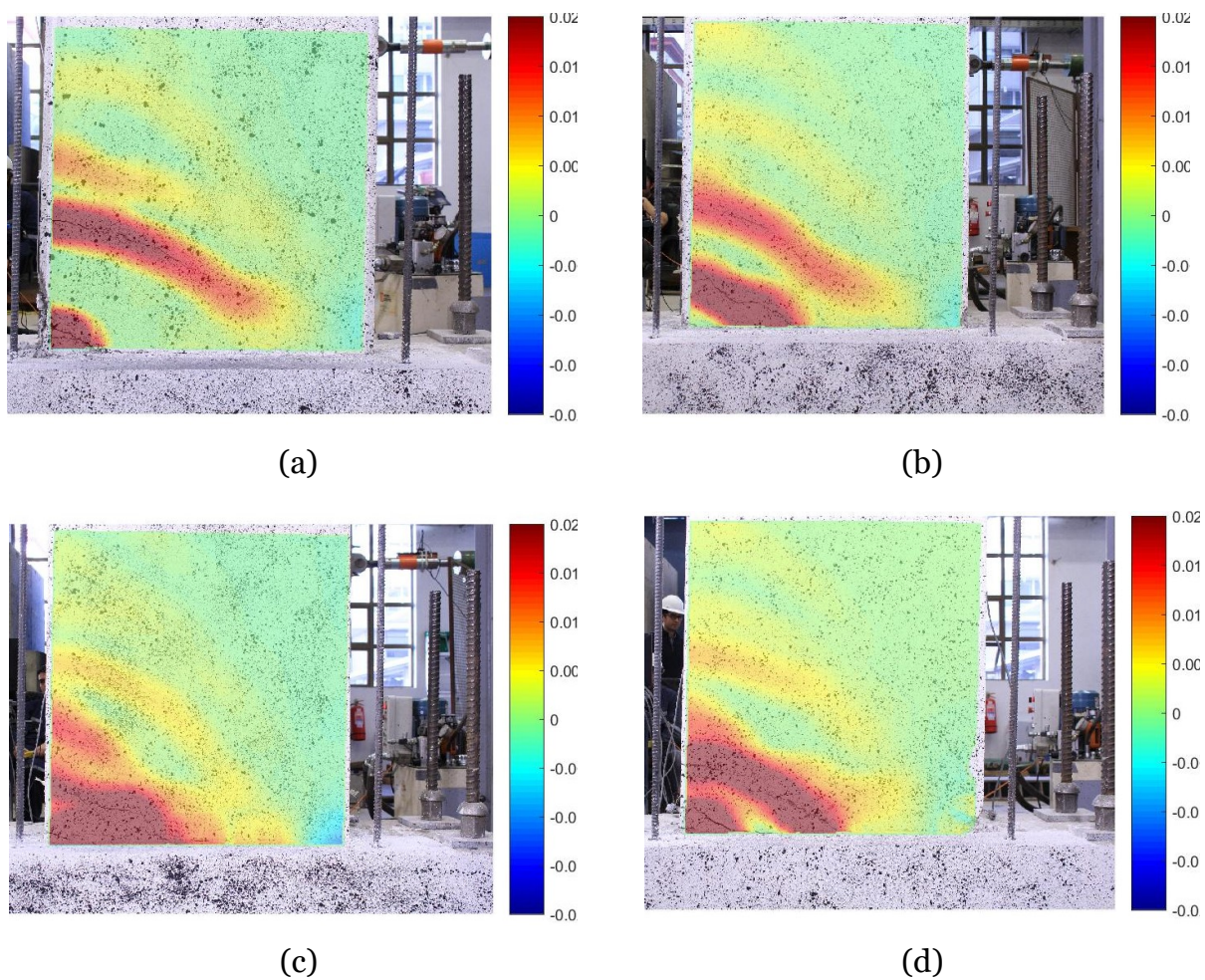


Figura 0.13: Deformación ε_{yy} 2% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.

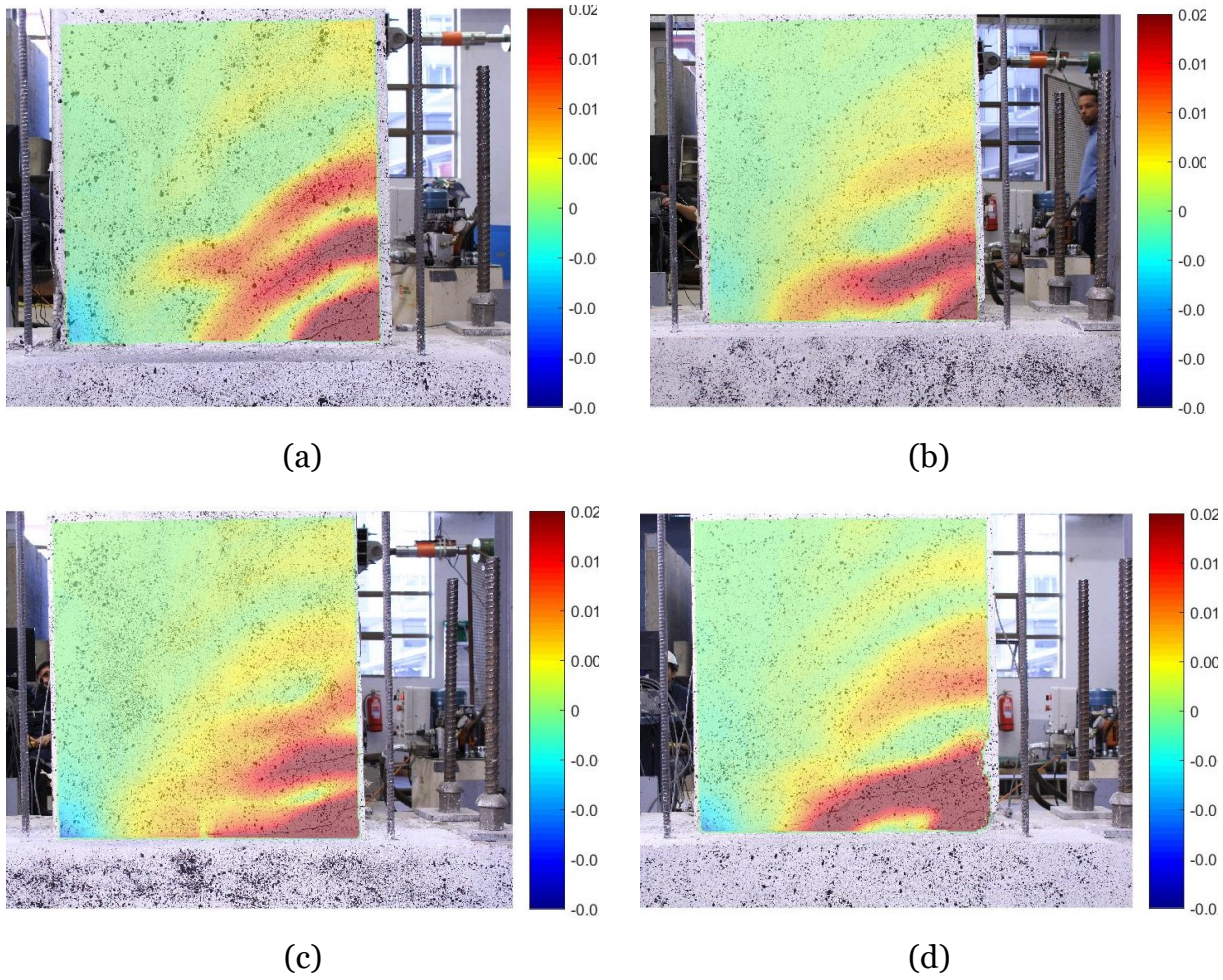


Figura 0.14: Deformación ε_{yy} -2% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.

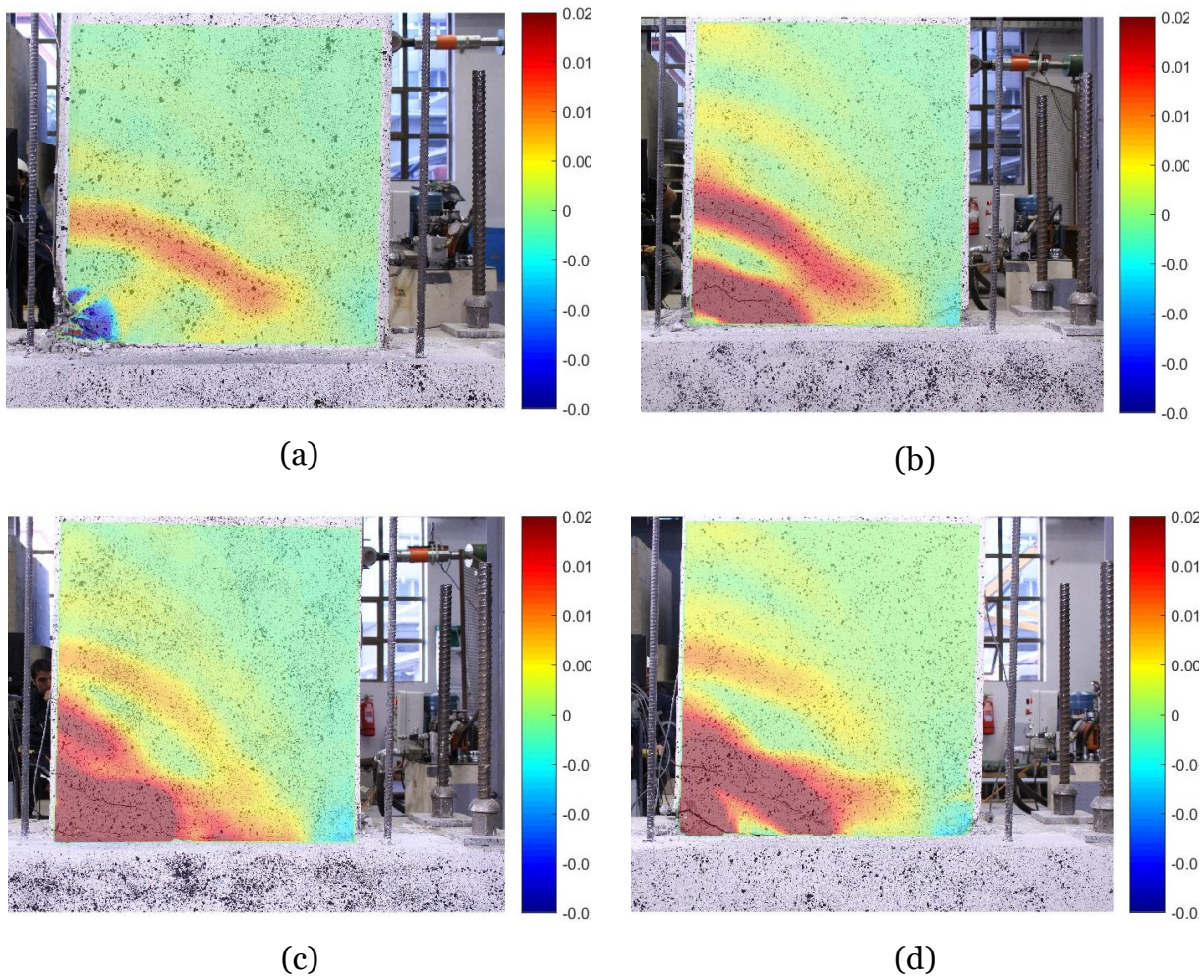


Figura 0.15: Deformación ϵ_{yy} 2.5% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.

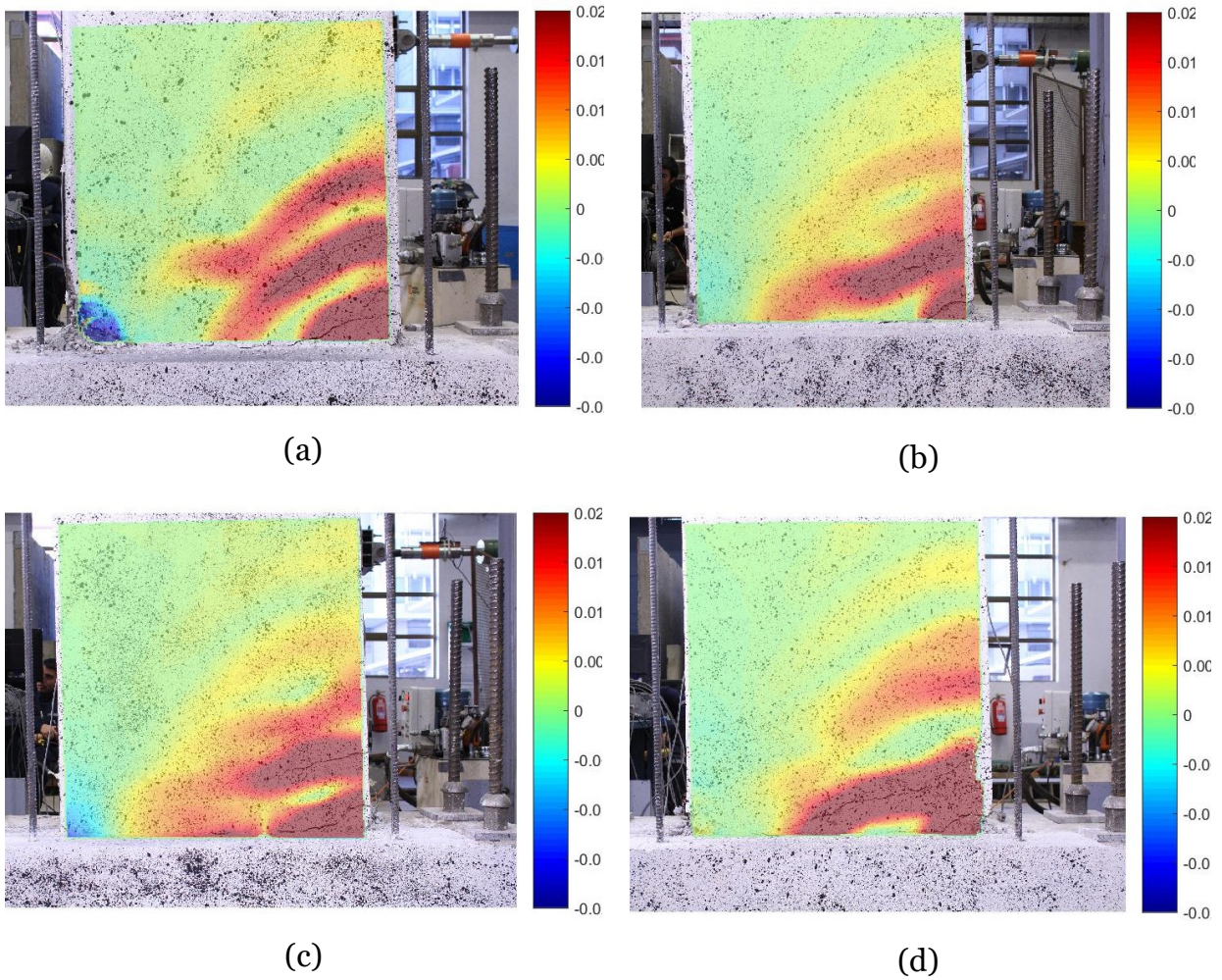
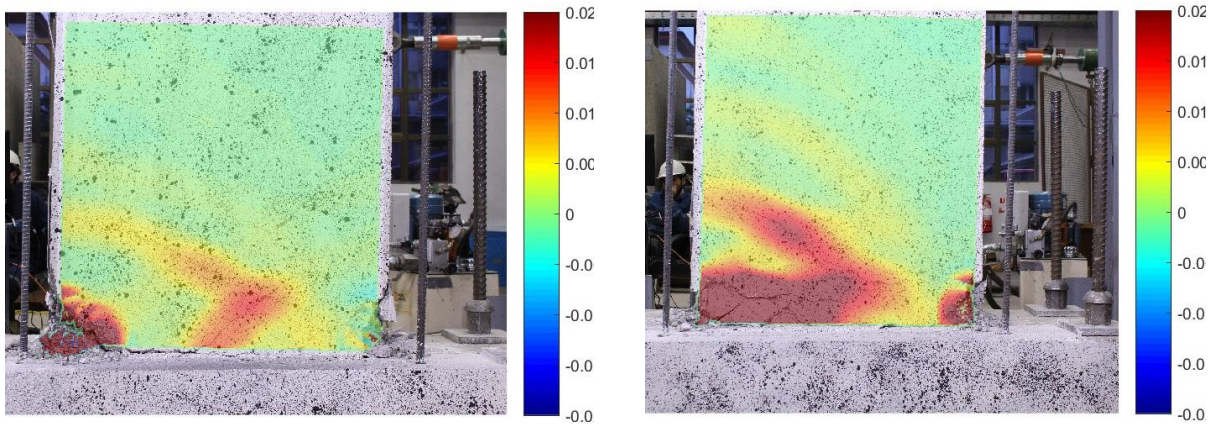
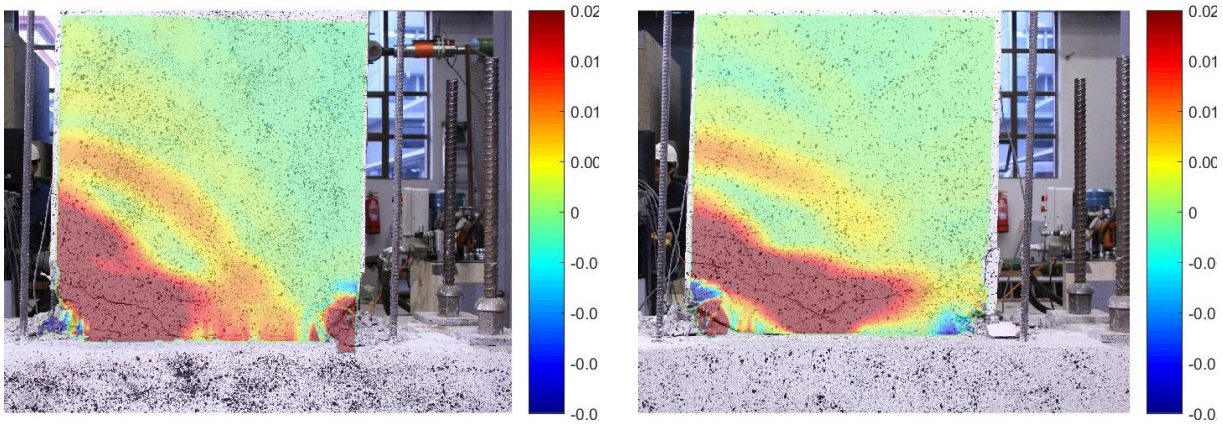


Figura 0.16: Deformación ε_{yy} -2.5% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.



(a)

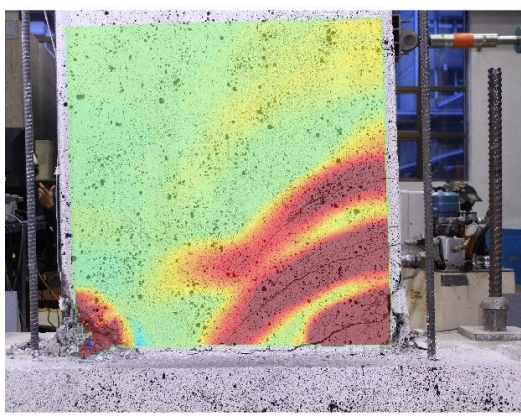
(b)



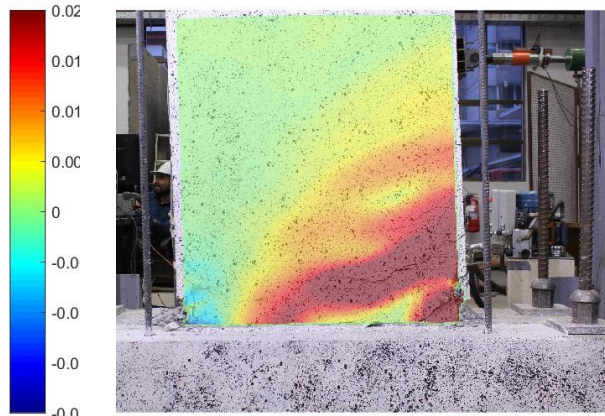
(c)

(d)

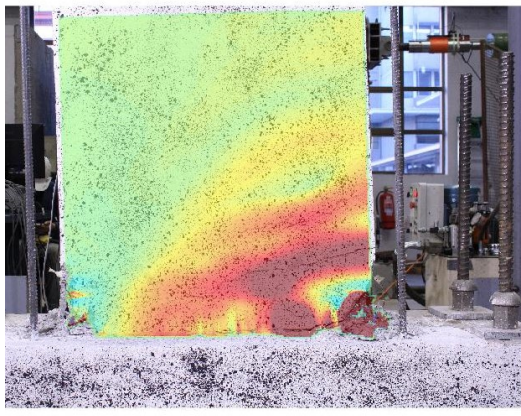
Figura 0.17: Deformación ε_{yy} 3.2% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.



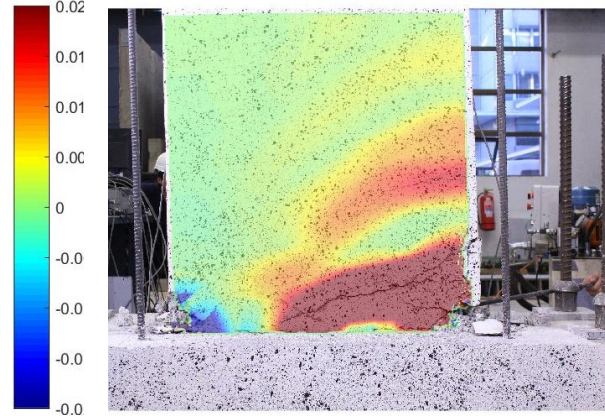
(a)



(b)

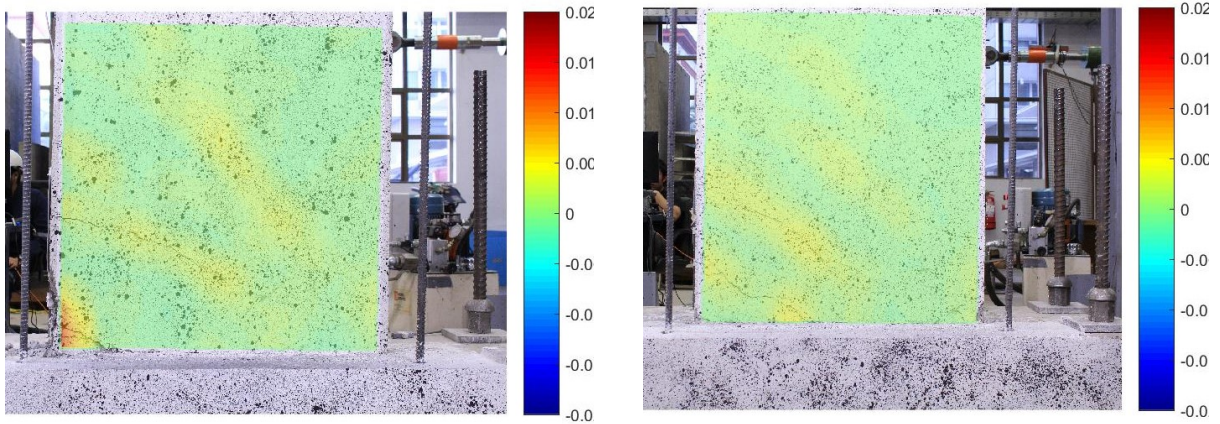


(c)



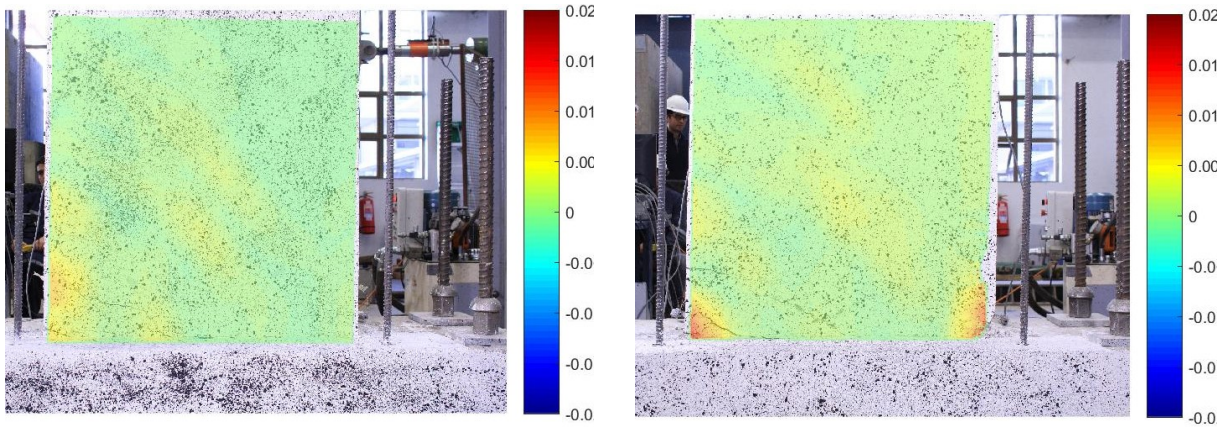
(d)

Figura 0.18: Deformación ε_{yy} -3.2% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.



(a)

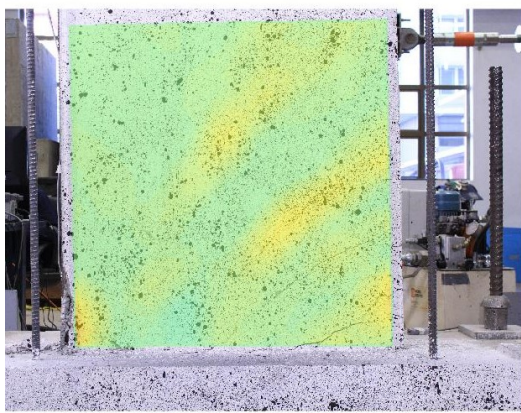
(b)



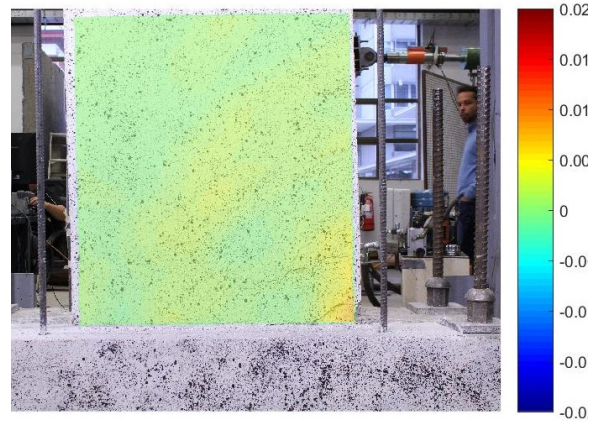
(c)

(d)

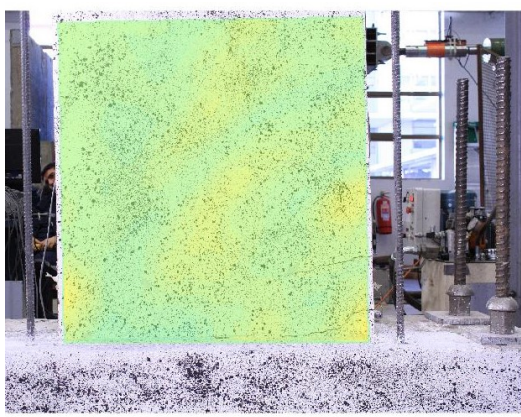
Figura 0.19: Deformación ε_{xx} 2% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.



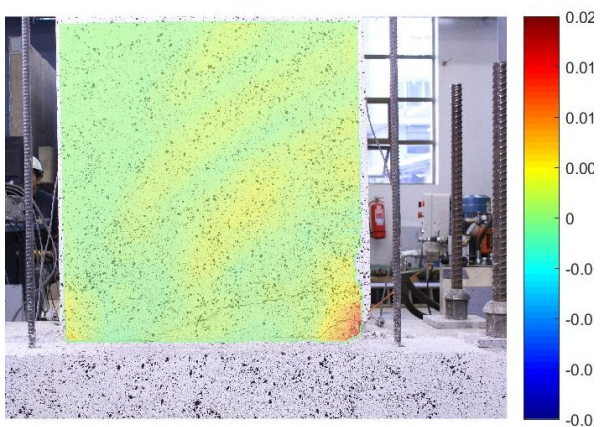
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 0.20: Deformación ε_{xx} -2% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.

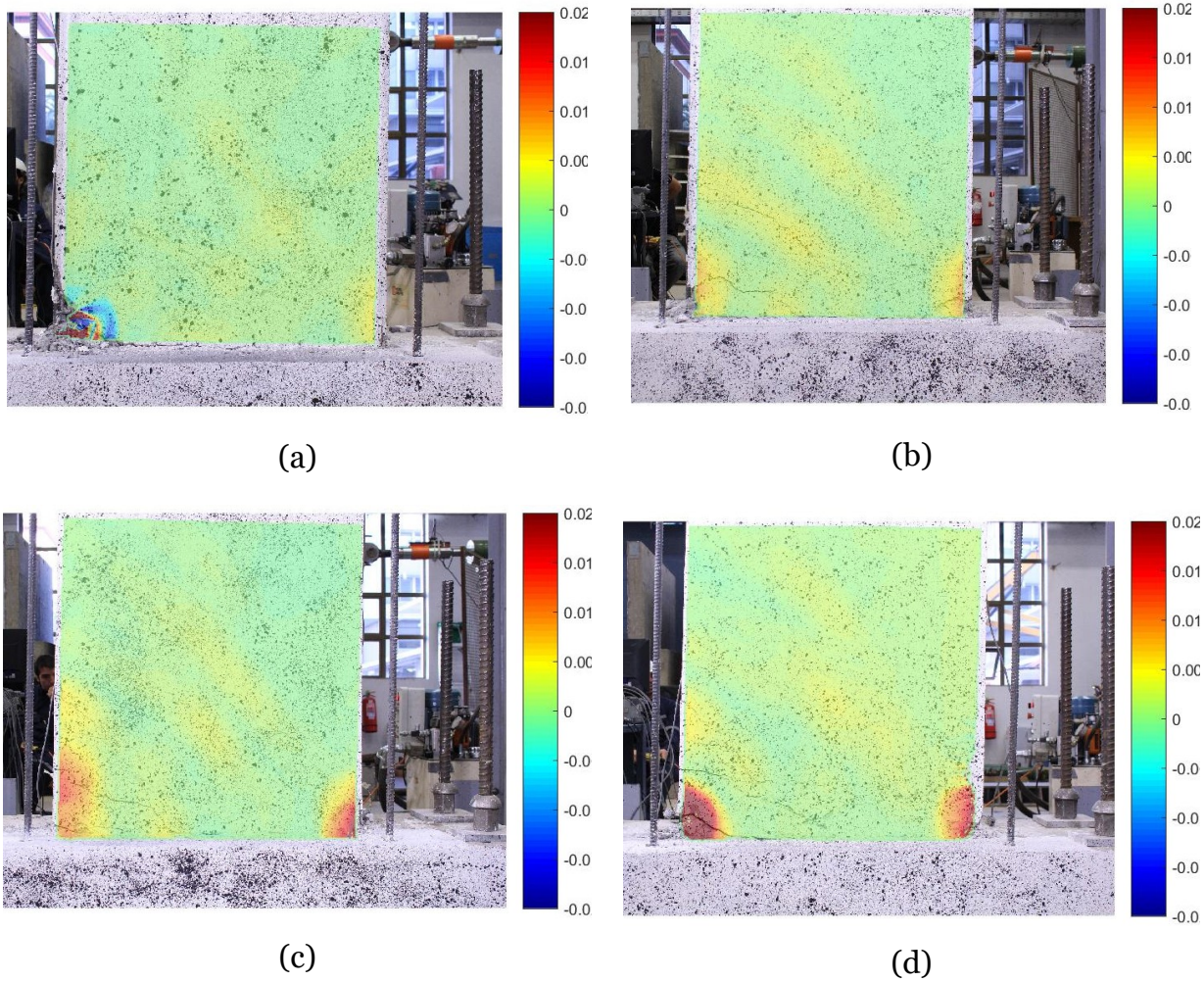
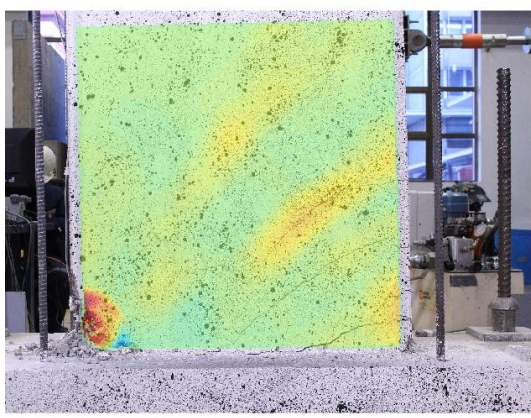
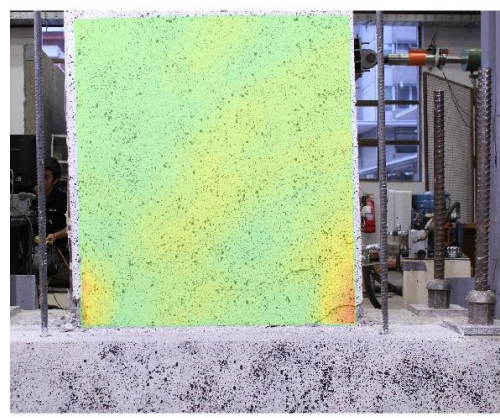


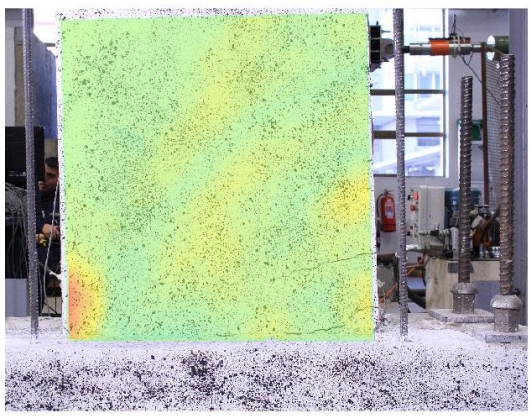
Figura 0.21: Deformación ε_{xx} 2.5% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.



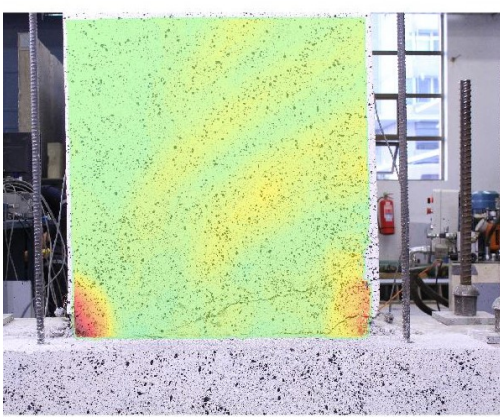
(a)



(b)

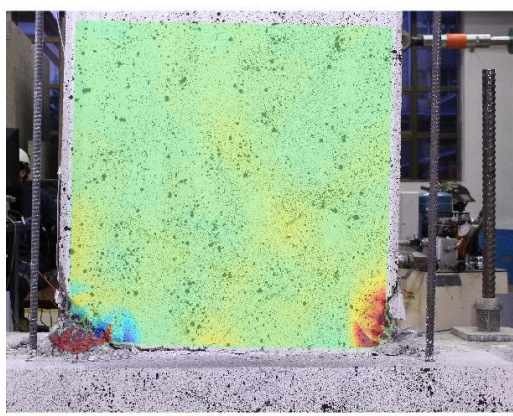


(c)

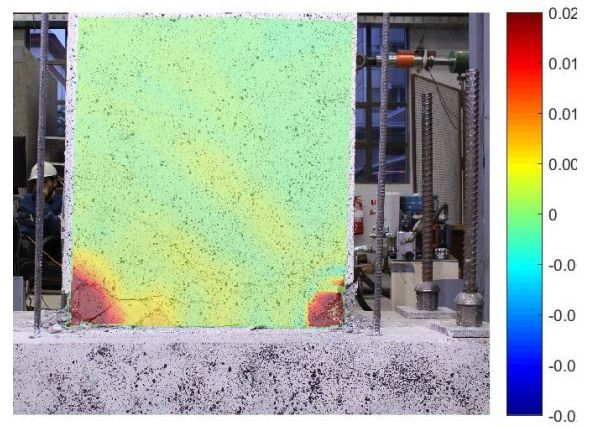


(d)

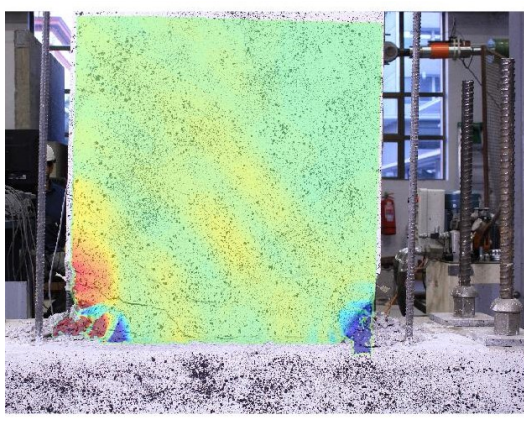
Figura 0.22: Deformación ε_{xx} -2.5% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.



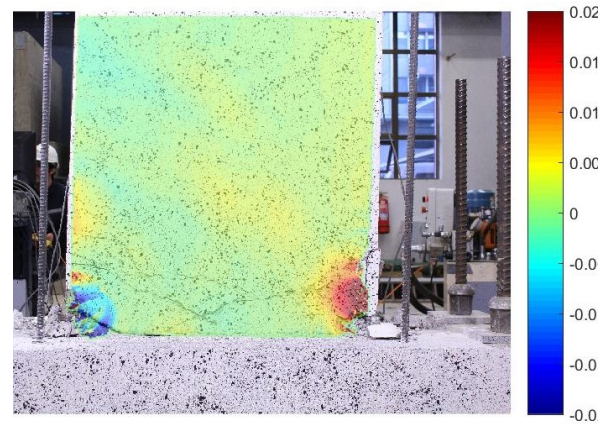
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 0.23: Deformación ϵ_{xx} 3.2% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.

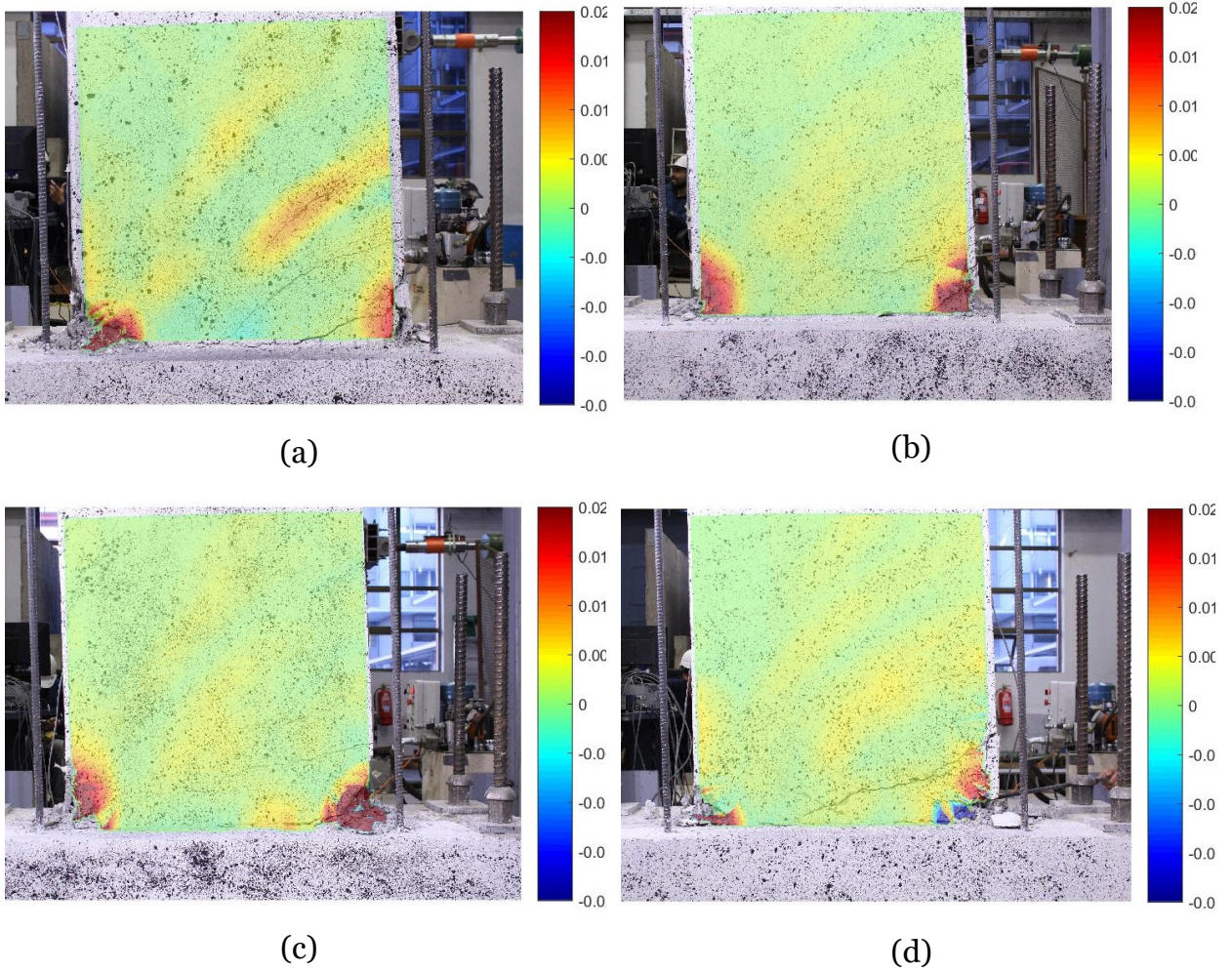


Figura 0.24: Deformación ε_{xx} -3.2% M1: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.

- Muro 2

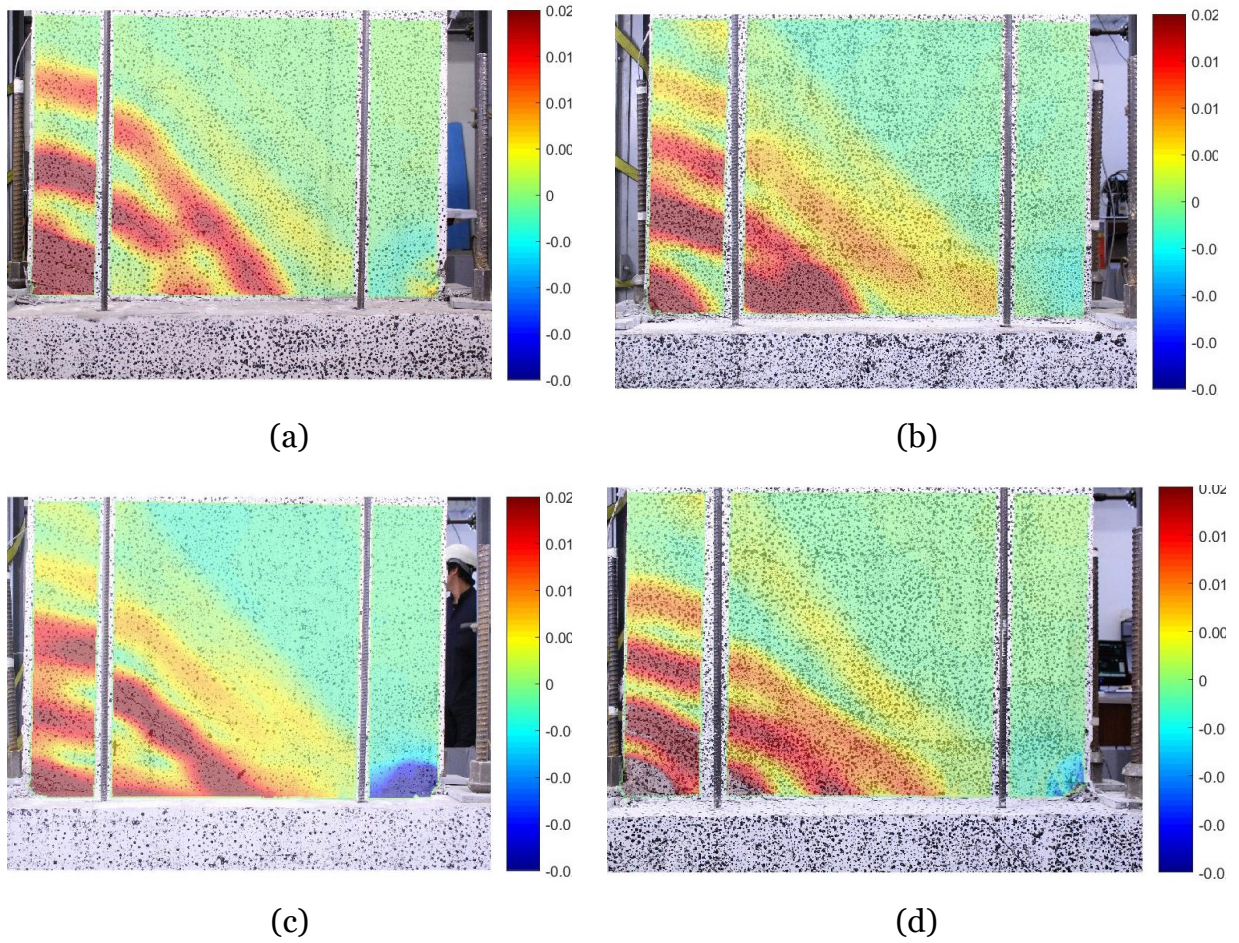


Figura 0.25: Deformación ε_{yy} 2% M2: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.

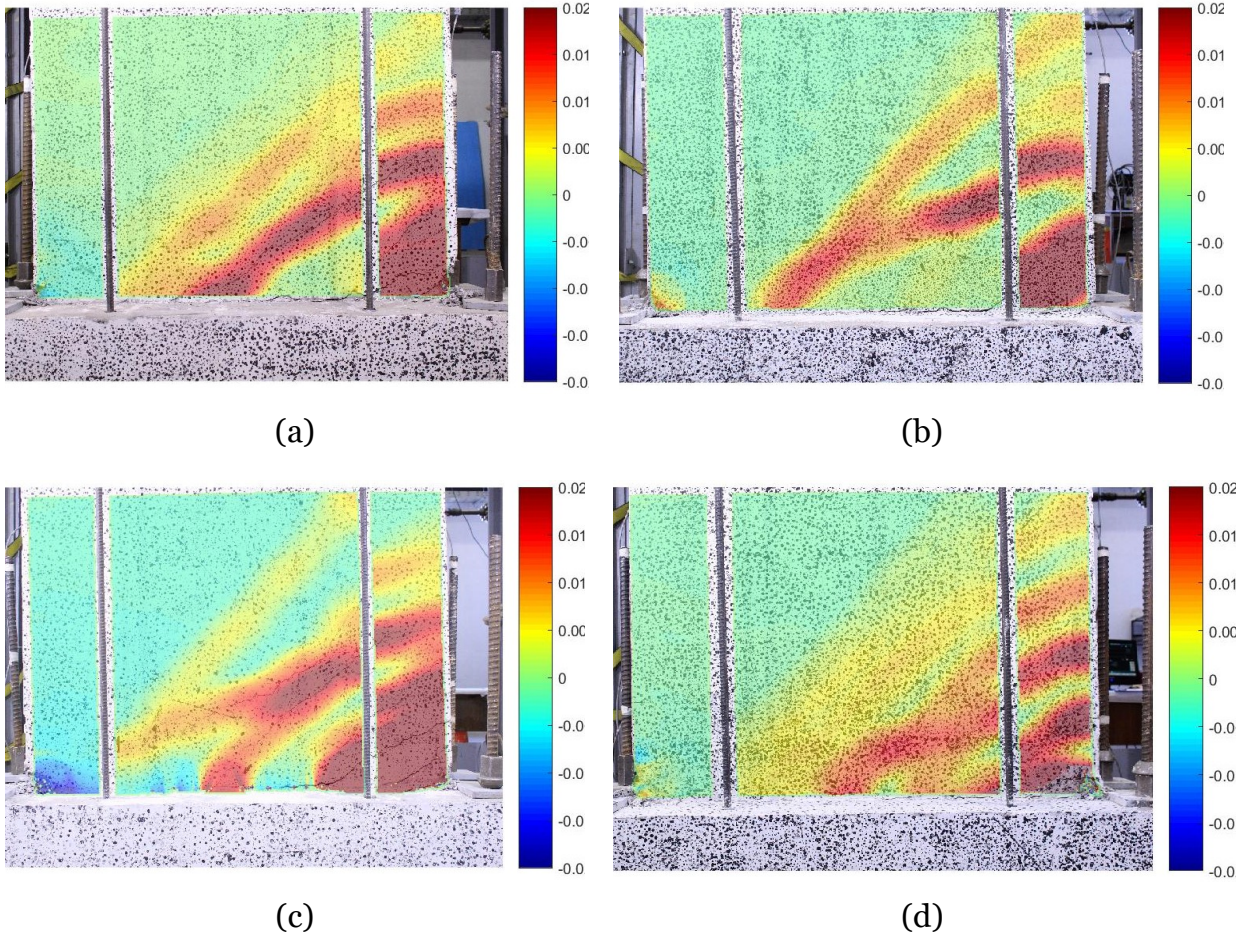


Figura 0.26: Deformación ε_{yy} -2% M2: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.

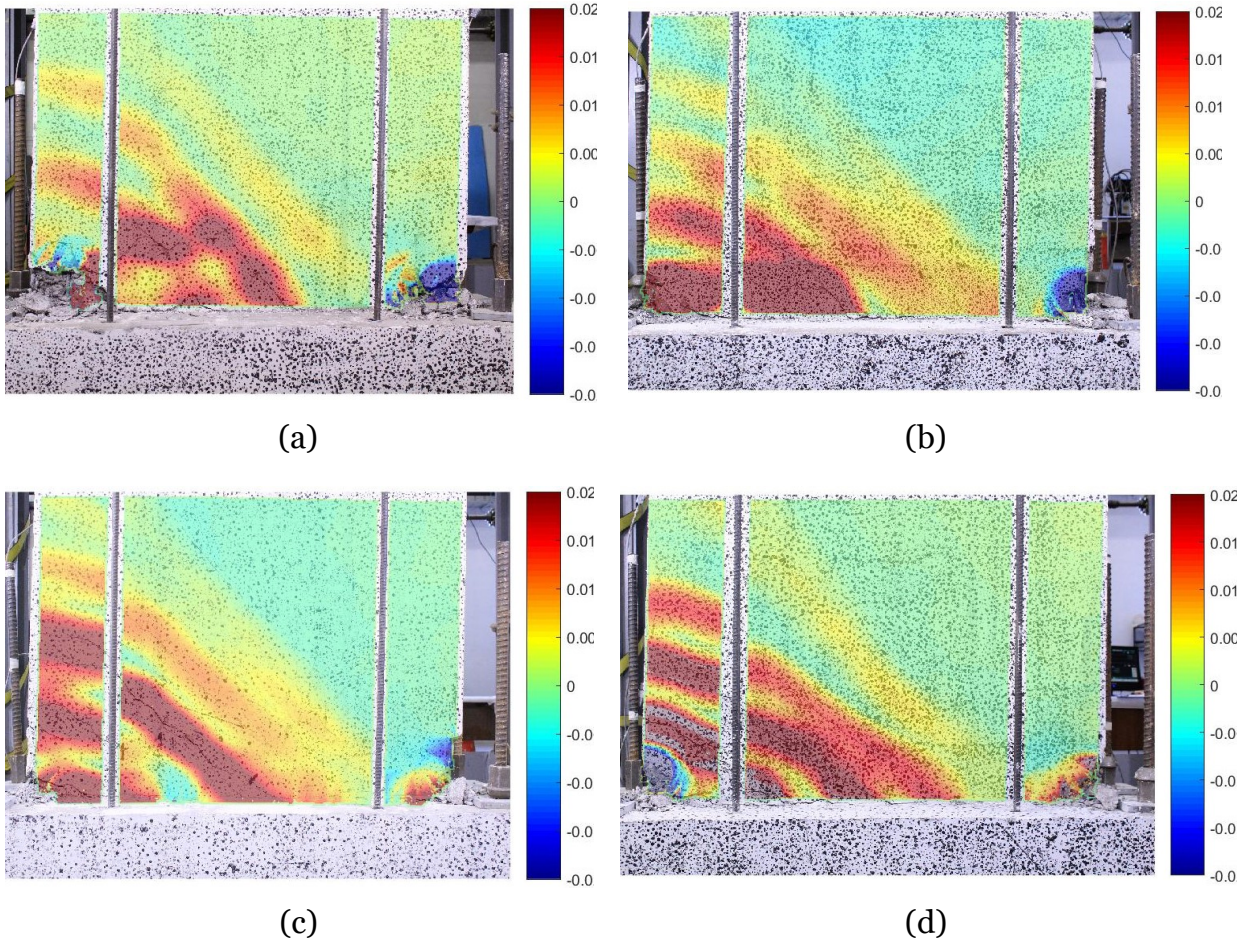


Figura 0.27: Deformación ε_{yy} 2.5% M2: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.

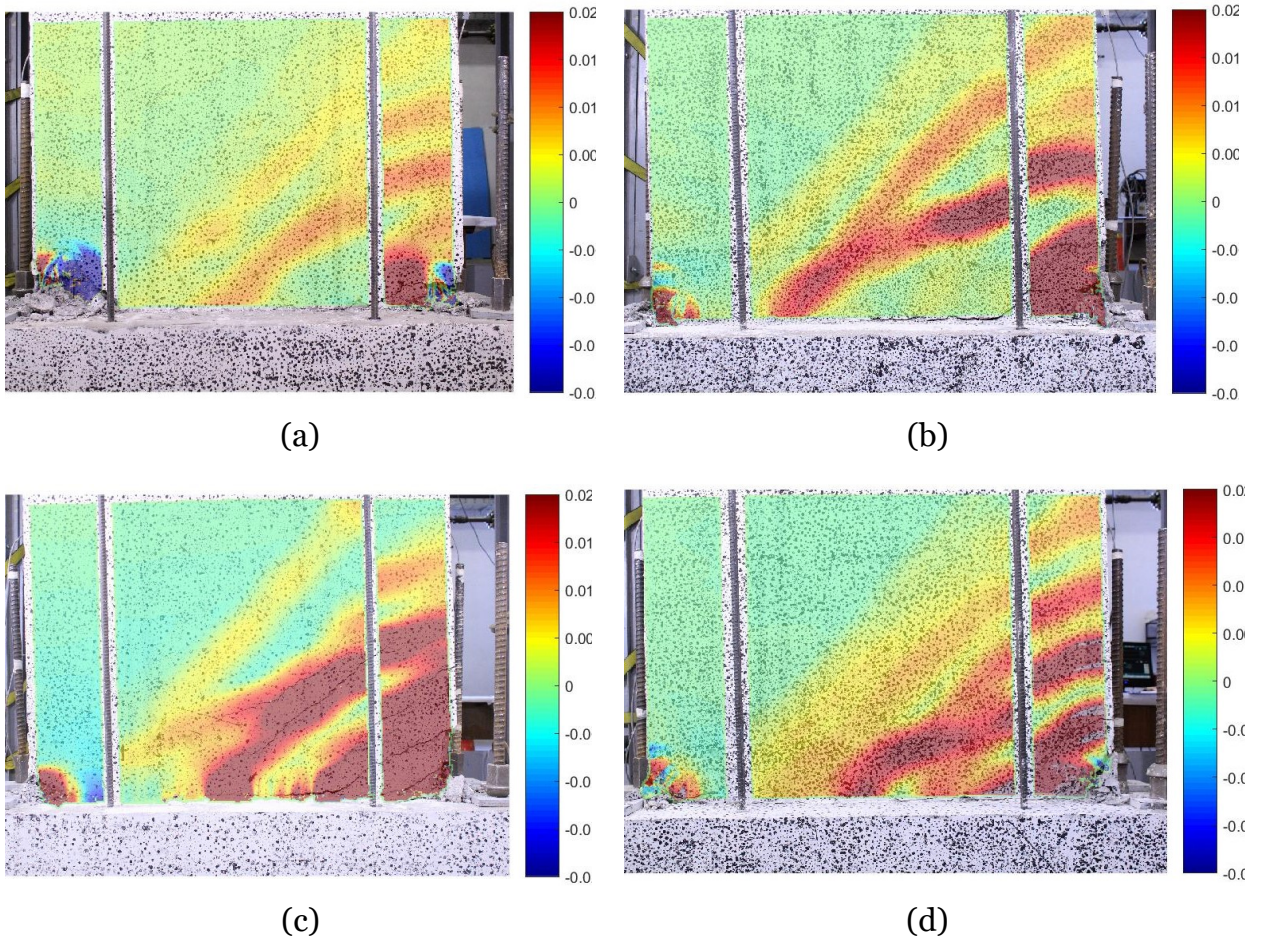


Figura 0.28: Deformación ε_{yy} -2.5% M2: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.

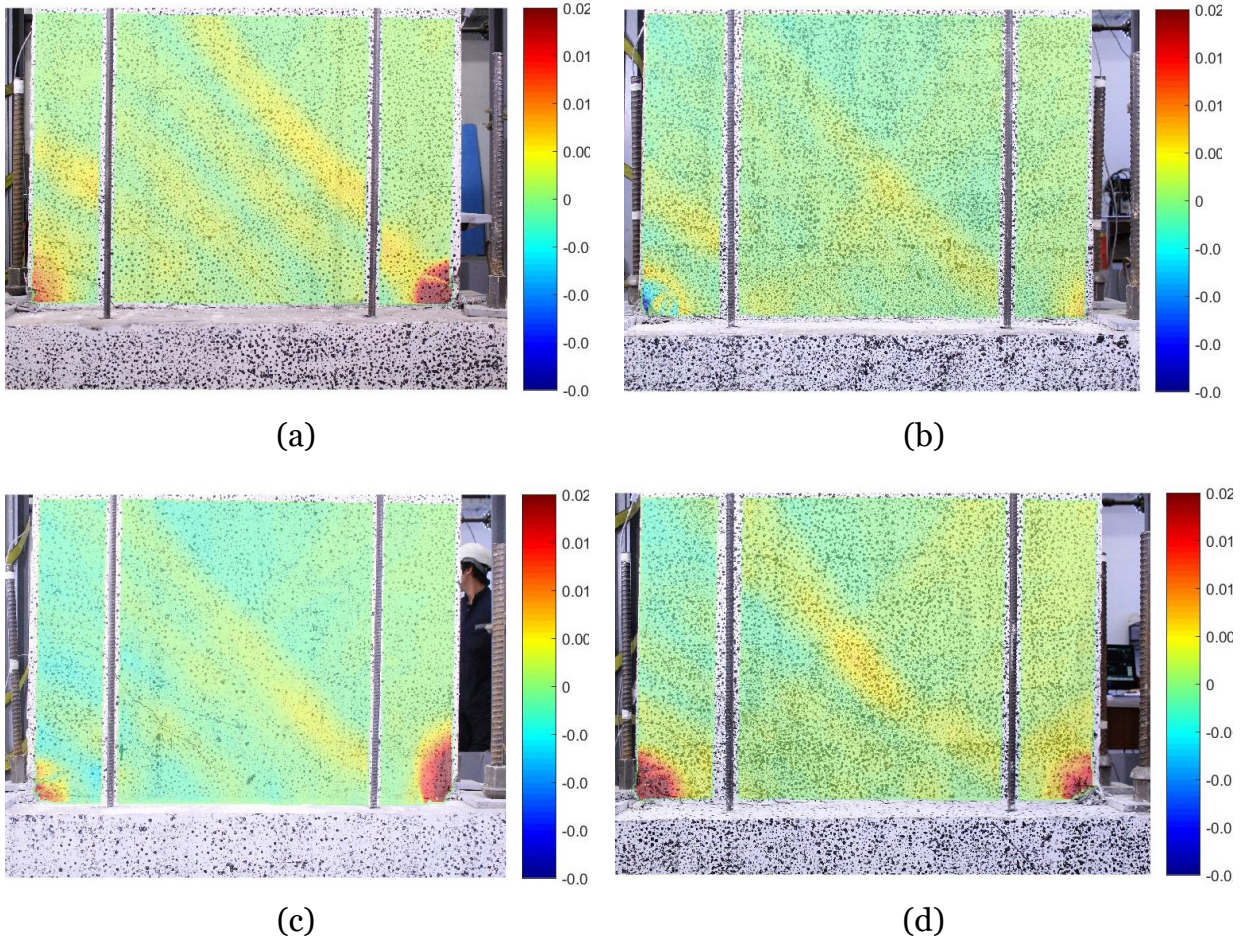


Figura 0.29: Deformación ε_{xx} 2% M2: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.

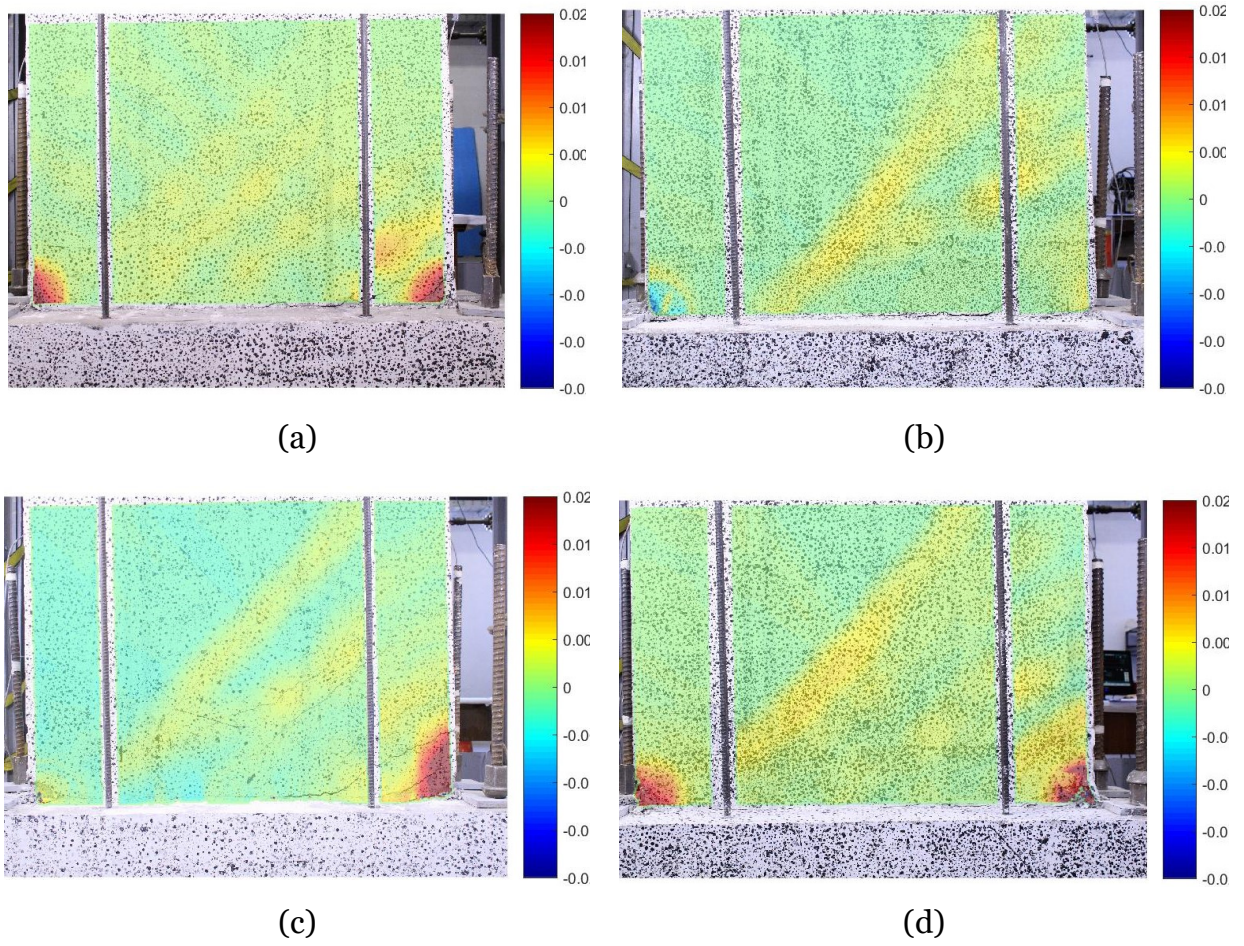


Figura 0.30: Deformación ε_{xx} -2% M2: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.

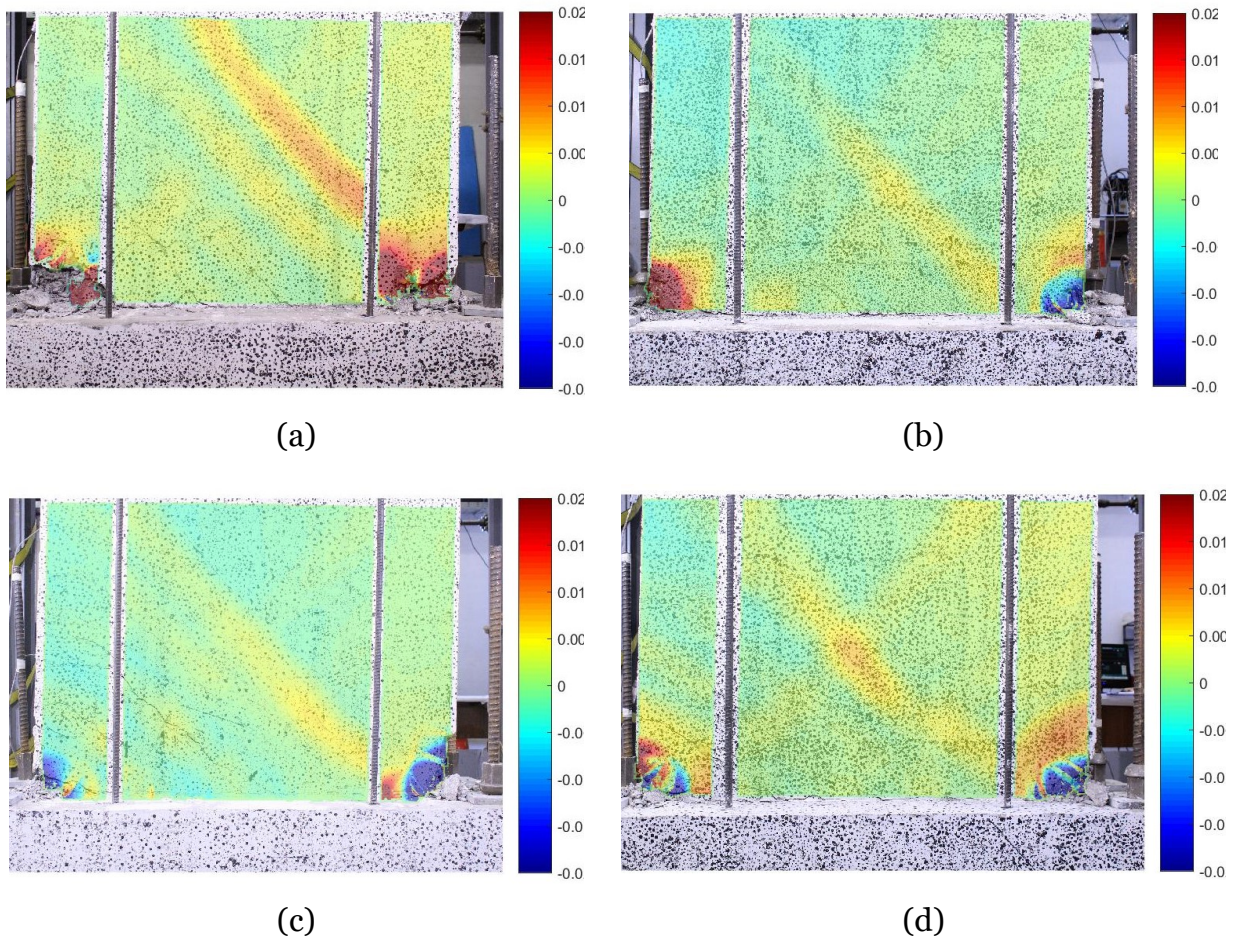
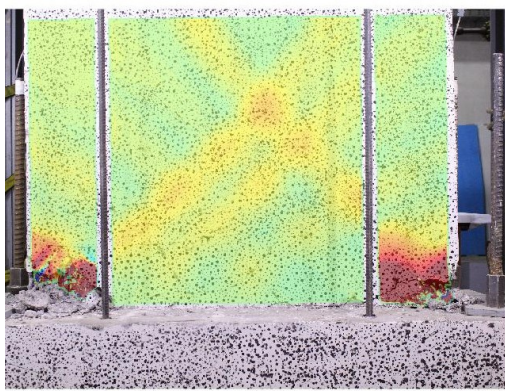
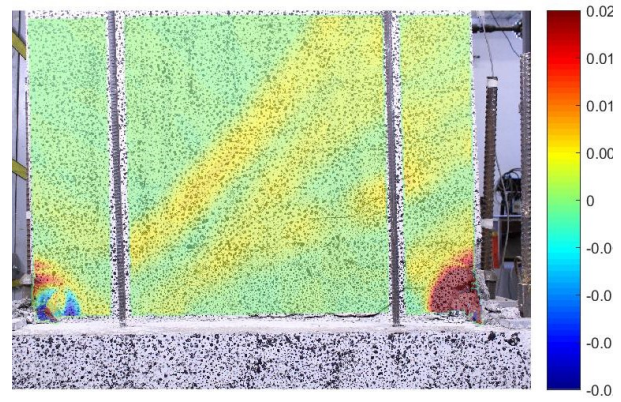


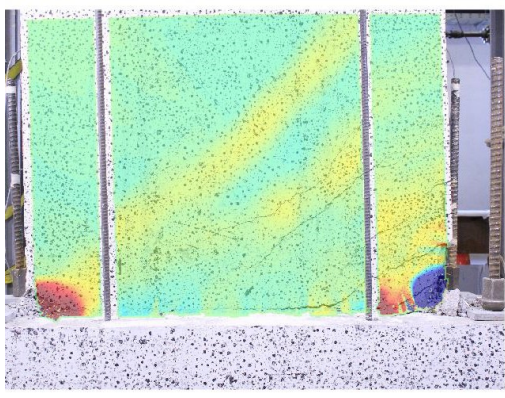
Figura 0.31: Deformación ε_{xx} 2.5% M2: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.



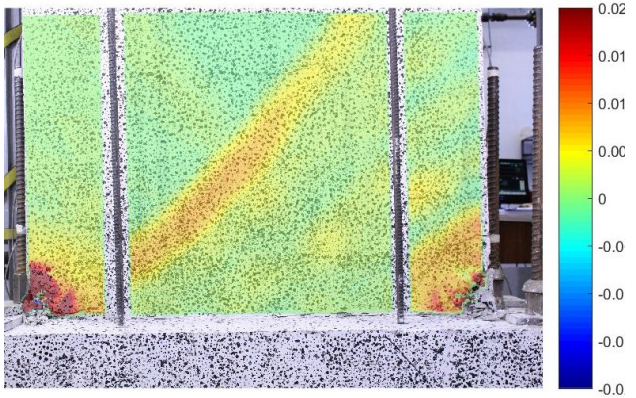
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 0.32: Deformación ε_{xx} -2.5% M2: (a)FPA; (b)FPB; (c)MEA; (d)MEB.