



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

**ESTUDIO EXPERIMENTAL-TEÓRICO DE MUROS DE HORMIGÓN ARMADO CON
DISCONTINUIDAD CENTRAL EN LA BASE E INFLUENCIA DE LA PRESENCIA DE LOSAS**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN
INGENIERÍA SÍSMICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

GONZALO ISIDORO MUÑOZ ARRIAGADA

PROFESOR GUÍA:

LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

FABIÁN ROJAS BARRALES

RICARDO HERRERA MARDONES

MATIAS HUBE GINESTAR

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL Y
GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN EN
INGENIERÍA SÍSMICA**

POR: GONZALO ISIDORO MUÑOZ
ARRIAGADA

FECHA: 05 DE OCTUBRE DE 2017

PROFESOR GUÍA: LEONARDO MASSONE
SANCHEZ.

**ESTUDIO EXPERIMENTAL-TEÓRICO DE MUROS DE HORMIGÓN ARMADO CON
DISCONTINUIDAD CENTRAL EN LA BASE E INFLUENCIA DE LA PRESENCIA DE LOSAS**

De acuerdo a los daños observados por el terremoto del 27 de Febrero de 2010 en Chile sobre muros de hormigón armado y el común requerimiento arquitectónico de disponer de discontinuidades sobre los mismos en los primeros pisos y/o primeros subterráneos se realiza el presente estudio. El objetivo es entender el comportamiento de un muro bajo la influencia de una abertura central en la base, y como cambia esa respuesta al agregar elementos en el muro (particularmente losas en la zona de la discontinuidad). Lo anterior es llevado a cabo a través de dos grandes enfoques: el ensayo de cuatro probetas de hormigón armado representativas del caso anterior, y la modelación en elementos finitos de los mismos, además de una extensión a través de un análisis paramétrico.

Los muros ensayados tienen 2.65 [m] de alto, 0.9 [m] de largo y 0.15 [m] de espesor. Los primeros tres no tienen losas y se diferencian por las dimensiones de su abertura, mientras que el cuarto tiene las mismas dimensiones (tanto del muro como de la abertura) que el tercer muro, pero consta con la presencia de dos losas en la zona de discontinuidad. El ensayo consta de una aplicación de un desplazamiento pseudo estático controlado a 2.8 [m] desde la base del muro bajo una carga axial controlada y constante de 400 [kN] (cercano al 7% de la capacidad a compresión de la sección entera). El muro se encuentra anclado a la losa de reacción y es sometido a tres ciclos de desplazamiento por cada nivel de deriva. Los materiales usados son comunes en el país (hormigón H30 y acero A63-42H). La instrumentación usada fueron strain gages en las barras de acero, LVDT's sobre una cara del muro y capturando el comportamiento global de éste, y una grilla de fotogrametría para realizar un análisis de correlación de imágenes digitales (DIC).

Los resultados muestran que la presencia de las aberturas no genera cambios ni en la rigidez ni en la resistencia de los muros, pero sí en su capacidad de deformación. De acuerdo a los ensayos y literatura previa, el largo de la abertura es la variable más importante en el impacto global. Mientras que el muro base y el abertura pequeña llegan a 3.9% y 3.7% de deriva respectivamente, los muros con abertura más ancha llegan sólo a 2.6%, y el muro con losa se posiciona como un caso intermedio con un 3.2%. En todos los casos con aberturas se genera una grieta diagonal desde la abertura a la esquina del muro, generando además pandeo de las barras de refuerzo de la abertura. Al estudiar las deformaciones unitarias verticales en la sección se muestra un cambio de signo en la pendiente, acusando la presencia de un puntal a compresión o una doble curvatura. Al realizar modelos a flexión para relaciones de aspecto mayores, se encuentra que el modelo es aceptable para captar la degradación del muro.

DEDICATORIA

A mi mamá y a mi papá, quienes cada uno por su lado,
han dado lo mejor de ellos para que sea la mejor versión de mí mismo.

AGRADECIMIENTOS

Sé que hice bien las cosas para llegar hasta acá porque al pensar en mi vida universitaria tengo cientos de gratos recuerdos que me hacen sentir agradecido de la gente con la cual he compartido durante estos 8 años y medio. Primero que todo, darle las gracias a mi familia, la cual a pesar de tener personalidades bastante diferentes, tiene la capacidad de dejar eso de lado y estar unida en los momentos que importan. Usando la jerga de mi carrera, admiro la resiliencia de mi mamá y la resistencia de mi papá, ison unos grandes!

A mi profesor guía, Leonardo Massone, por estar siempre dispuesto a solucionar cualquier problema, responder cualquier pregunta (a pesar de preguntarlas mil veces de manera distinta para que no notara que no entendí a la primera) y estar allí para cualquier cosa. A pesar de estar terminando la tesis en harto tiempo más del previsto, le agradezco que hasta el día de hoy no sea agotador seguir trabajando en ella. Menos mal vio desde un comienzo que su proyecto no podía ser realizado por alumnos-islas y nos obligó a trabajar como un equipo. Eso ayudó a que la parte experimental fuese muy grata. Gracias Jorge por estar copla a copla, gato a gato y muro a muro en el laboratorio! También feliz de haber estado con los demás del team muros: Aru, Nacho, el Abuelo y dos grandes de los experimentos: Víctor y Don Piter. A las generaciones de peceras que vi a través de mi puesto y los suza con apuesta incluida, aunque la Concacaf nunca las pagaba (cof cof Nacho Cartes y Sáez).

Entre taca-tacas, pool, cervezas, terrazas y muchas risas plan común y los primeros años de especialidad pasaron en un parpadeo. Gracias al Pelao Max, Julito, Nacho, Gerson, el Chato, Camilito, el chico José, Edmundo y aún más atrás a Pedro y mis padrinos de primer año por darnos una guía para pasarlo bien y no morir en el intento. A Inducción y las tardes de risas con Ricardo, mamá, Andresín, Pablo, Juampi, Pedro, Súper y miles más. A la feria empresarial y todas las personas que pude conocer y compartir (grande Lorca!). Ya en civil al Nico Vásquez, sir Cono, Herni y el Willy, y a los parámetros para ver qué tan mal estábamos en topo. Al team topo (Isa y Jote y todos los demás), y las ganas de reírnos y pasarlo bien durante los cursos y la práctica. A los que fui conociendo al final de mi carrera, gracias Dani por los buenos momentos, las risas y las copuchas entre el estudio. Finalmente, a los dos con los cuales hemos sufrido parejo (?) estos años: Herni y Ary, siempre recordaré las conversaciones profundas y como cambiar el paradigma de la ingeniería entre cerveza y cerveza (y cómo modelar obreros en el SAP). En general, por lo comido, lo tomado, lo bailado y lo conversado. También agradezco a los amigos que hice en el Liceo Ruiz Tagle, que a pesar de alejarme por un tiempo sé que puedo contar con ellos, gracias Celia y Chico por todo (ya estoy terminando esto así que deberían empezar a aparecer más triunfos en la liga!).

Y quería finalizar dándole gracias a mi pareja de estos últimos 7 años: estoy tan feliz de haberme pillado contigo, Fran. No me imagino llegar a este momento sin tu apoyo. Me siento agradecido de seguir creciendo contigo, seguir viviendo contigo y de seguir aprendiendo contigo. Gracias además por aguantarme durante la tesis, sólo por ese tema ya te mereces el cielo. Gracias también por hacerme ver la vida de otra manera, e introducirme a la Linda!

Gracias a todas con loas que pude compartir aunque sea unas palabras, ni se imaginan todo lo aprendido de ustedes, y espero que algo de mí haya quedado en ustedes también, loh viloh!

TABLA DE CONTENIDO

Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Índice de Tablas	viii
Índice de Figuras.....	ix
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes generales	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivos Generales	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Metodología	3
1.3.1 Etapa Experimental	3
1.3.2 Etapa de Modelación	4
1.4 Organización de la tesis.....	4
2. Revisión Bibliográfica.....	6
2.1 Introducción	6
2.2 Estudios experimentales previos	6
2.3 Uso de fotogrametría en ingeniería civil	12
2.4 Estudios analíticos previos.....	14
3. Antecedentes para el análisis por fotogrametría y la modelación numérica.....	17
3.1 Introducción	17
3.2 Fotogrametría.....	17
3.3 Modelación numérica.....	21
3.3.1 SAFE Toolbox	21
3.3.2 Leyes constitutivas.....	21

3.3.2.1	Hormigón	22
3.3.2.2	Acero.....	25
4.	Descripción del montaje experimental	30
4.1	Introducción	30
4.2	Descripción de las probetas.....	30
4.2.1	Geometría	30
4.2.2	Diseño y detallamiento	32
4.2.3	Resistencia de los materiales.....	37
4.3	Instrumentalización y adquisición de datos	38
4.3.1	Strain gages.....	38
4.3.2	LVDT's	39
4.3.3	Fotogrametría	40
4.4	Montaje.....	41
4.5	Procedimiento de ensayo	43
5.	Resultados Experimentales	44
5.1	Introducción	44
5.2	Respuesta global y comportamiento observado	44
5.2.1	MR1	47
5.2.2	MR2.....	50
5.2.3	MR3.....	53
5.2.4	MR4.....	56
5.2.5	Comparación entre ensayos	59
5.3	Fotogrametría.....	64
5.3.1	Perfil de deformación unitaria vertical en la altura	66
5.3.2	Perfil de deformación unitaria vertical en la sección.....	71

5.3.3	Deformaciones principales en el muro	79
5.3.4	Comparación respecto a muro base y resumen de resultados.....	82
6.	Modelación y Resultados Analíticos.....	86
6.1	Introducción	86
6.2	Modelamiento.....	86
6.3	Respuesta global: relación carga desplazamiento	91
6.4	Estudio de deformaciones unitarias	95
6.4.1	Perfil de deformación unitaria vertical en la altura	95
6.4.2	Perfil de deformación unitaria vertical en la sección.....	98
6.4.3	Deformación unitaria vertical en el muro	103
6.4.4	Estudio de deformaciones a compresión	104
6.5	Análisis paramétrico.....	106
6.5.1	Modelos a flexión.....	106
6.6	Estudio analítico.....	119
7.	Conclusiones.....	120
7.1	Resumen	120
7.2	Conclusiones.....	121
	Bibliografía.....	124
	Anexos	127
	Anexo 1: Planos complementarios.....	127
	Anexo 2: Curvas tensión deformación de barras de acero.....	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Resultados de los ensayos de las probetas de hormigón.....	37
Tabla 4-2: Resultados de los ensayos de las barras de acero.	37
Tabla 4-3: Datos de captura cámara EOS Rebel T3i.	40
Tabla 4-4: Datos de captura cámara EOS Rebel T5.	40
Tabla 4-5: Desplazamientos inducidos para cada deriva de techo.	43
Tabla 5-1: Derivas que marcan los inicios de degradación de capacidad.	60
Tabla 5-2: Parámetros para el análisis DIC.....	64
Tabla 5-3: Relación de milímetros y píxeles en fotos analizadas.....	64
Tabla 5-4: Errores de deformación por caso de análisis.	65
Tabla 5-5: Desplazamientos reales alcanzados en los ensayos.	66
Tabla 6-1: Elementos y nodos usados para modelación.....	86
Tabla 6-2: Materiales usados en modelación.	87
Tabla 6-3: Cuantías por zona modelada.	90
Tabla 6-4: Derivas de falla de muros modelados.	95
Tabla 6-5: Factor de utilización de muros ensayados.	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Daño observado en discontinuidades. A) Elevación, B) C) D) Daño mostrado en A (Massone & Rojas, 2012)	1
Figura 1.2: Diseños de muro con aberturas: izquierda diseño que no considera la abertura, derecha diseño que si considera la abertura.	2
Figura 2.1: Elevación y corte de RW3-O (Taylor et al., 1998).....	7
Figura 2.2: Histéresis de RW3-O (Taylor et al., 1998) y RW2 (Thomsen & Wallace, 1995).	8
Figura 2.3: Perfil de deformaciones verticales en la sección (ambas direcciones) (Taylor et al., 1998).....	8
Figura 2.4: Elevaciones de muros banderas (Díaz, 2016).....	9
Figura 2.5: Histéresis muros bandera (Díaz, 2016).	10
Figura 2.6: Deformaciones verticales en extremos de los muros 1 y 2 (Díaz, 2016).	11
Figura 2.7: Deformaciones verticales muro 1 a). Sentido positivo b). Sentido negativo (Manríquez, 2016).....	13
Figura 2.8: Deformaciones principales Muro 1 (Manríquez, 2016).....	13
Figura 2.9: Curvatura en la altura. Cuantía 2.5% y refuerzo hasta el piso 2 (Ahumada, 2014).	14
Figura 2.10: Curvatura en la altura. Cuantía 2.5% y refuerzo hasta el piso 9 (Ahumada, 2014).	15
Figura 2.11: Curvatura en la altura. Cuantía 0.3125% y refuerzo hasta el piso 4 (Morales, 2015).....	15
Figura 2.12: Factor de amplificación propuesto por Morales (Morales, 2015).	16
Figura 3.1: Pestaña Ncorr con imágenes cargadas.	18
Figura 3.2: ROI definida para el análisis.	18
Figura 3.3: Parámetros para el análisis DIC.....	19
Figura 3.4: Imagen con regla referencial.....	20
Figura 3.5: Parámetros para análisis de deformación.....	20
Figura 3.6: Tensiones reales en la sección producto del agrietamiento (Rojas, 2012).	21
Figura 3.7: Curva tensión deformación hormigón a compresión (Peña, 2016).....	22

Figura 3.8: Curva tensión deformación hormigón a tracción (Peña, 2016).	23
Figura 3.9: Curva tensión deformación para el comportamiento cíclico del hormigón (Peña, 2016).	24
Figura 3.10: Curva tensión deformación acero (PEÑA, 2016).	27
Figura 3.11: Curva tensión deformación acero en tracción con pandeo incluido (Massone & Moroder, 2009).	28
Figura 3.12: Comportamiento cíclico acero con pandeo incluido (Massone & Moroder, 2009).	29
Figura 3.13: Modelación del pandeo (Massone & Moroder, 2009).	29
Figura 4.1: Dimensiones generales de las probetas.	31
Figura 4.2: Elevación y cortes armadura MR1.	33
Figura 4.3: Elevación y cortes armadura MR2.	34
Figura 4.4: Elevación y cortes armadura MR3.	35
Figura 4.5: Elevación y cortes armadura MR4.	36
Figura 4.6: Ubicación Strain gages.	38
Figura 4.7: Ubicación LVDT's en una de las caras de los muros-	39
Figura 4.8: Puntos para fotogrametría.	40
Figura 4.9: Montaje final.	42
Figura 4.10: Esquema del montaje (sin marco ni sistema de medición de datos).	43
Figura 4.11: Protocolo de carga.	43
Figura 5.1: Ubicación de LVDT's externos.	44
Figura 5.2: Componentes del desplazamiento total MR1.	45
Figura 5.3: Componentes del desplazamiento total MR4.	46
Figura 5.4: Componentes del desplazamiento total MRO.	46
Figura 5.5 Patrón de grietas (izquierda) y pandeo fuera del plano (derecha).	48
Figura 5.6: Pandeo fuera del plano ya ocurrida la falla a compresión.	48
Figura 5.7: Pandeo de la barra de refuerzo de abertura al fin del ensayo.	48

Figura 5.8: Falla a compresión que generó la pérdida de capacidad.....	49
Figura 5.9: Estado final del muro MR1 al final del ensayo.	49
Figura 5.10: Respuesta carga-desplazamiento MR1.	50
Figura 5.11: Grietas generadas en el extremo superior de la abertura.....	51
Figura 5.12: Desprendimiento de hormigón en elemento de borde.	51
Figura 5.13: Grieta de corte que generó la pérdida de capacidad.	52
Figura 5.14: Pandeo de la barra de refuerzo de abertura al fin del ensayo.....	52
Figura 5.15: Estado final del muro MR2 al final del ensayo (zoom a la derecha).....	52
Figura 5.16: Respuesta carga-desplazamiento MR2.	53
Figura 5.17: Grietas horizontales en el cambio de sección.....	54
Figura 5.18: Grieta vertical en el borde de la abertura.....	54
Figura 5.19: Pandeo de la barra de refuerzo de abertura al fin del ensayo.....	55
Figura 5.20: Estado final muro MR3 (izquierda). Grietas de corte generadas en las patas del muro (derecha).....	55
Figura 5.21: Respuesta carga-desplazamiento MR3.	56
Figura 5.22: Desprendimiento del hormigón (izquierda). Grieta en losa inferior (derecha)....	57
Figura 5.23: Pandeo de la barra de refuerzo de abertura al fin del ensayo.	57
Figura 5.24: Grieta de corte que ocasionó la falla (izquierda). Estado final muro MR4 (derecha).	58
Figura 5.25 Respuesta carga-desplazamiento MR4.	59
Figura 5.26: Respuesta carga desplazamiento de muros ensayados comparados con muro base.....	60
Figura 5.27: Grieta de corte, MR1 (antes y después).....	61
Figura 5.28: Grieta de corte, MR2.	62
Figura 5.29: Grieta de corte, MR3.	62
Figura 5.30: Grieta de corte, MR4.....	62
Figura 5.31: Ausencia de grietas de corte, MRO	63

Figura 5.32: Restricción al pandeo de la malla horizontal.....	63
Figura 5.33: Mapa de colores, error en deformaciones por fotogrametría (de izquierda a derecha: ϵ_{xx} , ϵ_{xy} y ϵ_{yy}).....	65
Figura 5.34: Ubicación de ejes: corte (izq) y elevación (der).	66
Figura 5.35: Deformación vertical: eje 3 (izq) y eje 4 (der) MR1.	67
Figura 5.36: Deformación vertical: eje 3 (izq) y eje 4 (der) MR2.	69
Figura 5.37: Deformación vertical: eje 3 (izq) y eje 4 (der) MR3.....	70
Figura 5.38: Deformación vertical eje 4 MR4.	71
Figura 5.39: Secciones de interés.	72
Figura 5.40: Deformación vertical capa 1 MR1.	73
Figura 5.41: Deformación vertical capa 3 MR1.	73
Figura 5.42: Deformación vertical capa 7 MR1.	74
Figura 5.43: Deformación vertical capa 1 MR2.	74
Figura 5.44: Deformación vertical capa 4 MR2.	75
Figura 5.45: Deformación vertical capa 9 MR2.....	75
Figura 5.46: Deformación vertical capa 1 MR3.	76
Figura 5.47: Deformación vertical capa 5 MR3.....	76
Figura 5.48: Deformación vertical capa 9 MR3.	77
Figura 5.49: Deformación vertical capa 1 MR4: cámara global (izquierda) y local (derecha). .	77
Figura 5.50: Deformación vertical capa 2 MR4.	78
Figura 5.51: Deformación vertical capa 10 MR4.	78
Figura 5.52: Deformación vertical (fila superior) y principal mayor (fila inferior) MR1.	79
Figura 5.53: Deformación principal mayor MR2.	80
Figura 5.54: Deformación principal mayor MR3.	81
Figura 5.55 Deformación principal mayor MR4 (cámara local).	81
Figura 5.56: Deformación vertical: eje 3 (izq) y eje 4 (der) MR0.	82

Figura 5.57: Deformación vertical capa 1 MR0.	83
Figura 5.58: Deformación vertical capa 2 MR0.	83
Figura 5.59: Deformación vertical capa 4 MR0.	84
Figura 5.60: Deformación vertical capa 10 MR0.	84
Figura 5.61: Deformación principal mayor MR0.	85
Figura 6.1: Bosquejo de elementos finitos. De izquierda a derecha: MR1, MR2, MR3, MR4 y ambas losas de MR4.....	87
Figura 6.2: Hormigones usados en modelación.....	88
Figura 6.3: Curvas mono tónicas del acero (ensayo y modelo).....	88
Figura 6.4: Curvas cíclicas de aceros modelados (barras phi 10 a la izquierda y phi 16 a la derecha).....	89
Figura 6.5: Zonas con diferentes cuantías. De izquierda a derecha: MR1, MR2, MR3, MR4 y losas MR4.....	89
Figura 6.6: Relación carga desplazamiento MR1.	91
Figura 6.7: Relación carga desplazamiento MR2.	92
Figura 6.8: Relación carga desplazamiento MR3.....	93
Figura 6.9: Relación carga desplazamiento MR4.....	94
Figura 6.10: Comparación de deformación vertical en la altura para ejes 3 y 4, MR1.	96
Figura 6.11: Comparación de deformación vertical en la altura para ejes 3 y 4, MR2.	96
Figura 6.12: Comparación de deformación vertical en la altura para ejes 3 y 4, MR3.	97
Figura 6.13: Comparación de deformación vertical en la altura para ejes 3 y 4, MR4.	97
Figura 6.14: Primeras 10 capas para todos los muros, tanto fotogrametría como modelación.	98
Figura 6.15: Deformaciones en la sección (izq, fotogrametría, der, modelación), MR1.....	99
Figura 6.16: Deformaciones en la sección (izq, fotogrametría, der, modelación), MR2.	100
Figura 6.17: Deformaciones en la sección (izq, fotogrametría, der, modelación), MR3.	101
Figura 6.18: Deformaciones en la sección (izq, fotogrametría, der, modelación), MR4.....	102

Figura 6.19: Distribución de deformaciones principales mayores sobre los muros.....	103
Figura 6.20: Zona de interés de deformaciones a compresión.	104
Figura 6.21: Deformación a compresión zona de interés.....	105
Figura 6.22: Histéresis modelos completo y flexión, MR1.....	107
Figura 6.23: Deformaciones verticales (izq modelo completo, der modelo flexión), MR1.	108
Figura 6.24: Histéresis modelos completo y flexión, MR2.	109
Figura 6.25: Histéresis modelos completo y flexión, MR3.	110
Figura 6.26: Deformaciones verticales (izq modelo completo, der modelo flexión), MR3.....	110
Figura 6.27: Histéresis modelos completo y flexión, MR4.	111
Figura 6.28: Capas que indican doble curvatura para MR2 y MR3, modelos a flexión.	112
Figura 6.29: Profundidad de línea neutra.	112
Figura 6.30: Influencia de confinar la zona de comportamiento inelástico (para MR2).....	113
Figura 6.31: Distribución de deformaciones verticales: izquierda muro MR2 base, derecha muro MR2 con primer piso confinado.	114
Figura 6.32: (Izq) Modelo generado. (Der) Histéresis.....	114
Figura 6.33: Histéresis MRO con mayor carga axial.	115
Figura 6.34: Histéresis MR2 con mayor carga axial.	116
Figura 6.35: Muros más esbeltos (de izquierda a derecha: rectangular completo, rectangular a flexión, con abertura completo y con abertura a flexión).	117
Figura 6.36: Histéresis modelos rectangulares.	118
Figura 6.37: Histéresis modelos con abertura equivalente a la de MR2.	118
Figura 0.1: Planos viga de transferencia. (arriba vista longitudinal. Abajo vista transversal y detalle de enfierradura).	127
Figura 0.2: Planos fundación.....	128
Figura 0.3: Ensayo barras de 6 [mm].....	129
Figura 0.4: Ensayo barras de 8 [mm].....	129
Figura 0.5 Ensayo de barras de 10 [mm].	129

Figura 0.6: Ensayo barras de 16 [mm].130

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

El pasado terremoto Mw 8.8 ocurrido en la zona centro de Chile el 27 de Febrero de 2010 generó daño en todo tipo de estructuras. En particular para las de hormigón armado, muchos de los elementos sismorresistentes dañados correspondieron a muros estructurales, dado que según la usanza nacional son la primera opción para resistir las cargas sísmicas en edificios esbeltos destinados a oficinas o departamentos. El daño visto fue aplastamiento del hormigón, pandeo local y global de las barras longitudinales e incluso fractura de las barras longitudinales. Estos muros se encuentran de las más variadas formas y dimensiones, donde los requerimientos arquitectónicos generan distintas geometrías, cambios de sección, cambios de espesor y diversos tipos de discontinuidades a lo largo y alto del muro. Sin embargo, dado que por lo general a partir de cierto piso las plantas de los edificios son idénticas, las discontinuidades se centran en los primeros pisos y en los primeros subterráneos, al igual que donde se espera el mayor daño generado por las acciones sísmicas (ver Figura 1.1).

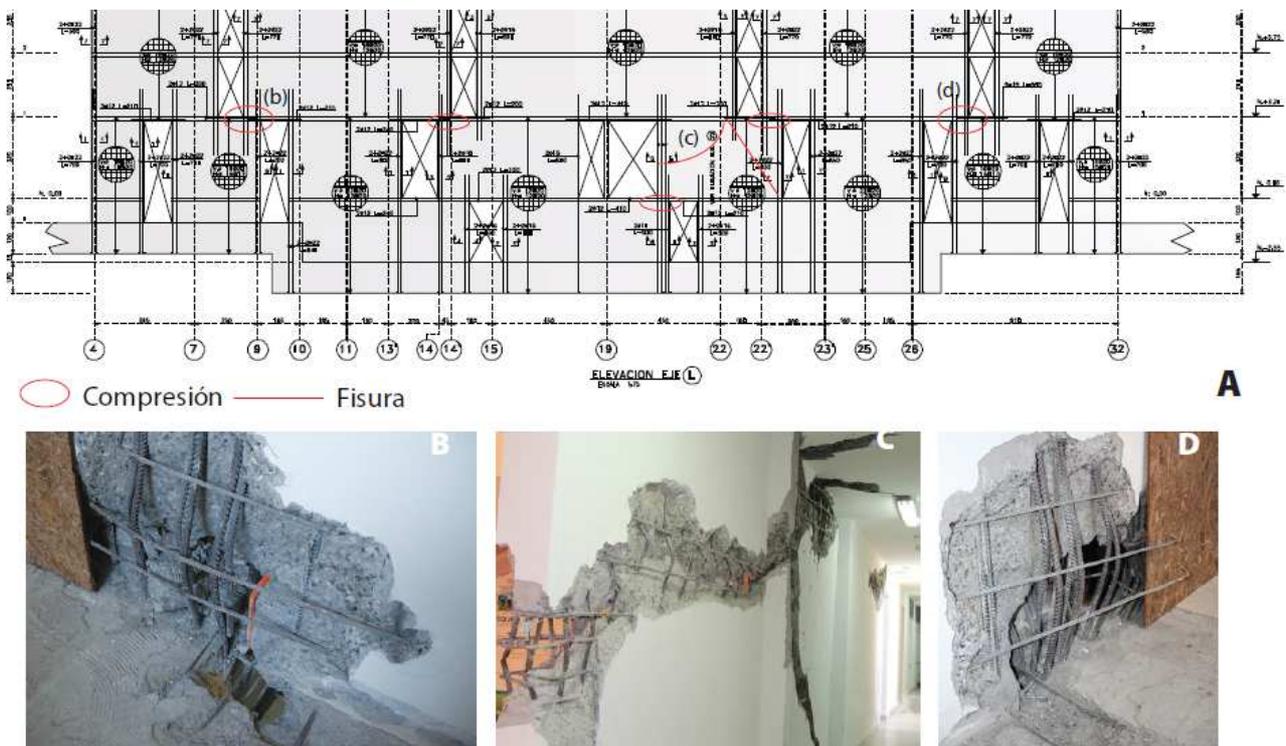


FIGURA 1.1: DAÑO OBSERVADO EN DISCONTINUIDADES. A) ELEVACIÓN, B) C) D) DAÑO MOSTRADO EN A (Massone & Rojas, 2012)

Considerando el diseño de muros de hormigón armado, generalmente se usa un modelo a flexión simple para determinar la armadura longitudinal necesaria, y se usa el diseño basado en desplazamientos -que se basa en un modelo de rótula plástica en la base que liga un desplazamiento de techo con la máxima deformación a compresión a la cual estará sometido el muro- para determinar el detallamiento de la armadura de borde. Sin embargo en dichos modelos queda fuera la influencia de los esfuerzos de corte para el primer caso, y no se

considera si los supuestos del modelo basado en desplazamiento son válidos para los muros a diseñar. En particular con respecto al último punto, el diseño basado en desplazamiento se basa en un muro rectangular, sin ningún tipo de abertura o discontinuidad. En el caso de la normativa ACI 318, la versión del año 2014 considera restricciones sobre la capacidad resistente al corte del muro y las secciones que puede generar una abertura, pero no menciona alguna influencia sobre el detallamiento o capacidad de deformación. Por lo general, si la abertura es relativamente pequeña (a criterio del ingeniero) se desprecia la presencia de la abertura y se usa un diagrama de interacción para diseñar a flexocompresión. Si la abertura es de una dimensión mayor, se obtienen los valores en las secciones basales del muro a través de un programa de elementos finitos y se diseña cada sección por separado. Dada la geometría del muro, por lo general lo anterior se traduce en que el momento que baja por el muro se traduce un par tracción-compresión que toma cada sección del muro (ver Figura 1.2). Así, la cantidad de armadura quedaría controlada por la tracción de una de las secciones, similar al caso de considerar el muro como sección completa y concentrar la armadura en el elemento de borde. Sin embargo, si se considera la segunda opción el diseño de la sección de muro pasaría a ser un diseño de columna, cambiando las disposiciones de armadura y detallamiento.

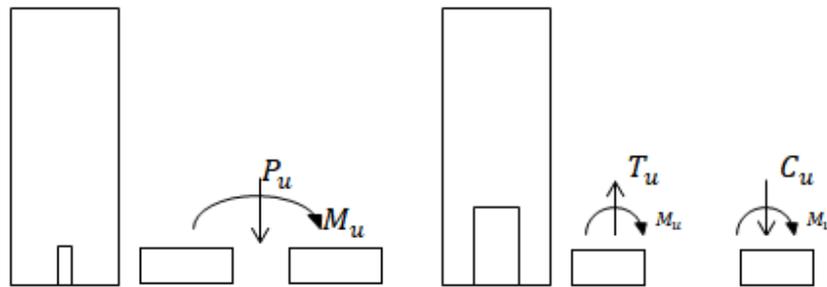


FIGURA 1.2: DISEÑOS DE MURO CON ABERTURAS: IZQUIERDA DISEÑO QUE NO CONSIDERA LA ABERTURA, DERECHA DISEÑO QUE SI CONSIDERA LA ABERTURA.

A pesar de su frecuente uso, existe poco material disponible de ensayos de muros de hormigón armado, y la cantidad se reduce aún más cuando se consideran distintos tipos de discontinuidades. Además, debido a los alcances de los laboratorios, los ensayos por lo general consideran a un muro aislado (o con sección de “T” o “L”), pero no existe mucha información al considerar la interacción de un muro con otro elemento estructural (ya sea otro muro, vigas y/o losas), a pesar de que esa es la manera real en la cual están inmersos los muros de hormigón armado en edificios.

El presente trabajo se sitúa en el contexto mencionado para realizar el estudio de muros esbeltos de hormigón armado con discontinuidades tipo puertas centradas en la base del muro. La primera parte se centra en el ensayo de cuatro probetas a escala en las cuales se variará como parámetro las dimensiones de la abertura, además de considerar en el cuarto caso la presencia de losas en las zonas en las cuales se esperan deformaciones inelásticas. La segunda parte considera la modelación de dichas probetas, comparar resultados y poder dar recomendaciones de diseño para los casos estudiados.

El estudio analítico del comportamiento de muros con discontinuidades en la base tipo puerta fue iniciado por Morales (Morales, 2015), el cual entregó fórmulas que permiten obtener las

deformaciones máximas por compresión considerando las aberturas dentro de las variables en un rango de aberturas mayor a las que se ensayarán.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVOS GENERALES

- Determinar la influencia de aberturas centrales en la base de muros esbeltos de hormigón armado para poder dar recomendaciones de diseño, considerando tanto su efecto global (ductilidad, rigidez, resistencia, longitud de rótula plástica, modo de falla) como en las cercanías de la discontinuidad (amplificaciones de deformaciones unitarias a tracción y compresión).
- Determinar el efecto de la presencia de losas en muros esbeltos de hormigón armado con discontinuidades.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar probetas representativas de muros de hormigón armado con abertura en la base de acuerdo a la usanza nacional.
- Instrumentalizar las probetas y los ensayos en general para rescatar la información necesaria de éstos.
- Desarrollar modelos analíticos a fin de comparar los resultados obtenidos con los ensayos realizados.
- Comparar los resultados obtenidos de los ensayos para ver la influencia de las dimensiones de la abertura en la respuesta del muro.

1.3 METODOLOGÍA

1.3.1 ETAPA EXPERIEMENTAL

Se construyen cuatro muros de hormigón armado, todos de 2650[mm] de alto, 900[mm] de largo y 150[mm] de espesor, en los cuales se varía las dimensiones de la abertura en la base y la presencia o ausencia de losas en las zonas de la discontinuidad. La idea es tener una base lo más robusta posible para poder comparar las probetas entre sí y cubrir la mayor cantidad de casos. Tanto los materiales como el diseño caen dentro de las prácticas usuales del país. El montaje y el ensayo de las probetas pretenden simular un muro en cantiléver sometido a carga axial constante y carga lateral variable controlada por desplazamiento aplicada en el extremo superior del muro. La instrumentación y toma de datos se realiza a través de cuatro métodos: celdas de carga, strain gauges, transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT's de ahora en adelante), y fotogrametría. Se disponen cerca de quince strain gauges (todos soldados a armaduras dentro del muro) y veinte LVDT's por muro en promedio. Se aumenta la cantidad de sensores en las cercanías de la abertura y donde se espera un comportamiento inelástico en la respuesta del muro. Se consideran LVDT's en el pedestal para capturar su rotación y desplazamiento, y otro en el sistema de carga lateral, para tener una segunda fuente de información del desplazamiento inducido. La fotogrametría se realiza

usando una grilla de manchas negras sobre el muro, para posteriormente procesar las fotografías a través del método de Correlación de Imágenes Digitales (DIC, por su sigla en inglés) y obtener información sobre desplazamientos y deformaciones.

1.3.2 ETAPA DE MODELACIÓN

Se utiliza el programa SAFE Toolbox implementado para el programa Matlab (The MathWorks Inc, 1994), por Rojas (Rojas, 2012), para la modelación de las probetas ensayadas. El programa está basado en el método de los elementos finitos (FEM, por su sigla en inglés), y considerada tanto materiales como análisis no lineal. Una vez consideradas las dimensiones reales de los muros, se establece una malla que permita representar la información entregada por los LVDT's y se procede con el análisis. El desplazamiento inducido es idéntico al programa generado para el ensayo real. Con el análisis realizado, se obtienen gráficos de carga desplazamiento, perfiles de deformación a distintas alturas, deformaciones verticales a lo largo de ejes verticales, y distribución de deformaciones verticales, horizontales y principales.

1.4 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

- Introducción

Se presenta brevemente un contexto que sirve como motivación para el estudio, el contenido de la tesis en general y sus objetivos. A partir de lo anterior se fija una metodología para lograr dicha meta, teniendo claro los alcances que tendrá el trabajo. Además, se presenta el resto de capítulos de la tesis.

- Revisión Bibliográfica

Se recopila información relevante a la tesis, desde trabajos similares a posibles casos de interés a los cuales expandir los resultados principales y así tener un marco teórico que permite entender el estado actual de la investigación de muros con discontinuidades. Además se estudian metodologías experimentales similares.

- Antecedentes para el análisis por fotogrametría y la modelación numérica

Se presenta la información necesaria para entender el análisis a realizar, tanto de los resultados experimentales obtenidos por fotogrametría como la modelación numérica. En el caso de fotogrametría se muestra el funcionamiento del programa usado, mientras que para la modelación se muestra las leyes constitutivas de los materiales y otros parámetros relevantes, como la discretización del muro, características de los elementos finitos y protocolo de carga en el modelo.

- Descripción del Montaje Experimental

Se deja un registro de todo lo realizado para el correcto ensayo de las probetas diseñadas, con el fin de registrar lo necesario para una completa comprensión de lo realizado en el laboratorio y entender los resultados, alcances y limitaciones de lo ensayado.

- Resultados Experimentales

Se muestran los resultados obtenidos de los ensayos a las probetas. Se busca disponer de todo lo necesario para una correcta interpretación de los datos en el capítulo de análisis de resultados.

- Modelación y Resultados Analíticos

Se registra la metodología para la modelación de las probetas, incluyendo los modelos de materiales usados y el tipo de análisis, y se muestra los resultados obtenidos (gráficos de carga desplazamiento, perfiles de deformaciones, entre otros). Teniendo ya procesados los resultados experimentales y analíticos, se comparan para validar la modelación realizada y usar sus resultados para extensiones que no pudieron ser realizadas en las probetas ensayadas.

- Conclusiones

Se resume el trabajo realizado, y se dan recomendaciones de diseño. Se discuten los resultados obtenidos, sus alcances y se dan recomendaciones para futuras investigaciones.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUCCIÓN

Dentro de la ingeniería civil, las dos principales formas de estudiar problemas y generar conocimiento son a través de estudios experimentales y modelación numérica. Los resultados obtenidos a través de experimentos son fiel reflejo de lo ensayado, sin dejar lugar a interpretaciones o variaciones de parámetros. Su principal dificultad es que generalmente no es posible estudiar el problema como un todo y se debe resolver un problema equivalente. El estudio analítico se basa en el avance de las herramientas computacionales y la facilidad y robustez del método de los elementos finitos (FEM, en inglés) para modelar estructuras. El principal inconveniente de la modelación recae en los alcances de los métodos que se usan para resolver el problema. Además, siempre está la necesidad de verificar el comportamiento real de la estructuras con respecto a cómo se modeló. Es a partir de las fortalezas y debilidades de cada enfoque que el presente estudio tiene un carácter experimental y analítico a la vez, tratando de suplir las debilidades de un método con las fortalezas del otro.

A continuación se detalla el estado de la investigación de muros de hormigón armado con discontinuidades, mostrando en qué se ha hecho énfasis, que falta por estudiar, y cómo el presente trabajo de título trata de responder alguna de las preguntas planteadas con anterioridad, distinguiendo si el estudio es de carácter experimental o analítico. Además, se describe el uso de la fotogrametría en distintos ensayos destacando sus principales ventajas.

2.2 ESTUDIOS EXPERIMENTALES PREVIOS

Existen distintos estudios realizados en muros con discontinuidades en la base y en la altura. Dentro de sus focos, se pueden apreciar la resistencia al corte (Wang, 2012), (Todut, 2014), la influencia de la posición de las aberturas, haciendo énfasis en los muros con aberturas alternadas debido a que mostraron un buen desempeño para el terremoto de 1985 en Chile (Ali & Wight, 1990), (Mosoarca, 2014), (Mosoarca, 2013), la validación de métodos de diseño y detallamiento (Taylor, Cote, & Wallace, 1998) y la geometría de la discontinuidad en la respuesta global del muro (Díaz, 2016), (Manríquez, 2016), (Manríquez, Díaz, & Massone, 2017). A pesar de tener distintos enfoques y alcances, no hay estudios que traten sobre la influencia de una abertura central en un muro con respecto a uno que no la tenga. Dado el enfoque del presente trabajo, se ahondará en los trabajos de Taylor, Díaz y Manriquez a continuación.

El trabajo de Taylor (Taylor et al., 1998) tiene como fin validar el diseño basado en desplazamiento para la elección del refuerzo transversal del elemento de borde en muros con discontinuidades en la base, además de evaluar el diseño de la armadura transversal (horizontal) mediante el método puntal-tensor. Para llevar a cabo lo anterior se realizó un estudio experimental que contempla el ensayo de dos probetas de hormigón armado (RW3-O y BW1-O), sin embargo se detallará información sólo de RW3-O dado que es la que resulta relevante para este caso. Sus dimensiones globales son 3.66 [m] de alto, 1.22 [m] de largo y un espesor de 102 [mm]. La abertura se encuentra en la base del muro y tiene una posición descentrada, con 686 [mm] de alto y 305 [mm] de ancho y a 191[mm] del borde del muro. La cantidad y disposición de las armaduras fueron determinadas por métodos distintos para cada caso: el refuerzo de borde longitudinal se obtuvo mediante un análisis seccional tradicional en

el cual se descontó como efectiva la zona de la abertura; el refuerzo transversal de borde se determinó a partir del diseño basado en desplazamiento; y finalmente la cuantía de armadura central transversal fue obtenida a partir de un análisis puntal tensor. El refuerzo longitudinal consta de 8 barras de 9.5 [mm] de diámetro en cada borde. Los estribos son de 4.8 [mm] de diámetro y están espaciados cada 51 [mm] los primeros 1.5 [m] del muro, y a 191 [mm] el resto de la altura. La armadura de refuerzo de abertura es de 2 barras de 9.5 [mm], sin confinamiento o trabas extras. En el centro del muro se dota de doble malla a 127 [mm] de espaciamiento hasta 1 [m] de altura para luego aumentar el espaciamiento a 191 [mm]. Descripciones generales y la disposición de las armaduras se pueden ver en Figura 2.1.

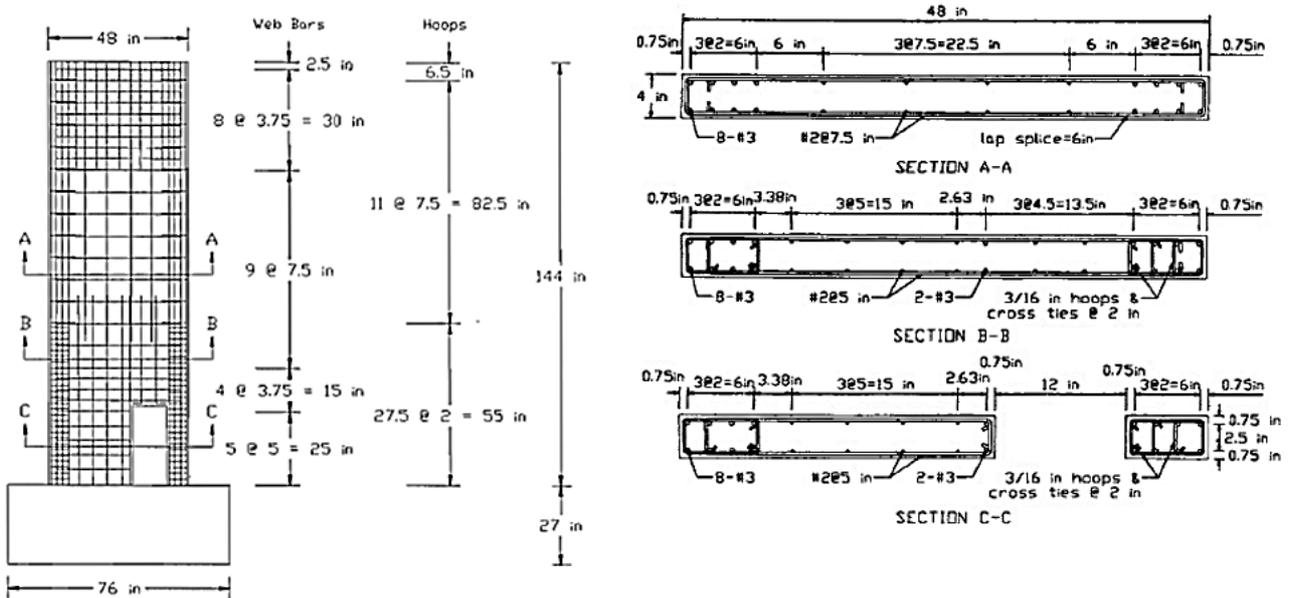


FIGURA 2.1: ELEVACIÓN Y CORTE DE RW3-O (Taylor et al., 1998).

Las probetas fueron ancladas a la base usando cuatro pernos de anclaje. La carga lateral es aplicada por un gato hidráulico que actúa sobre un sistema de transferencia de carga, que evita problemas de cargas puntuales en la zona de aplicación. Un marco de acero cumple la función de restringir el movimiento fuera del plano, siendo anclado al muro. Dos gatos hidráulicos se encargan de simular la carga axial, la cual tuvo un valor promedio de $0.099f'_cA_g$. El protocolo de carga contempla dos ciclos para cada nivel de deriva, siendo éstos 0.10%, 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5% y 3%.

El muro de referencia corresponde al ensayo por Thomsen y Wallace (Thomsen & Wallace, 1995), el cual tiene como principales diferencias: la abertura, que afecta la distribución de la armadura horizontal; trabas extras en el borde cercano a la abertura debido a las altas compresiones vistas en el diseño basado en desplazamiento; y un aumento en la carga axial aplicada en RW3-O ($0.099f'_cA_g$) comparado con RW2 ($0.07f'_cA_g$).

La Figura 2.2 muestra la respuesta global del muro con la abertura y su caso base, en cuales se aprecia un buen comportamiento, similar resistencia y alta ductilidad hasta el 2% de deriva. La falla de ambos muros ocurren al 2.5% de deriva, sin embargo existe una mayor capacidad

en el muro sin abertura por poder llegar a un segundo ciclo del 2.5%. La abertura representa un 25% del largo del muro, generando dos secciones de 16% y 59% a cada lado de la misma.

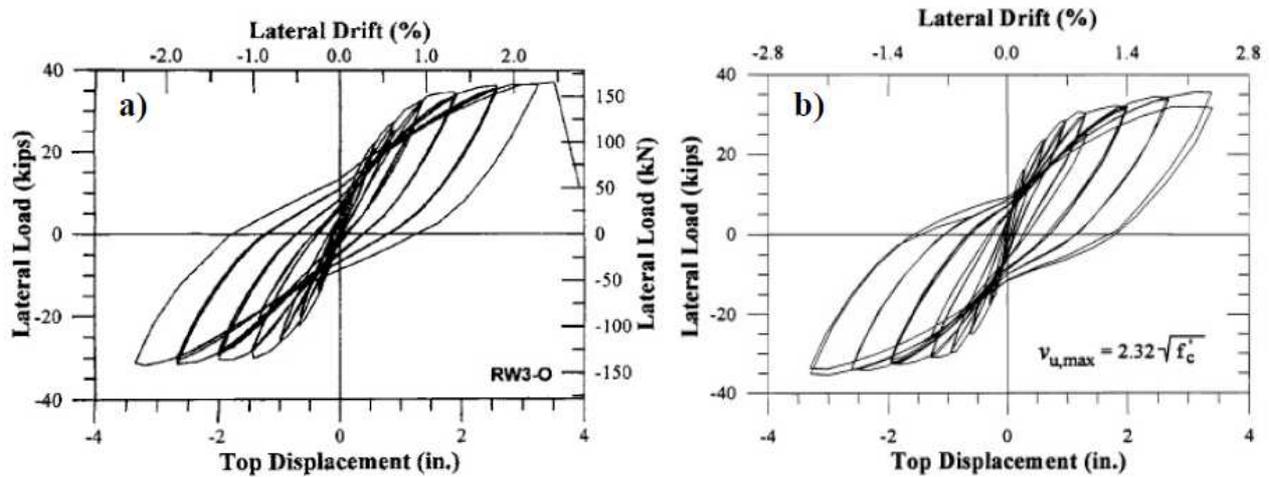


FIGURA 2.2: HISTÉRESIS DE RW3-O (Taylor et al., 1998) y RW2 (Thomsen & Wallace, 1995).

Tanto en el estudio de Taylor como en sus estudios de referencia (Ali & Wight, 1990 y Thomsen & Wallace, 1995) no se recomienda unir el perfil de deformaciones verticales con una línea en la zona de la abertura, como se ve que lo hacen en la Figura 2.3. Lo anterior surge al ver los perfiles de deformación vertical en la sección entregados por los strain gages soldados a las barras, y se aprecia que el supuesto de trazar una línea recta entre un extremo y el otro de la abertura no parece ser muy acertado.

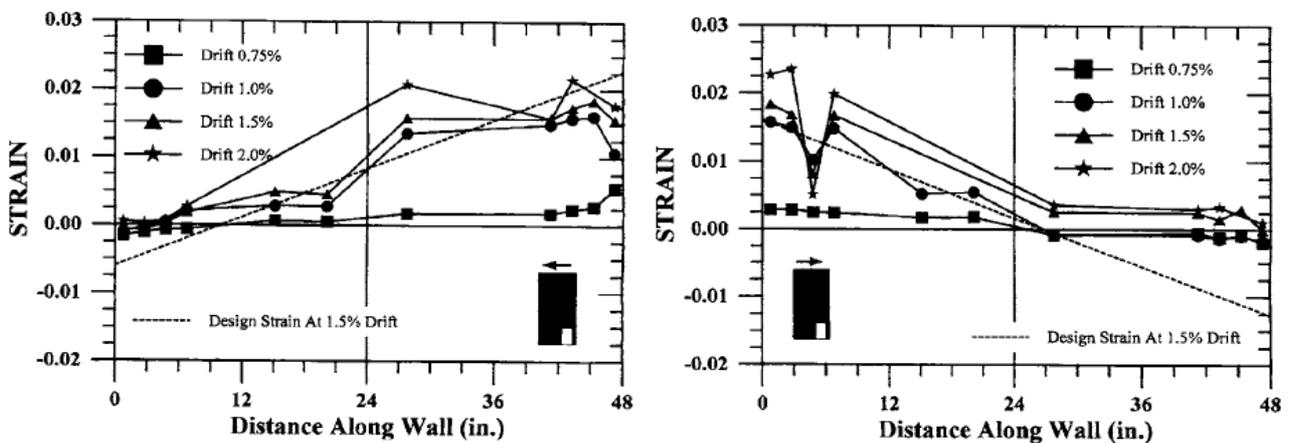


FIGURA 2.3: PERFIL DE DEFORMACIONES VERTICALES EN LA SECCIÓN (AMBAS DIRECCIONES) (Taylor et al., 1998).

De la Figura 2.2 se puede concluir que un muro debidamente reforzado con aberturas en zonas críticas puede tener una histéresis estable y alta ductilidad. Además, no se aprecian grandes cambios en la resistencia o en la rigidez de la probeta. De acuerdo a los sensores que tenía el muro en la base, se aprecia que la distribución de deformaciones dista más del comportamiento lineal que el caso del muro sin perforación. Con respecto al diseño basado en

desplazamientos, dada la similar ductilidad entre el caso con abertura y su caso base, se considera un método válido para el detallamiento de muros con aberturas en la base. A pesar de que se menciona que el perfil de deformaciones verticales en la sección tiene un mayor comportamiento no lineal, dado el alcance del estudio no se puede cuantificar este efecto en el detallamiento del muro.

Díaz y Manríquez realizaron el diseño y ensayo de cuatro muros de hormigón armado con discontinuidades en la base tipo bandera, que hace referencia a un acortamiento abrupto en el largo del muro en uno de sus extremos en las cercanías de la base (Díaz, 2016), (Manríquez, 2016). Esta disposición satisface requerimientos arquitectónicos típicos en edificios del país. El objetivo es determinar el impacto que genera la bandera en el comportamiento del muro, además de validar expresiones analíticas creadas para determinar el desplazamiento de fluencia, curvatura de fluencia y longitud de rótula plástica para este tipo de muros (Ahumada, 2014).

Las dimensiones globales de los muros es de 2.65 [m] de alto, 0.9 [m] de largo y 150 [mm] de espesor. El primer muro no tiene ningún tipo de discontinuidad y servirá de muro base para los estudios de los autores mencionados, además del presente trabajo de título. Las otras tres probetas tienen una extensión del largo del muro de 250 [mm] a los 300 [mm] y 600 [mm] desde la base del muro, mientras que el último tiene una extensión de 500 [mm] a los 300 [mm] desde la base. El refuerzo longitudinal consta de cuatro barras de 16 [mm] de diámetro en cada extremo del muro. Los estribos son simples y con barras de 6 [mm] de diámetro, espaciados cada 70 [mm] en los primeros 0.9 [m], para después aumentar el espaciamiento a 100 [mm] hasta el final. Tanto la malla vertical como la horizontal son dobles, de barras de 8 [mm] espaciadas cada 200 [mm]. Dimensiones generales y disposición de armaduras se pueden ver en la Figura 2.4.

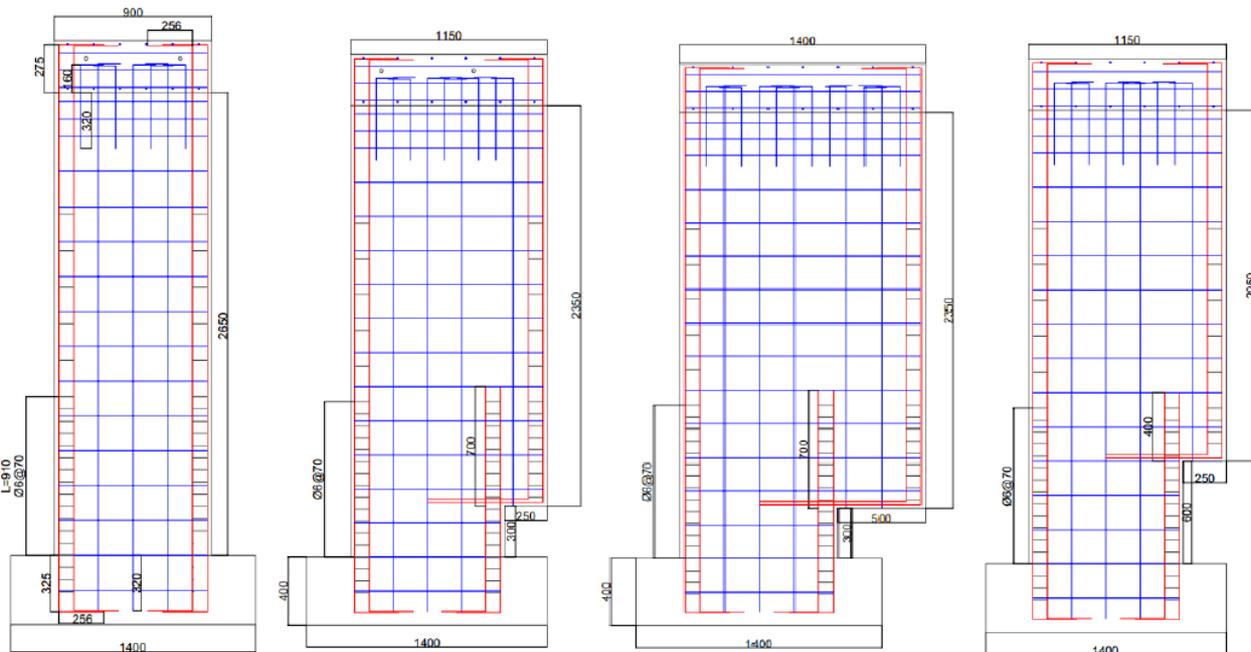


FIGURA 2.4: ELEVACIONES DE MUROS BANDERAS (Díaz, 2016).

El montaje realizado es el bastante similar al del presente trabajo: las probetas se anclaron a la losa de reacción usando 6 barras de anclaje para luego pretensar la rótula que va en el extremo del muro que permite montar el actuador que inducirá los desplazamientos laterales. Posteriormente se inicia el montaje del sistema de carga axial, el cual consta de una viga cajón de acero que se apoya longitudinalmente sobre la viga monolítica de coronación del muro, dos vigas doble canal también de acero que se apoyan transversalmente sobre la viga cajón, las cuales permiten el paso de cuatro barras que son estiradas por gatos hidráulicos y así generar la carga axial sobre la probeta que simula la carga gravitacional a la cual están sometidos los muros inmersos en un edificio. De los cuatro ensayos el valor promedio fue de $0.074f'_cA_g$. Finalmente se instala el marco que sirve para restringir el desplazamiento fuera del plano de carga, y se monta el actuador y los sensores de medición.

La toma de datos es mediante cuatro métodos: celdas de carga para la carga aplicada por el actuador y los gatos que ejercen la carga axial (sólo se monitorea uno de los cuatro), strain gages soldados en las barras de refuerzo, LVDT's dispuestos en una cara del muro y controlando los desplazamientos globales del mismo, y un sistema de fotogrametría en la otra cara del muro, el cual mediante el análisis de fotos calcula desplazamientos y deformaciones.

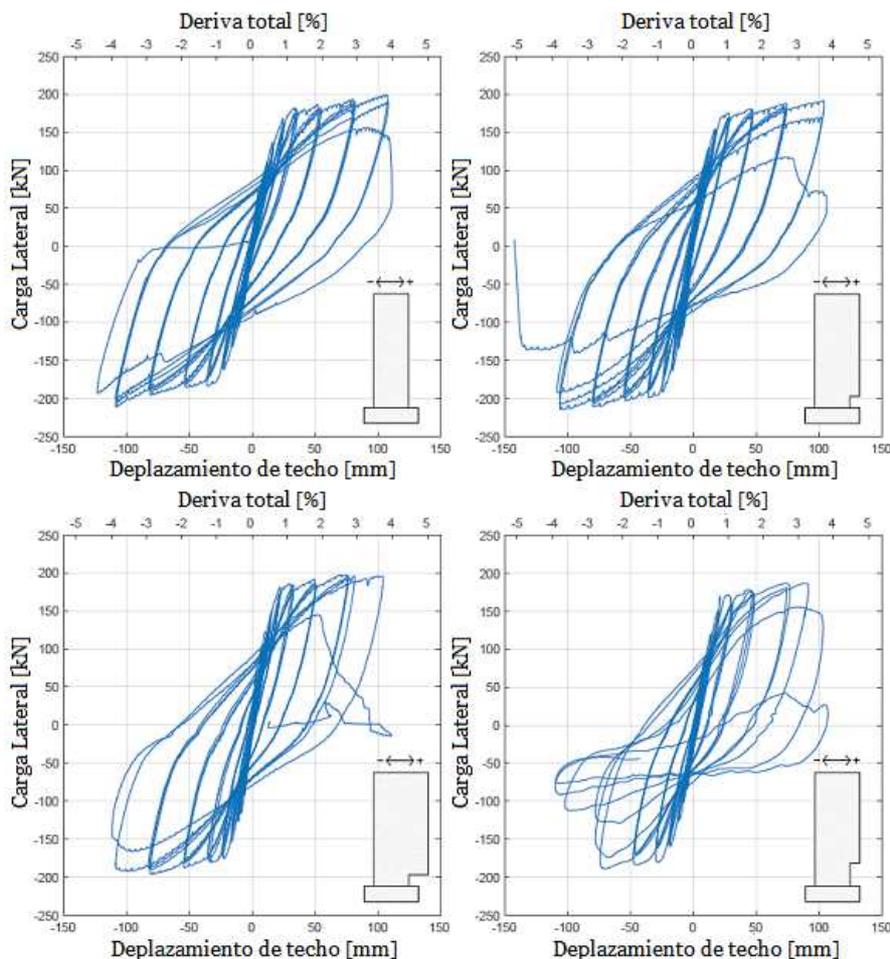


FIGURA 2.5: HISTÉRESIS MUROS BANDERA (Díaz, 2016).

La Figura 2.5 muestra los gráficos de carga desplazamiento para los cuatro muros ensayados. Se puede apreciar que tanto la resistencia como la rigidez son bastante similares entre los cuatro casos, y su principal diferencia ocurre en el inicio de la degradación. El cuarto muro tiene un comportamiento diferente puesto que tuvo otro tipo de falla, deslizando las barras de refuerzo longitudinal de borde en la zona de la bandera.

Tanto el estudio por fotogrametría hecho por Manríquez como la modelación en elementos finitos hecha por Díaz confirman que la presencia de una discontinuidad tipo bandera tiende a concentrar las deformaciones en la base del muro. La Figura 2.6 a y b muestra el perfil de deformaciones verticales en la altura en los dos extremos del muro rectangular, tanto por fotogrametría como por modelación. Se puede apreciar que el comportamiento es simétrico y los resultados caen dentro de valores esperados, con una concentración de las deformaciones en las cercanías de la base. Sin embargo, en la Figura 2.6 c y d (que muestra lo mismo, solo que para el muro 2) se aprecia que mientras el lado continuo del muro tiene un comportamiento muy similar al caso rectangular, el lado discontinuo concentra aún más las deformaciones en la base, siendo limitada por la distancia desde la base a la cual ocurre la discontinuidad.

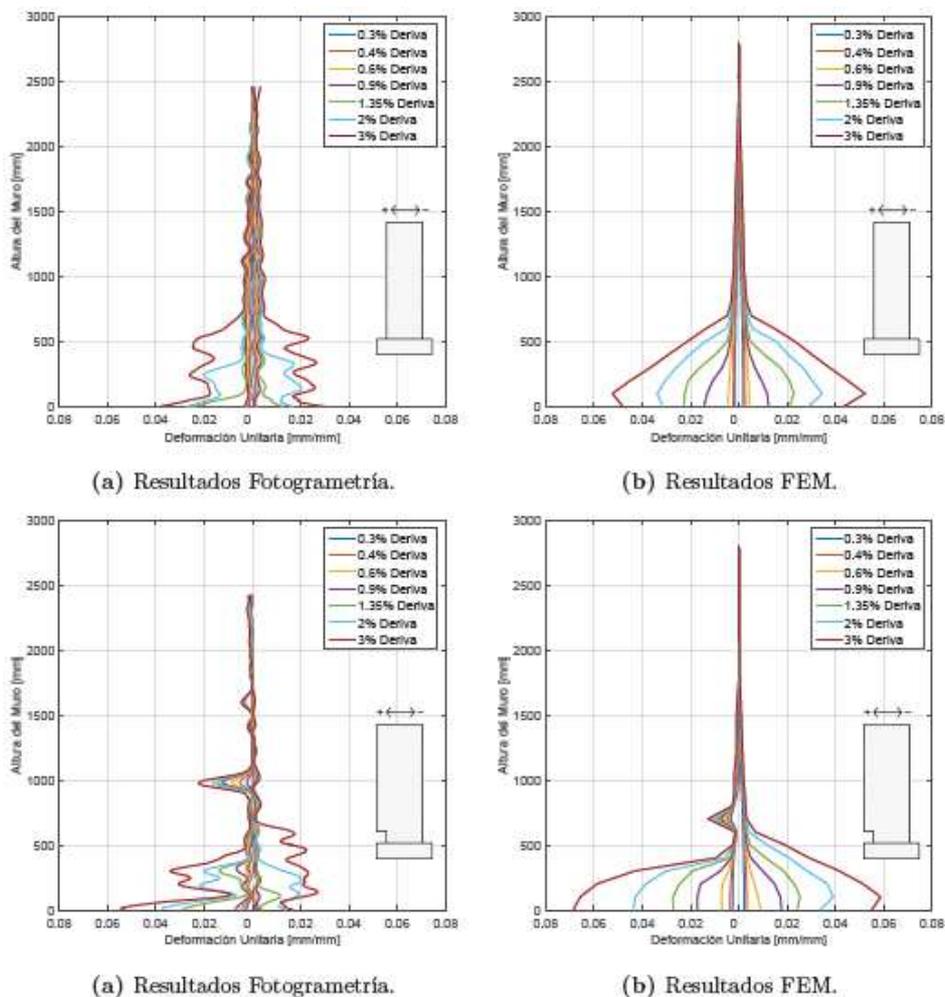


FIGURA 2.6: DEFORMACIONES VERTICALES EN EXTREMOS DE LOS MUROS 1 Y 2 (Díaz, 2016).

A pesar de no existir diferencias en la capacidad de deformación de los muros ensayados, el extender los resultados a través de un análisis paramétrico a muros más altos (con mayor relación de aspecto), existe una notoria limitación en la capacidad de deformación de un muro al tener una abertura tipo bandera. Al evaluar y validar las expresiones dadas por Ahumada, limitaron la longitud de rótula plástica a no más que el alto de la bandera.

2.3 USO DE FOTOGRAMETRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

La obtención de datos a través de un análisis por fotogrametría se puede considerar más bien nuevo, y con un amplio espectro de tópicos a cubrir. Con respecto a la ingeniería civil, antecedentes en geotecnia se pueden ver en el trabajo de Slominski al estudiar deformaciones en muestras de suelos (Slominski, Niedostatkiewicz, & Tejchman, 2006). En ensayos de elementos de hormigón armado, Harilal y Ramji usaron el mismo software que en este estudio, pero frente a carga monotónica (Harilal & Ramji, 2014).

El principal precedente de este estudio es el realizado por Manríquez (Manríquez, 2016), el cual usa un sistema de fotogrametría para determinar desplazamientos y deformaciones en el ensayo de cuatro muros de hormigón armado sometidos a carga lateral cíclica. El análisis fue realizado a través del software Ncorr (Blaber, Adair, & Antoniou, 2015), el cual usa el método de Correlación de Imágenes Digitales (DIC). Como primer paso, Manríquez realizó una validación de los datos entregados por fotogrametría. Para esto, comparó los resultados entregados por los LVDT's montados en el muro y los que obtuvo a través de fotogrametría, diferenciando entre pequeños y grandes desplazamientos. En el análisis de grandes desplazamientos se encontró una correlación mayor a 0.99 en todos los muros, mientras que al estudiar los pequeños desplazamientos la diferencia en los resultados variaron desde una correlación de 0.99 para el segundo muro a 0.22 para el cuarto muro. La notable diferencia se entiende mejor si se considera los desplazamientos inducidos en cada caso: mientras que en el segundo muro el rango de desplazamientos registrados es cercano a 3 [mm], en el cuarto muro es menos de 0.5 [mm]. Posteriormente realiza el mismo análisis para los LVDT's que se encuentran dentro del muro, los cuales son un caso intermedio a los dos recién presentados, y arrojan resultados aceptables para la validación de la fotogrametría como método para obtener desplazamientos y deformaciones.

Para determinar los posibles errores en las mediciones y en los resultados obtenidos, se distinguió entre el error de que el programa seleccione un pixel diferente dentro de la vecindad introducida en el análisis, y los errores aleatorios que puedan existir con respecto a la metodología propia del ensayo. El primer caso arrojó un error en la medición de las deformaciones de 0.0043, mientras que el segundo caso el error recién mencionado fue mayor en 70 de 72 casos (en los otros dos se obtuvo 0.0057 y 0.0067). Estos valores acotan los resultados obtenidos sólo a tracciones en el muro, puesto que el campo de las compresiones por lo general tiene valores menores o similares al error del método, invalidando su estudio a través de esta forma. La información dada resulta muy útil, puesto que la metodología del presente trabajo es idéntica a la aplicada por Manríquez.

Dentro de los resultados obtenidos por Manríquez usando fotogrametría se pueden encontrar las deformaciones verticales en todo el muro para cierta foto (ver Figura 2.7). Este resultado permite conocer las deformaciones en todo el muro para cierto instante, información mucho más completa que la deformación longitudinal entre dos puntos que entrega un LVDT's.

También permite distinguir el patrón de grietas, pudiendo analizar si corresponden a grietas de flexión o de corte, o una combinación de ambas solicitaciones. Además, dentro de los resultados que entrega Ncorr se encuentra la matriz de datos con los desplazamientos y deformaciones de cada punto, para cada foto. Así el usuario puede estudiar los datos más allá de las alternativas que da el programa. Manríquez aprovecha lo anterior y obtiene las deformaciones principales para cada muro en un instante de tiempo, lo cual le permite estimar de mejor manera el flujo de las tensiones y así proponer un modelo puntal-tensor para los muros estudiados (ver Figura 2.8).

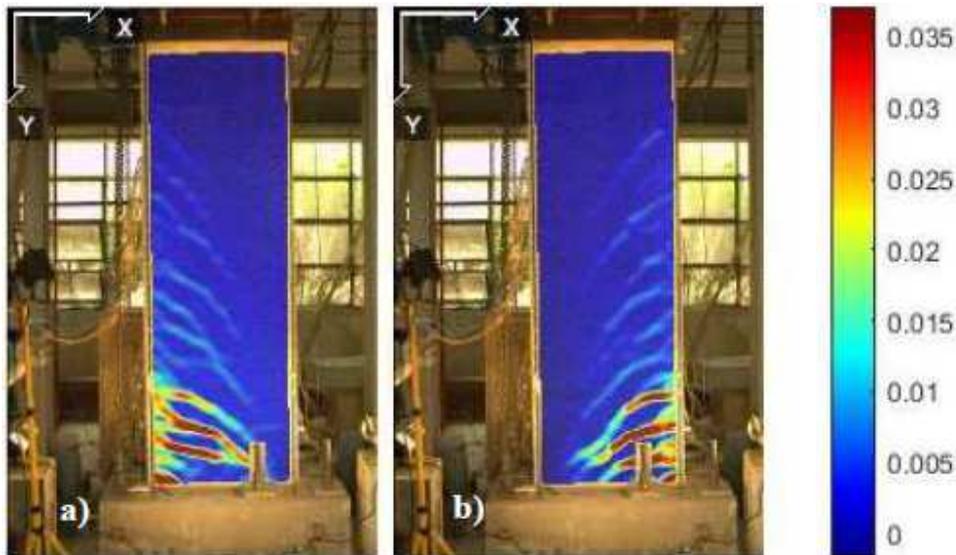


FIGURA 2.7: DEFORMACIONES VERTICALES MURO 1 A). SENTIDO POSITIVO B). SENTIDO NEGATIVO (Manríquez, 2016).

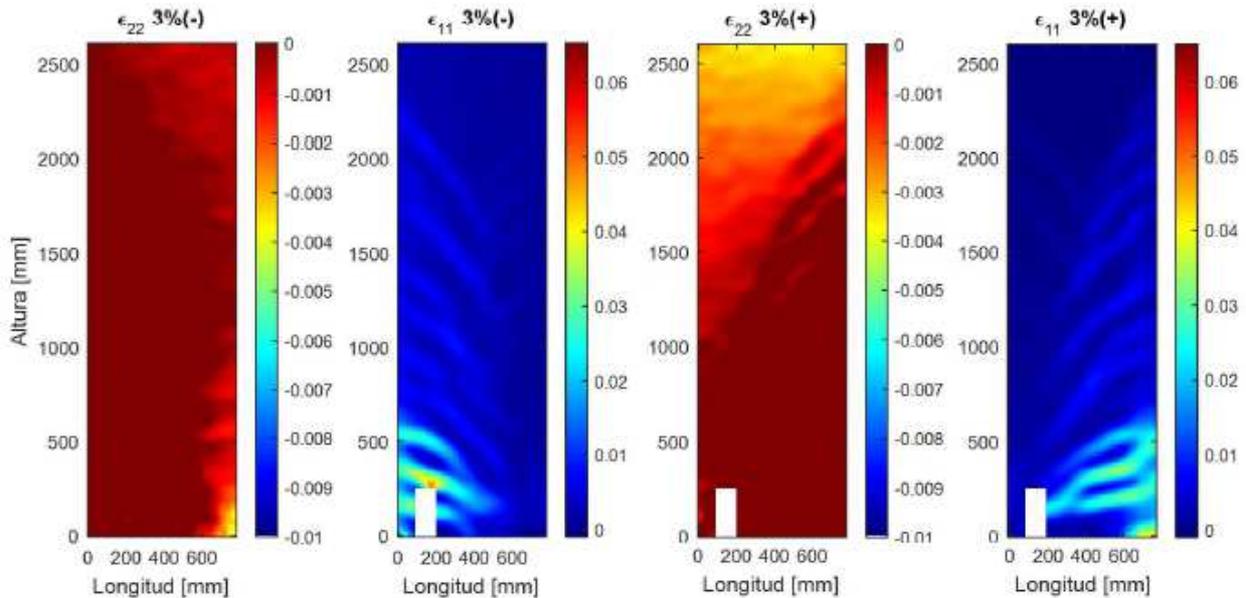


FIGURA 2.8: DEFORMACIONES PRINCIPALES MURO 1 (Manríquez, 2016).

2.4 ESTUDIOS ANALÍTICOS PREVIOS

Ahumada se centró en estudios de muros bandera, sin embargo dedicó una parte de su estudio en muros con discontinuidades centrales, para dar guías de investigación futura (Ahumada, 2014). Dicha línea fue tomada por Morales, quien profundizó en el comportamiento de muros con discontinuidades tipo puerta (Morales, 2015).

El principal aporte en esta sección es la realizada por Morales, el cual realizó un estudio de la influencia de aberturas centrales en la base en muros esbeltos de hormigón armado (Morales, 2015). Para ello, realizó análisis no lineal de elementos finitos tipo pushover monotónico para 99 casos: 10 muros con diferentes aberturas más un caso base sin abertura, bajo 3 diferentes tipos de análisis y con 3 relaciones de aspecto diferentes.

Como primer resultado interesante descubre que existe una concentración de deformaciones de tracción en el término de la armadura de refuerzo de la abertura, la cual es más notoria mientras más grande sea la cuantía de esa armadura y/o que tan cercano esté el término de la barra desde la base del muro. En la Figura 2.9 se puede ver la influencia de esto en la curvatura en la altura del muro para una cuantía de un 2.5% en el borde de la abertura, y con refuerzo hasta el piso 2.

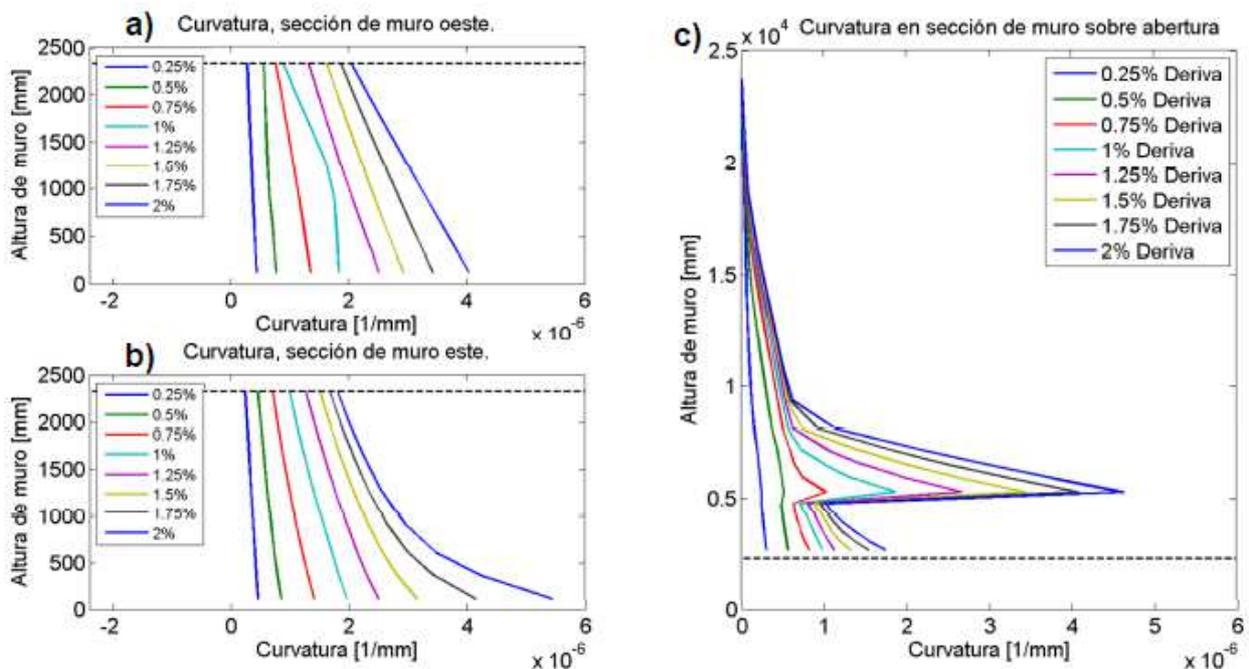


FIGURA 2.9: CURVATURA EN LA ALTURA. CUANTÍA 2.5% Y REFUERZO HASTA EL PISO 2 (Ahumada, 2014).

En la figura anterior se aprecia una importante curvatura en el término de la armadura de refuerzo de la abertura, siendo comparable con la curvatura en la base del muro. Lo anterior podría indicar una potencial segunda rótula plástica, ubicada en una sección ni esperada ni considerada en análisis o diseños. Como alternativa Ahumada propone extender las barras de refuerzo hasta el piso 9, en donde se ve que desaparece la concentración de deformaciones (ver Figura 2.10).

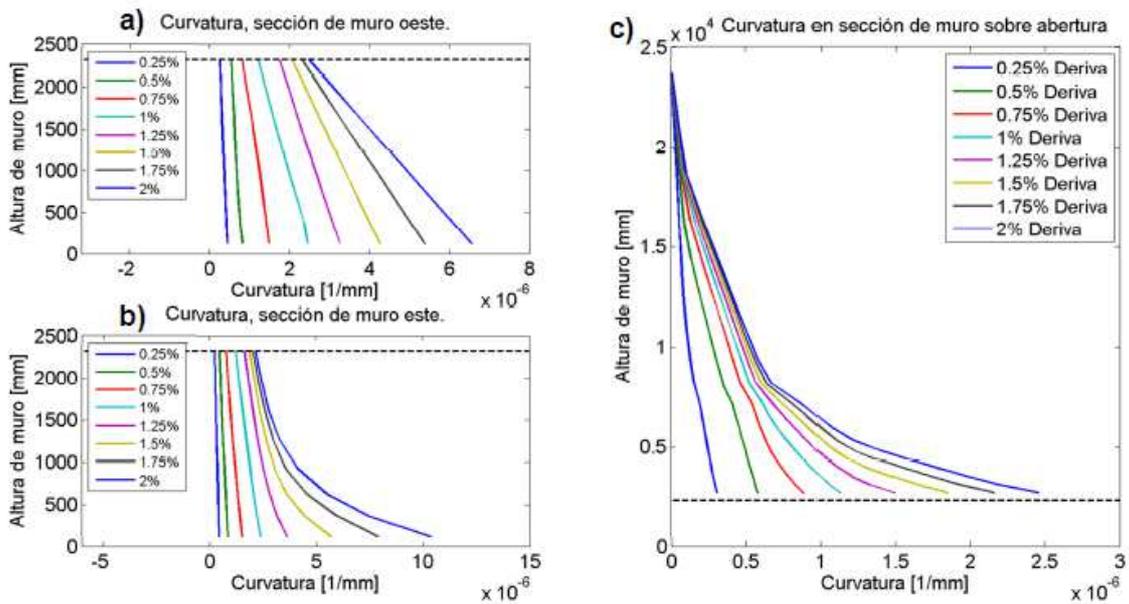


FIGURA 2.10: CURVATURA EN LA ALTURA. CUANTÍA 2.5% Y REFUERZO HASTA EL PISO 9 (Ahumada, 2014).

Dado lo poco práctico de la medida, Morales propone disminuir la cuantía de la armadura dispuesta en esa zona. La Figura 2.11 muestra el mismo resultado, para el mismo muro, pero con una cuantía de la octava parte de la mostrada anteriormente (cambio de 2.5% a 0.3125%) y la armadura hasta el piso 4, en la cual se puede apreciar que genera un impacto muy similar al prolongar las barras hasta casi el fin del muro, pero representa una medida más concreta y fácil de implementar en el diseño.

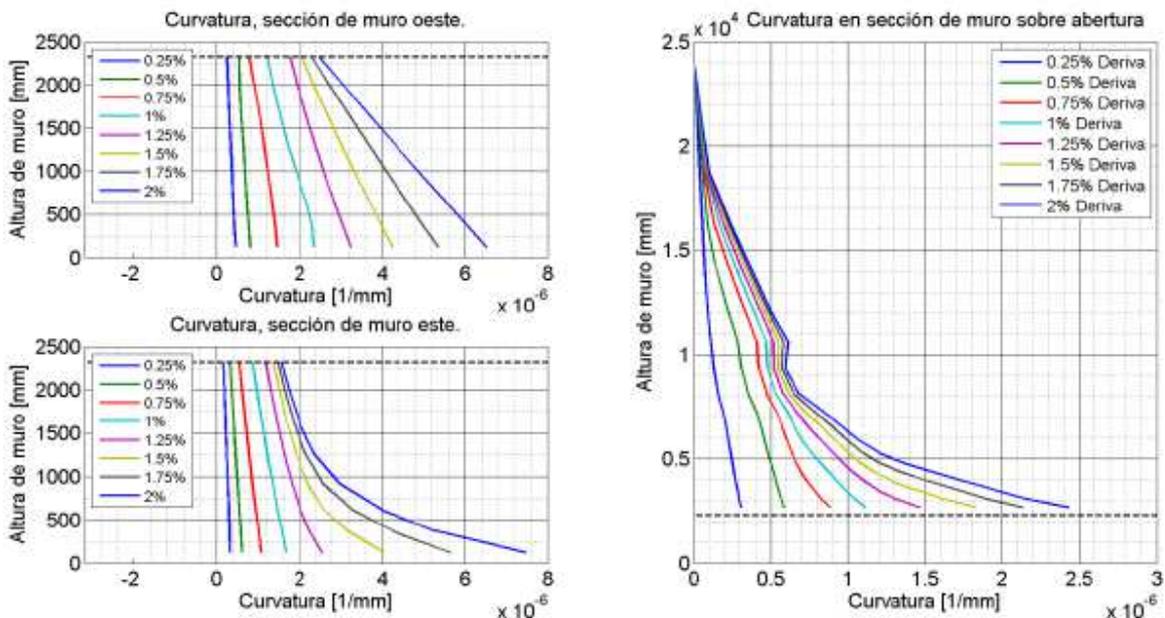


FIGURA 2.11: CURVATURA EN LA ALTURA. CUANTÍA 0.3125% Y REFUERZO HASTA EL PISO 4 (Morales, 2015).

Finalmente, complementa las expresiones dadas por Ahumada para estimar la amplificación de la máxima deformación de compresión y la máxima deformación de tracción al pasar de un modelo de flexión a otro que considere flexión y corte, a que sean una expresión que considere la presencia de una abertura en la base.

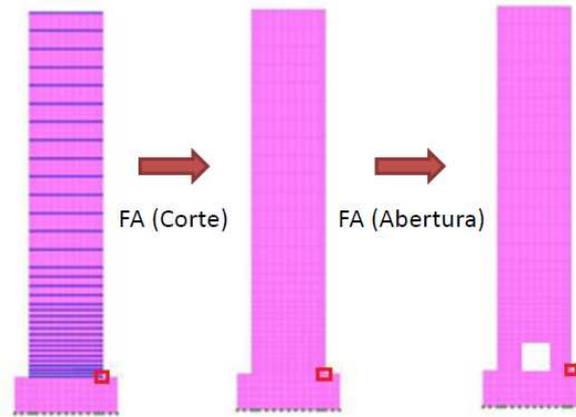


FIGURA 2.12: FACTOR DE AMPLIFICACIÓN PROPUESTO POR MORALES (Morales, 2015).

La Figura 2.12 esquematiza lo anterior: el paso de un modelo para un muro totalmente flexural a un modelo para un muro que considera la influencia del corte fue el trabajo realizado por Ahumada. El siguiente paso, que da un factor de amplificación para un muro que considera el efecto de corte a otro similar que además presente una abertura en la base es resultado del estudio de Morales. De acuerdo a lo anterior, propone las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon_{cca} = 9.69 \cdot \Delta_p^{0.29} \left(\frac{h_w}{l_w} \right)^{-0.23} \cdot \left(1 + 0.64 \left(\frac{Area_{Abertura}}{Area_{piso}} \right)^{0.31} \right) \cdot \varepsilon_{cf} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{tca} = 0,6 \left(\frac{h_w}{l_w} \right)^{0,18} \cdot \left(1 + 0.66 \left(\frac{Area_{Abertura}}{Area_{piso}} \right)^{0,1} \right) \cdot \varepsilon_{tf} \quad (2)$$

Donde, ε_{cca} corresponde a la máxima deformación de compresión que considera la influencia del corte y de la presencia de una abertura, Δ_p corresponde a la deriva plástica del muro, h_w es la altura del muro, l_w es el largo del muro, $Area_{Abertura}$ considera el área de la abertura, mientras que $Area_{piso}$ considera el área total del muro en ese piso, y ε_{cf} es la máxima deformación de compresión obtenida a través de un modelo de fibras que considera sólo flexión. Las expresiones ε_{tca} y ε_{tf} son análogas a ε_{cca} y ε_{cf} pero son deformaciones máximas de tracción.

De su trabajo Morales concluye que para el detallamiento de un muro con abertura central recomienda usar un método de flexión pura que incluya la abertura, esperando un error para la máxima deformación de compresión que varía del 2% al 20%, dependiendo de las dimensiones de la abertura.

3. ANTECEDENTES PARA EL ANÁLISIS POR FOTOGRAMETRÍA Y LA MODELACIÓN NUMÉRICA

3.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presentarán las bases del funcionamiento del análisis por fotogrametría y la información relevante a la modelación realizada en el estudio. La técnica de Correlación de Imágenes Digitales (DIC) se basa en maximizar un coeficiente de correlación para obtener así desplazamientos y deformaciones entre una fotografía base y otra con el muro ya deformado. Por el lado de la modelación, todos los casos modelados corresponden a muros de hormigón armado tipo cantiléver o con presencia de losas (pero que sólo actúan como elementos rigidizantes del muro, puesto que no están acopladas a otro elemento o están sometidas a algún estado de carga). Los análisis son siempre estáticos, sometidos a una carga axial constante y carga lateral variada, traducida a un desplazamiento controlado. A continuación se mostrarán las plataformas usadas para el análisis de las fotografías y para la modelación con sus distintas características y alcances.

3.2 FOTOGRAMETRÍA

La correlación digital de imágenes es una técnica que mide desplazamientos de puntos entre una fotografía y otra. Es por esto que se toman fotos durante todos los ensayos, además de tomar una fotografía inicial antes de aplicar la carga axial que servirá como referencia para realizar el análisis. Cada foto es dividida en subconjuntos que se caracterizan por su valor en la escala RGB (*Red, Green and Blue*, método que caracteriza la tonalidad de cualquier pixel por sus componentes en colores rojo, verde y azul), para ser identificado entre una foto y la siguiente maximizando un coeficiente de correlación.

El programa a utilizar para analizar las fotografías será Ncorr (Blaber et al., 2015), el cual permite al usuario determinar la cantidad de píxeles que actuarán como unidad para el análisis, con el fin de suavizar ruidos y minimizar el tamaño de las matrices. La optimización se basa en el uso del coeficiente de relación llamado 'Normalized Cross Correlation' a través del método llamado 'Mínimos cuadrados iterativo no lineal de Gauss-Newton' para después calcular las deformaciones (de Green) considerando el coeficiente de correlación 'Least Square Correlation' mediante el algoritmo 'Inverse Compositional Gauss-Newton'.

Ncorr tiene una interfaz muy intuitiva que va mostrando el estado del análisis en todo momento. Una vez se elijan las fotografías a analizar (que deben estar todas en la misma carpeta y con nombres enumerados correlativos), se carga la imagen referencial en el programa a partir de la cual calculará la posición inicial del muro. Luego, se procede a cargar las demás fotos a analizar. La Figura 3.1 muestra la pestaña con la fotografía referencial y las fotografías cargadas.



FIGURA 3.1: PESTAÑA NCCORR CON IMÁGENES CARGADAS.

A continuación es necesaria definir la zona de interés, ROI (*Region Of Interest*, en inglés), la cual determina el área donde se realizarán los cálculos para determinar desplazamientos y deformaciones. Dado que en los cuatro muros las barras que se traccionan para generar la carga axial reducen el área de muro a estudiar, y en MR2 una barra de anclaje genera el mismo impacto, se define la ROI lo más grande posible, pero que no consideren esos elementos que generarán ruido y datos no confiables en el análisis posterior. La Figura 3.2 muestra la ROI definida para uno de los casos estudiados.

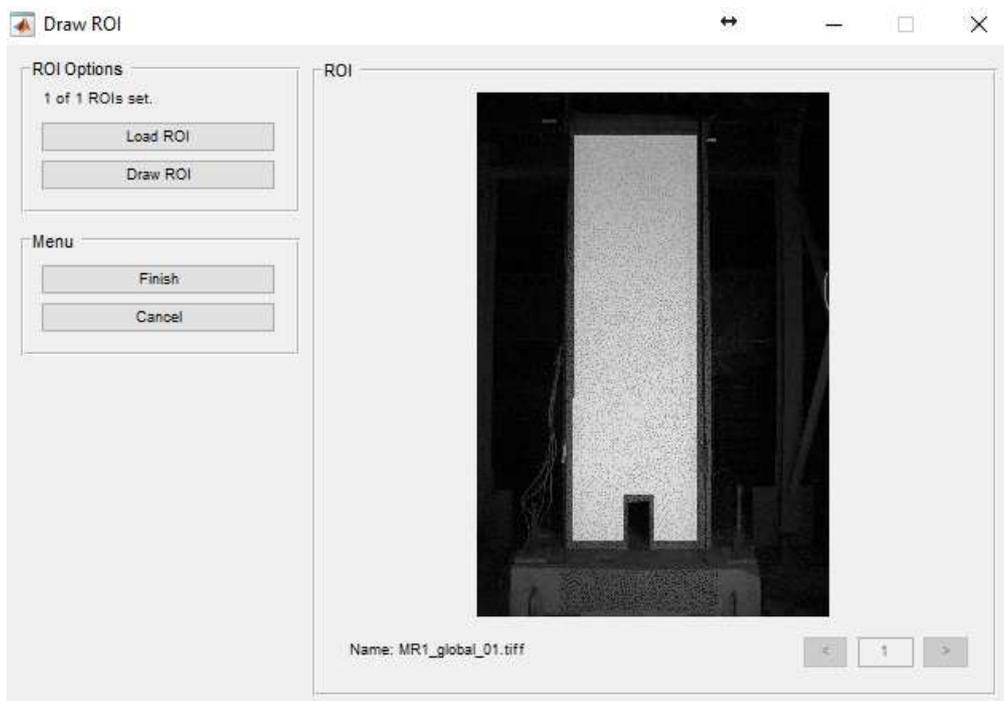


FIGURA 3.2: ROI DEFINIDA PARA EL ANÁLISIS.

La Figura 3.3 muestra la pestaña en la cual se ingresan los parámetros de análisis, la cual es la más determinante en la calidad de los resultados obtenidos. Primero se define el radio de pixeles que serán considerados como subconjunto. A partir de este grupo es que caracteriza el patrón RGB. Luego se define el espaciamiento que tendrán los subconjuntos definidos. Es a partir de este parámetro (y la cantidad de megapíxeles de la cámara) que se puede obtener las dimensiones de la matriz que entregará como resultado el programa. Posteriormente se definen los parámetros que serán criterio de término de convergencia (norma y número de iteraciones máximas). Finalmente se consideran las opciones de realizar análisis de altas deformaciones (que va actualizando la fotografía de referencia y la ROI) y si se realiza un análisis discontinuo (el cual considera que se separa el material a estudiar, como ocurre en el hormigón cuando se generan grietas). En el capítulo de resultados se mostrarán los valores usados para el análisis.

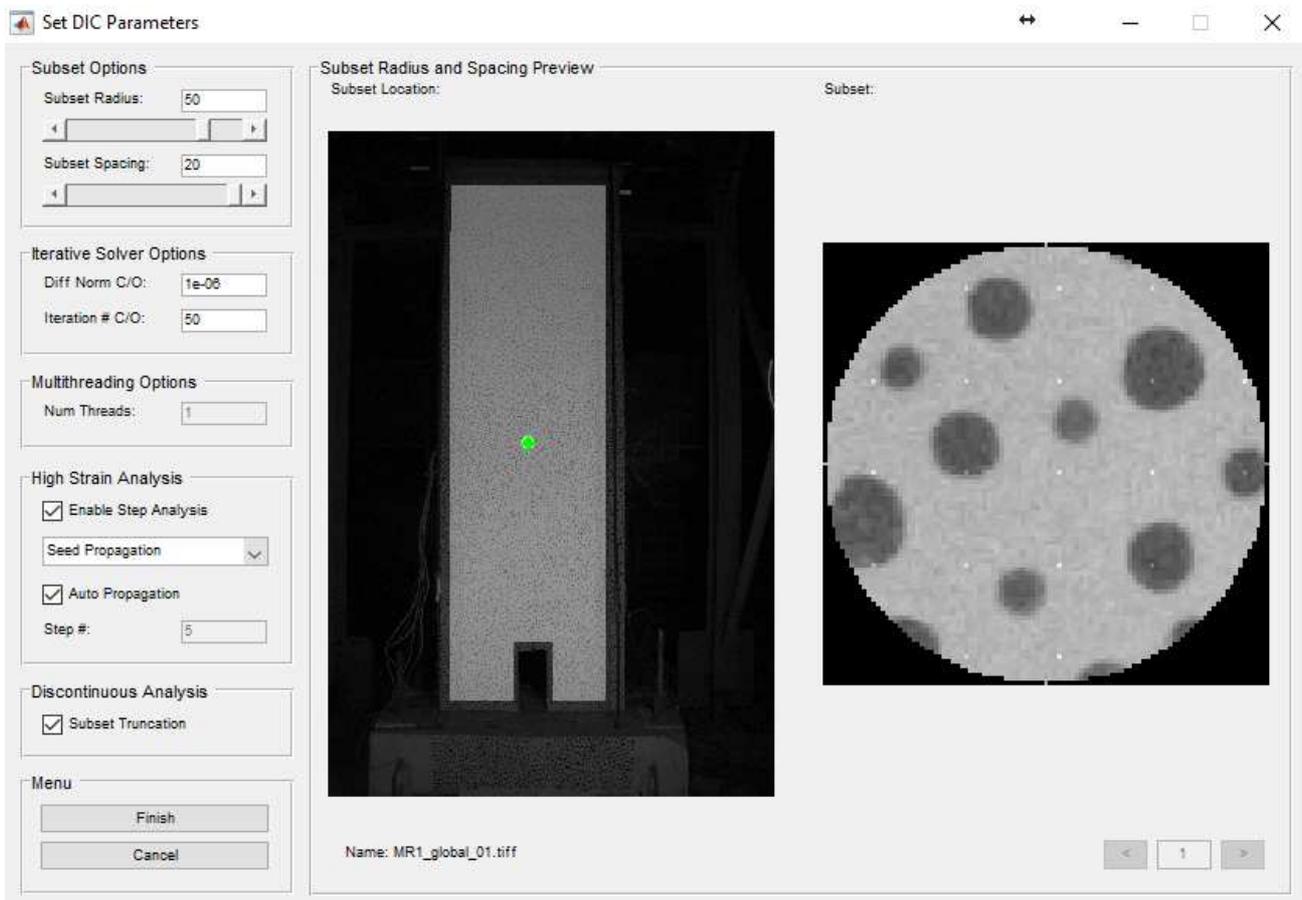


FIGURA 3.3: PARÁMETROS PARA EL ANÁLISIS DIC.

El análisis de las fotografías es el siguiente paso en el programa. Se definen la cantidad de semillas (una, para todos los análisis) que son el punto inicial de la convergencia y a donde se realiza la primera correlación. Finalmente se establece una relación entre pixeles y una unidad de longitud para estimar los desplazamientos. Para lograr lo anterior, se captura una foto con una huincha de medir sobre el muro, para poder ingresar esa distancia conocida (ver Figura 3.4). En el capítulo de resultados se mostrarán los valores usados para el análisis. Para

realizar el análisis de deformaciones, se elige un radio de subconjunto (similar al del análisis de desplazamiento) a partir del cual se define un plano que represente dicha vecindad de puntos y así obtener las deformaciones. El programa da las opciones de mostrar los resultados usando un enfoque lagrangiano o euleriano, además de realizar análisis discontinuo al igual que en los desplazamientos. La Figura 3.5 muestra la pestaña en la cual se define lo anterior.

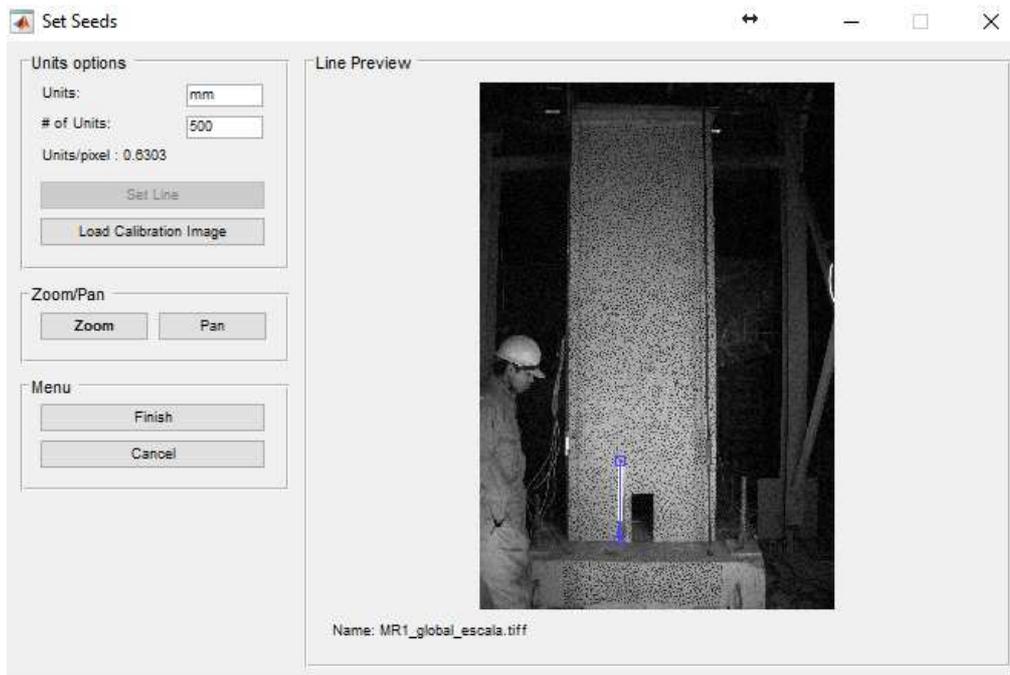


FIGURA 3.4: IMAGEN CON REGLA REFERENCIAL.

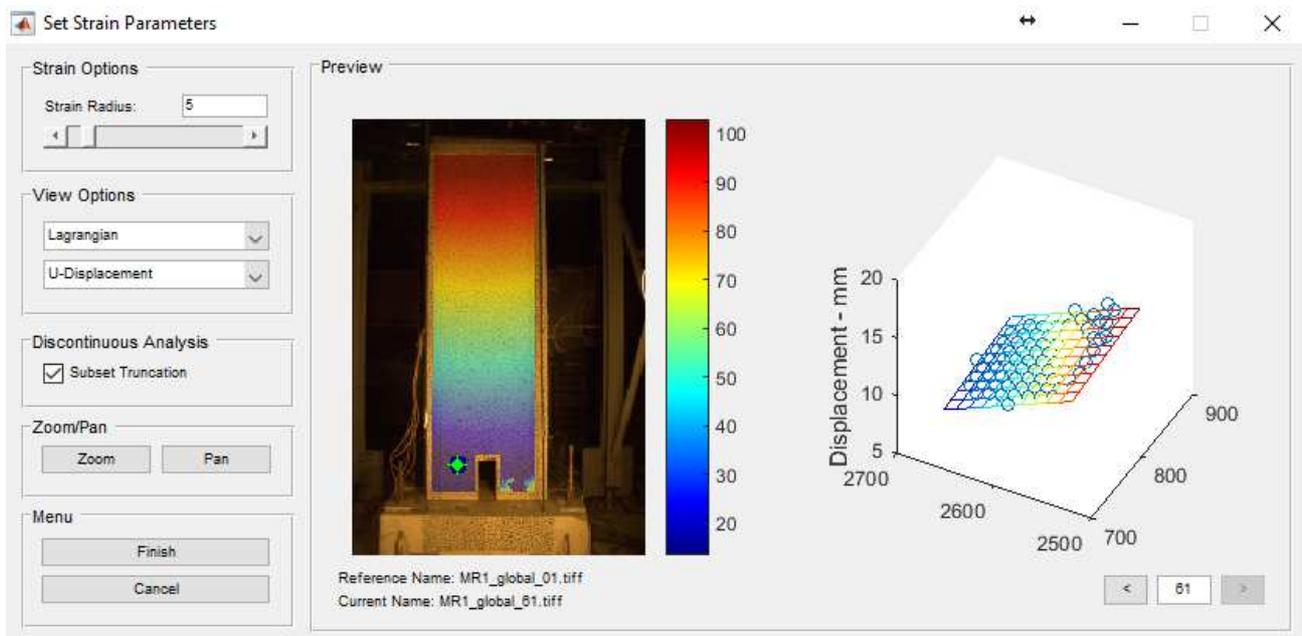


FIGURA 3.5: PARÁMETROS PARA ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN.

3.3 MODELACIÓN NUMÉRICA

3.3.1 SAFE TOOLBOX

La modelación realizada en el presente trabajo usa la plataforma realizada por Rojas (Rojas, 2012) SAFE Toolbox la cual es ejecutada en Matlab (The MathWorks Inc, 1994). Se basa en el método de los elementos finitos (FEM, por su sigla en inglés) para la modelación y análisis no lineal de muros de hormigón armado. Dispone de elementos tipo membrana y tipo placa de cuatro nodos y con tres grados de libertad por cada uno de éstos: dos desplazamientos y un giro en el plano, además de disponer de nueve puntos de cuadratura dentro de cada elemento. Para representar el comportamiento del hormigón armado el elemento puede crearse con capas de diferentes materiales con adherencia completa entre ellas. Tanto el acero como el hormigón ortotrópico usan el enfoque de deformaciones promedio, el cual considera que la presencia de grietas y la variación en las tensiones debida a éstas en las cercanías puede ser representada por una curva tensión deformación promedio. El enfoque ortotrópico del hormigón se traduce en explicar su comportamiento a través de dos relaciones uniaxiales de tensión deformación en los ejes principales del estado de deformaciones.

SAFE dispone de diferentes algoritmos para la resolución de problemas altamente no lineales, los cuales se diferencian principalmente en controlar la fuerza o el desplazamiento. El método de iteración es una modificación del método Newton-Rhapson en el cual se utiliza la pendiente de la tangente inicial para todo el proceso (Peña, 2016). Además, Peña añadió un factor de convergencia de carga, el cual permite disminuir la oscilación en la búsqueda de la respuesta, disminuyendo los tiempos de ejecución de las rutinas (Peña, 2016).

3.3.2 LEYES CONSTITUTIVAS

El enfoque de todos los materiales a modelar (hormigón y acero bajo distintas leyes constitutivas) es de deformaciones promedio, lo cual genera un comportamiento más homogéneo a la situación real que surge al existir una grieta (ver Figura 3.6).

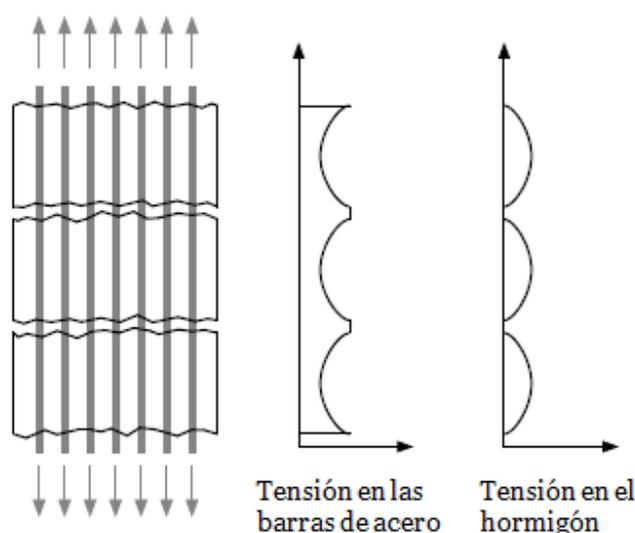


FIGURA 3.6: TENSIONES REALES EN LA SECCIÓN PRODUCTO DEL AGRIETAMIENTO (Rojas, 2012).

Es así que a continuación se presentan las leyes constitutivas de ambos materiales, las cuales son la base de la modelación y de los resultados obtenidos en el capítulo de resultados analíticos.

3.3.2.1 HORMIGÓN

El comportamiento del hormigón está caracterizado por la implementación de Massone (Massone, 2006) de la rutina “Concrete06” para OpenSees (McKenna, Fenves, & Scott, 2000), la cual tiene como envolvente de compresión la curva de Thorenfeldt (Thorenfeldt, Tomaszewics, & Jensen, 1987), el trabajo de Belarbi como envolvente a tracción (Belarbi & Hsu, 1994) y una regla histerética lineal.

La curva propuesta por Thorenfeldt para el hormigón sometido a compresión es la siguiente:

$$\sigma_c(\epsilon_c) = f'_c * \frac{n \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right)}{n - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right)^{nk}} \quad (3)$$

Donde f'_c corresponde a la máxima capacidad del hormigón a compresión, ϵ_{c0} es la deformación unitaria alcanzada en el peak y n y k son parámetros calibrados por Carreira y Kuang-Han para hormigones con resistencia normal (Rojas, 2012). La forma de la curva es la mostrada en la Figura 3.7

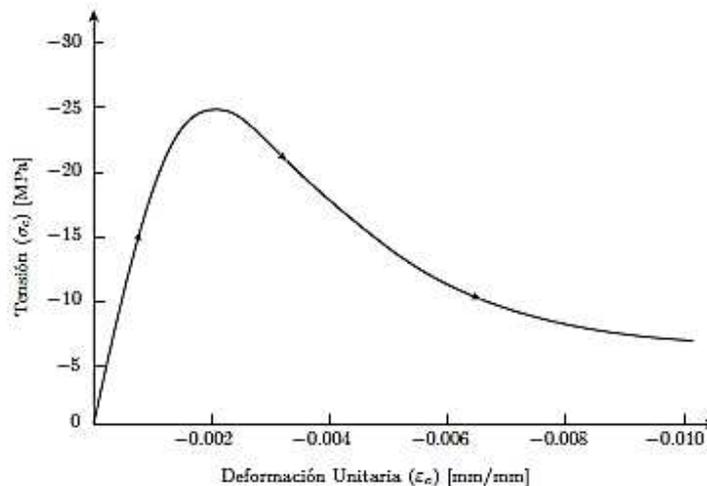


FIGURA 3.7: CURVA TENSIÓN DEFORMACIÓN HORMIGÓN A COMPRESIÓN (Peña, 2016).

La curva del hormigón sometido a tracción se basa en el trabajo realizado por Belarbi (Belarbi & Hsu, 1994), el cual realizó el ensayo de 17 paneles de hormigón armado a tracción pura, calibrando la siguiente expresión para describir su comportamiento:

$$\sigma_c(\epsilon_c) = \begin{cases} \left(\frac{f_{cr}}{\epsilon_{cr}}\right) \epsilon_c, & 0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cr} \\ f_{cr} \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_c}\right)^b, & \epsilon_{cr} \leq \epsilon_c \end{cases} \quad (4)$$

La expresión está dividida en dos partes: una pre y otra post agrietamiento, siendo lineal la primera y una rama descendente la segunda, la cual considera el aporte que tiene el acero que está actuando colaborativamente al hormigón frente a una grieta. Las expresiones de f_{cr} y ϵ_{cr} corresponden a la tensión de fisura y la deformación a ese valor de tensión, respectivamente. Finalmente, b es un parámetro que controla la caída de resistencia en la segunda rama de la ecuación. Las expresiones para las expresiones mostradas son:

$$f_{cr} = 0.31 \sqrt{f'_c (MPa)} \quad (5)$$

$$\epsilon_{cr} = 0.00008 \quad (6)$$

$$b = \begin{cases} 0.4, & \text{para hormigón no confinado} \\ 0.6, & \text{para hormigón confinado} \end{cases} \quad (7)$$

Donde el cambio de 0.4 a 0.6 en el valor de b es propuesto por Rojas (Rojas, 2012). La Figura 3.8 muestra la curva del hormigón a tracción.

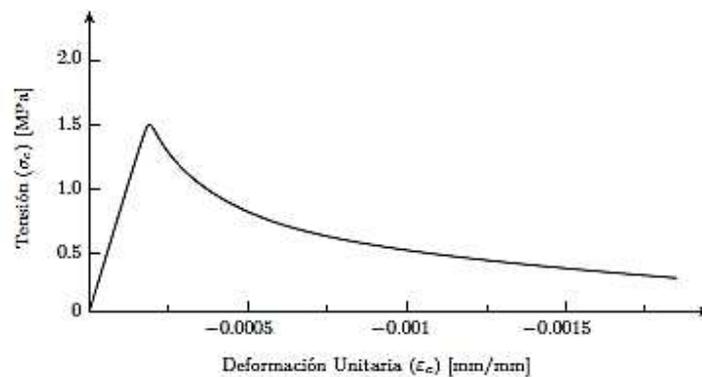


FIGURA 3.8: CURVA TENSIÓN DEFORMACIÓN HORMIGÓN A TRACCIÓN (Peña, 2016).

Finalmente, Massone propone un modelo histerético con tramos lineales en las zonas de carga y descarga con pendiente igual a la inicial, unidas también por una línea con pendiente igual al 7.1% de la pendiente inicial. La deformación plástica en compresión en descarga total (la cual corresponde a la deformación no recuperable) se obtiene mediante:

$$\epsilon_p^c = \epsilon_m^c \left(1 - e^{-\left(\frac{\epsilon_m^c}{\epsilon_{c0}}\right)\alpha_c} \right) \quad (8)$$

Donde ϵ_m^c es la máxima deformación de compresión alcanzada en el ciclo anterior y α_c es un parámetro que determina la cantidad de deformación plástica que quedará, fijándose en el valor $\alpha_c = 0.32$ para el presente estudio.

La deformación remanente que rige en tensión viene definida por el mismo modelo que el mostrado en compresión, resultando:

$$\epsilon_p^t = \epsilon_m^t \left(1 - e^{-\left(\frac{\epsilon_m^t}{\epsilon_{cr}}\right)\alpha_t} \right) \quad (9)$$

Donde ϵ_m^t y α_t son análogos a ϵ_m^c y α_c pero en tracción, respectivamente. Además para este caso $\alpha_t = 0.08$. Finalmente, Massone propone cambiar el origen de la envolvente a tensión para generar un modelo más preciso. La ley constitutiva final se puede ver en la Figura 3.9.

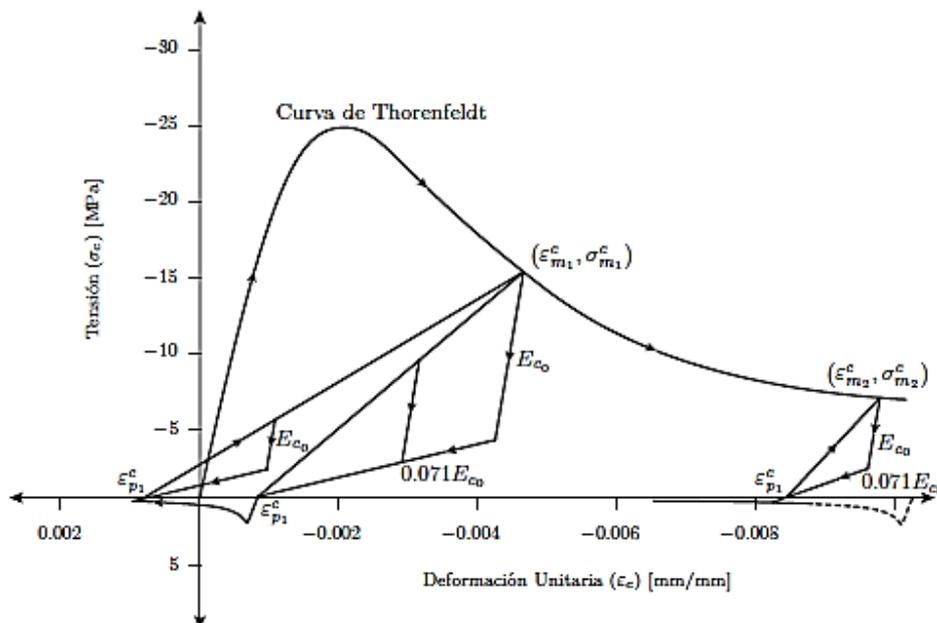


FIGURA 3.9: CURVA TENSIÓN DEFORMACIÓN PARA EL COMPORTAMIENTO CÍCLICO DEL HORMIGÓN (Peña, 2016)

El comportamiento biaxial del hormigón se caracteriza por modificar el valor de f'_c al multiplicarlo por un factor β y en un caso el valor de ϵ_{c0} al multiplicarlo por un factor δ , y está determinado por tres fenómenos: disminución de la resistencia a compresión por tracción en la dirección transversal, disminución de f'_c debido a daño por carga cíclica y aumento de f'_c y

ϵ_{c0} por confinamiento. Belarbi y Hsu (Belarbi & Hsu, 1995) proponen una reducción para el primer caso dado por:

$$\beta_s = \frac{k}{\sqrt{1 + k_\sigma \epsilon_{tracción}}} \quad (10)$$

Donde k toma el valor de 1.0 para tener resultados estables (Rojas, 2012), k_σ vale 250 en carga secuencial y 400 para carga proporcional, y $\epsilon_{tracción}$ corresponde a la deformación unitaria a tracción en la dirección perpendicular a la estudiada.

La mejora en el comportamiento en el hormigón por confinamiento es modelada con el estudio de Saatcioglu y Razvi, los cuales entregan las siguientes fórmulas (Saatcioglu & Razvi, 1992):

$$\beta_c = 1 + K \quad (11)$$

Donde K depende de las dimensiones del elemento de borde y disposición de la armadura de confinamiento (estribos) tanto en la sección como en la altura. Por otro lado, la variación de la deformación donde ocurre la máxima tensión en el hormigón se ve modificada por:

$$\delta = 1 + 5k \quad (12)$$

Nuevamente, el valor de k depende de las mismas variables de K . Finalmente, el daño por carga cíclica se basa en el trabajo de Palermo y Vecchio, y está caracterizado por (Palermo & Vecchio, 2003):

$$\beta_s = \frac{1}{1 + \alpha_1 \left(\frac{\epsilon_{rec}}{\epsilon_{c0}}\right)^{\alpha_2}} \quad (13)$$

Donde ϵ_{rec} corresponde a la diferencia en los valores máximos de deformación unitaria entre la carga y la descarga del material, y α_1 y α_2 son parámetros que controlan la magnitud y la forma del daño provocado.

3.3.2.2 ACERO

Para caracterizar al acero se dispondrán de dos modelos, uno de fácil implementación y otro que considera la pérdida de capacidad por pandeo debido por pocos ciclos. El primero es la curva propuesta por Menegotto y Pinto (Menegotto & Pinto, 1973) modificada posteriormente por Filippou (Filippou, Popov, & Bertero, 1983) para considerar el endurecimiento post fluencia. El segundo es el modelo creado por Massone (Massone & Moroder, 2009) y

modificado por Massone (Massone, Beltrán, Lacaze, & Rojas, 2010) para considerar una mejor distribución de las deformaciones de tracción sobre la barra.

La curva de Menegotto está restringida por cuatro rectas, dos paralelas con pendientes igual al módulo de elasticidad del acero, y las otras dos –también paralelas– con pendientes igual a la definida como endurecimiento post fluencia. Además, considera el efecto Bauschinger en el material. La ley viene definida por:

$$f_s^*(\epsilon_s^*) = b\epsilon_s^* + \frac{(1-b)\epsilon_s^*}{(1+(\epsilon_s^*)^R)^{1/R}} \quad (14)$$

$$\epsilon_s^* = \frac{\epsilon_s - \epsilon_r}{\epsilon_0 - \epsilon_r} \quad (15)$$

$$f_s^* = \frac{f_s - f_r}{f_0 - f_r} \quad (16)$$

Donde f_r y ϵ_r son la tensión y deformación en la última posición de cambio de deformación, la cual es también el origen de la curva con pendiente igual a E_s , el módulo de elasticidad del acero. Además, f_0 y ϵ_0 son la tensión y deformación en la intersección de las dos envolventes con distintas pendientes. El parámetro R viene definido por:

$$R = R_0 - \frac{a_1\xi}{a_2 + \xi} \quad (17)$$

Donde se calibraron experimentalmente los siguientes valores: $R_0 = 18$, $a_1 = 16.2$ y $a_2 = 0.15$. ξ se define según:

$$\xi = \left| \frac{\epsilon_m - \epsilon_0}{\epsilon_y} \right| \quad (18)$$

Donde ϵ_m es la mínima o máxima deformación del último cambio de deformación (carga o descarga) y ϵ_y es la deformación de fluencia.

De acuerdo al estudio de Belarbi se considera una reducción en la tensión de fluencia y un aumento en el endurecimiento post fluencia al considerar el comportamiento del acero embebido en el hormigón, según:

$$f_y^{ave} = (0.93 - 2B)f_y \quad (19)$$

$$b_{ave} = (0.8 + 10B)b \quad (20)$$

Y el valor de B se calcula según:

$$B = \frac{1}{\rho} \left(\frac{f_{cr}}{f_y} \right)^{1.5} \quad (21)$$

Con ρ como la cuantía de la sección. La curva del acero se puede apreciar en la Figura 3.10.

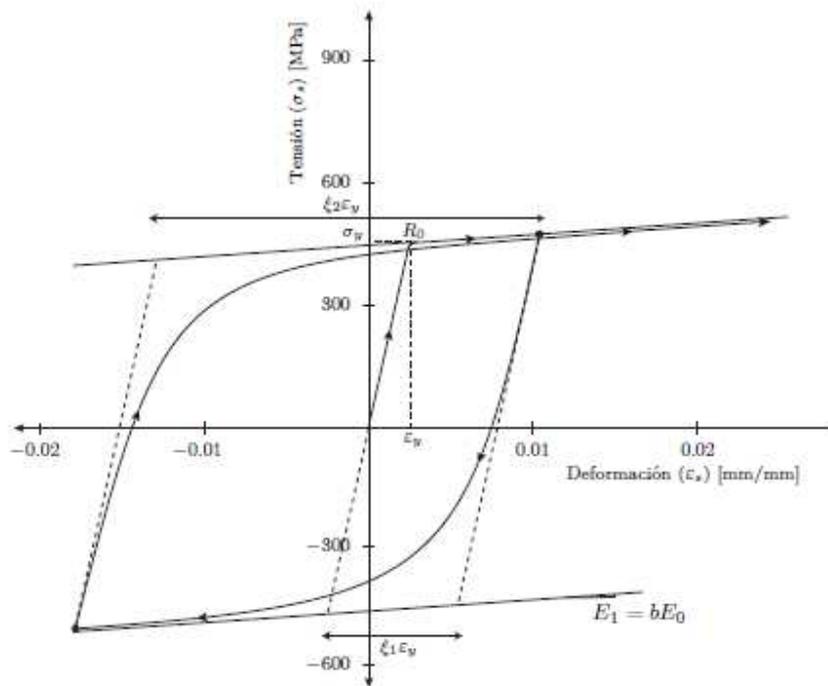


Figura 3.10: Curva tensión deformación acero (PEÑA, 2016).

El segundo modelo (Massone & Moroder, 2009) se basa en una curva en tracción que parte con pendiente igual al módulo de elasticidad hasta la fluencia. Luego toma un valor constante hasta el inicio del endurecimiento y de ahí aumenta la tensión hasta llegar a su máximo. Finalmente comienza la zona de descenso, la cual se modela de manera lineal. Dado que el modelo considera el efecto del pandeo local de las barras, es probable que el material esté sometido a altas deformaciones y debió ser establecida la respuesta del material después de alcanzada su máxima tensión. Las ecuaciones para cada rama y la forma general de la curva se pueden apreciar en la Figura 3.11.

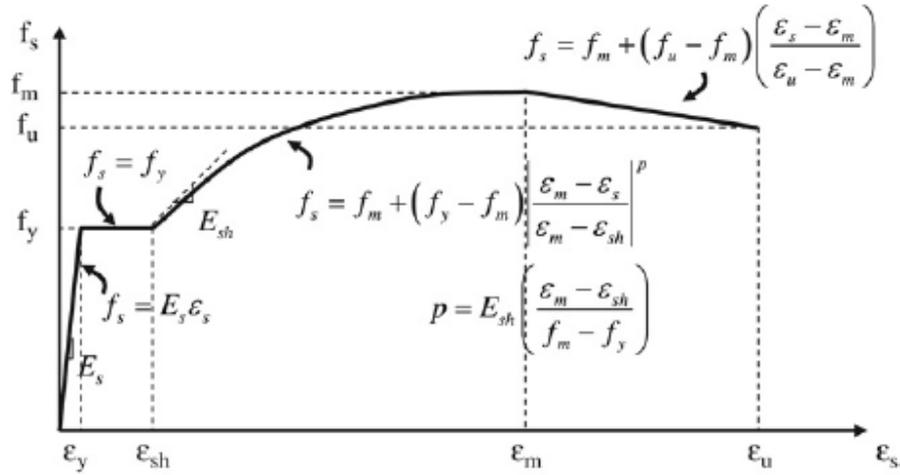


FIGURA 3.11: CURVA TENSIÓN DEFORMACIÓN ACERO EN TRACCIÓN CON PANDEO INCLUIDO (Massone & Moroder, 2009).

El comportamiento del acero a compresión tiene una pequeña diferenciación debido a que las coordenadas ingenieriles (que se basan en las dimensiones iniciales de los elementos para calcular la tensión y la deformación) no captan muy bien el estado de la barra. Para esto expresa la misma ley constitutiva dada en tracción pero considerando las coordenadas naturales, que se basan en las dimensiones reales de los elementos durante la carga. Dichas expresiones se calculan mediante:

$$f_{s,c} = -f_{s,t}(1 + \epsilon_{s,t})^2 \quad (22)$$

$$\epsilon_{s,c} = -\frac{\epsilon_{s,t}}{1 + \epsilon_{s,t}} \quad (23)$$

Donde $f_{s,c}$ y $\epsilon_{s,c}$ son la tensión y la deformación a compresión para los correspondientes tensión, $f_{s,t}$ y deformación, $\epsilon_{s,t}$ en tracción.

El comportamiento cíclico viene representado por una curva de transición, llamada curva A, que une los puntos de cambio de deformación (carga o descarga). La curva A siempre está acotada por las envolventes de tracción y compresión, pero con sus inicios desfasados al cambio de deformación. Además, considera el efecto Bauschinger, es decir, una disminución en la tensión en una dirección producto de la deformación alcanzada en el ciclo anterior en la otra dirección (de tracción a compresión, o viceversa). Dicho comportamiento se puede apreciar en la Figura 3.12 (para más información consultar la bibliografía citada).

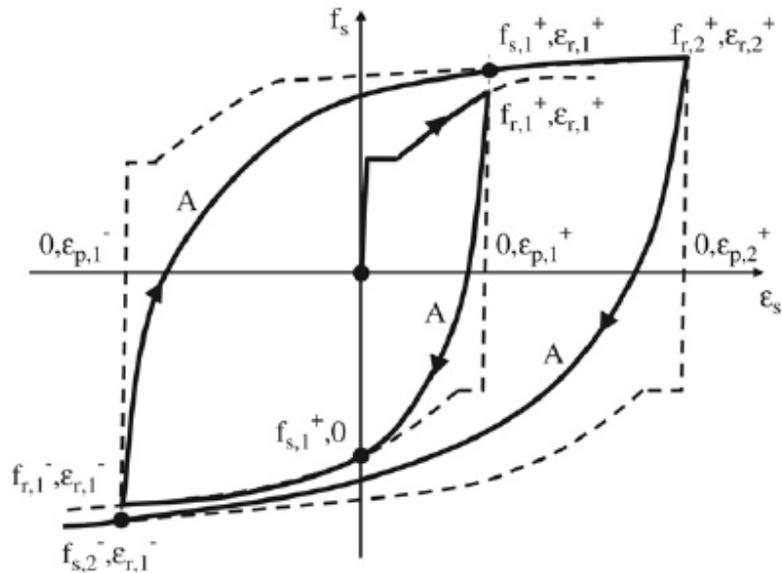


FIGURA 3.12: COMPORTAMIENTO CÍCLICO ACERO CON PANDEO INCLUIDO (Massone & Moroder, 2009).

La modelación del efecto del pandeo viene dada al generar un modelo de plasticidad concentrada, el cual asume que dos estribos consecutivos son totalmente rígidos, generando un apoyo empotrado en un extremo y un apoyo deslizante en el otro. Se generan cuatro rótulas: una en cada extremo y dos en el centro, y son aquellas las que se deforman en compresión (en tracción la deformación ocurre en toda la barra, de acuerdo a la modificación de Massone, (Massone et al., 2010)). Para considerar el pandeo, en un comienzo se induce a la barra una fuerza transversal generando una pequeña deformación inicial a la barra, pero suficiente para inducir el pandeo en la barra cuando esté sometida a grandes deformaciones.

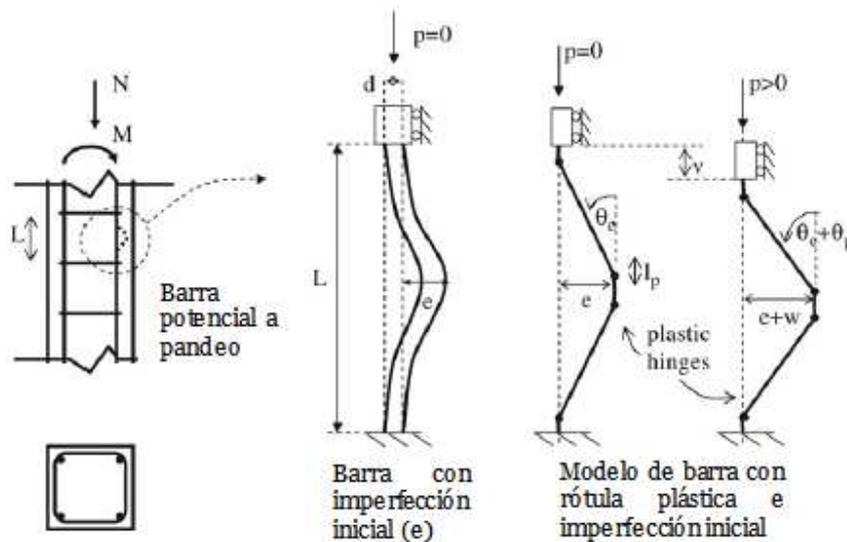


FIGURA 3.13: MODELACIÓN DEL PANDEO (Massone & Moroder, 2009).

4. DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUCCIÓN

Dentro de todos los puntos que cubre el presente estudio, la parte experimental es la más importante. Del capítulo 2 se puede desprender que la validez de los datos experimentales está por sobre los datos analíticos dado que la desviación en los segundos (para un mismo ensayo) por lo general es mayor que para los primeros. Además los resultados experimentales reflejan realmente el comportamiento de lo ensayado, mientras que en la modelación los resultados están supeditados al alcance de la modelación (tipo de materiales, análisis, modelación en sí, entre otros).

En este capítulo se mostrarán los principales puntos de la etapa experimental. Es importante mencionar que todos los ensayos fueron realizados en conjunto con otro memorista del departamento (Rivas, 2016), ya que debido a la envergadura de los ensayos el trabajo es poco factible de realizar por una persona. Además, se contó con el apoyo de un ingeniero encargado de coordinar las distintas tareas a realizar.

Dado que este estudio es parte de un proyecto que abarca discontinuidades tanto del tipo bandera (Díaz, 2016), (Manríquez, 2016) y (Manríquez et al., 2017) como del tipo puerta (Rivas, 2016) y (Muñoz, Rivas, Massone, Rojas, & Herrera, 2017), se consideró sólo un muro como referencial, es decir, diseñado de acuerdo a los estándares nacionales y con ningún tipo de discontinuidad. Para alcanzar realmente los objetivos del trabajo y determinar la influencia de las aberturas, todas las demás características del muro (dimensiones, geometría, cantidad y disposición de armadura) debiese mantenerse lo más constante posible. Sólo de este modo las diferencias entre el caso base y cualquier otro sería producido exclusivamente por la presencia de la discontinuidad.

4.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PROBETAS

4.2.1 GEOMETRÍA

Las dimensiones generales simulan ser una escala aproximada de 1 a 3. El alto del muro resulta la dimensión más crítica debido a la capacidad del laboratorio. Es así que se construyen cuatro muros de sección rectangular de hormigón armado, todos con una abertura central en la base, y diferenciarse en tener o no la presencia de losas. Las medidas de los muros (las cuatro probetas ensayadas del estudio más el muro base) son 2.65 [m] de alto, 0.9 [m] de largo y 150 [mm] de espesor. Todos los muros descansan sobre una fundación de 1.4 [m] de largo, 0.7 [m] de ancho y 0.4 [m] de espesor y están coronados con una viga de 0.9 [m] de largo, 0.3 [m] de alto y 0.4 [m] de espesor. La función del pedestal es para anclar las barras longitudinales del muro, anclar el muro a la losa de reacción y servir para la aplicación de la carga axial, mientras que la función de la viga es para aplicar la carga lateral y servir de apoyo para el sistema de carga axial.

Todas las aberturas están centradas en la base y tienen las siguientes dimensiones, definiendo así cada probeta: la abertura de MR1 tiene un largo de 135 [mm] y un alto de 300 [mm], en MR2 las dimensiones de la abertura es de 270 [mm] de largo y 300 [mm] de alto, y tanto en MR3 como en MR4 el largo de la abertura es de 270 [mm] y 600[mm] su alto. MR4 se

diferencia de MR3 por contar con dos losas de 600[mm] de largo, 900 [mm] de ancho y 65 [mm] de espesor, ubicadas (con respecto a su cara inferior) a 300 [mm] y a 600 [mm] desde el inicio del muro. Las dimensiones generales se pueden ver en la Figura 4.1

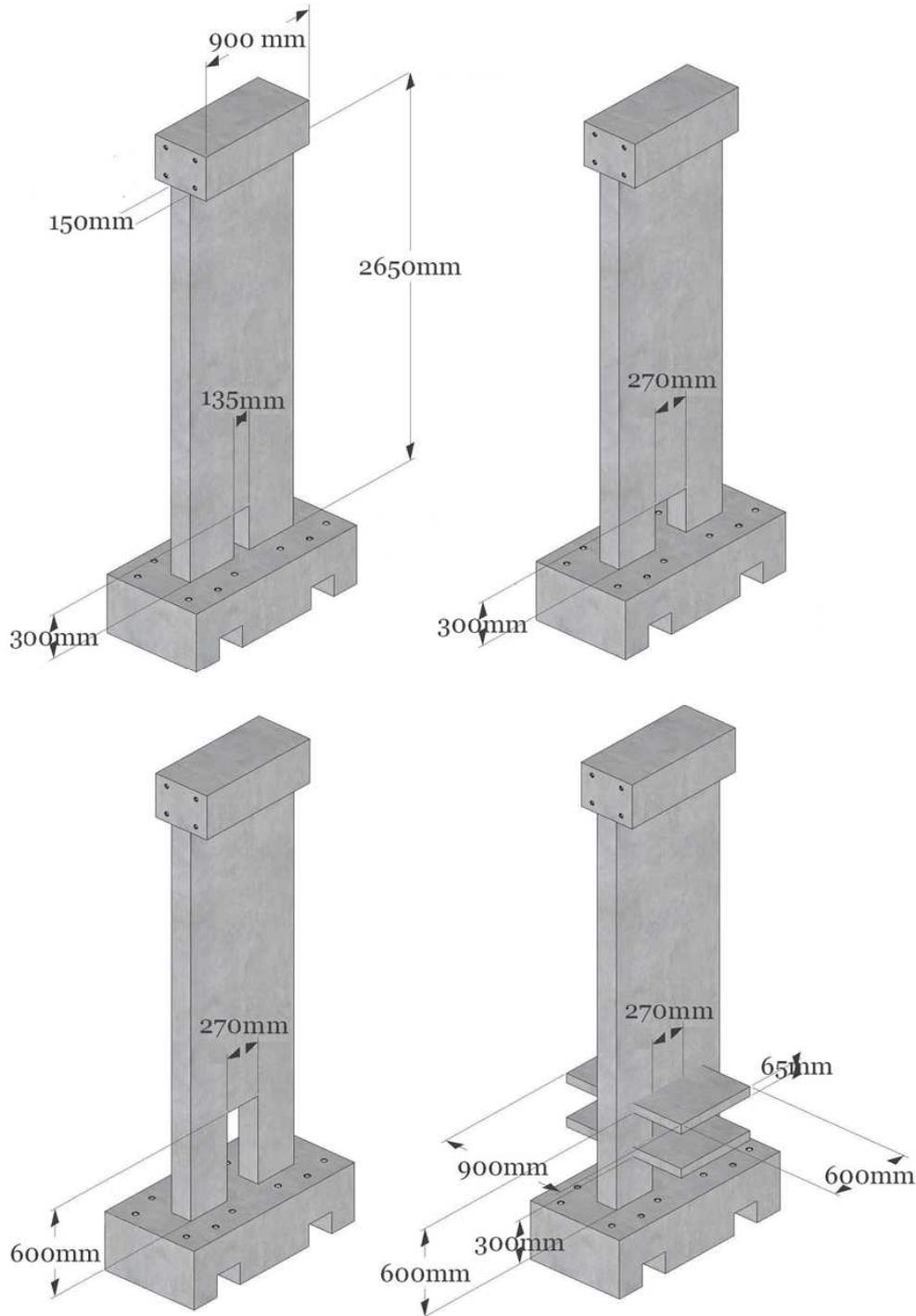


FIGURA 4.1: DIMENSIONES GENERALES DE LAS PROBETAS

4.2.2 DISEÑO Y DETALLAMIENTO

Tanto el diseño como el detallamiento de los muros fueron realizado de acuerdo a la normativa vigente, la cual es el uso de la norma ACI 318 (ACI Committee 318, 2008) más el decreto 60 (D.S. N°60, 2011) que tiene modificaciones con respecto al detallamiento en muros y otras consideraciones que aplican después del terremoto del 27 de Febrero de 2010. El diseño de la probeta base (MRO de aquí en adelante) estuvo a cargo de Díaz (Díaz, 2016), el cual consideró una cuantía de un 5% para el refuerzo de borde longitudinal, repartido en el 10% del largo del muro, siendo ese el elemento a confinar hasta 0.9 [m] por sobre el inicio del muro. La carga axial quedó determinada en un 10% de la capacidad máxima de la sección a compresión pura. Además, las propiedades de los materiales son de 25 [MPa] para la capacidad máxima del hormigón a compresión y 420 [MPa] para la fluencia del acero (excepto para los estribos, que tienen una fluencia de 280 [MPa]). Lo anterior es considerado como materiales típicos en edificación en el país (Estay, 2008). El diseño tanto de la fundación como de la viga fueron tales para que trabajaran de manera elástica durante los ensayos. El diseño de los muros de este estudio tiene diferencias sólo en la disposición de la armadura de reparto en la zona de la abertura, además de haber agregado una armadura de refuerzo en los bordes de la abertura.

El refuerzo de borde longitudinal consta de 4 barras de 16 [mm], las cuales están confinadas en los primeros 920 [mm] con estribos de 6 [mm] de diámetro espaciados a 70 [mm]. Sobre los 920 [mm] el confinamiento cambia: para un extremo se aumentó el espaciamiento a 100 [mm], mientras que para el otro extremo no se dispusieron estribos. La idea era estudiar si había una influencia en el confinamiento por sobre el largo de rótula plástica, sin embargo no se registraron resultados interesantes. La armadura horizontal, doble malla, es de barras de 8 [mm] espaciadas a 150 [mm] a la altura de la discontinuidad, y separadas a 200 [mm] en el resto del muro. La intención de reducir el espaciamiento en la zona de la abertura es mantener la capacidad al corte de la sección, tratando de suplir la falta del hormigón de la abertura con una mayor cuantía de acero. La armadura vertical (también doble malla) es la que sufre los mayores cambios con respecto a MRO: mientras en el caso base son tres barras de 8 [mm] espaciadas a 200 [mm], en las demás probetas son sólo dos barras que van proyectadas cerca de los bordes de la discontinuidad, y no llegan a la base. El refuerzo de abertura consta de dos barras de 10 [mm] de diámetro, que se empalman con la armadura vertical por sobre la abertura. Lo anterior tiene como fin que la armadura que llega a la sección crítica en los muros con discontinuidades sea lo más parecida en magnitud a la del muro base: es así que en la base se reemplazan seis barras de 6 [mm] de diámetro (la armadura de repartición vertical) con cuatro barras de 10 [mm] de diámetro (el refuerzo de armadura en la abertura). Las losas del muro MR4 constan de 4 barras de 8 [mm] en cada capa (superior e inferior) para la dirección longitudinal, donde 2 están en el plano del muro actuando como refuerzo de losa, y las otras dos están en la losa misma. En la dirección transversal, se disponen de tres barras de 8 [mm] tanto por arriba como por abajo, espaciadas a 225 [mm]. Más información sobre el diseño del muro base se puede encontrar en los trabajos de Díaz (Díaz, 2016) y Manríquez (Manríquez, 2016), mientras que para los muros con discontinuidades se puede acudir al trabajo de Rivas (Rivas, 2016). La disposición de la armadura de la fundación y la viga de puede ver en el Anexo 1, mientras que las elevaciones y cortes de la armadura de las cuatro probetas se puede ver en las Figura 4.2, Figura 4.3, Figura 4.4 y Figura 4.5.

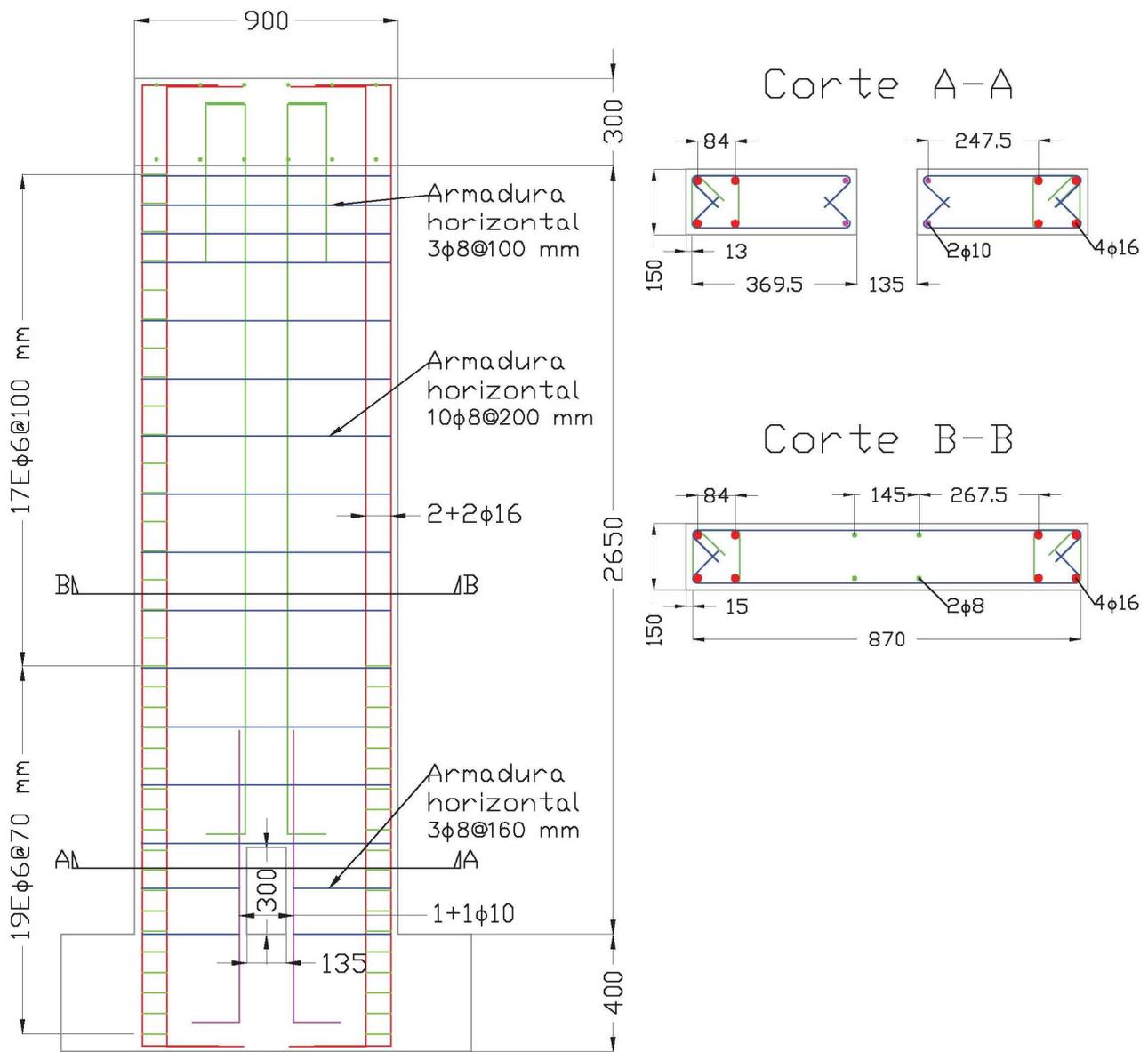


FIGURA 4.2: ELEVACIÓN Y CORTES ARMADURA MR1.

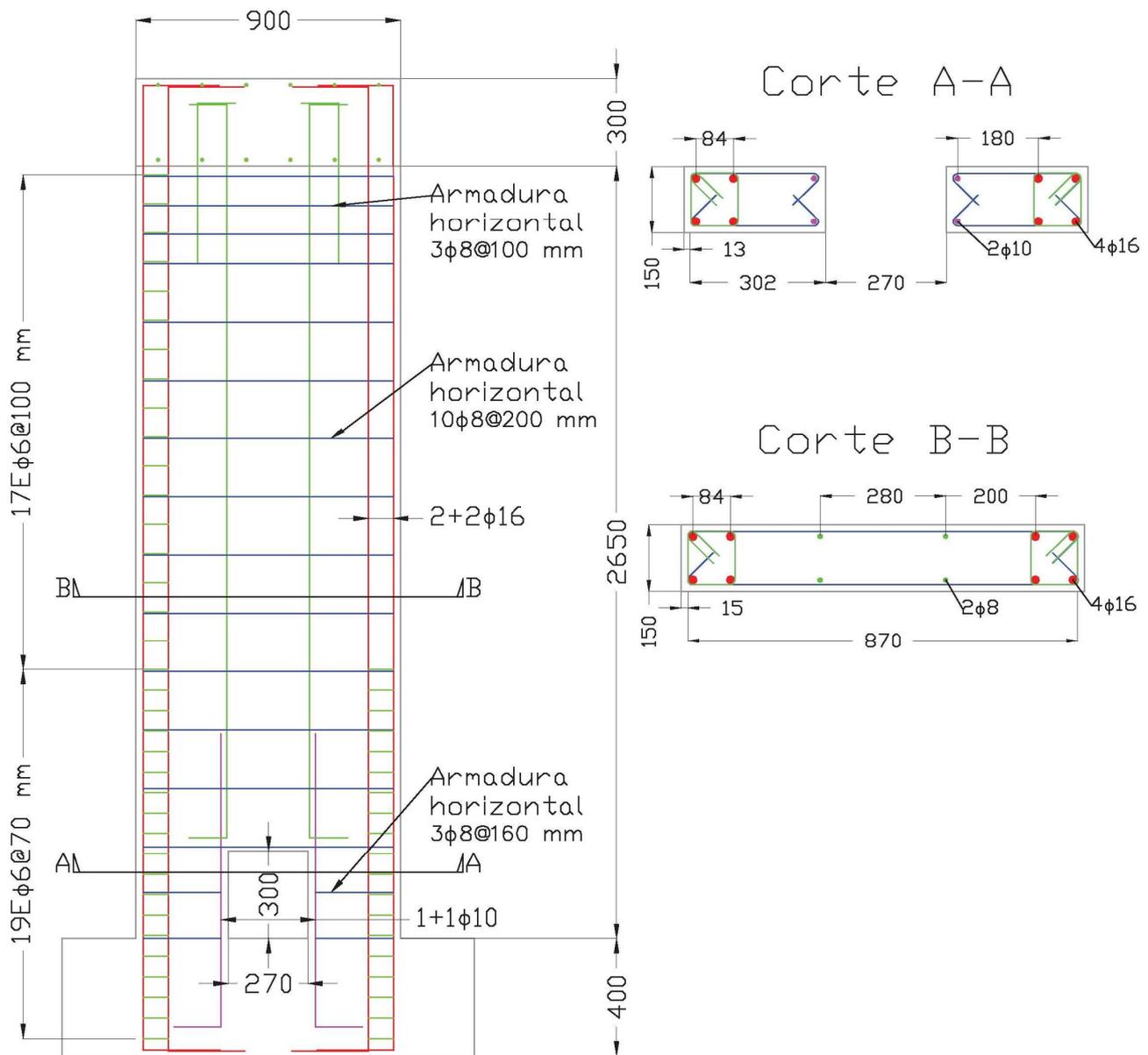


FIGURA 4.3: ELEVACIÓN Y CORTES ARMADURA MR2.

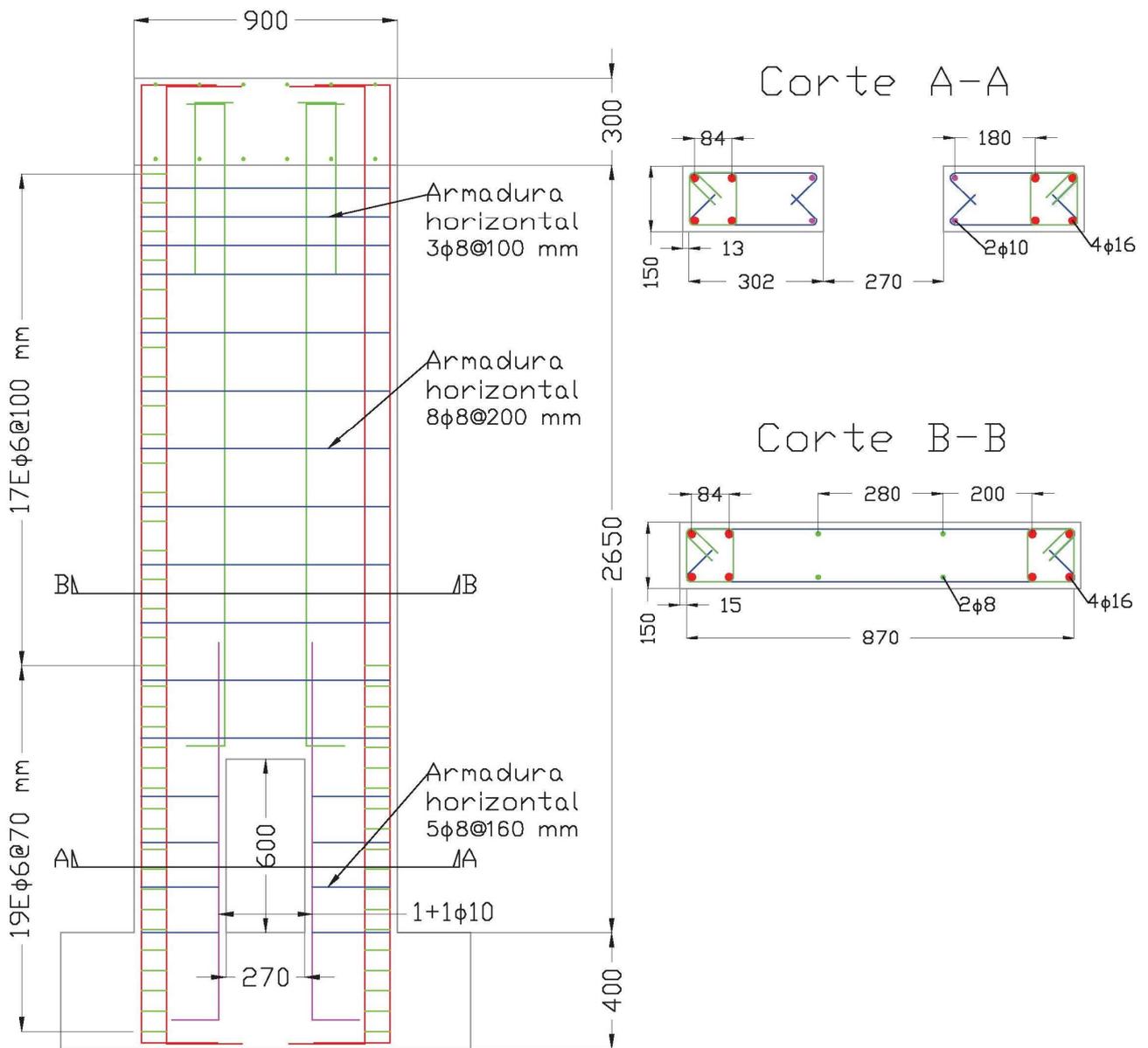


FIGURA 4.4: ELEVACIÓN Y CORTES ARMADURA MR3.

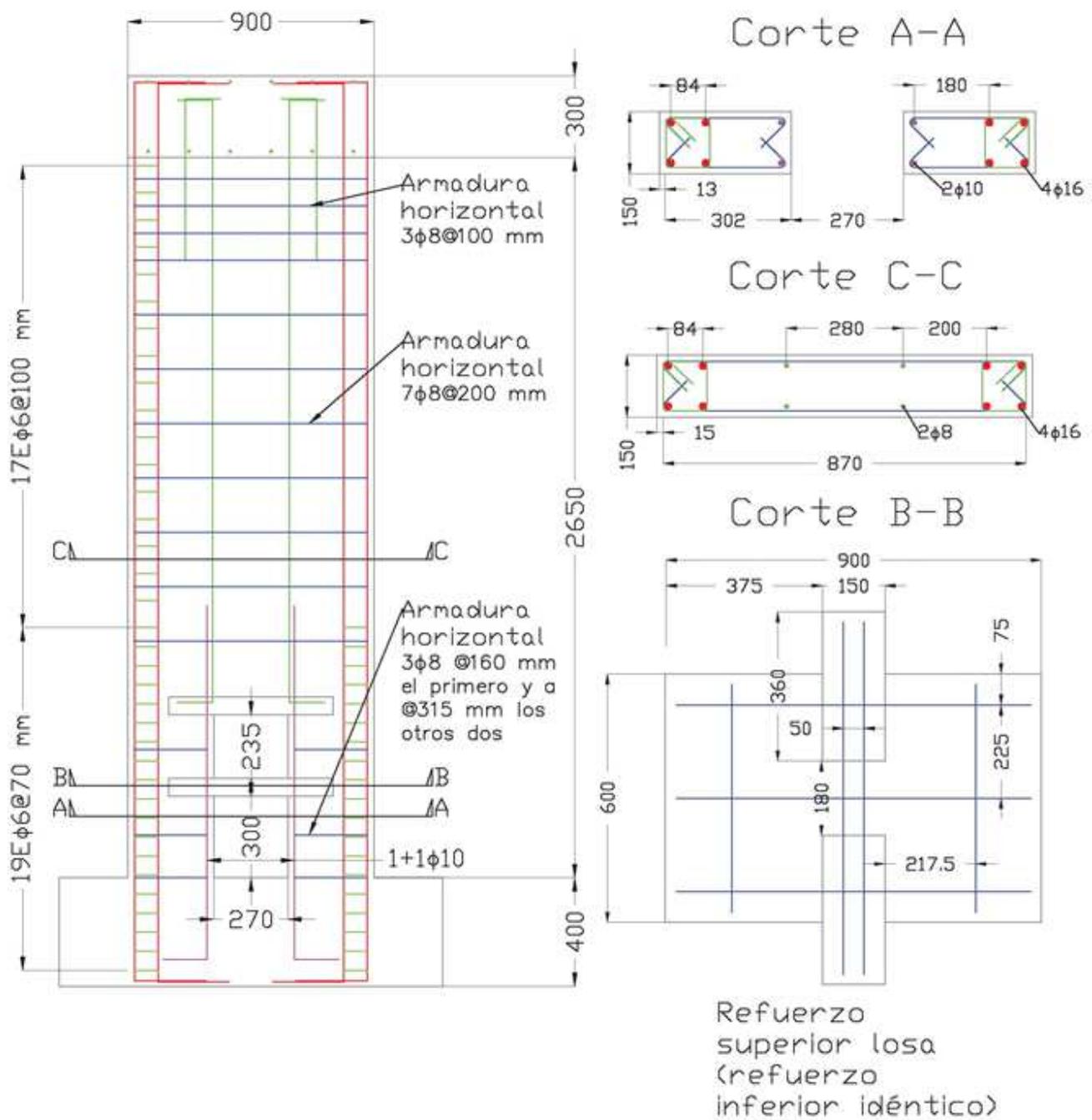


FIGURA 4.5: ELEVACIÓN Y CORTES ARMADURA MR4.

4.2.3 RESISTENCIA DE LOS MATERIALES

Tal y como se mostró en la etapa del diseño, los materiales usados son de usual práctica en el país (Estay, 2008). Se usó un hormigón H-30 (90) que tiene una resistencia máxima a la compresión para probeta cilíndrica de 25 [MPa]. Se registraron catorce cilindros para ser ensayados y tener el valor real de la resistencia del hormigón para el día de cada ensayo, siendo elaborados el día en que se hormigonaron los muros (2 de febrero de 2016). En la Tabla 4-1 se pueden ver los valores obtenidos de los ensayos, teniendo un valor promedio de 40 [MPa] (sin contar el primer cilindro ensayado, ya que no representa la resistencia para algún muro en particular). Para el capítulo de modelación, se considerará este promedio como el valor a ingresar en el programa, puesto que la desviación estándar entre las probetas de cada ensayo es similar a las diferencias en resistencia entre las probetas de un ensayo y el siguiente. Además, facilita la modelación.

TABLA 4-1: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LAS PROBETAS DE HORMIGÓN.

Tiempo de fraguado	Fecha de ensayo del muro (si aplica)	f'_{c1} [MPa]	f'_{c2} [MPa]	f'_{c3} [MPa]	f'_{c4} [MPa]	$f'_{c\bar{x}}$ [MPa]	$\sigma_{f'c}$ [MPa]
28 días	01/03/2016	30	-	-	-	30	-
128 días	31/05/2016 (MR2)	43.5	37.0	42.2	35.6	39.6	3.86
128 días	08/06/2016 (MR1)	41.5	36.8	39.5	-	39.3	2.34
154 días	16/06/2016 (MR3)	41.4	39.5	39.1	-	40.0	1.25
198 días	14/07/2016 (MR4)	40.2	41.6	41.7	-	41.2	0.81
					\bar{x} [MPa]	40.0	

Con respecto al acero, se usó del tipo A630-420H (excepto en las barras de 6 [mm] que son de calidad A440-280H). Se consideraron tres barras por cada diámetro usado para ser ensayadas y obtener la ley constitutiva para la modelación. Dado que el acero del país por lo general tiene un comportamiento muy estable, no varían mucho los valores entre cada barra del trío (lo cual se puede ver en la Tabla 4-2). Los ensayos, además de tener el registro de la máquina universal igual que en los ensayos de los cilindros, contaron con la medición de un extensómetro, el cual entrega información mucho más precisa de la deformación de la barra que la máquina universal. Los resultados de los ensayos de las barras se pueden ver en el Anexo 2, mientras que la Tabla 4-2 muestra los principales resultados obtenidos (datos marcados con asterisco (*) son de la máquina universal). La razón entre la tensión última y la tensión de fluencia es cerca de 1.4.

TABLA 4-2: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LAS BARRAS DE ACERO.

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

4.3 INSTRUMENTALIZACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS

La toma de datos es una de las partes fundamentales de cualquier experimento. Si no se toman datos, no hay información que procesar ni conclusiones que obtener. Es así que muchas veces la misma información se trata de obtener a través de distintos medios, para confirmar la validez de los datos más allá de la metodología, las limitaciones y los alcances de cada sistema.

En el presente trabajo se obtuvieron datos a través de cuatro métodos: celdas de carga para registrar la carga lateral y la carga ejercida por uno de los cuatro gatos, strain gages soldados a las barras de refuerzo para registrar su deformación unitaria, LVDT's ubicados dentro y fuera del muro para registrar desplazamientos, y el uso de fotogrametría para obtener desplazamientos y deformaciones de todo el muro. A continuación se detallarán cada uno de los métodos, exceptuando las celdas.

4.3.1 STRAIN GAGES

Los strain gages, o galgas extensiométricas por su nombre en español, son sensores que poseen un conductor eléctrico que varía su resistencia linealmente con respecto a la deformación a la que esté sometido. De fábrica entregan el factor de conversión para obtener directamente la deformación que registra el sensor. Las galgas usadas son de la marca HBM y modelo K-LY 41-6/120, con un largo útil de medición de 6 [mm]. La instalación fue realizada según lo descrito por Rivas (Rivas, 2016). La Figura 4.6 muestra la ubicación de los strain gages soldados para cada muro.

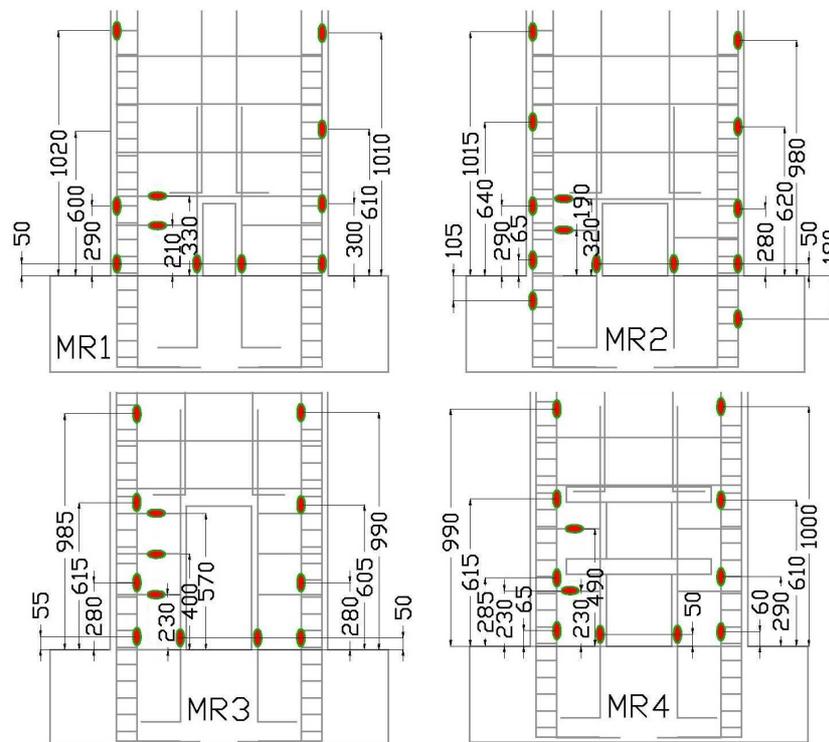


FIGURA 4.6: UBICACIÓN STRAIN GAGES.

4.3.2 LVDT's

Los LVDT's, o transductores diferenciales de variación lineal, son sensores que constan de un cuerpo cilíndrico hueco y un núcleo. Cada una de las partes se ancla a uno de los extremos que se desean medir, y la variación de desplazamiento entre el cilindro y el núcleo genera una variación de voltaje, el cual es registrado. Luego, mediante la calibración de fábrica se puede obtener el desplazamiento relativo entre el núcleo y el cilindro, o dicho de otra forma, entre los dos puntos de interés.

La fijación de los sensores al muro se realizó a través de hilos sin fin de 8 [mm] de diámetro embebidos en el hormigón. En estos hilos se ponía una caja de madera que permitía su fijación al hilo con el uso de tuercas, y además permitían fijar el cilindro del LVDT. El punto en el cual se fijaba el núcleo se armaba con varillas, golillas y tuercas. Para los LVDT que estaban en una posición diagonal (para registrar corte) se usaba además resortes para mantener la dirección fija tanto del cilindro como del núcleo. Las líneas rojas terminadas con un punto azul de la Figura 4.7 muestran la ubicación de los puntos de interés medidos con LVDT's dentro del muro. Además de los sensores mostrados en la Figura 4.7, se instalan dos LVDT's en el pedestal para determinar la rotación del muro, dos sensores en un marco independiente para determinar el deslizamiento en la base y el desplazamiento de techo, un sensor para determinar el desplazamiento entre la base del muro y el pedestal, y el LVDT del actuador que indica el desplazamiento de techo con respecto a éste.

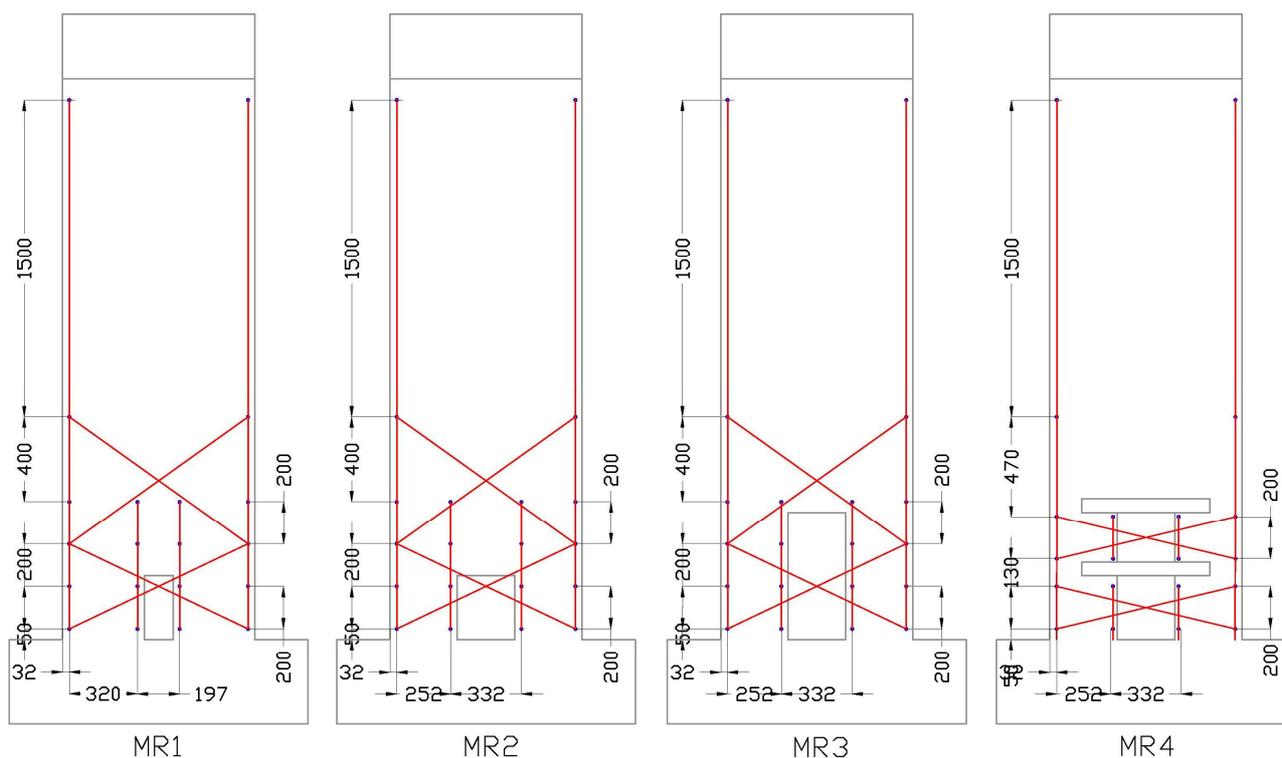


FIGURA 4.7: UBICACIÓN LVDT'S EN UNA DE LAS CARAS DE LOS MUROS-

4.3.3 FOTOGRAMETRÍA

La cara opuesta a la cual se instalan los LVDT's se usa para la fotogrametría. Para una correcta captura de datos en la correlación digital de imágenes es necesario otorgar textura a la superficie. Es así que se pintan puntos negros de distintos tamaños aleatoriamente sobre una base de cal blanca. La Figura 4.8 muestra el resultado final para el muro MR4.

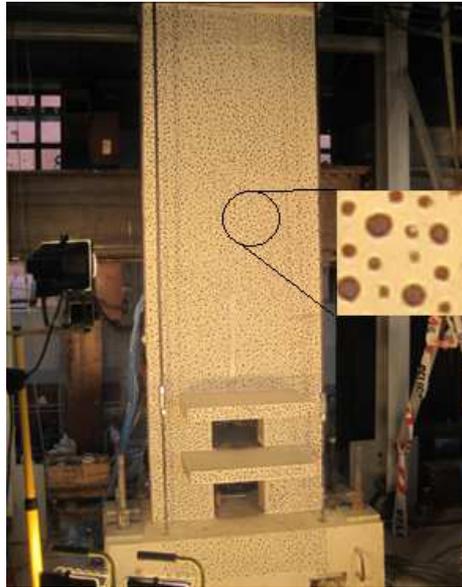


FIGURA 4.8: PUNTOS PARA FOTOGRAMETRÍA.

La captura de las fotos se realizó con dos cámaras, una encargada de registrar el muro entero (modelo EOS Rebel Canon T3i) y la segunda enfocada en la zona de la discontinuidad (modelo EOS Rebel Canon T5). Las características más relevantes en la toma de las fotografías se muestran en las Tabla 4-3 y Tabla 4-4.

TABLA 4-3: DATOS DE CAPTURA CÁMARA EOS REBEL T3I.

EOS Canon T3i	MR1	MR2	MR3	MR4
Megapíxeles	18	18	18	18
Punto Focal	f/6.3	f/6.3	f/6.3	f/6.3
Tiempo de exposición [s]	1/1000	1/1000	1/1000	1/1000
Velocidad ISO	ISO-6400	ISO-6400	ISO-6400	ISO-6400
Distancia focal [mm]	18	18	20	18

TABLA 4-4: DATOS DE CAPTURA CÁMARA EOS REBEL T5.

EOS Canon T3i	MR1	MR2	MR3	MR4
Megapíxeles	18	18	18	18
Punto Focal	f/6.3	f/6.3	f/6.3	f/6.3
Tiempo de exposición [s]	1/1000	1/1000	1/1000	1/1000
Velocidad ISO	ISO-6400	ISO-6400	ISO-6400	ISO-6400
Distancia focal [mm]	30	49	27	40

4.4 MONTAJE

Para la realización de los ensayos es necesario hacer una serie de tareas con la idea de reflejar del modo más fiel lo que se pretende ensayar. Dadas las capacidades del laboratorio, herramientas disponibles y trabajos en paralelo dentro de las instalaciones de la universidad, el montaje total de los muros toma un tiempo cercano a cinco días. A continuación se presentan las principales actividades que debían ser realizadas para poder realizar un ensayo.

Con los muros ya dentro del laboratorio, se posiciona el muro a ensayar y se aplica una capa de yeso con el fin de aumentar el contacto entre la probeta y la losa de reacción. A pesar de aplicar el yeso, en los cuatro muros del estudio se apreció una evidente curva en la base del pedestal que generó una mayor rotación de cuerpo rígido (que castiga al desplazamiento de techo del muro). En el capítulo de resultados experimentales se mostrará el efecto de la rotación del pedestal.

Con el muro ya instalado en la posición de ensayo se procede al tensado de las barras. Dado que una fuerza horizontal aplicada en la cima del muro puede generar un volcamiento, se usan barras para anclar la probeta a la losa de reacción y simular un empotramiento. Sin embargo la fuerza generada por el actuador induce una tracción en las barras, haciendo que eventualmente la base del muro se despreque de igual modo de la losa de reacción. Para evitar esto, se aplica una tracción previa a las barras de anclaje de modo que –sin ninguna carga aplicada sobre el muro- las barras traccionadas compriman el pedestal y se tenga una mayor holgura antes del despegue de la base del muro. La tensión aplicada a cada barra fue de 23 [tonf]. El sistema usado para el anclaje se puede ver en el trabajo de Rivas (Rivas, 2016). Una vez anclado el muro a la losa de reacción, se realiza el mismo procedimiento para el sistema que permite unir el actuador con la probeta.

Posterior a todas las pretensiones necesarias, se instala el sistema de carga axial. La necesidad de aplicar una carga vertical a los muros viene de la realidad de cualquier muro estructural: además de ser parte del sistema de carga lateral, son parte fundamental del sistema de carga vertical. Además, al no considerar carga vertical se tendrían mejores desempeños de los muros ensayados, lo cual no estaría siendo conservador y la validez de los datos de pondrían en duda. La fuerza de compresión es generada por barras que se encuentran traccionadas: un extremo se encuentra anclado en el pedestal y el otro en el sistema de carga vertical. Este sistema consta de una viga longitudinal al muro de acero con una sección cajón, que tiene como fin suavizar la aplicación de la carga axial y hacerla más uniforme en la cima del muro; dos vigas perpendiculares al muro de acero con una sección doble canal (con espacio entre ellas y unidas por pletinas espaciadas en su largo), que permiten colocar los gatos hidráulicos sobre ellas; y cuatro gatos hidráulicos que son los que traccionan a las barras de acero. La carga axial promedio se mantuvo en un 7% de la capacidad de la sección (entera) a la compresión, traduciéndose a un total de 40 [tonf].

Luego de la carga axial se monta el marco de acero, que tiene como fin restringir el movimiento fuera del plano, y además sirve como elemento de contingencia para sostener al muro si la falla de éste pone en peligro su estabilidad. La restricción se logra a través de cuatro puntales que nacen desde el marco a la altura de la viga de hormigón del muro y que llegan a esta con una punta redondeada y lubricada para permitir su desplazamiento transversal.

Con el marco ya instalado, se procede a montar el actuador que generará los desplazamientos laterales. Se usan pasadores tanto en el muro de reacción como en la probeta para que sus apoyos sean simples en ambos extremos. El actuador se encuentra a 3.2 [m] desde la losa de reacción, y a 2.8 [m] desde el inicio del muro como tal (sin contar el pedestal). Con todos los elementos ya montados, se procede a instalar los elementos de medición: LDVT's por una cara del muro, conectar los strain gages y pintar la cara restante para fotogrametría. En la Figura 4.9 se muestra la probeta lista para su ensayo, y en la Figura 4.10 se muestra un esquema del montaje. Sobre esta sección y las anteriores, se puede encontrar más información en el trabajo de Rivas, y para ver el montaje del muro rectangular base, se puede ver los trabajos de Díaz y Manríquez (Rivas, 2016, Díaz, 2016 y Manríquez, 2016).

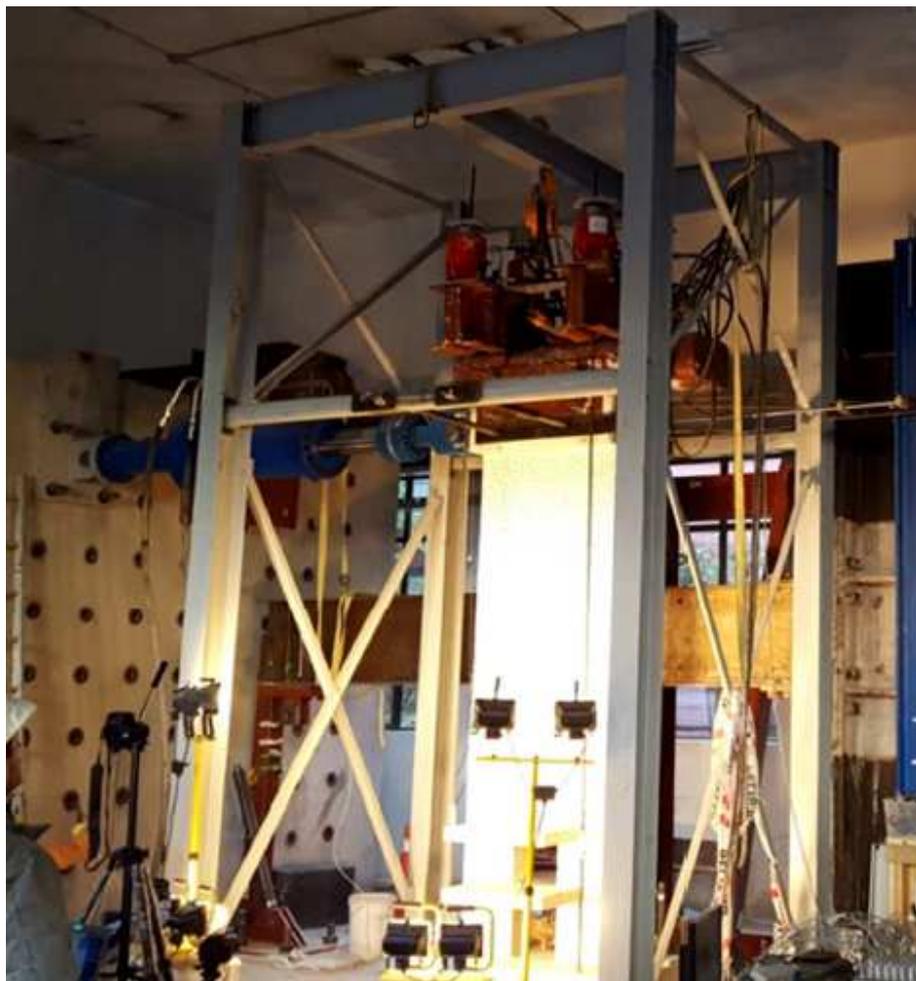


FIGURA 4.9: MONTAJE FINAL.

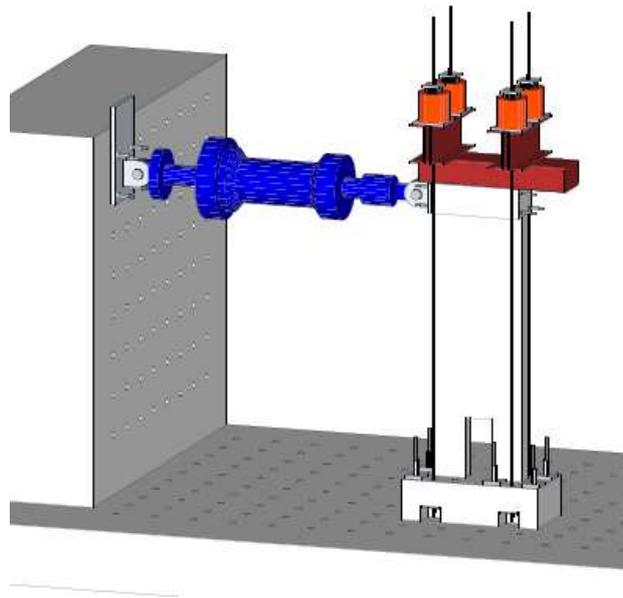


FIGURA 4.10: ESQUEMA DEL MONTAJE (SIN MARCO NI SISTEMA DE MEDICIÓN DE DATOS).

4.5 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

El control sobre el actuador es manual, restringiendo siempre por desplazamiento a través de dos LVDT's (uno montado en el actuador y otro como control). Se realizan siempre tres ciclos, comenzando tirando la probeta hacia el muro de reacción, y con los siguientes porcentajes de deriva (medidos con respecto a 2.8 [m]): 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.6%, 0.9%, 1.35%, 2%, 3% y 4%. La Tabla 4-5 muestra la equivalencia entre nivel de drift y desplazamiento inducido, mientras que la Figura 4.11 muestra los ciclos y los valores ya mencionados.

TABLA 4-5: DESPLAZAMIENTOS INDUCIDOS PARA CADA DERIVA DE TECHO.

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

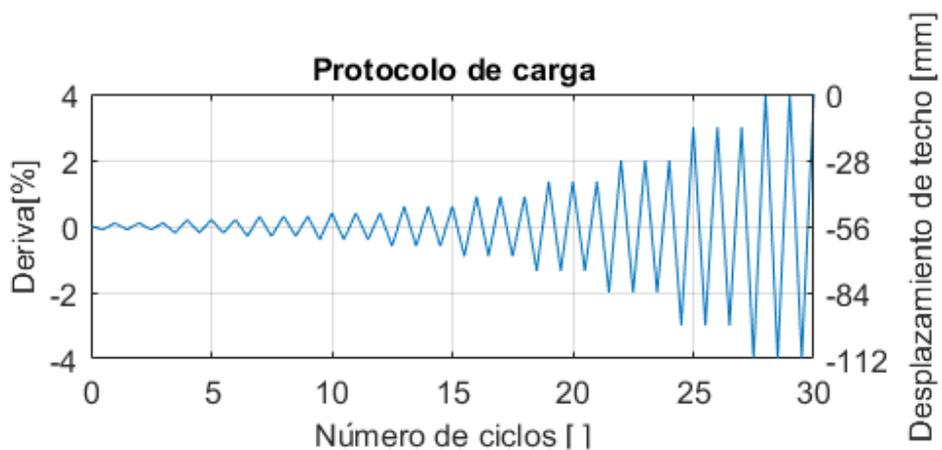


FIGURA 4.11: PROTOCOLO DE CARGA.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se mostrarán los principales resultados de la etapa experimental, los cuales son obtenidos del ensayo de los cuatro muros presentados (MR1, MR2, MR3 y MR4). Primero se analiza la elaboración de la respuesta carga-desplazamiento de todos los muros para después detallar el ensayo de cada probeta, indicando los principales hitos (primeras grietas, fisuración, pandeo y falla) además de su respuesta global. A continuación, se realizará un análisis de fotogrametría detallado para explicar los modos de fallas, además de rescatar información relevante tanto para el diseño como para el detallamiento.

5.2 RESPUESTA GLOBAL Y COMPORTAMIENTO OBSERVADO

De acuerdo a lo explicado en el capítulo anterior, los muros fueron ensayados siguiendo el protocolo de carga que especifica tres ciclos enteros para cierta deriva. El control del actuador es por desplazamiento y de carácter manual, mientras que la variable de control es la información entregada por el LVDT del actuador y un LVDT de control, parando la bomba ante el desplazamiento logrado. Sin embargo, deslizamientos y rotaciones del muro castigan el desplazamiento real del muro con respecto a lo dado por los LVDT's. Para cuantificar lo anterior, se dispusieron cuatro LVDT's fuera del muro: uno horizontal en el extremo superior, otro horizontal en el extremo inferior, y dos verticales en la base para determinar el deslizamiento y la rotación del muro a ensayar. La disposición de los sensores se puede ver en la Figura 5.1.

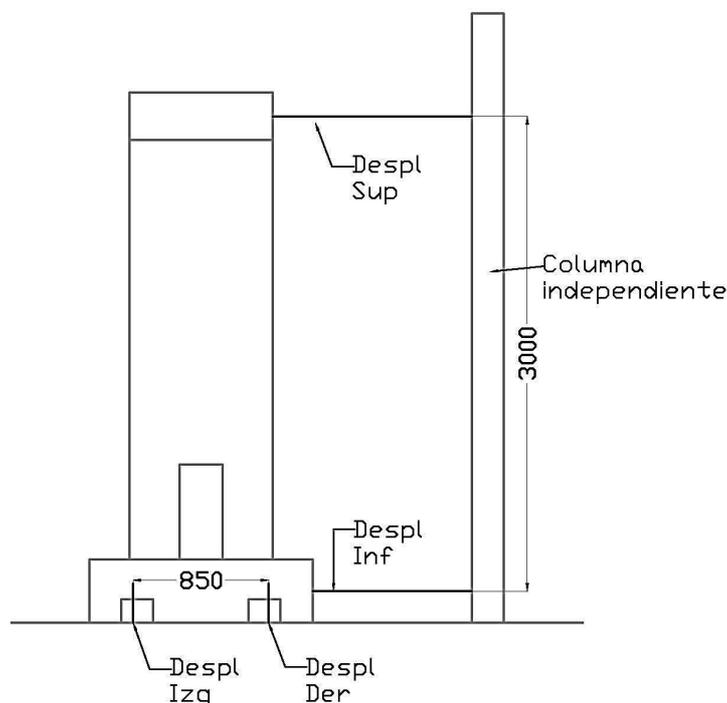


FIGURA 5.1: UBICACIÓN DE LVDT'S EXTERNOS.

La ecuación que permite obtener el desplazamiento de techo corregido para el muro es la siguiente:

$$\delta_{Corr} = \delta_{Sup} - \delta_{Inf} - (\delta_{Der} - \delta_{Izq}) * \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (24)$$

Donde δ_{Corr} es el desplazamiento de techo corregido por deslizamiento y rotación, δ_{Sup} y δ_{Inf} son los desplazamientos medidos por los LVDT superior e inferior en la columna independiente, respectivamente, y δ_{Der} y δ_{Izq} son los desplazamientos medidos por los LVDT's en la parte derecha e izquierda de la base del pedestal, respectivamente, ΔL es la distancia entre los LVDT's de la base del pedestal y ΔH es la distancia entre los LDVT's de la columna.

Aplicada la corrección a los registros del LVDT superior para los cuatro ensayos se tiene el desplazamiento real inducido al muro. Las Figura 5.2 y Figura 5.3 muestran las componentes del desplazamiento superior, el desplazamiento corregido de techo, el deslizamiento de la base, y el desplazamiento por rotación para MR1 y MR4, y a modo de comparación, la Figura 5.4 muestra los mismos resultados pero para el muro MRO.

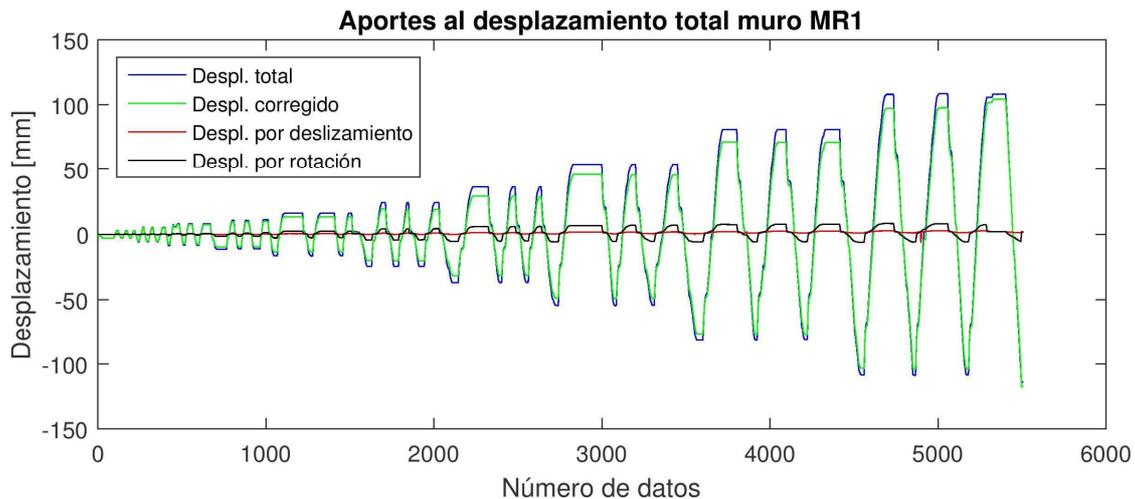


FIGURA 5.2: COMPONENTES DEL DESPLAZAMIENTO TOTAL MR1.

De la Figura 5.2 se aprecia que desde pequeños desplazamientos existe una rotación en la base del muro, que la pretensión de las barras no fue capaz de resistir. La máxima diferencia entre el desplazamiento total y el de techo es de 10.7 [mm] en el segundo peak del 4% de deriva, mientras que el mayor porcentaje de diferencia entre dichos desplazamientos es de 15.05% y ocurre en el segundo peak del 2% de deriva. En ambos casos, la diferencia es principalmente por la rotación del pedestal más que el deslizamiento del muro. El anclaje para este ensayo fue con cuatro barras de anclaje, sometidas a una tracción de 20 [tonf]. El deslizamiento y la rotación fueron similares en todos los ensayos realizados, a excepción del muro MR4, en donde existió una notoria rotación en el sentido positivo de carga

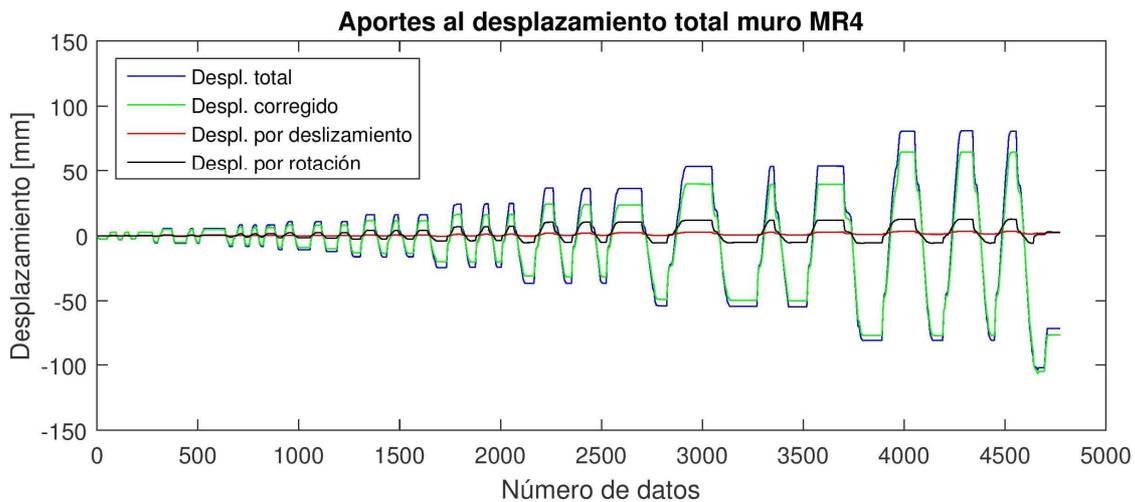


FIGURA 5.3: COMPONENTES DEL DESPLAZAMIENTO TOTAL MR4.

Al igual que en el caso anterior, en la Figura 5.3 se muestra un importante castigo en el desplazamiento corregido producto de la rotación en la base. La máxima diferencia ocurre en el cuarto peak del 3%, siendo de 15.88 [mm], mientras que la mayor diferencia porcentual es de 26.61% y ocurre en el segundo peak del 2%. El anclaje fue realizado con cuatro barras a una tracción inicial de 23 [tonf] cada una. Las mayores rotaciones de todos los ensayos se aprecian en los desplazamientos positivos inducidos en MR4.

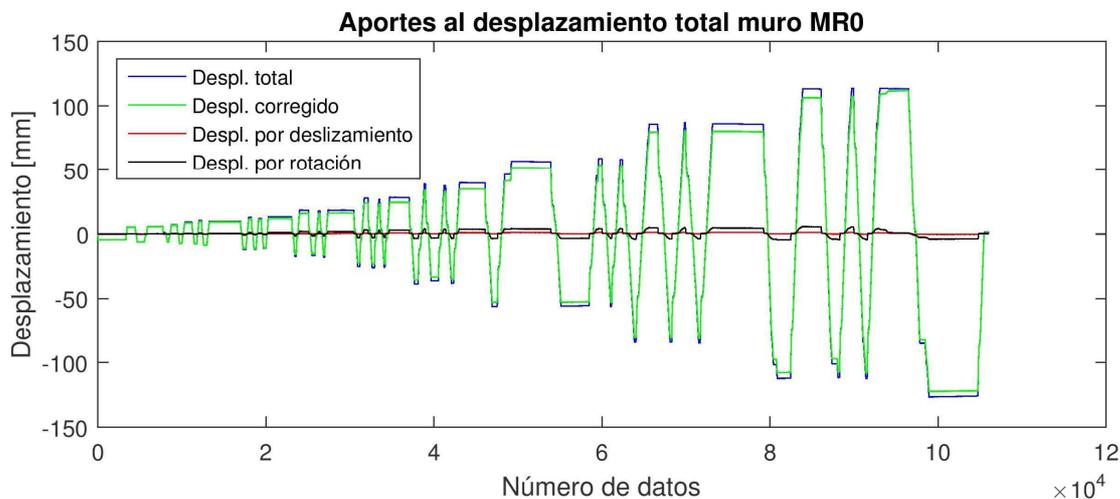


FIGURA 5.4: COMPONENTES DEL DESPLAZAMIENTO TOTAL MR0.

Comparando la Figura 5.4 con las anteriores, se nota una mayor efectividad en el anclaje de las barras, castigando menos el desplazamiento corregido que en los demás casos. La máxima diferencia ocurre en el segundo peak del 6% (7.1 [mm]) y la máxima diferencia porcentual es de un 8.86% en el sexto peak del 2%. El anclaje se realizó con seis barras, con cargas que varían entre 10 [tonf] y 15 [tonf].

Se puede apreciar de los gráficos anteriores que existe una fuerte influencia de la rotación de los muros para todos los casos del presente estudio. A pesar de aplicar una fuerza total de anclaje mayor a la aplicada a la probeta MRO, la rotación no disminuyó su valor. La explicación a este fenómeno radica en la evidente curvatura que se apreciaba en todos los muros que la capa de yeso no fue capaz de disminuir. El principal problema de lo anterior es que la comparación de los resultados evaluados en los desplazamientos máximos de cada ciclo entre el muro base y los ensayados en este trabajo no podrá ser cuantitativa, puesto los desplazamientos que se analizarán serán diferentes. Sin embargo los desplazamientos entre todos los muros con aberturas son bastante similares y la comparación cuantitativa si se podrá realizar.

Dado que la carga registrada por la celda no sufre de modificaciones ni correcciones, los datos que entrega son para análisis directo. Es así que a continuación se detallará el comportamiento global de cada muro ensayado, además de identificar los principales hitos durante cada ensayo.

5.2.1 MR1

El muro MR1 fue ensayado el día 8 de Junio de 2016. Se aplicó 10 [tonf] a cada barra, siendo un 7.3% de la capacidad a compresión de la sección entera ($f'_c A_g$). Considerando el área efectiva de la sección en la base (restando la abertura) se tiene una carga de 8.6% de $f'_c A'_g$. Durante la aplicación de la carga axial, una de las coplas de las barras que generan la carga axial falló pero no generó grandes problemas.

Las primeras grietas significativas aparecen en el segundo ciclo del 0.6%, ubicadas en la base del muro y horizontales, acusando un comportamiento flexural. En el tercer ciclo aparecen grietas similares pero en el otro extremo del muro. En el primer ciclo de 1.35% aumentan el grosor de las grietas mencionadas, además de aparecer grietas flexurales a la altura de término de la abertura y grietas de corte (diagonales) que parten en la base del muro y suben con un ángulo cercano a 45° . Para el primer ciclo del 2% las grietas ya atraviesan todo el espesor del muro, y para el primer ciclo del 3% comienza a desprenderse el hormigón en el extremo inferior. Ya en los ciclos del 4% se aprecia una falla del hormigón por compresión, para luego producirse pandeo tanto de las barras de borde como las de refuerzo de la abertura, además de salir del plano de carga. La Figura 5.5 muestra el patrón de grietas al final del 3% de deriva, mientras que la Figura 5.6 muestra pandeo fuera del plano inducido al final del ensayo, provocado por la falla a compresión mostrada en la Figura 5.8. La Figura 5.7 muestra pandeo fuera del plano en la barra de refuerzo de abertura, lo cual no era esperado dada la lejanía de la barra a las zonas en las que se esperan las mayores tracciones. Yendo camino al 6% se genera una grieta de corte que nace en el extremo superior izquierdo de la abertura y llega a base con una inclinación cercana a 45° , que genera la falla en la otra dirección de carga. La Figura 5.9 muestra el estado final de la probeta al final del ensayo.



FIGURA 5.5 PATRÓN DE GRIETAS (IZQUIERDA) Y PANDEO FUERA DEL PLANO (DERECHA).



FIGURA 5.6 PANDEO FUERA DEL PLANO YA OCURRIDA LA FALLA A COMPRESIÓN.



FIGURA 5.7 PANDEO DE LA BARRA DE REFUERZO DE ABERTURA AL FIN DEL ENSAYO.



FIGURA 5.8: FALLA A COMPRESIÓN QUE GENERÓ LA PÉRDIDA DE CAPACIDAD.

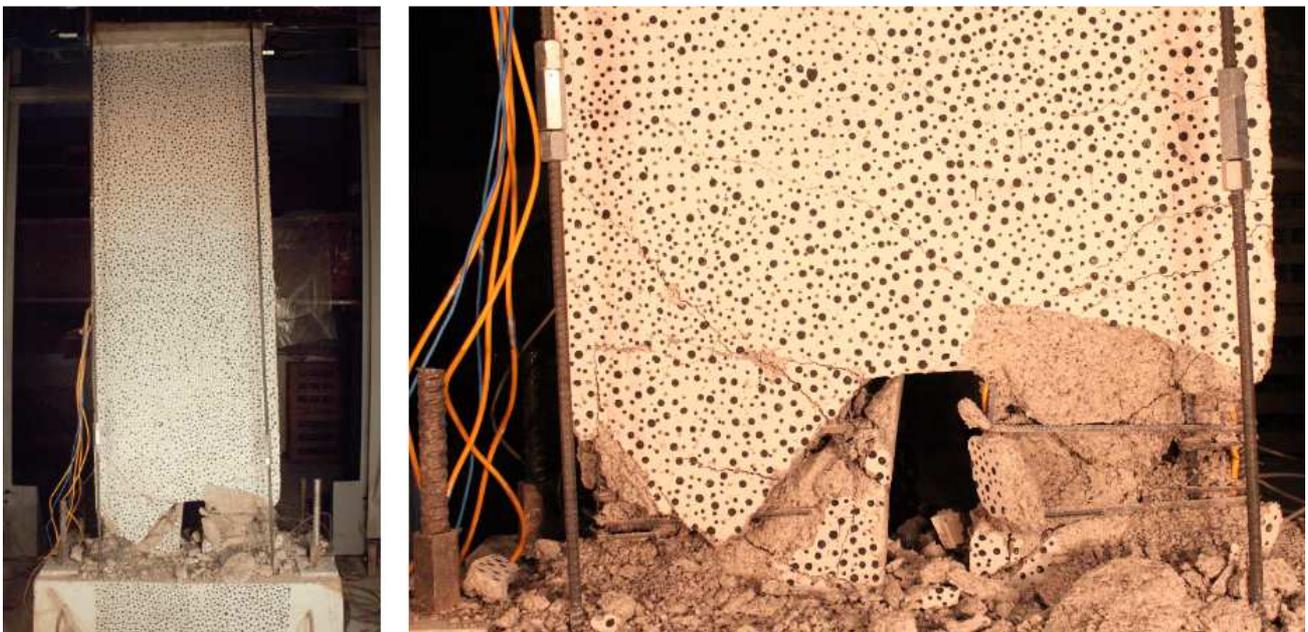


FIGURA 5.9: ESTADO FINAL DEL MURO MR1 AL FINAL DEL ENSAYO.

La Figura 5.10 muestra la respuesta de carga-desplazamiento de la probeta. Se puede apreciar que el muro tiene un buen comportamiento, completando sus tres ciclos del 4%. La rigidez se nota simétrica, pero existe una pequeña diferencia en la capacidad para cada dirección de carga. Los desplazamientos alcanzados son menores en la dirección positiva debido a una mayor rotación hacia esa dirección de carga. La fluencia ocurre cercana al 0.75%, y después muestra un pequeño endurecimiento post-fluencia. La resistencia disminuye muy poco para ciclos del mismo nivel, aunque se aprecia una mayor diferencia en los últimos niveles. La primera pérdida de capacidad notable ocurre en el segundo peak (positivo) del primer ciclo del 4%. De hecho, la carga registrada en el máximo desplazamiento es cercana a las 20 [tonf]. Dicha pérdida ocurre cuando falla el hormigón a la derecha de la abertura (Figura 5.8).

Posterior a esto, se produce la grieta de corte (Figura 5.9) que genera la notoria pérdida de capacidad en la dirección negativa cuando el muro va camino al 6% de deriva.

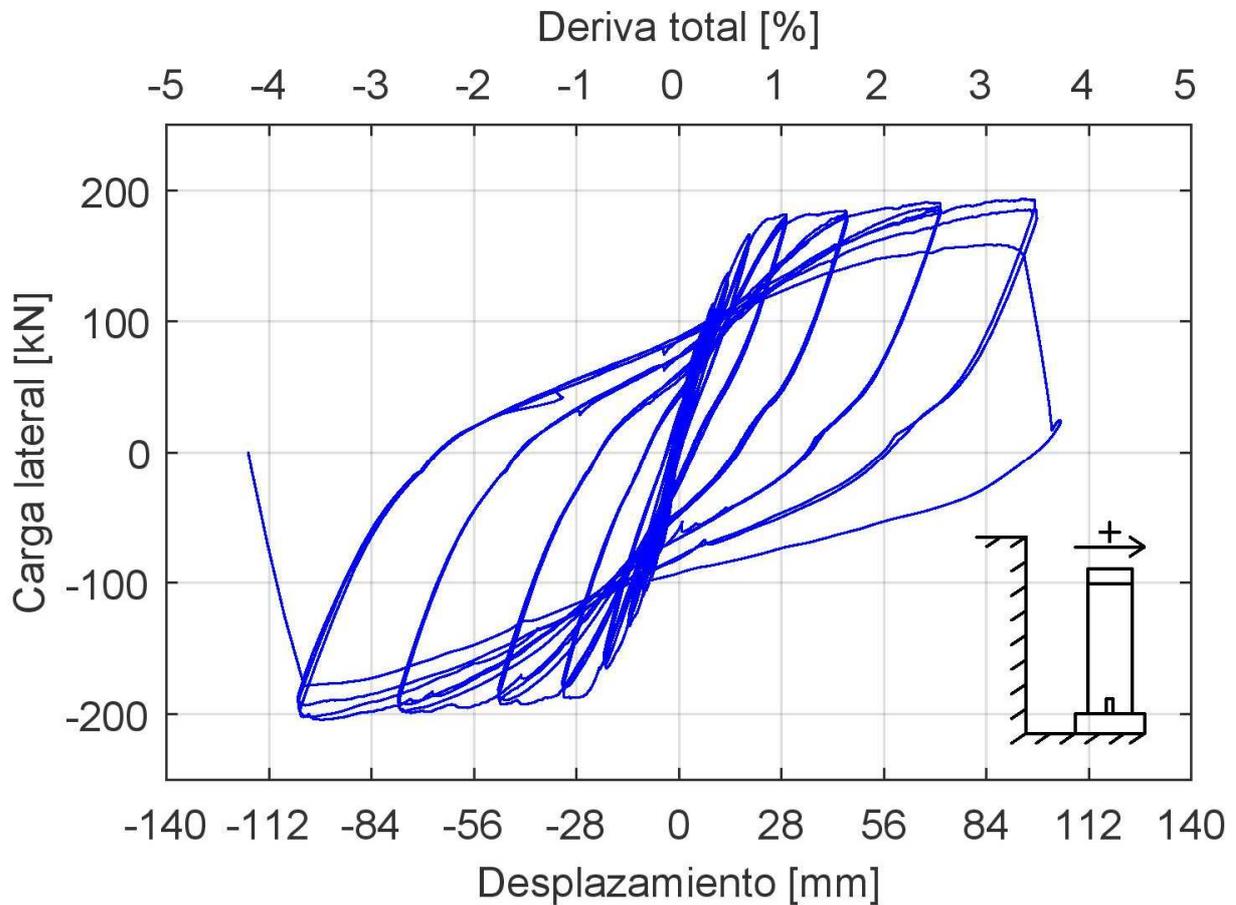


FIGURA 5.10: RESPUESTA CARGA-DESPLAZAMIENTO MR1.

5.2.2 MR2

El muro MR2 fue ensayado el día 31 de Mayo de 2016. Se aplicó 10 [tonf] a cada barra, siendo un 7.3% de $f'_c A_g$. Considerando el área efectiva de la sección en la base se tiene una carga de 10.4% de $f'_c A'_g$. MR2 fue el primer muro a ensayar, por lo cual fue el que estuvo expuesto a cualquier problema no visto en la planificación de los ensayos. En particular, entre el primer y segundo ciclo de 0.9% de deriva falló una copla de una de las barras que hacen la fuerza axial sobre el muro. El ensayo debió ser detenido para acomodar el sistema de carga axial, que se vió desplazado producto del problema. Una vez reemplazada la pieza, se continuó el ensayo desde el punto en el cual quedó (inicio del segundo ciclo de 0.9% de deriva).

El comienzo del ensayo es bastante similar al de MR1. En el primer ciclo de 1.35% se genera una diferencia en el patrón de grietas a cada lado de la abertura: mientras que para un lado las grietas son horizontales, en el otro extremo son diagonales. En el primer ciclo del 2% se

incrementa el grosor y la cantidad de las grietas (ver Figura 5.11). En los últimos peaks del 2% comienza la pérdida de recubrimiento en los extremos del muro, lo cual se puede ver en la Figura 5.12. En el segundo peak del primer ciclo del 3% aparece una grieta de corte que nace en el extremo superior de la abertura, y baja con una inclinación cercana a 45° . Dicha grieta genera la falla del muro, perdiendo capacidad resistente (ver Figura 5.13). Un ciclo después, la grieta aumenta de grosor llevando al muro a prácticamente no tomar carga, y generando pandeo en las barras de refuerzo de abertura y de borde (ver Figura 5.14) Al cargar en la dirección opuesta, dado que la sección izquierda del muro quedó sin capacidad de resistir carga alguna, se genera la falla en la otra dirección debido al aplastamiento del hormigón. La Figura 5.15 muestra el estado final de la probeta MR2 al finalizar el ensayo.



FIGURA 5.11: GRIETAS GENERADAS EN EL EXTREMO SUPERIOR DE LA ABERTURA.



FIGURA 5.12: DESPRENDIMIENTO DE HORMIGÓN EN ELEMENTO DE BORDE.



FIGURA 5.13: GRIETA DE CORTE QUE GENERÓ LA PÉRDIDA DE CAPACIDAD.



FIGURA 5.14: PANDEO DE LA BARRA DE REFUERZO DE ABERTURA AL FIN DEL ENSAYO.



FIGURA 5.15: ESTADO FINAL DEL MURO MR2 AL FINAL DEL ENSAYO (ZOOM A LA DERECHA).

La Figura 5.16 muestra la respuesta de carga-desplazamiento de la probeta. Se puede apreciar que la resistencia es bastante similar a la obtenida en el muro MR1, pero la capacidad de deformación es notoriamente menor. Tiene un comportamiento estable sólo hasta el primer

peak del 3%. Se aprecia la misma simetría de rigidez y diferencia en la resistencia para cada dirección de carga. La fluencia ocurre cercana al 0.75%, y después muestra un pequeño endurecimiento post-fluencia. La primera pérdida de capacidad notable ocurre en el segundo peak (positivo) del primer ciclo del 3%. Dicha pérdida ocurre cuando aparece la grieta de corte a derecha de la abertura (Figura 5.13). Un ciclo entero después, se acrecienta el grosor de la grieta y la carga resistida por el muro es casi cero. Al tratar de cargar el muro en la dirección opuesta, falla por compresión el otro extremo del muro cercano a los 40 [mm]. En la dirección positiva del 0.9% se aprecia una caída abrupta en la carga, la cual marca el momento en que falló la copla en la barra de la carga axial.

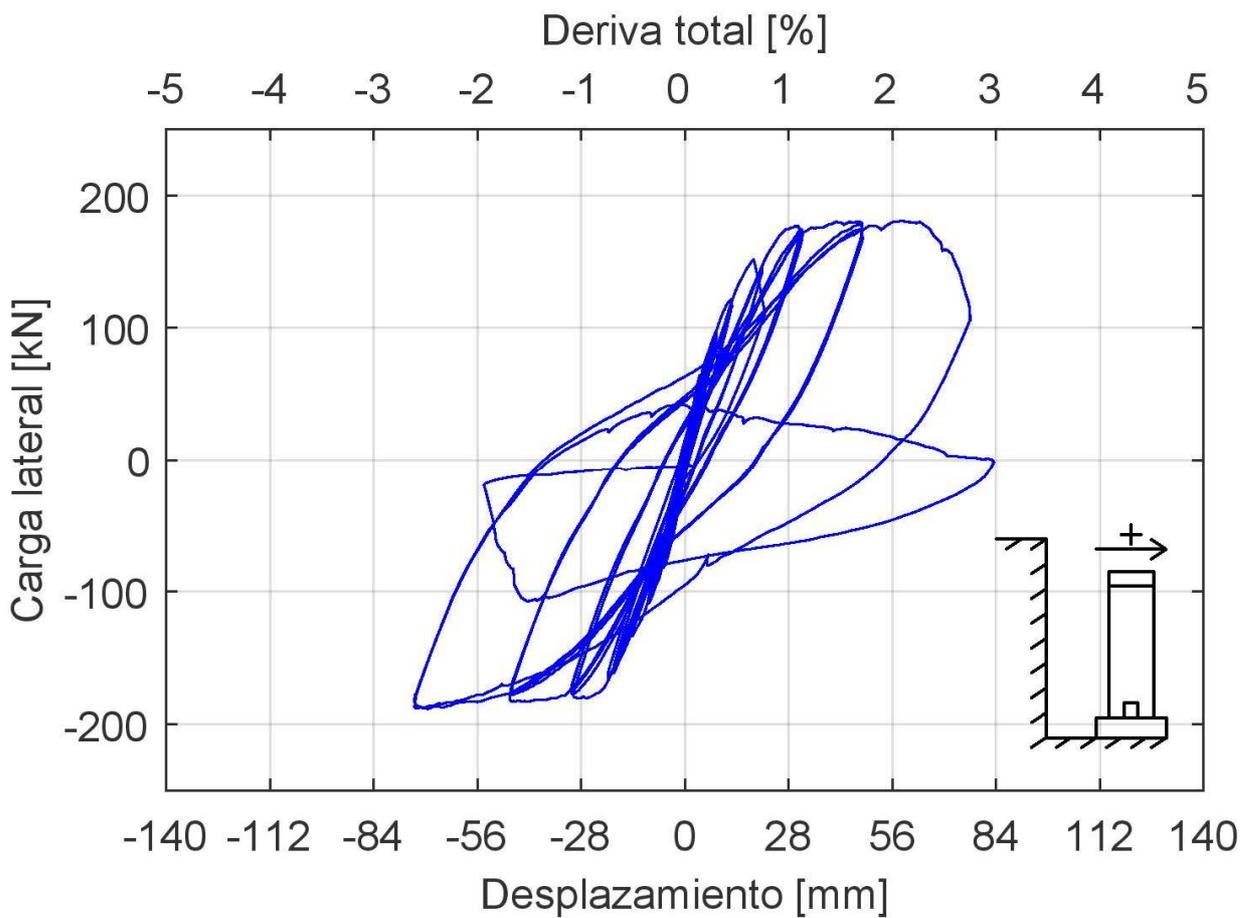


FIGURA 5.16: RESPUESTA CARGA-DESPLAZAMIENTO MR2.

5.2.3 MR3

El muro MR3 fue ensayado el día 16 de Junio de 2016. Tanto la carga axial como los porcentajes equivalentes en la capacidad a compresión del muro son idénticos que en la probeta MR2 (10 [tonf] aplicadas por barra, siendo un 7.3% de $f'_c A_g$ y un 10.4% de $f'_c A'_g$).

En el primer ciclo de 0.4% aparece una grieta horizontal que une el extremo superior de la abertura hasta el final del muro, en ambas direcciones (ver Figura 5.17). A parte de las grietas señaladas recién, el comportamiento del muro es bastante similar al de MR2: las grietas horizontales en la base aparecen en el primer ciclo del 0.6%, para luego seguir las grietas de corte. En el 1.35% de deriva las grietas ya atraviesan el espesor del muro, además de aparecer una grieta vertical en el borde derecho de la abertura a mitad de su altura (ver Figura 5.18), que podría dar señales de un inicio del pandeo de las barras de refuerzo de la abertura. Cargando el muro por primera vez al 3% en el sentido positivo, se genera una notoria grieta de corte que nace en el extremo superior derecho de la abertura y llega hasta el extremo del muro en la base. Dicha grieta generó una pérdida de capacidad en el muro y pandeo en las barras de refuerzo de abertura (ver Figura 5.19). Al cargarlo en el sentido contrario, se generó exactamente la misma grieta pero en la otra parte del muro, terminando el ensayo. Las grietas mencionadas y el estado final del muro se pueden ver en la Figura 5.20.

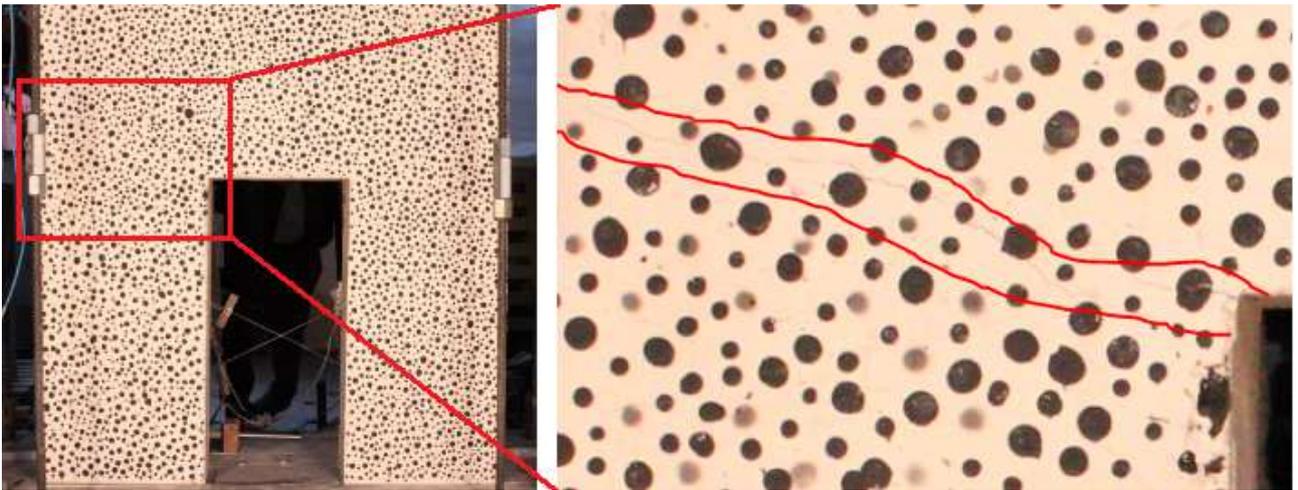


FIGURA 5.17: GRIETAS HORIZONTALES EN EL CAMBIO DE SECCIÓN.

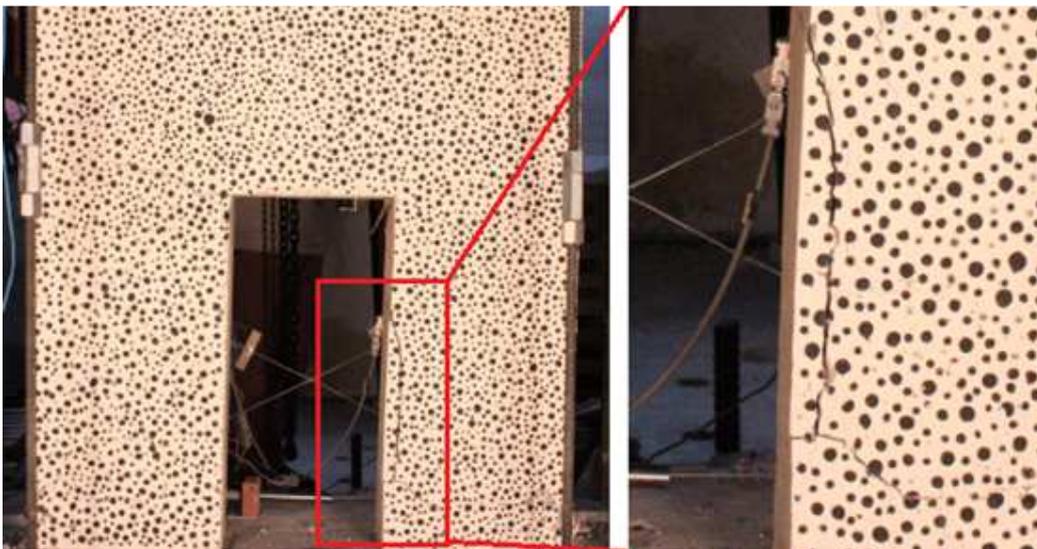


FIGURA 5.18: GRIETA VERTICAL EN EL BORDE DE LA ABERTURA.

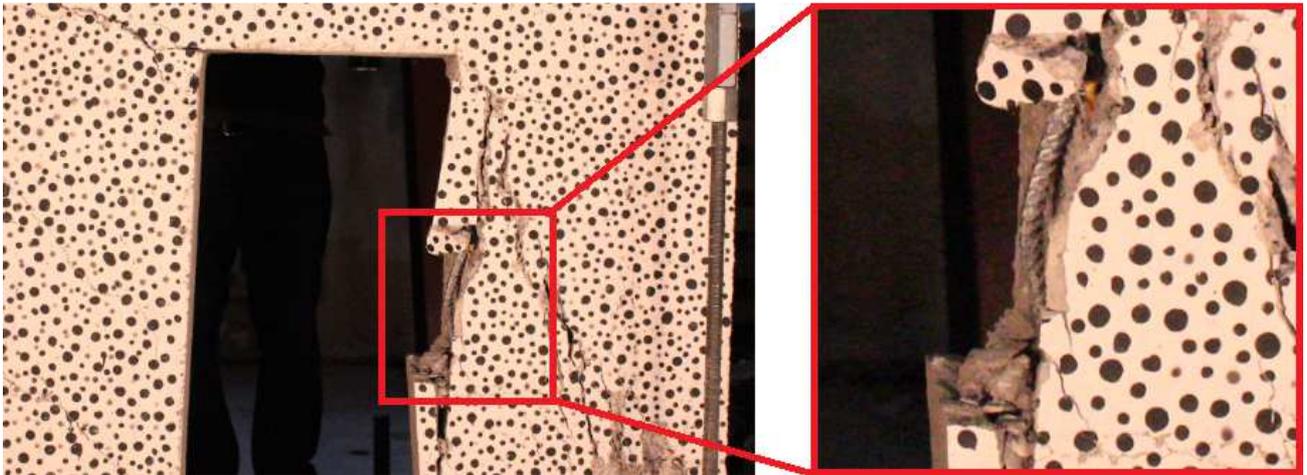


FIGURA 5.19: PANDEO DE LA BARRA DE REFUERZO DE ABERTURA AL FIN DEL ENSAYO.

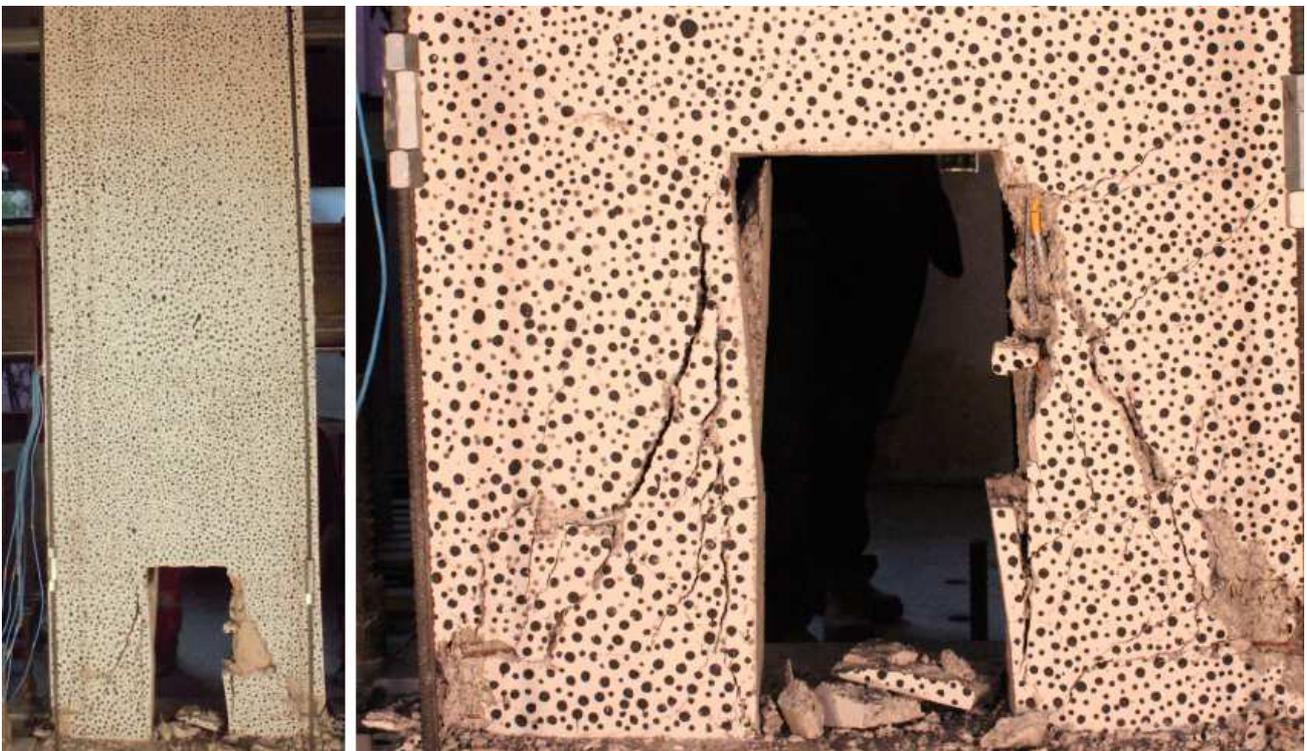


FIGURA 5.20: ESTADO FINAL MURO MR3 (IZQUIERDA). GRIETAS DE CORTE GENERADAS EN LAS PATAS DEL MURO (DERECHA).

La Figura 5.21 muestra la respuesta de carga versus desplazamiento del muro MR3. Al igual que en los casos anteriores, la resistencia es muy parecida a la obtenida en los muros MR1 y MR2. Existe simetría en la rigidez y en resistencia. Se aprecia un comportamiento estable sólo hasta el 2% de deriva, puesto que en el primer peak en el sentido positivo del 3% existe una pérdida de resistencia notoria, la cual es generada por la grieta de corte mostrada en la Figura 5.20. Al tratar de comenzar el segundo ciclo del 3% ocurre una falla frágil cercana a los 45 [mm] que no permite continuar con el ensayo. Dicha falla es generada por la segunda grieta

de corte que se genera en la pata izquierda del muro, como se puede ver en la Figura 5.20. Al comparar la respuesta con las de los muros MR1 y MR2, se observa que es bastante parecida a la de MR2, difiriendo en sólo un ciclo extra a pesar de tener una abertura con el doble de altura.

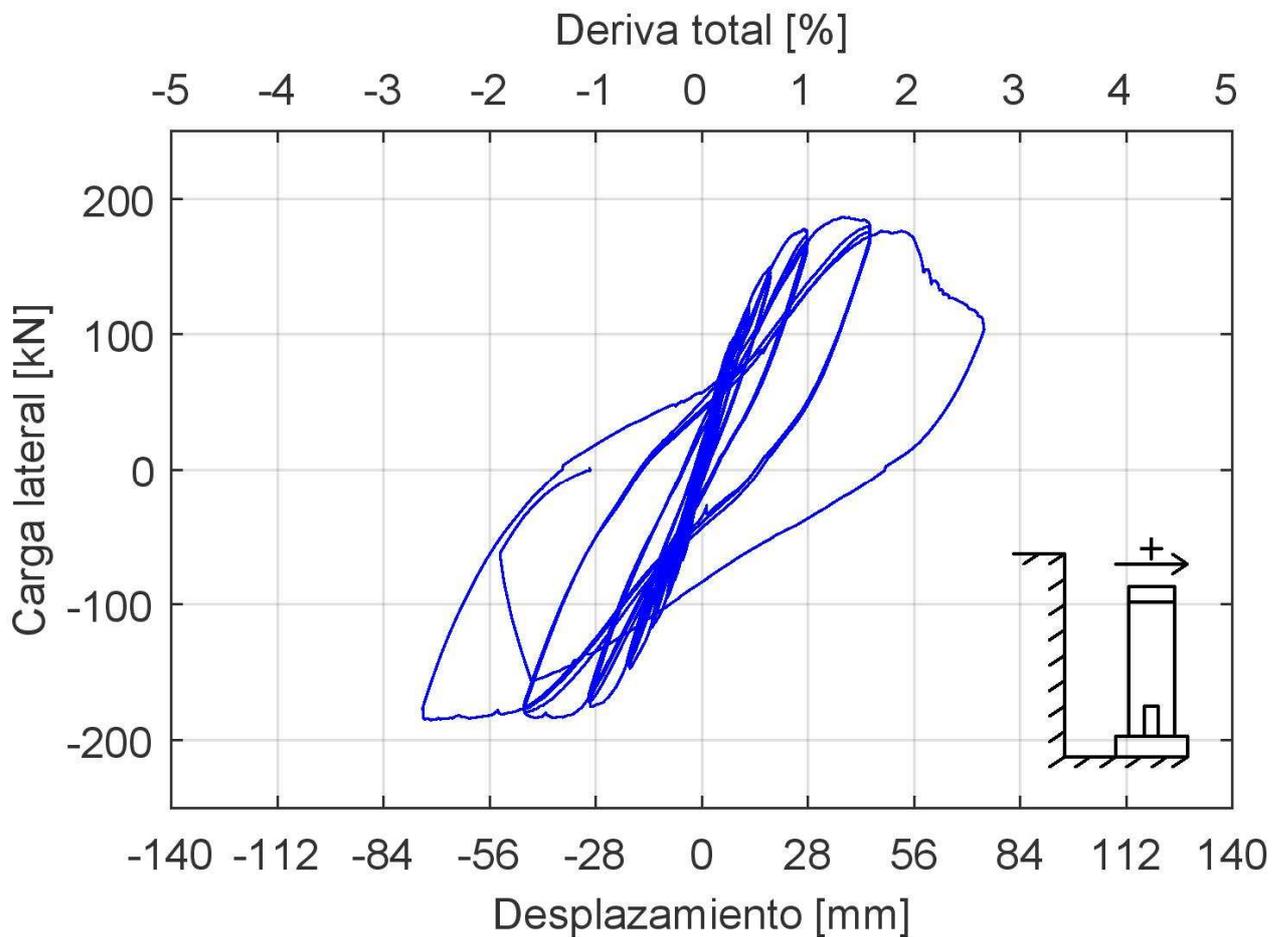


FIGURA 5.21: RESPUESTA CARGA-DESPLAZAMIENTO MR3.

5.2.4 MR4

El muro MR4 fue ensayado el día 14 de Julio de 2016. Los valores de carga axial son idénticos a los de los muros MR2 y MR3 (10 [tonf] aplicadas por barra, siendo un 7.3% de $f'_c A_g$ y un 10.4% de $f'_c A'_g$).

Las primeras grietas aparecen bajo la primera losa en el segundo ciclo del 0.6%. En el primer ciclo del 0.9% las grietas aumentan de grosor, además de aparecer grietas de corte en la misma zona. En el 1.35% aparecen grietas en la losa inferior, dando cuenta que está trabajando acoplado las dos secciones del muro. También aparecen grietas en el muro, entre las dos losas. En el primer ciclo del 2% comienza a desprenderse el hormigón en el extremo

inferior traccionado (ver Figura 5.22). En el segundo ciclo del 2% se hacen más notorias las grietas de la primera losa (ver Figura 5.22).



FIGURA 5.22: DESPRENDIMIENTO DEL HORMIGÓN (IZQUIERDA). GRIETA EN LOSA INFERIOR (DERECHA).

En el primer ciclo del 3% las grietas aumentan en cantidad y tamaño, tanto bajo la primera losa como entre ésta y la segunda. Además, el desprendimiento en el hormigón abarca una mayor zona del borde confinado. Iniciando el primer ciclo del 4% se genera una notoria grieta de corte que nace desde la esquina formada por la cara inferior de la primera losa y el borde izquierdo de la abertura y cae con una inclinación cercana a 60° . Junto con la aparición de la grieta, se puede observar pandeo de la barra de refuerzo de abertura, la cual se puede ver en la Figura 5.23. La Figura 5.24 muestra la grieta mencionada (que genera la pérdida de resistencia de la probeta), además del estado del muro al final del ensayo.

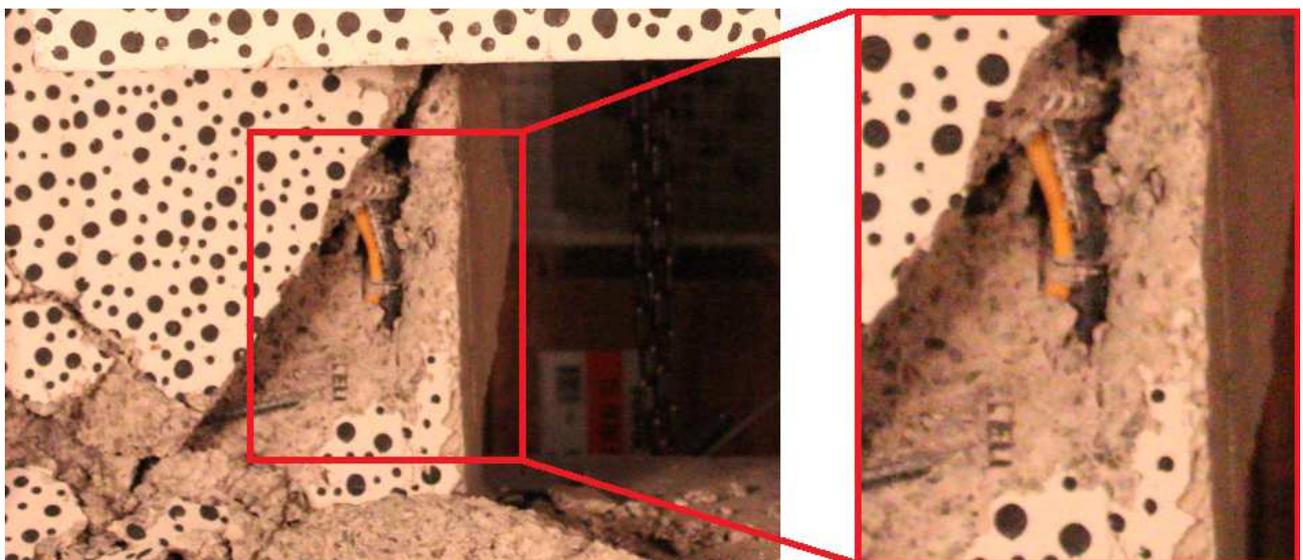


FIGURA 5.23: PANDEO DE LA BARRA DE REFUERZO DE ABERTURA AL FIN DEL ENSAYO.

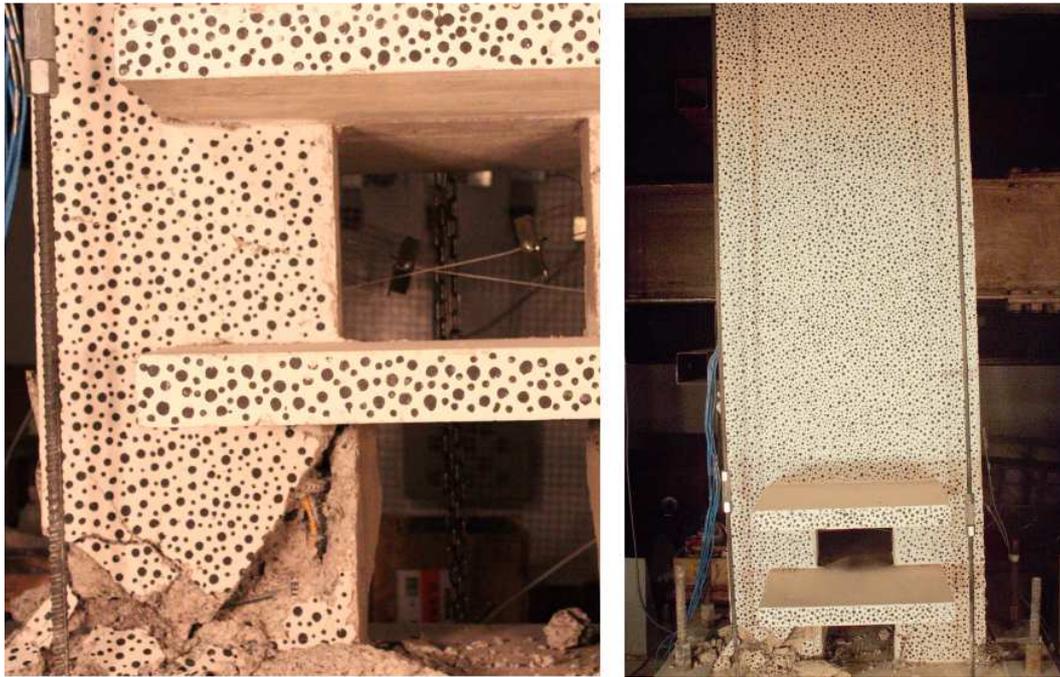


FIGURA 5.24: GRIETA DE CORTE QUE OCASIONÓ LA FALLA (IZQUIERDA). ESTADO FINAL MURO MR4 (DERECHA).

La Figura 5.25 muestra la respuesta de carga versus desplazamiento del muro MR4. Al ver la respuesta es evidente que tiene un mejor comportamiento que su muro de comparación – MR3-, e incluso mejor comportamiento que MR2. Rigidez, resistencia y simetría es similar a los tres casos anteriores. Esta probeta logra realizar los tres ciclos del 3% (valores nominales) sin pérdida de resistencia. Sin embargo al iniciar el primer ciclo del 4% se genera la grieta mostrada en la Figura 5.24 que genera la drástica caída en resistencia que muestra el gráfico. No se extendió el ensayo en la dirección que todavía tomaba carga debido a la gran inestabilidad alcanzada después de generada la grieta: la carga registrada era 0[tonf], así que se detuvo el ensayo por un tema de seguridad. De la histéresis se puede apreciar la rotación que experimentó MR4 en la dirección positiva de carga, dado que los máximos para cada nivel de deriva de techo están más alejados que en cualquier otro caso. En la dirección negativa de carga la corrección por rotación y deslizamiento es similar a los otros tres muros ensayados.

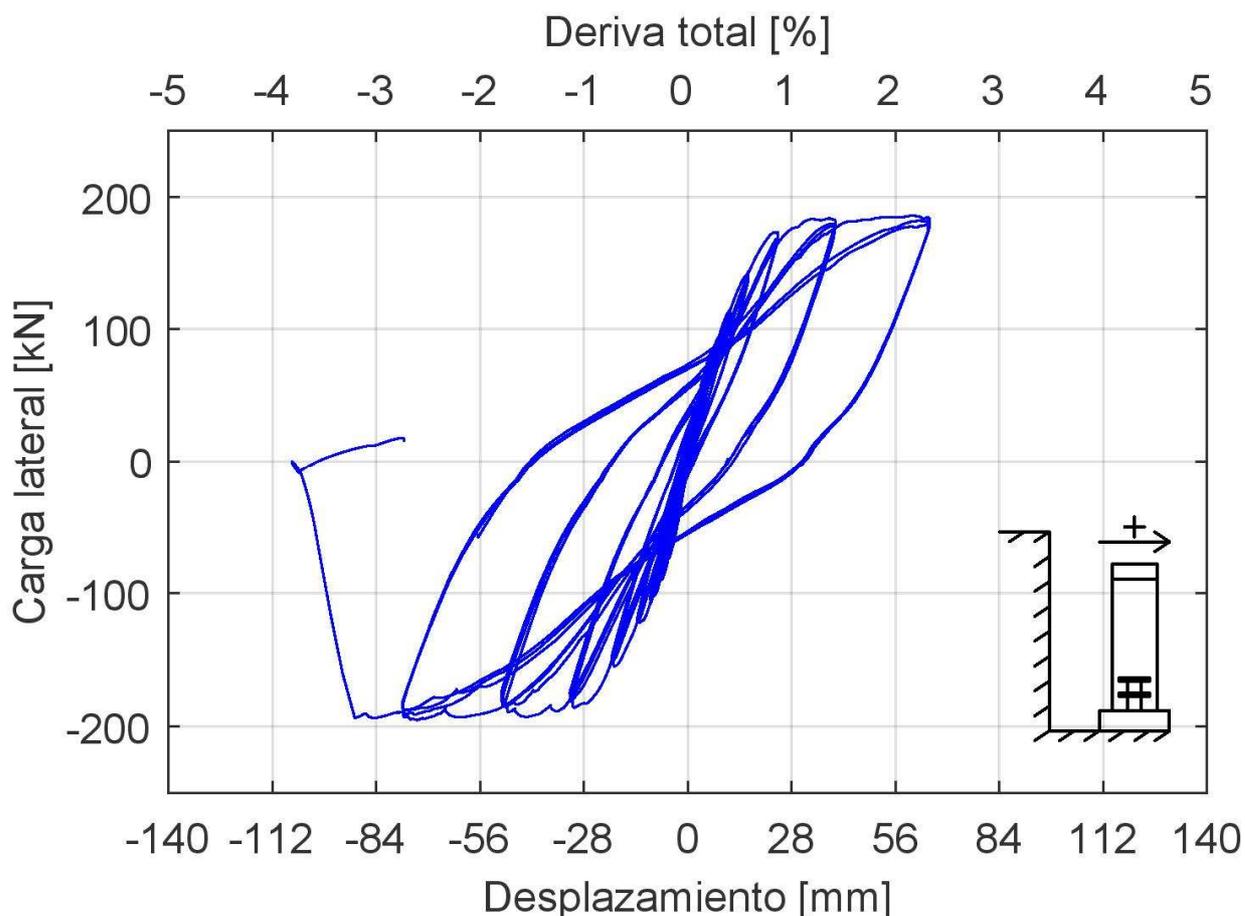


FIGURA 5.25 RESPUESTA CARGA-DESPLAZAMIENTO MR4.

5.2.5 COMPARACIÓN ENTRE ENSAYOS

Como se puede apreciar de los resultados en las Figura 5.10, Figura 5.16, Figura 5.21 y Figura 5.25, existen varias similitudes entre los ensayos: la resistencia, rigidez y endurecimiento son bastante similares entre los cuatro ensayos. Al considerar la resistencia de las probetas se muestra que la capacidad a flexocompresión de los muros no está influenciada por la presencia de las aberturas, ya que las resistencias alcanzadas son bastante similares. Lo anterior va de acuerdo a la intuición: del diseño simple de elementos de hormigón armado a flexión se tenía que la resistencia estaba determinada principalmente por la cantidad de armadura que trabaja a tracción y el brazo de palanca de ésta. Dado que el diseño de los muros fueron en base a estos principios y dichos parámetros se mantuvieron constantes, la resistencia alcanzada fue prácticamente la misma en todos los casos. Las diferencias en la rigidez y endurecimiento de los muros son tan pequeñas que no merecen discusión.

La Figura 5.26 muestra la respuesta de cada muro ensayado con respecto a la probeta base ensayada por Díaz y Manríquez, MRO (ellos se refieren como especimen 1 ó muro 1) (Díaz, 2016; Manríquez, 2016). Se puede ver ,al igual que al comparar los muros ensayados entre

ellos, que tanto resistencia, rigidez y endurecimiento son bastante similares al muro base, pero la diferencia más notoria ocurre en la deriva en la cual comienza la degradación de la resistencia.

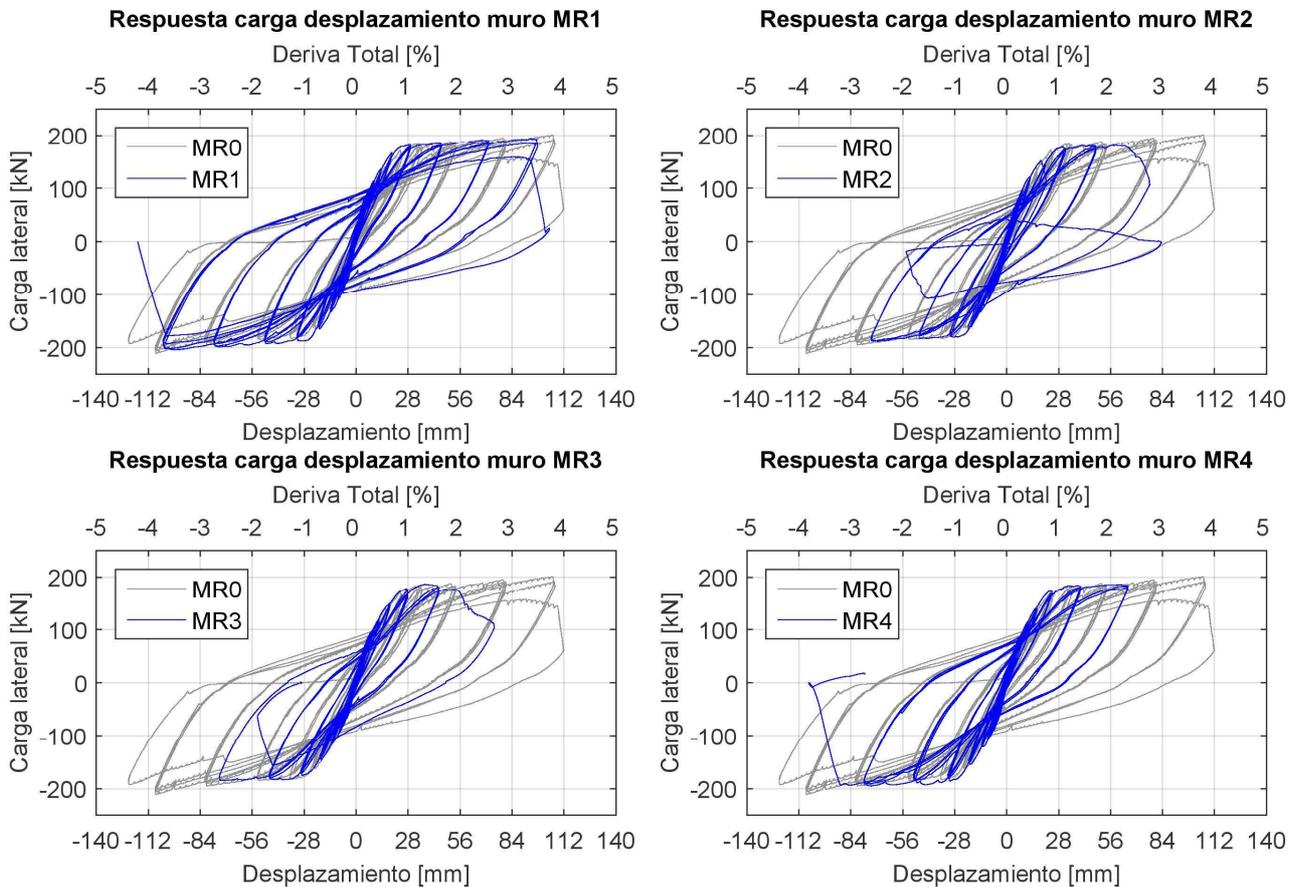


FIGURA 5.26: RESPUESTA CARGA DESPLAZAMIENTO DE MUROS ENSAYADOS COMPARADOS CON MURO BASE.

La Tabla 5-1 muestra los valores en los cuales se aprecia la falla para cada muro (además de los resultados para la probeta MR0) mostrados en la Figura 5.26, la cual se define como el punto en el cual alcanza el 90% de la máxima resistencia alcanzada por el muro o el punto de máxima capacidad del ciclo que no hay alcanzado el 90% de la máxima resistencia, además de presentar el máximo desplazamiento alcanzado sin pérdida de resistencia.

TABLA 5-1: DERIVAS QUE MARCAN LOS INICIOS DE DEGRADACIÓN DE CAPACIDAD.

Muro	Máx despl [%]	Parte del protocolo de carga	Falla [%]
MR0	3.9	3° ciclo 4%	3.3
MR1	3.7	3° ciclo 4%	3.2
MR2	2.6	1° ciclo 3%	2.5
MR3	2.6	1° ciclo 3%	2.1
MR4	3.2	Inicio 1° ciclo 4%	3.3

Al ver los valores de la tabla anterior y contrastar con las histéresis, se aprecia que el máximo desplazamiento alcanzado sin pérdida de capacidad tiene una mejor correlación que la definición de falla con respecto a la resistencia, dado que la pérdida de resistencia no se genera necesariamente de la mano con el máximo desplazamiento alcanzado. Esto se puede ver fácilmente en el muro MR3: a pesar de llegar al 2.6% de deriva sin pérdida de capacidad la falla por resistencia ocurre en la otra dirección de carga, a un nivel de deriva mucho menor. De lo anterior –y hablando en términos del máximo desplazamiento alcanzado sin pérdida de resistencia- se puede ver que los comportamientos son bastante similares entre los muros MRO y MR1 y entre MR2 y MR3, siendo MR4 un caso intermedio entre los dos pares. Es así que se puede determinar que el ancho de la abertura es notoriamente más influyente que el alto al determinar la capacidad de desplazamiento de los muros. Una abertura centrada de largo del diez por ciento del largo del muro no genera una gran pérdida en la capacidad de desplazamiento (de 3.8% a 3.7%), pero al aumentarle el largo al doble genera una notoria degradación, pasando de 3.7% a 2.7%. Al mantener ese largo, pero aumentar el alto al doble, no existe una gran variación (de 2.7% a 2.6%). Sin embargo, al disponer de losas que atraviesen la abertura tratando de ensayar una situación más cercana a la real, se tiene una mejora significativa: el comportamiento de MR4 es mucho mejor que MR3, e incluso que MR2. Sin embargo, se debe considerar que los desplazamientos inducidos en sentido positivo en MR4 son menores a los de los demás muros ya que la rotación de la base castigó más en este muro que en el resto (a modo de ejemplo, el primer peak en la dirección positiva del 3% nominal tuvo valores de 2.8% en MR2 y 2.3% en MR4). Es por esto que es posible afirmar que el comportamiento es mejor sin dudas, pero el grado de mejora es difícil de cuantificar.

Una última diferencia entre los cuatro muros ensayados y el muro base es la forma en que se genera la pérdida de resistencia para cada muro. Mientras que en MRO la pérdida de resistencia se produce por una falla del bloque a compresión que induce un pandeo en las barras de acero que trabajan como elemento de borde, en los cuatro muros ensayados se genera una grieta de corte (diagonal) que nace en la esquina superior de la abertura y llega a la base del muro, induciendo un pandeo de las barras de acero que trabajan como refuerzo de la abertura (en MR1 ocurre una falla por compresión previa a la grieta). Dado que dichas barras no son el refuerzo principal que determina la capacidad del muro, la falla se puede atribuir exclusivamente a la grieta de corte. Las Figura 5.27, Figura 5.28, Figura 5.29, Figura 5.30 y Figura 5.31 muestran las fotografías usadas en fotogrametría en las cuales se puede ver que en todos los muros con aberturas se genera una grieta de corte, y que en el muro base no se generó.



FIGURA 5.27: GRIETA DE CORTE, MR1 (ANTES Y DESPUÉS).

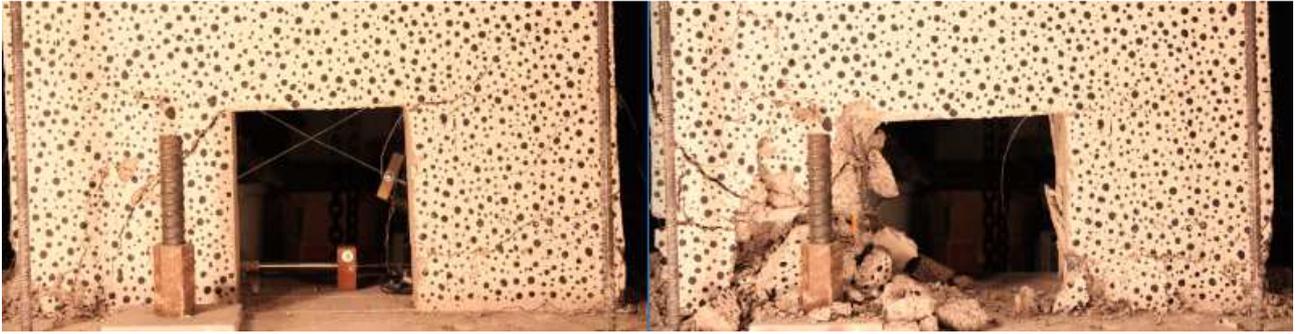


FIGURA 5.28: GRIETA DE CORTE, MR2.

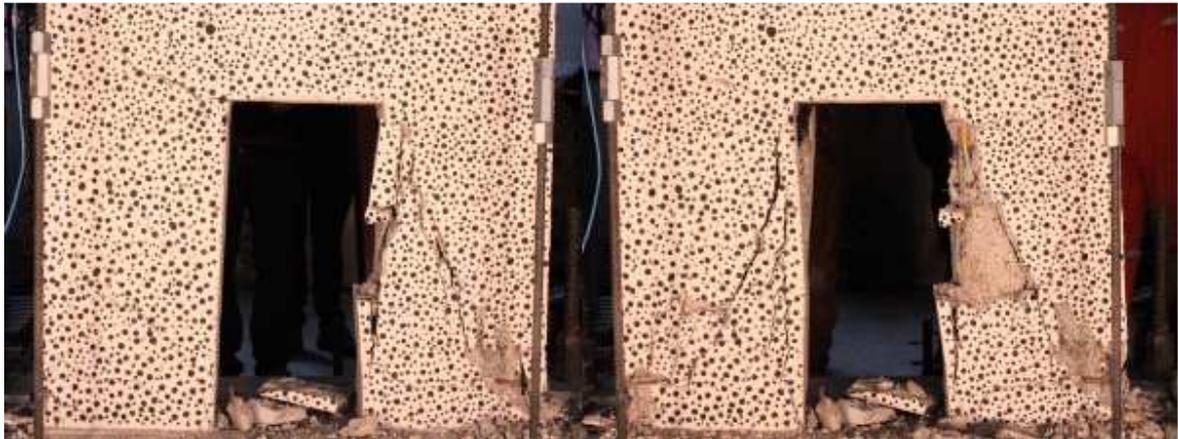


FIGURA 5.29: GRIETA DE CORTE, MR3.

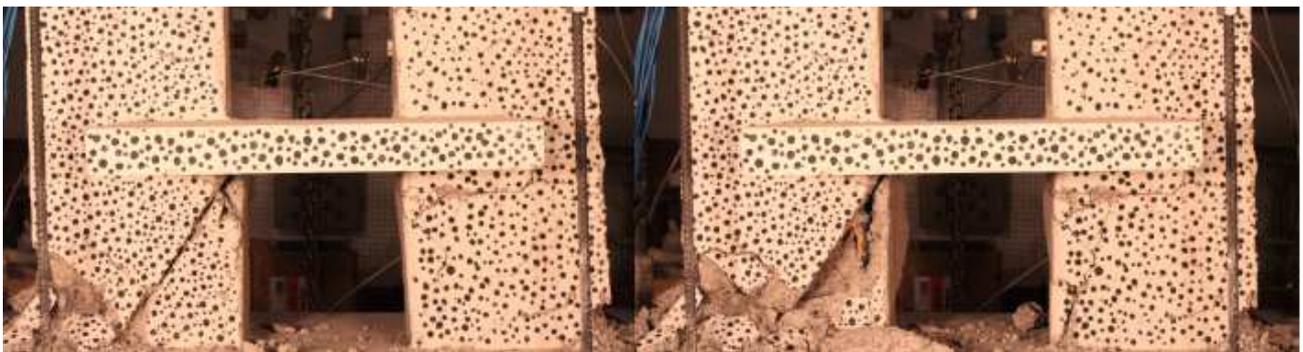


FIGURA 5.30: GRIETA DE CORTE, MR4.



FIGURA 5.31: AUSENCIA DE GRIETAS DE CORTE, MRO

Ante la duda si la malla horizontal ofrece alguna resistencia al pandeo de las barras de refuerzo de abertura, la Figura 5.32 muestra el estado de la enfierradura antes del desmontaje de la probeta, cuando se puede apreciar mejor la configuración final de la armadura.

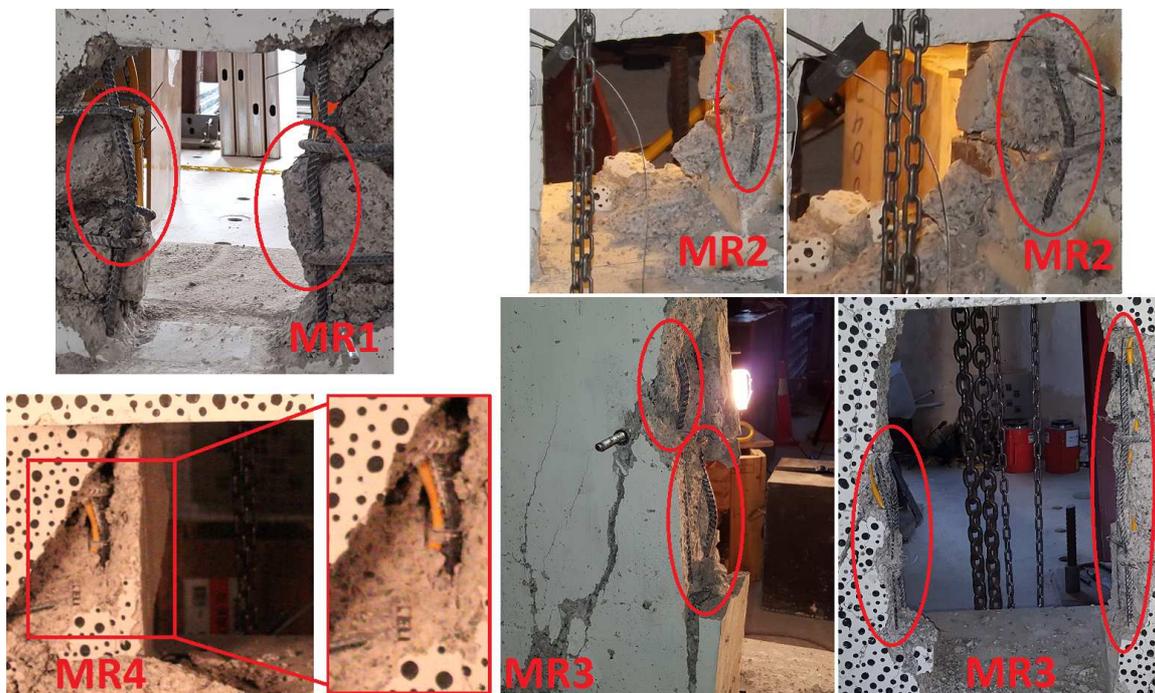


FIGURA 5.32: RESTRICCIÓN AL PANDEO DE LA MALLA HORIZONTAL.

Como se puede ver de la imagen anterior, la malla si es una alternativa eficaz para restringir el pandeo, por lo que limitar su espaciamiento podría ayudar a que el refuerzo de la abertura tenga un mejor comportamiento ante altos desplazamientos.

La siguiente sección realiza el análisis por fotogrametría con la idea de tratar de explicar el comportamiento observado en los ensayos y rescatar información útil tanto para el diseño como para el detallamiento, además de explicar los modos de fallas de cada uno de los muros. Se estudiará directa e indirectamente la formación de rótulas plásticas, el acoplamiento de las secciones a los costados de la abertura, la validez de la hipótesis de Bernoulli y el patrón de

grietas, tratando de identificar el comportamiento de cada muro. La idea será identificar un parámetro que capture el orden de degradación visto en los ensayos.

5.3 FOTOGRAMETRÍA

De acuerdo a lo mostrado en el capítulo 3 se presenta los parámetros definidos para la realización del análisis DIC. La Tabla 5-2 muestra los valores ingresados en Ncorr, tanto para el análisis de desplazamiento como el de deformación.

TABLA 5-2: PARÁMETROS PARA EL ANÁLISIS DIC.

Parámetro	Cámara global (Canon EOS Rebel T3i)	Cámara local (Canon EOS Rebel T5)
Subset Radius	50	100
Subset Spacing	20	20
Diff Norm C/O	1E-6	1E-6
Iteration #C/O	50	50
Step Analysis	Marcado (Seed Propagation)	Marcado (Seed Propagation)
Auto Propagation	Marcado	Marcado
Subset Truncation	Marcado	Marcado
Strain Radius	5	5
Subset Truncation Strain	Marcado	Marcado

Como en cualquier medición, es importante tener una noción del error que tienen dichos valores. Al hablar de desplazamientos, el error estaría determinado por la relación de milímetros por píxel. Mientras mayor es el número, mayor es el error. Para controlar este parámetro se tienen dos opciones: contar con una cámara de alta resolución y/o limitar al máximo la distancia focal de las fotografías. Para los ensayos realizados, tanto la cámara global como la local contaban con la misma cantidad de megapíxeles, pero dado que la cámara local estaba ubicada más cerca del muro (para captar sólo la parte inferior del muro), la distancia focal fue menor, al igual que el error. Así, la relación entre milímetros y píxeles para cada análisis se presenta en la Tabla 5-3.

TABLA 5-3: RELACIÓN DE MILÍMETROS Y PÍXELES EN FOTOS ANALIZADAS.

Muro	MR1	MR2	MR3	MR4
Global [mm/píxel]	0.630	0.600	0.628	0.618
Local [mm/píxel]	0.240	0.182	0.278	0.231

Al hablar de deformaciones, una manera simple y efectiva de estudiar el error asociado tanto a la teoría como a la metodología usada en el laboratorio es tomar dos fotos con el muro en reposo, sin ninguna variación entre una foto y la siguiente. Tanto los desplazamientos como las deformaciones debiesen ser nulos entre una foto y la otra, así que los valores distintos de cero están asociados al error mencionado. Al procesar las imágenes, Ncorr entrega una distribución de deformaciones tanto para las direcciones horizontales y verticales, como para la desangulación. La Figura 5.33 muestra los resultados obtenidos para las fotos globales del muro MR1.

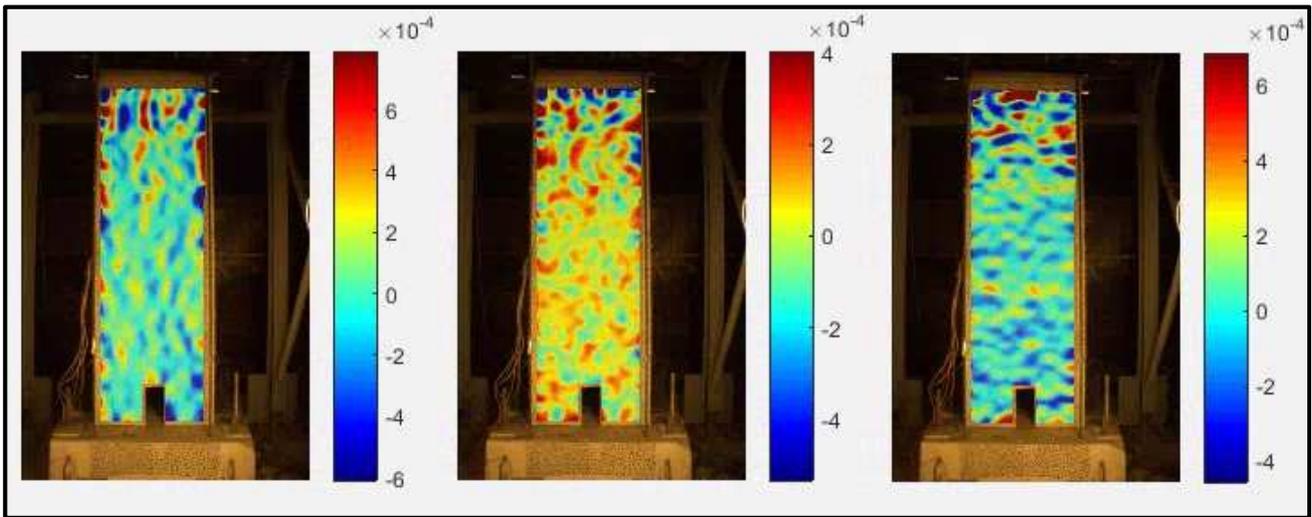


FIGURA 5.33: MAPA DE COLORES, ERROR EN DEFORMACIONES POR FOTOGRAMETRÍA (DE IZQUIERDA A DERECHA: ϵ_{xx} , ϵ_{xy} Y ϵ_{yy}).

TABLA 5-4: ERRORES DE DEFORMACIÓN POR CASO DE ANÁLISIS.

Cámara	Deformación	MR1	MR2	MR3	MR4
Global	ϵ_{xx}	0.0030	0.0018	0.0008	0.0007
	ϵ_{xy}	0.0044	0.0011	0.0011	0.0012
	ϵ_{yy}	0.0029	0.0008	0.0008	0.0020
Local	ϵ_{xx}	0.0012	0.0045	0.0011	0.0021
	ϵ_{xy}	0.0009	0.0049	0.0016	0.0022
	ϵ_{yy}	0.0005	0.0018	0.0010	0.0010

Realizando lo anterior para los ocho análisis realizados (cámara local y cámara global, por cada muro) se obtiene el máximo error (absoluto) para cada deformación. La Tabla 5-4 resume la información obtenida. Se observa que el máximo error registrado es en la deformación angular para la cámara local en el ensayo de MR2. En base a lo anterior, se asume que el error de deformación unitaria para fotogrametría toma un valor de 0.0049.

Ya analizado el error inducido en los valores presentados, es necesario mencionar que los desplazamientos mostrados en los gráficos a continuación son valores nominales. A pesar de que la comparación entre los muros ensayados es bastante directa, la diferencia en los desplazamientos reales alcanzados varían un poco con respecto a MRO. La Tabla 5-5 muestra los desplazamientos reales alcanzados por cada muro para cada ciclo, promediando para cada nivel de deriva y mostrando además la desviación estándar, en donde se aprecia lo recién mencionado. Por lo general los mayores valores de desviaciones estándar se debe a que la rotación del pedestal era más marcada en la dirección positiva de desplazamiento (alejando la probeta del muro de reacción) que en la negativa, pero para obtener el valor se trataron los seis máximos juntos, sin distinguir entre valores positivos y negativos. Lo anterior se puede ver indirectamente al verificar los valores máximos de desplazamiento para cada nivel de deriva en los gráficos de carga desplazamiento de cada muro (Figura 5.10, Figura 5.16, Figura 5.21 y Figura 5.25).

TABLA 5-5: DESPLAZAMIENTOS REALES ALCANZADOS EN LOS ENSAYOS.

Despl. nominal [mm]	Desplazamiento real [mm]									
	MR0		MR1		MR2		MR3		MR4	
	Prom	σ	Prom	σ	Prom	σ	Prom	σ	Prom	σ
2.8	-	-	2.7 (4%)	0.2	2.9 (-3%)	0.3	2.7 (4%)	0.1	2.6 (7%)	0.1
5.6	5.8 (-3%)	1.0	5.1 (8%)	0.2	4.9 (13%)	0.7	5.1 (9%)	0.2	4.9 (13%)	0.2
8.4	8.5 (-1%)	0.5	7.4 (12%)	0.7	7.1 (16%)	0.6	7.0 (17%)	0.3	6.8 (19%)	0.3
11.2	11.3 (-1%)	0.5	9.6 (14%)	0.1	9.2 (18%)	0.7	8.8 (22%)	0.3	8.8 (22%)	0.8
16.8	15.9 (6%)	0.7	13.5 (19%)	0.2	13.5 (20%)	0.8	12.7 (25%)	0.5	12.5 (26%)	1.1
25.2	23.5 (7%)	0.6	19.7 (22%)	0.6	20.4 (19%)	1.0	18.6 (26%)	0.7	18.3 (27%)	2.1
37.8	34.4 (9%)	1.5	30.4 (20%)	1.4	30.8 (19%)	0.6	28.7 (24%)	1.0	27.7 (27%)	4.1
56	52.9 (5%)	1.0	47.4 (15%)	1.9	47.4 (15%)	0.6	45.5 (19%)	1.4	44.4 (21%)	5.3
84	80.7 (4%)	1.2	73.8 (12%)	2.9	76.5 (9%)	5.0	73.9 (18%)	0.7	71.0 (16%)	6.5
112	108.1 (3%)	1.9	101.8 (9%)	3.3	-	-	-	-	-	-

Con el análisis realizado el programa entrega una matriz con los desplazamientos y deformaciones para cada una de las fotografías añadidas con el fin de poder procesarlos de la manera más adecuada para cada estudio que se realice.

5.3.1 PERFIL DE DEFORMACIÓN UNITARIA VERTICAL EN LA ALTURA

Para determinar la concentración del daño, estimar el largo de rótula plástica y tener una aproximación de la distribución de curvatura en la altura del muro, se presentan a continuación perfiles de deformación vertical unitaria en la altura en ejes importantes en los muros ensayados. De izquierda a derecha son: extremo izquierdo del muro (más cercano al muro de reacción), borde izquierdo de la abertura, borde derecho de la abertura y extremo derecho del muro. Es importante mencionar que mientras los dos ejes extremos son fijos para los cuatro muros ensayados (además del muro base), los ejes centrales varían en su ubicación entre el muro MR1 y los demás (dado que el largo de la abertura es distinto en este muro con respecto a los demás). La ubicación de los ejes se puede ver en la Figura 5.34.

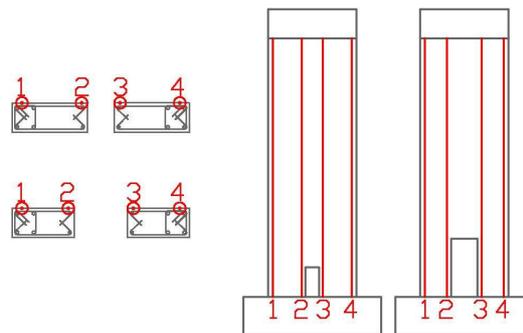


FIGURA 5-34: UBICACIÓN DE EJES: CORTE (IZQ) Y ELEVACIÓN (DER).

La información presentada en todo el análisis de fotogrametría siempre corresponde al primer máximo de desplazamiento de cada ciclo, a no ser que se indique lo contrario. De acuerdo a lo anterior, el desplazamiento inducido en las fotos mostradas siempre será desde el eje 4 al eje 1 (excepto en el muro 2 que fue ensayado con otra orientación, pero se presentará la información corregida para ser consistente con los demás ensayos).

Con respecto a los resultados obtenidos el eje 1 es el que está sometido a la mayor compresión, pero recordando que el mínimo error deformaciones es de 0.0043, es difícil distinguir las zonas de compresión que gobiernan en el eje 1. Debido a lo anterior, se presentarán los resultados obtenidos de los ejes 3 y 4, que son en donde ocurren las mayores tracciones (lo cual se asocia con fluencia del acero, deformaciones plásticas, longitud de rótula plástica e indirectamente con pandeo de barras).

De manera general, se aprecia una curva menos suave en los resultados de la cámara local, además de fluctuar más entre valores altos y bajos. Lo anterior se produce dado que la cámara local tiene una mejor resolución (relación de milímetros por píxel mostrado en la Tabla 5-3) y a pesar de promediar una mayor cantidad de pixeles para el análisis, de todos modos se está promediando una porción menor de muro en cada subconjunto, haciendo que una grieta tomen una mayor porción en el subconjunto a estudiar. Dado que los resultados de la cámara global son más fáciles de estudiar y presentan resultados aceptables, serán los que se mostrarán para los demás muros, excepto en MR4. A continuación la Figura 5.35 muestra los resultados para los ejes 3 y 4 del muro MR1 con la cámara global.

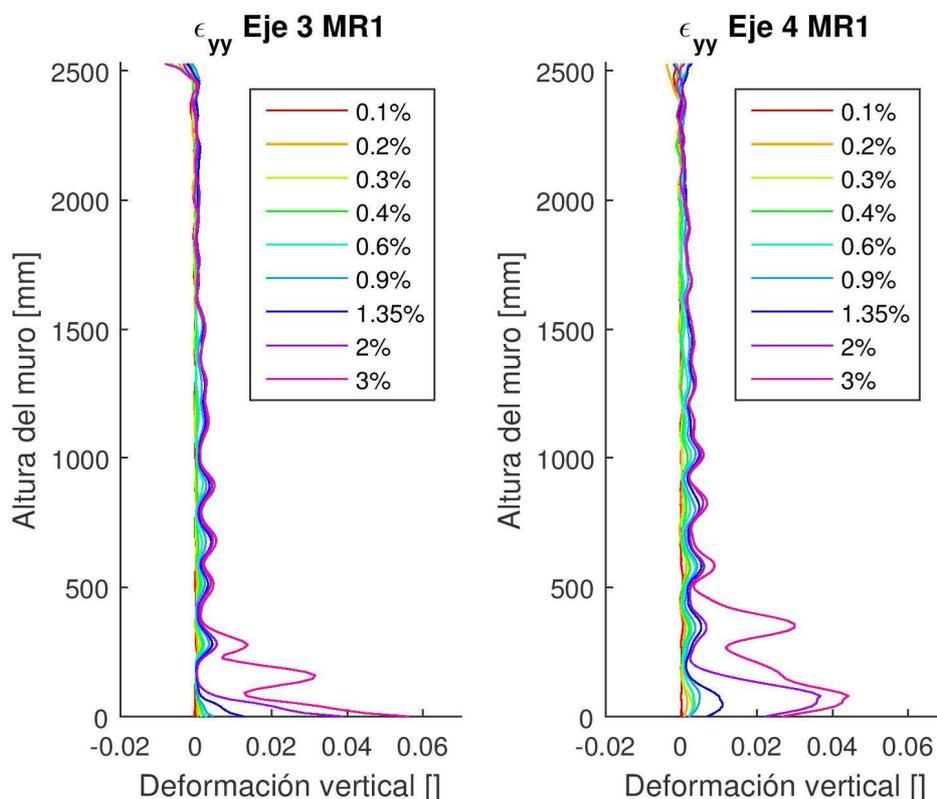


FIGURA 5.35: DEFORMACIÓN VERTICAL: EJE 3 (IZQ) Y EJE 4 (DER) MR1.

Como se puede apreciar en la figura se concentra las deformaciones por tracción en la base del muro para todos los niveles de deriva, y progresivamente va aumentando en la altura y en magnitud al aumentar el nivel de deformación aplicado. El resultado más interesante que se repite en los cuatro ensayos es que la máxima deformación vertical en tracción no ocurre en el eje 4 si no que en el eje 3, generando un punto importante al considerar las restricciones que

se aplican en el detallamiento para evitar el pandeo de las barras longitudinales. En la Figura 5.35 se aprecia un máximo de 0.056 en el eje 3 y de 0.044 en el eje 4 al 3% de desplazamiento. Si se recuerda que los estribos que generan el confinamiento en el elemento de borde del hormigón también tiene como fin evitar el pandeo de la barra longitudinal debido a las altas deformaciones de tracción a la cual se verán sometidas, entonces sería necesario entregar una mayor protección a las barras del refuerzo de abertura, puesto que estarían siendo más susceptibles a pandearse frente a una deformación a compresión que las barras del elemento de borde (las barras son de menor diámetro, tienen una menor protección ante el pandeo producto de estribos o trabas a lo largo de la barra y están sometidas a una mayor deformación axial de tracción). Definiendo la altura de rótula plástica como aquella en la cual se tiene una deformación de 0.01 (bastante mayor a la fluencia de las barras, pero dicho valor es cercano al error también), ésta toma un valor cercano a 470 [mm] en el eje 4 al 3% de deriva.

Durante el ensayo del muro MR2 hubo problemas con la cámara, la cual fue desplazada de su posición durante el ensayo y perdiendo así la posición inicial de ésta. A pesar de realizar correcciones a las fotografías desplazándolas en el plano para volver a la posición inicial de la cámara, la Figura 5.36 muestra los resultados sólo para los últimos cuatro niveles de deriva que tuvo el muro. Comparando las respuestas de MR1 y MR2 se aprecia que sus formas son bastante similares en sus ejes 4 pero no en sus ejes 3. La máxima deformación en MR2 también ocurre en el eje 3, pero a mayor altura (a 250 [mm]), tomando un valor de 0.054 al 3% de deriva. En este caso resulta inusual la posición de la máxima deformación, pero dado que al definir la zona de interés (ROI) se pierden centímetros en la base del muro, la ubicación de dicho máximo ocurre justo bajo el cambio de sección, como se podrá ver cuando se presente la deformación vertical unitaria en el muro entero para los últimos niveles de deriva. En el eje 4, la máxima deformación ocurre en la base, y tiene un valor de 0.045 al 3% de deriva. En ambos ejes, las deformaciones aumentan gradualmente de valor a medida que aumenta el nivel de deriva. La rótula plástica tiene un valor de 570 [mm] al 3% de deriva, en el eje 4.

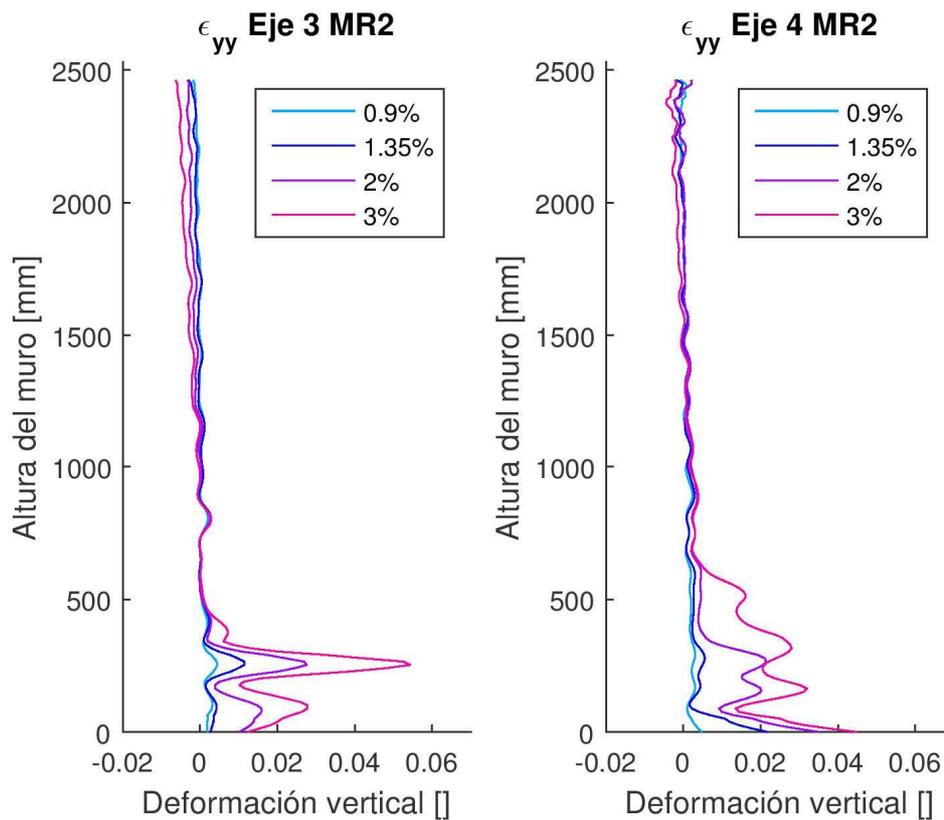


FIGURA 5.36: DEFORMACIÓN VERTICAL: EJE 3 (IZQ) Y EJE 4 (DER) MR2.

La Figura 5.37 muestra que en el muro MR3 la rótula plástica alcanza la misma cota en los ejes 3 y 4, siendo cercana a los 600 [mm], y la máxima deformación por tracción (que ocurre tanto a los 360 [mm] como a los 530[mm] en el eje 3) es de 0.04: menor que en MR1 y MR2. Comparado con los dos casos anteriores, el eje 4 muestra deformaciones más constantes en la altura, pero menores en magnitud que los vistos en los muros anteriores. Por otro lado, el eje 3 tiene valores menores que en MR1 y MR2, pero el máximo valor de deformación ocurre en dos puntos a la vez. Al igual que en los gráficos anteriores, las deformaciones mostradas aumentan gradualmente de valor a medida que aumenta el nivel de deriva aplicado, excepto en los 200 [mm] de altura en el eje 3: al pasar del 2% al 3% ocurre una disminución en la deformación obtenida. Lo anterior ocurre debido a una notoria grieta que aparece al 3% que genera una relajación de la deformación en esa zona debido a las altas tracciones que se generan en los máximos.

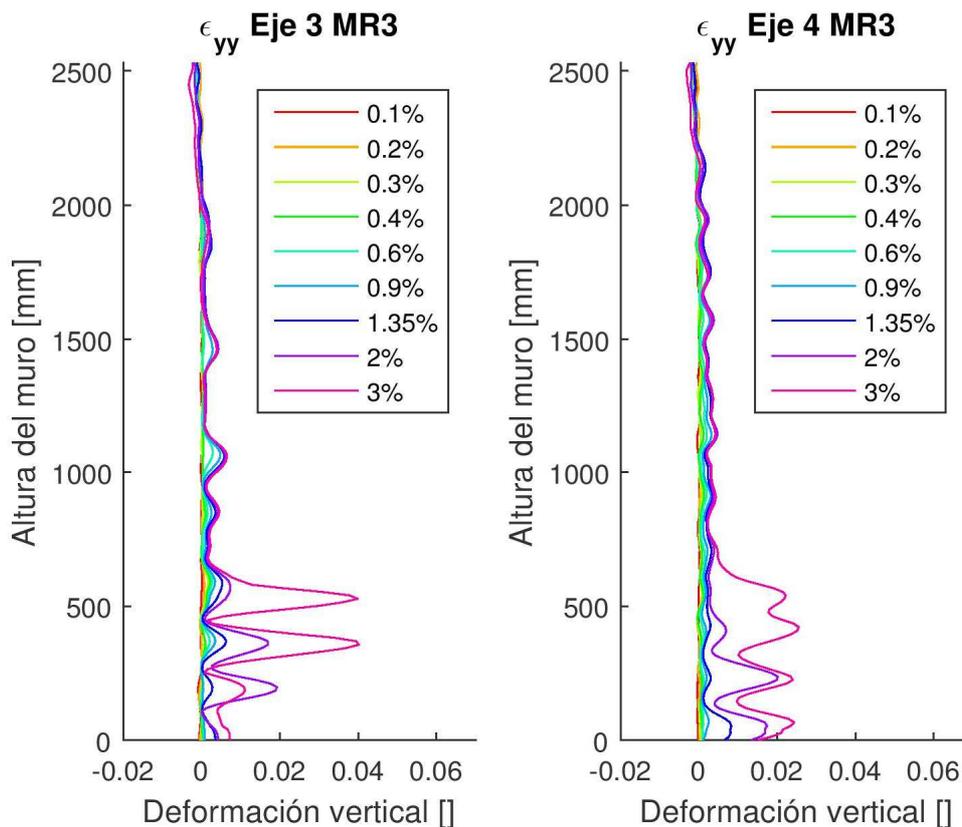


FIGURA 5.37: DEFORMACIÓN VERTICAL: EJE 3 (IZQ) Y EJE 4 (DER) MR3.

La presencia de la losa en el muro MR4 genera zonas en las cuales se pierde información por la proyección de las losas sobre el muro en la cámara global. Debido a lo anterior, en la Figura 5.38 se muestran los ejes 3 de los muros MR3 y MR4, además del eje 4 de MR4: la idea es poder comparar el eje 3 de MR3 entre la cámara global (Figura 5.37, izquierda) con el mismo eje pero en la cámara local (Figura 5.38, izquierda) y así tener una noción del paso del análisis en cámara global al local. Luego de ver las diferencias entre las cámaras, se puede estudiar el eje 3 del muro MR4. Los dos máximos del eje 3 en MR3 que tiene un valor de 0.04 en la cámara global, tienen un valor de 0.07 (aumento del 75%), además de ser mucho más pronunciados con respecto a los valores inmediatamente arriba y abajo, confirmando que al promediar menos valores, los valores serán más extremos y menos suavizados. El eje 3 de MR4 muestra dos valores importantes justo debajo de las losas, pero que no se aprecian en el eje 4. El eje 4 del muro MR4 es bastante similar a su similar en MR3 tanto en forma como en magnitud. El máximo valor en el eje 4 es de 0.025 y se ubica en la base, pero a diferencia de los demás máximos ya presentados, este valor permanece casi constante durante toda la altura. La rótula plástica alcance hasta los 590 [mm] al 3% de deriva.

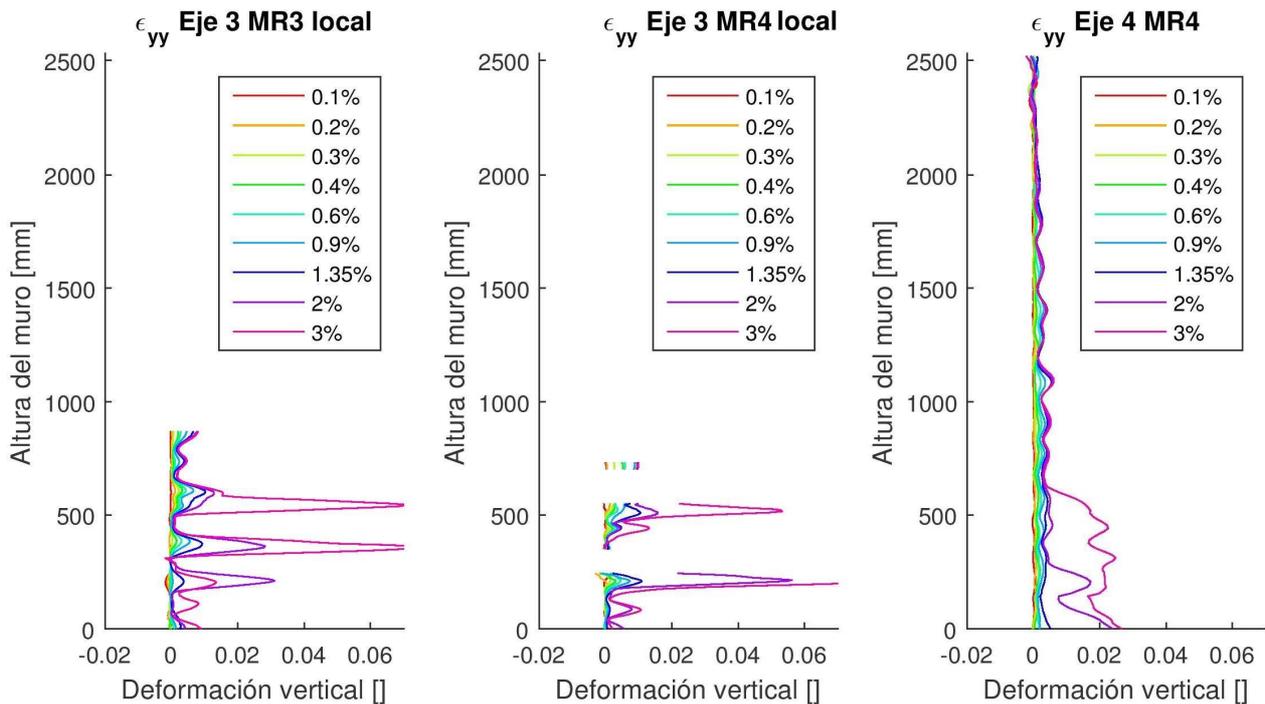


FIGURA 5.38: DEFORMACIÓN VERTICAL EJE 4 MR4.

A pesar de los gráficos mostrados son útiles para ver la evolución del daño por tracción en la altura con respecto al nivel de deriva, ni la longitud de rótula plástica ni la máxima deformación a tracción son capaces de explicar el inicio de la degradación de los muros ensayados, ni mucho menos justificar el orden en el cual fallaron. Dado que el estudio de esta sección viene de asumir que el comportamiento de los muros ensayados son similares a un muro rectangular con un notorio comportamiento flexural, la siguiente sección estudiará ese supuesto: que tan correcto es asumir que la respuesta de los muros es flexural y que tan acoplados son los comportamientos de las secciones de muro a los lados de la abertura.

5.3.2 PERFIL DE DEFORMACIÓN UNITARIA VERTICAL EN LA SECCIÓN

En esta sección se estudiará las deformaciones verticales unitarias a lo largo de la sección con tres fines: distinguir los máximos y mínimos en secciones de interés, validar la hipótesis de Bernoulli y verificar si existe acoplamiento en la deformación en las secciones adyacentes a las aberturas.

Dado el espaciamiento definido en el análisis de fotogrametría (20 píxeles) y la relación de milímetros por píxel (promedio de 0.62 [mm por píxel] en las cámaras globales) el perfil de deformación unitaria está fuertemente influenciado por la presencia de grietas, generando información poco clara. Para poder visualizar la información de mejor manera (y de generar perfiles que promedien el mismo espesor que el mallado de la modelación) se promedian 6 filas de la matriz entregada en fotogrametría para generar los perfiles de deformación. Es así que cada sección de muro tiene un espesor cercano a los 75 [mm] y se generan 33 capas en promedio para estudiar. Dada la gran cantidad de información, se presentan distintas capas para cada muro, de acuerdo a lo que se quiera discutir. Por lo general se mostrará la primera

capa, aquellas en las cuales se muestren resultados interesantes, y la primera capa (de abajo hacia arriba) en la cual se cumpla evidentemente la hipótesis de Bernoulli. La Figura 5.39 muestra en rojo las capas discutidas en esta sección para cada muro, mientras en el capítulo 6 se muestran todas las capas para todos los muros al compararlos con resultados numéricos.

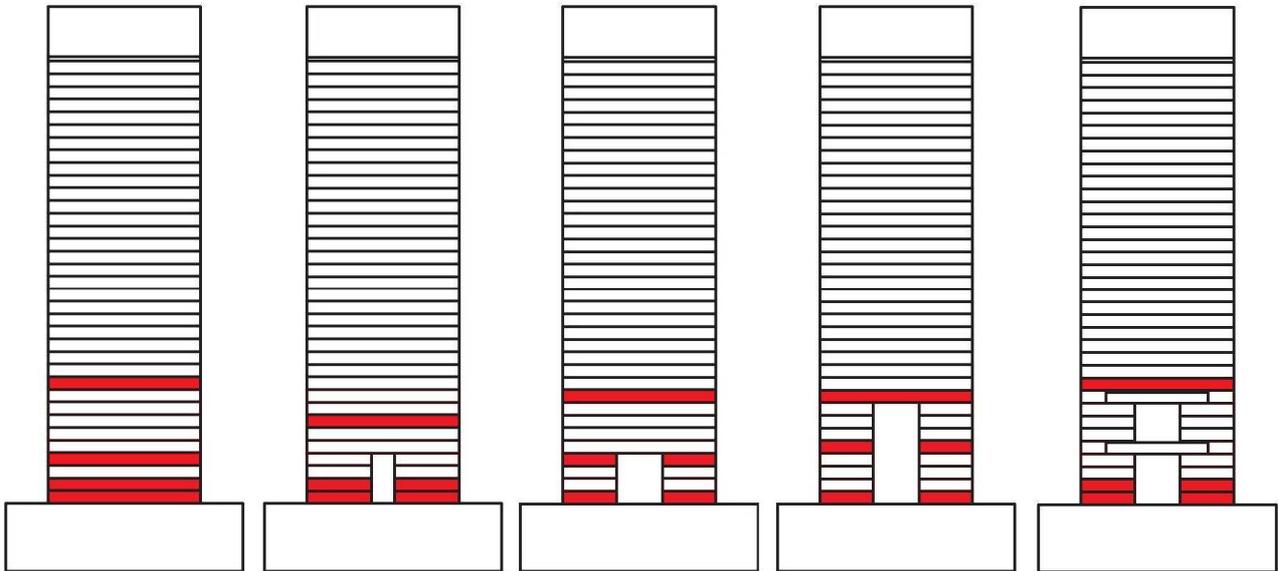


FIGURA 5.39: SECCIONES DE INTERÉS.

Los valores mostrados a continuación corresponden a la deformación obtenida por fotogrametría para los primeros máximos de desplazamiento de cada nivel de deriva. De manera general, se descartan los primeros ciclos debido a lo pequeño de los valores (en MR2 se presentan los últimos cuatro niveles), mientras que en MR1 no se presentan los resultados del primer ciclo del 4% dado que no tienen comparación con los demás muros.

Al ver los resultados obtenidos para MR1 se puede apreciar que la hipótesis de Bernoulli se puede considerar válida tratando la sección como un todo (restando la abertura). Las mayores deformaciones se encuentran en la primera capa, las cuales se pueden ver en la Figura 5.40. Se puede apreciar que la máxima deformación de tracción ocurre en la zona central de la sección derecha del muro y no en el extremo, como se podría predecir y como se asume en la hipótesis de Bernoulli. Sin embargo, al considerar una sola recta que minimice el error (Bernoulli) no se estaría incursionando en grandes errores, dado que a los altos valores de tracción registrados, el hormigón se encuentra agrietado y el acero fluyendo, tanto para el caso real como para la recta hipotética. De manera general, los perfiles aumentan gradualmente desde los primeros niveles de deriva hasta los últimos. Además, ambos extremos de la abertura están sometidos a tracción, dado que la línea neutra se encuentra cercana a los 200 [mm] desde el borde comprimido. La máxima deformación de tracción ocurre en la primera capa, con un valor de 0.06 al 3% de deriva.

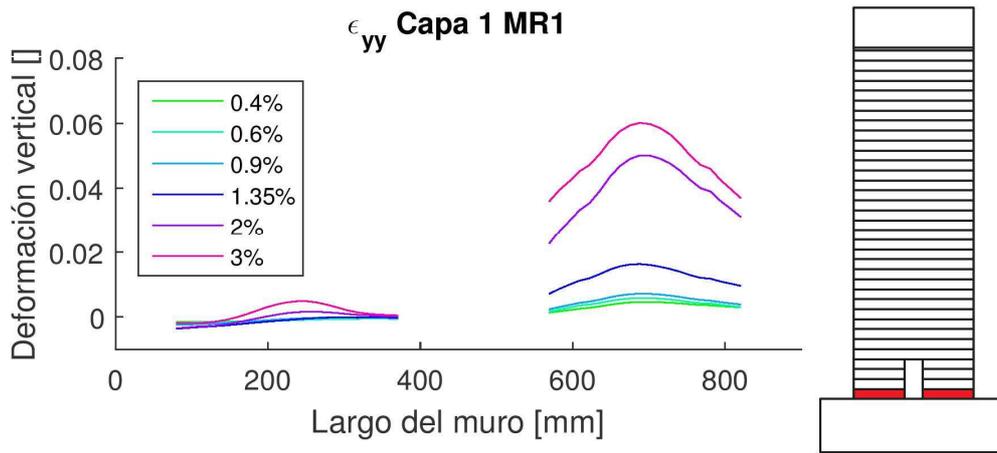


FIGURA 5.40: DEFORMACIÓN VERTICAL CAPA 1 MR1.

La Figura 5.41 corresponde a la segunda capa de MR1, la cual muestra que existe acoplamiento entre las dos secciones de muro que están divididas por la abertura. A pesar de que no sería exacto unir los dos extremos del perfil en la abertura con una línea recta, utilizar una regresión lineal en toda la sección representa de buena manera el comportamiento general del muro.

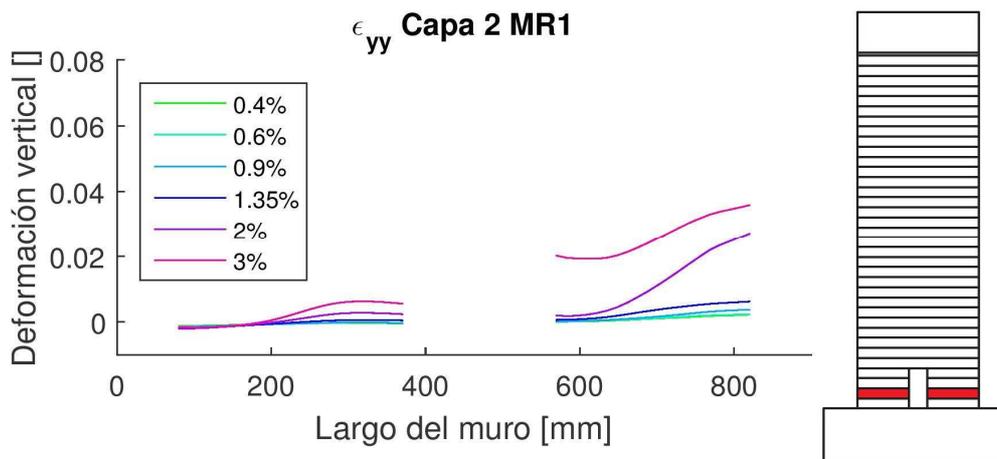


FIGURA 5.41: DEFORMACIÓN VERTICAL CAPA 3 MR1.

A partir de la séptima capa (Figura 5.42) las deformaciones mantienen valores menores a 0.5% (tanto para tracción como para compresión) y la hipótesis de Bernoulli es bastante acertada para representar el perfil de deformaciones.

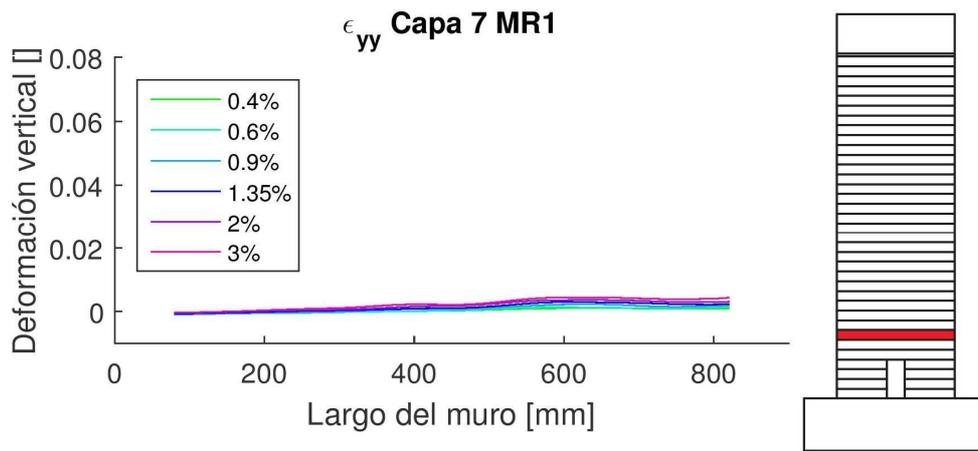


FIGURA 5.42: DEFORMACIÓN VERTICAL CAPA 7 MR1.

A continuación se presentan los perfiles de deformación vertical unitaria para el muro MR2. En la Figura 5.43 se muestra la primera capa, la cual claramente dista de lo obtenido en MR1: la sección traccionada presenta altos valores tanto cerca de la abertura como en el extremo del muro, y valores bajos entre estos. Lo anterior pone en duda la hipótesis de Bernoulli, sobre todo si se consideran los resultados de las demás capas. Similar a lo visto en MR1, ambos extremos de la abertura se encuentran traccionados. Además, el crecimiento en los valores de deformación es gradual a medida que aumenta el nivel de deriva.

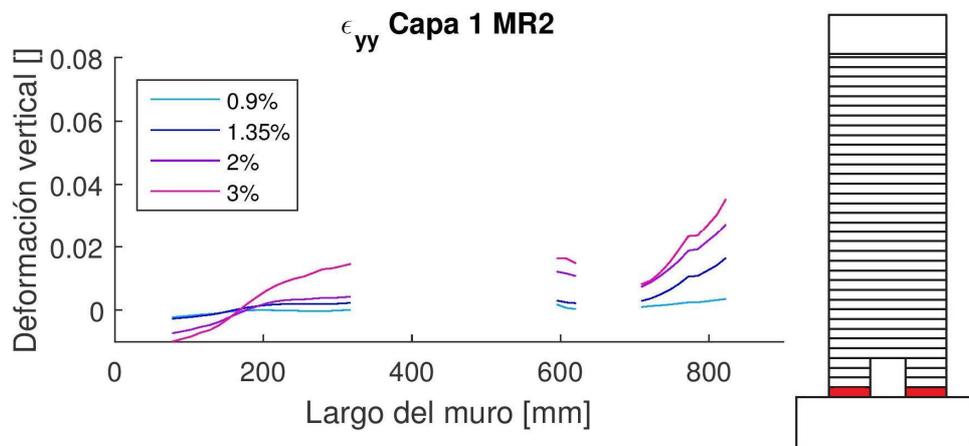


FIGURA 5.43: DEFORMACIÓN VERTICAL CAPA 1 MR2.

En la cuarta capa (Figura 5.44) se aprecia que el lado traccionado tiene una pendiente equivalente opuesta a lo que se espera, mostrando mayores valores en las cercanías de la abertura y disminuyendo a medida que se avanza hasta el final del muro. En estos casos la hipótesis de Bernoulli queda descartada si se considera que las dos secciones del muro trabajan acopladas, pero no habría problemas si se considera la hipótesis separada para cada sección, trabajando independientemente. Lo anterior confirma lo propuesto por Morales, que afirmaba que para aberturas con un largo mayor al 10% (MR2 tiene una abertura con el 30% del largo del muro de largo) las dos secciones de muro se pueden modelar como columnas

separadas (Morales, 2015). Se puede apreciar que la máxima deformación de tracción ya no se ubica en la primera capa –como es de esperarse y como se observó en MR1- si no que en la cuarta capa, justo en la esquina superior derecha de la abertura, llegando a ser 0.043 al 3% de deriva.

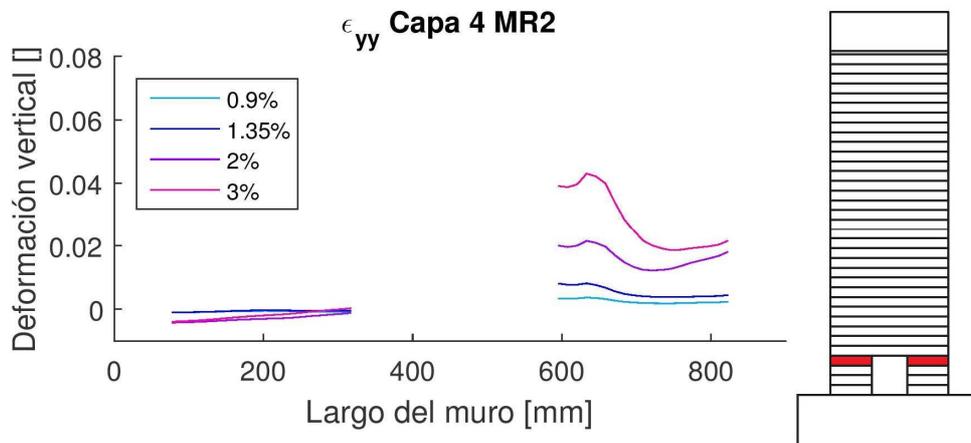


FIGURA 5.44: DEFORMACIÓN VERTICAL CAPA 4 MR2.

La Figura 5.45 muestra los resultados de la novena capa de MR2, en la cual ya se aprecia que no existen grandes valores de deformación (todas menores al 0.5%) y la aproximación de usar la hipótesis de Bernoulli para el perfil de deformaciones es bastante cercana al comportamiento real de la sección.

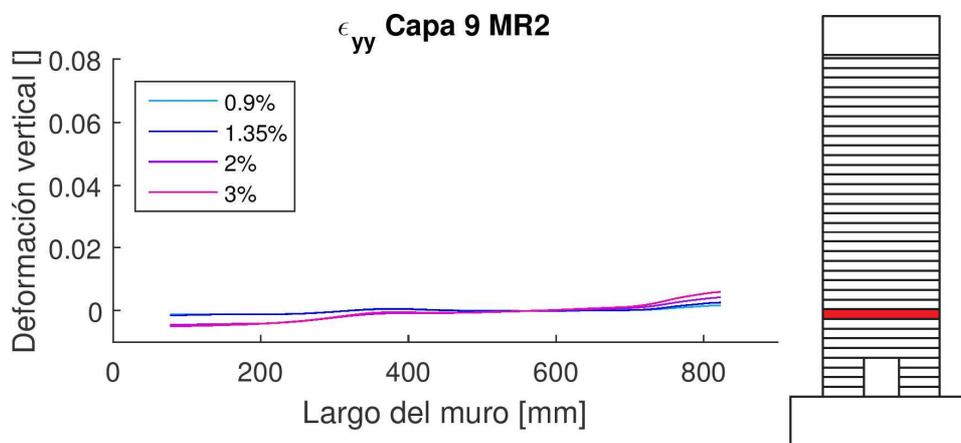


FIGURA 5.45: DEFORMACIÓN VERTICAL CAPA 9 MR2.

La Figura 5.46 muestra el perfil de deformaciones para la primera capa de MR3. Nuevamente se aprecia que el acoplamiento no se presenta, por lo cual usar la hipótesis de Bernoulli no sería acertado. Sin embargo, dentro de cada sección de muro el perfil es bastante similar a una recta, incluso para valores altos de deriva por lo que usar la hipótesis dentro de esa sección pareciera una alternativa. Al igual que en los casos anteriores, las deformaciones aumentan

gradualmente a medida que se aumenta el nivel de deriva, y ambos extremos de la abertura se encuentran traccionados en todos los niveles de deriva.

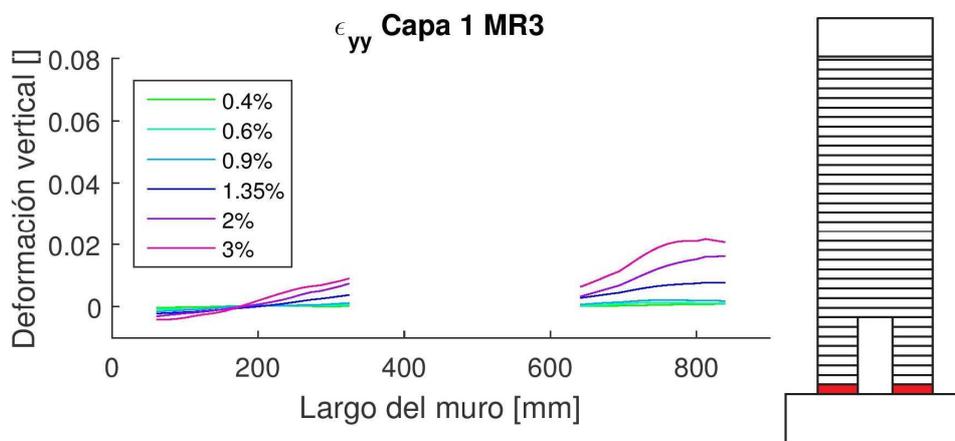


FIGURA 5.46: DEFORMACIÓN VERTICAL CAPA 1 MR3.

La Figura 5.47 muestra la quinta capa de MR3, donde nuevamente la máxima deformación unitaria de tracción se encuentra en una capa distinta a la primera, alcanzando un valor cercano a 0.034 al 3% de deriva. Además, en esta capa se aprecia que el gradiente de deformación se invierte en la sección traccionada: se aprecia mayores valores en las cercanías de la abertura y disminuyen a medida que se acerca al fin del muro, al igual que la capa 4 de MR2. Si se considera la pendiente (definiéndola positiva) que tendría la línea que representa el perfil de deformaciones de la sección derecha (traccionada) que se ve en la primera capa, la pendiente que tendría la misma línea en la quinta capa tendría pendiente negativa. Lo anterior da pie a que existe una doble curvatura en dicha sección para compatibilizar los perfiles de deformaciones mostrados, algo sin antecedentes y fuera de cualquier pronóstico en el comportamiento del muro.

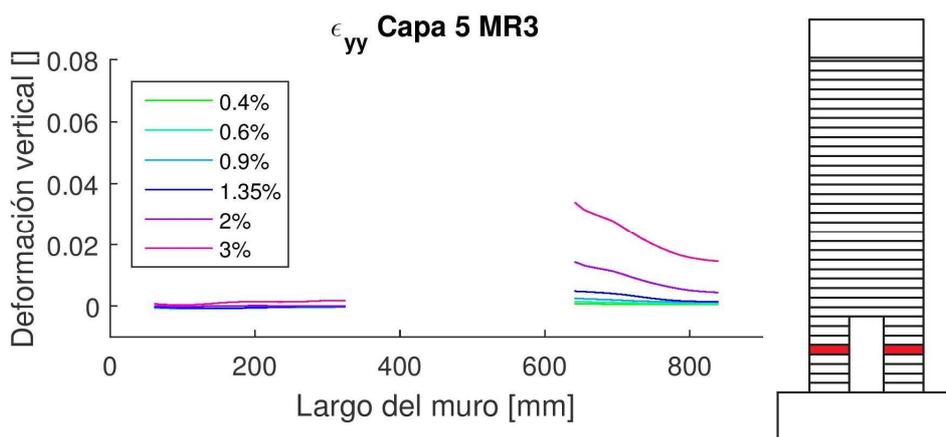


FIGURA 5.47: DEFORMACIÓN VERTICAL CAPA 5 MR3.

La Figura 5.48 muestra los resultados de la novena capa de MR9, la cual corresponde a la inmediatamente superior al término de la abertura y en donde se aprecia que

no existen grandes valores de deformación (todas menores al 0.5%). Además, la aproximación de usar la hipótesis de Bernoulli para el perfil de deformaciones es bastante cercana al comportamiento real de la sección.

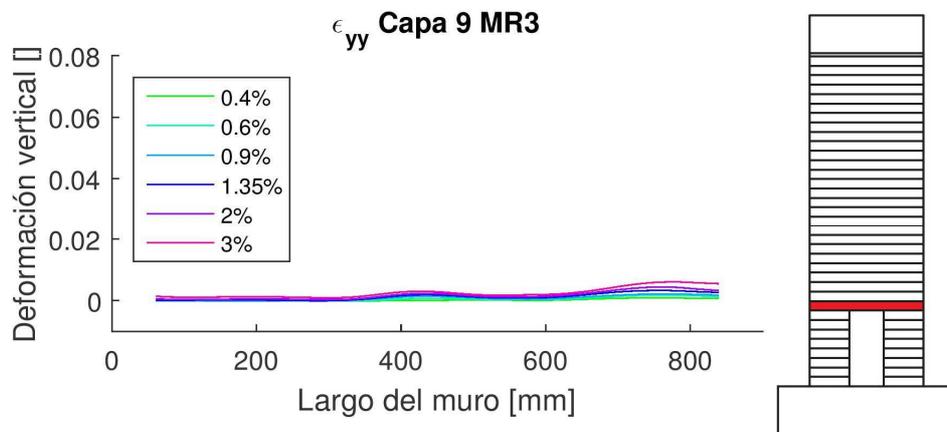


FIGURA 5.48: DEFORMACIÓN VERTICAL CAPA 9 MR3.

Debido a la proyección que generan las losas sobre el muro en la cámara global, los perfiles de deformaciones unitarias verticales presentados son tanto de la cámara global como de la local, dado que la última pierde menos información por las proyecciones de las losas. El perfil de deformaciones de la primera capa se muestra en la Figura 5.49, tanto para la cámara global (izquierda) como para la local (derecha). Al comparar los dos gráficos se nota la tendencia entre ambos resultados ya vistos en gráficos anteriores: la cámara local entrega valores más altos y más variados, pero siguen la tendencia de la cámara global. En ambos casos se muestra un comportamiento más acoplado que en los dos muros anteriores, lo cual es atribuible al efecto que tiene la losa sobre las dos secciones del muro. Dado que durante el ensayo se vieron grietas en la losa, se confirma que ésta trabajó durante el ensayo induciendo un acoplamiento entre ambas secciones, generando resultados como los mostrados. La curva del 3% de deriva presenta valores anómalos en la sección comprimida debido a que ocurre un desprendimiento de hormigón que anula los valores mostrados en dicha zona. La máxima deformación alcanzada en esta capa (para la cámara global) tiene un valor de 0.026 al 3% de deriva, y ocurre en el extremo del muro.

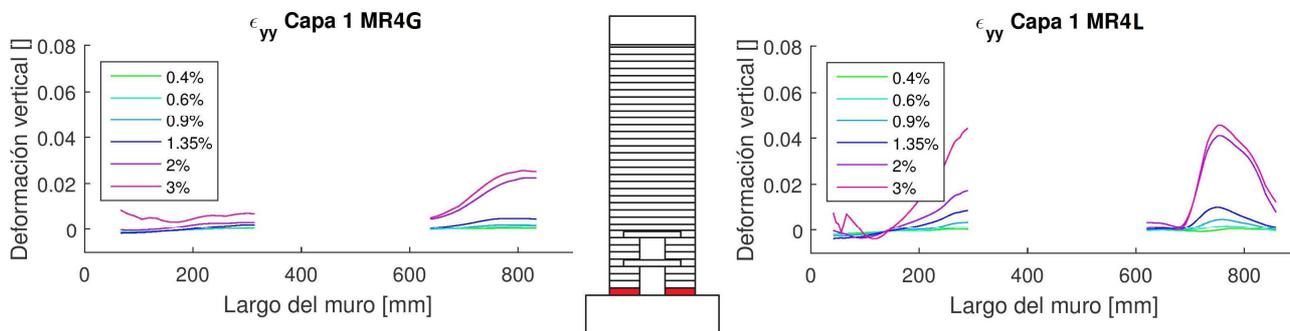


FIGURA 5.49: DEFORMACIÓN VERTICAL CAPA 1 MR4: CÁMARA GLOBAL (IZQUIERDA) Y LOCAL (DERECHA).

La Figura 5.50 muestra los resultados para la segunda capa, a través de la cámara local. De inmediato se puede reconocer un comportamiento más acoplado que en los demás muros, atribuible a la presencia de las losas. Observando los resultados de las primeras dos capas, se podría concluir que la hipótesis de Bernoulli aplicada a toda la sección toma peso como alternativa válida, a diferencia de lo visto en MR2 y MR3.

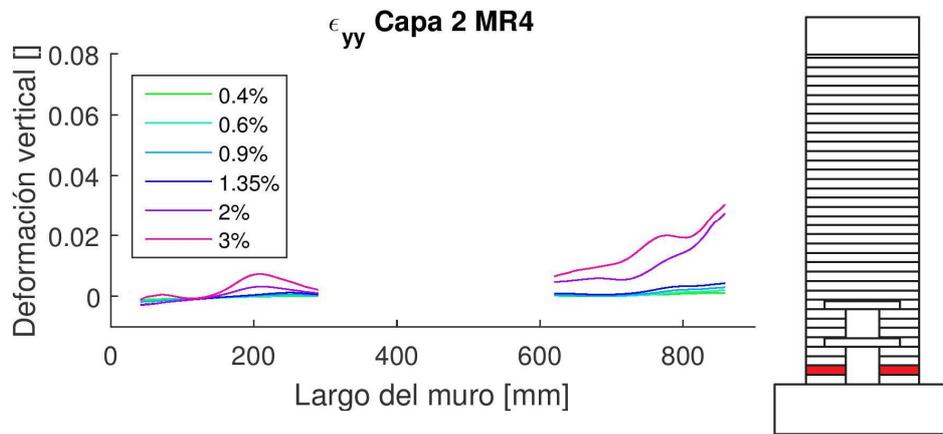


FIGURA 5.50: DEFORMACIÓN VERTICAL CAPA 2 MR4.

Finalmente, la Figura 5.51 muestra el perfil de deformaciones para la décima capa de MR4, donde los valores de deformaciones son bastante menores (menores a 0.5%) y se puede considerar que la sección se mantuvo plana al ser deformada.

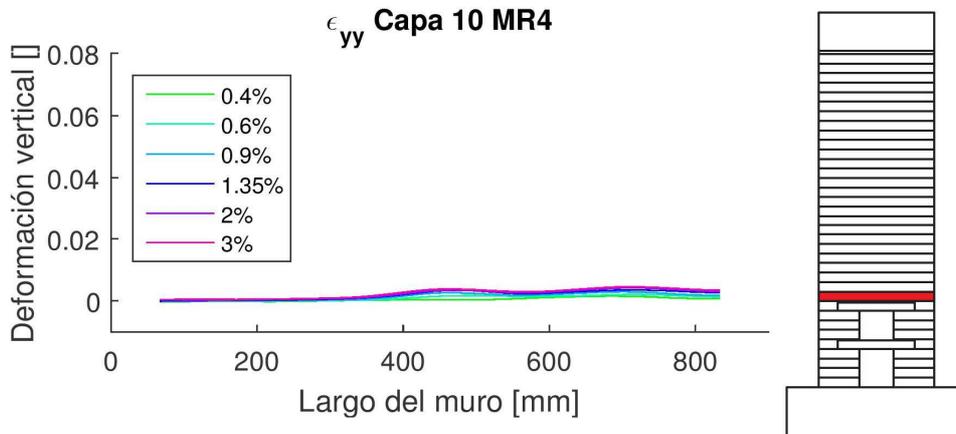


FIGURA 5.51: DEFORMACIÓN VERTICAL CAPA 10 MR4.

Del estudio de esta sección, fue posible identificar el comportamiento de la sección en distintas capas para todos los niveles de deriva de techo y en todos los muros. A pesar de que la presencia de la abertura -además de los esfuerzos de corte- genera una discrepancia entre lo mostrado y lo supuesto por la hipótesis de Bernoulli, en la mayoría de los casos no induce grandes errores asumir la hipótesis pero para cada sección de muro (a cada lado de la abertura) por separado. Las capas que tienen una pendiente equivalente opuesta a lo esperado podrían ser señal de una incursión en una doble curvatura en la altura o la creación de un

puntal que afecte esa zona. Para poder determinar la forma en la cual se está deformando el muro en su totalidad, la siguiente sección mostrará el patrón de deformaciones en el muro, distinguiendo entre deformaciones verticales y principales, para poder identificar puntales que puedan estar generando la degradación de capacidad en los muros.

5.3.3 DEFORMACIONES PRINCIPALES EN EL MURO

Se presenta a continuación un estudio de deformación entregado por fotogrametría para los primeros máximos en los últimos niveles de deriva de todos los muros ensayados. En esta sección, las dimensiones de las matrices entregadas por Ncorr no fueron promediadas, por lo cual los valores son los mismos que podría entregar el software.

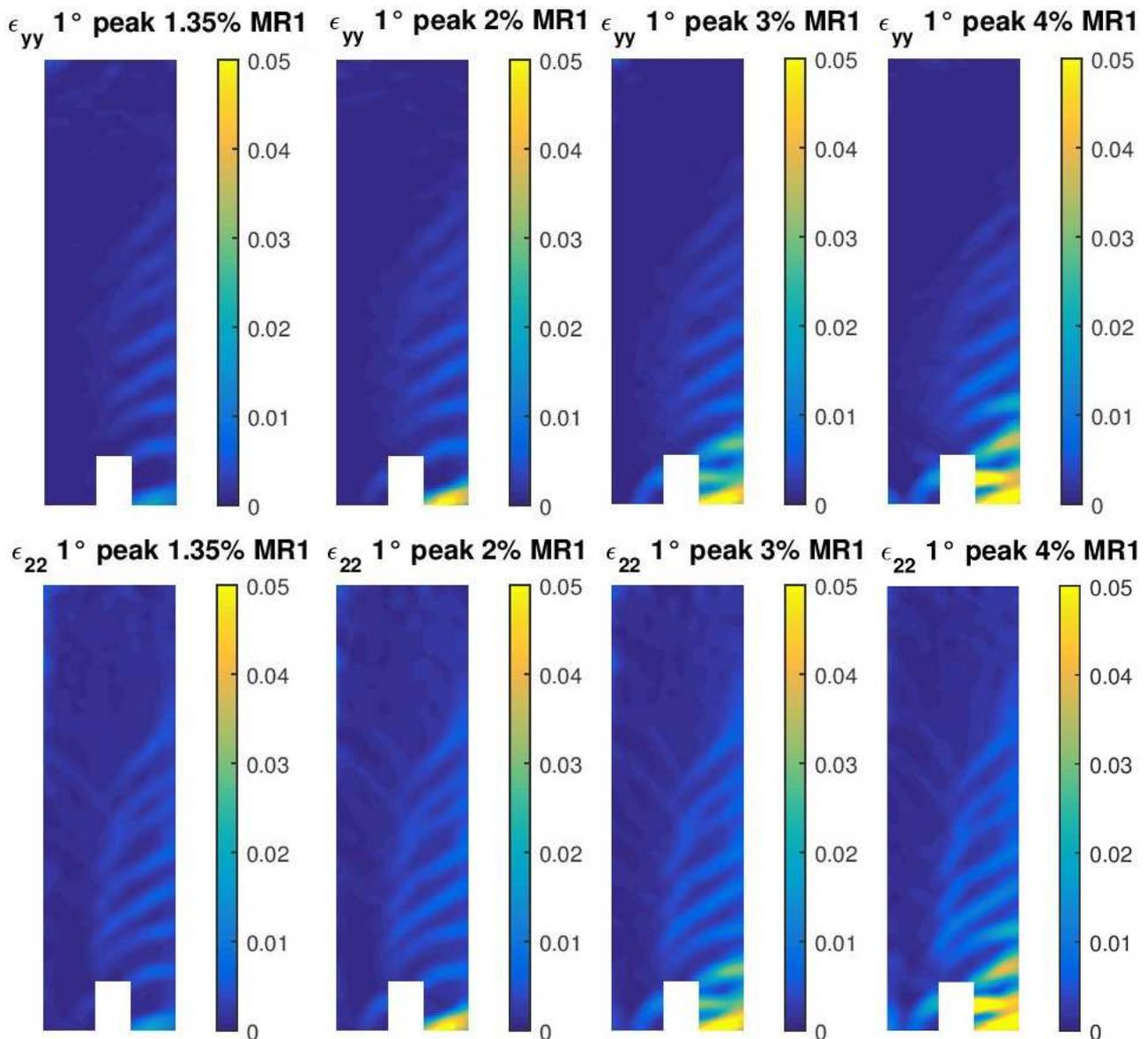


FIGURA 5.52: DEFORMACIÓN VERTICAL (FILA SUPERIOR) Y PRINCIPAL MAYOR (FILA INFERIOR) MR1.

Dada la relación de aspecto de los muros, se espera un fuerte comportamiento flexural en la respuesta. A pesar de lo anterior, los dos estudios anteriores no han podido explicar el orden en la degradación de capacidad de los muros ensayados. Así, para entender mejor el flujo de cargas y deformaciones en el muro se presentarán las deformaciones principales en vez de las verticales. Las variaciones entre unas y otras son pequeñas, como se puede ver en la Figura 5.52, que compara las deformaciones verticales y principales (mayores) del muro MR1 para los últimos cuatro niveles de deriva. A pesar de que hay más consistencia tanto con los análisis anteriores como con la práctica usual en usar las deformaciones verticales, una ventaja de realizar el análisis a través de las deformaciones principales es que los flujos de deformaciones son más evidentes que los mostrados por la deformación vertical (pudiendo además distinguir que tan flexural es la respuesta). Además, más que los valores como tal se pretende estudiar el patrón de deformación en el muro, lo cual es más evidente de las deformaciones principales.

De la fila inferior de la Figura 5.52 se puede ver una evolución en la deformación principal mayor bastante regular: a medida que se aumenta la deriva de techo los colores se van volviendo más cálidos. En el primer máximo del 4% de deriva se aprecian dos zonas de alta tracción: en la base y a mitad de altura de la abertura. Esta última zona está más cargada hacia el centro del muro que a los extremos. Además, se aprecia una línea cálida inclinada que nace en el extremo superior izquierdo de la abertura y baja en cerca de 45°. Esta zona de alta tracción es la que genera la segunda pérdida de capacidad importante en MR1 (Figura 5.10).

De acuerdo a lo visto en las imágenes del ensayo del muro MR2, la barra de anclaje a la losa no permite observar con claridad la creación de la grieta de corte a la cual se le puede adjudicar la degradación de capacidad. Además, dado que la cámara fue puesta en la otra cara del muro para este ensayo, los resultados están invertidos con respecto a los demás ensayos. En la Figura 5.53 se aprecia una importante concentración de deformación en la esquina superior izquierda de la abertura, siendo incluso mayor que las deformaciones registradas en la base. Además, nuevamente aparece una zona de deformación con una inclinación marcada que parte en la esquina superior derecha de la abertura y cae con un ángulo cercano a 45°, similar a la grieta observada en el ensayo que generó la falla del muro.

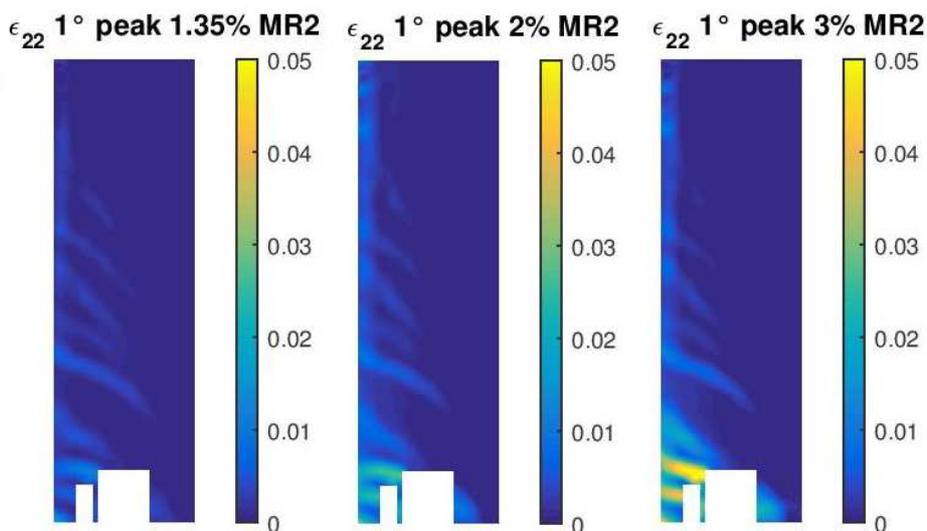


FIGURA 5.53: DEFORMACIÓN PRINCIPAL MAYOR MR2.

La Figura 5.54 muestra los primeros máximos registrados en los últimos tres niveles de deriva del muro MR3. En este caso, la zona con las mayores deformaciones está claramente concentrada en la esquina superior derecha de la abertura, bajando hasta llegar a cerca de la mitad de la altura de la abertura. Además, se aprecia que al otro lado de la abertura está ocurriendo un agrietamiento diagonal que nace en la esquina superior izquierda de la abertura y termina en el extremo inferior izquierdo del muro, caso similar a lo observado en MR2 y que dan inicio a la degradación de la capacidad resistente.

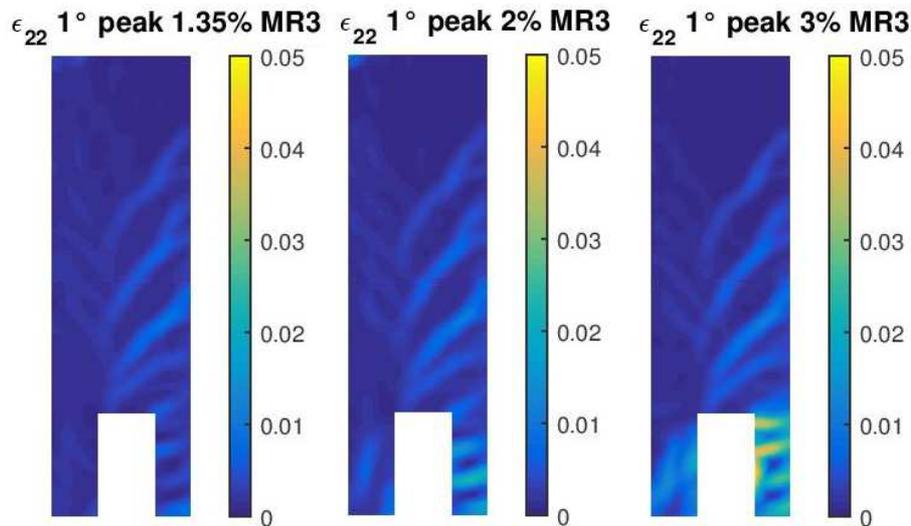


FIGURA 5.54: DEFORMACIÓN PRINCIPAL MAYOR MR3.

Dado que las proyecciones de las losas sobre el muro dejan poco de éste visible en la cámara global, el estudio de MR4 se realizará a través de la cámara local. La Figura 5.55 muestra los resultados ya mostrados, pero esta vez para el muro MR4 en su cámara local. Se puede apreciar que dada la mayor dimensión de la matriz de datos las concentraciones de deformaciones son más nítidas que en los demás casos. Al igual que en MR2 y MR3, las máximas deformaciones se encuentran en altura y no en la base del muro. Desde el primer máximo mostrado se ve una zona con altas deformaciones justo bajo la primera losa, en el sector derecho. Además, progresivamente se va generando una grieta diagonal que nace en la intersección del lado izquierdo de la abertura con la primera losa, y baja en 45° hasta la base, siendo una grieta similar a la observada tanto en MR2 como en MR3.

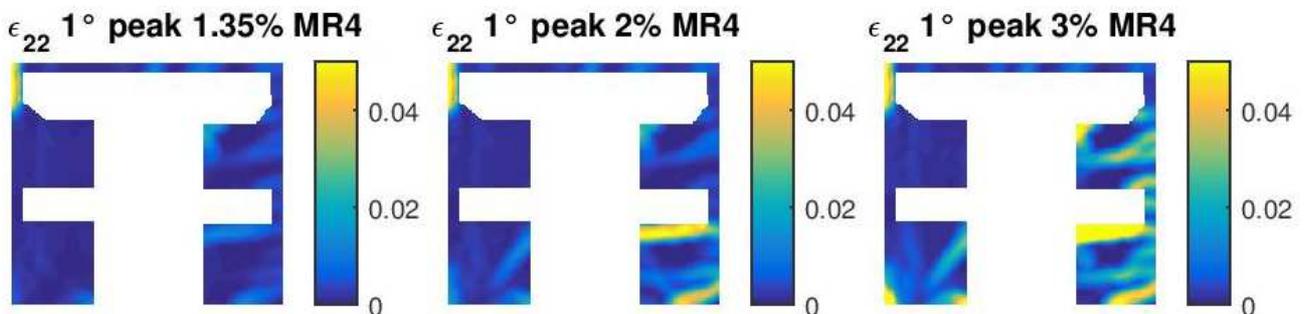


FIGURA 5.55 DEFORMACIÓN PRINCIPAL MAYOR MR4 (CÁMARA LOCAL).

Tres diferentes análisis se han realizado sobre los muros ensayados: perfiles de deformación vertical en la altura para cuatro ejes de interés, perfiles de deformación vertical en la sección para distintas capas y deformaciones principales en todo el muro. A pesar de que han entregado información valiosa, todavía no han sido capaces de explicar el origen de la degradación de capacidad vista en los ensayos.

5.3.4 COMPARACIÓN RESPECTO A MURO BASE Y RESUMEN DE RESULTADOS.

Para determinar la influencia de la presencia de una abertura en un muro, es importante tener la comparación con respecto a un muro sin abertura. Así, a continuación se muestran los mismos análisis realizados pero para el muro base, con la idea de identificar diferencias entre éste y los demás muros.

La Figura 5.56 muestra los ejes 3 y 4 ya definidos, pero para MRO. El eje 4 es bastante similar al eje 4 de MR3, mostrando una buena distribución del daño. La rótula plástica alcanza los 750 [mm] al 3% de deriva, y muestra una paulatina evolución entre cada nivel de deriva. El eje 3 también muestra una buena distribución del daño, alcanzando altas deformaciones por sobre los 500 [mm]. Al igual que en los muros anteriores, la máxima deformación no ocurre en la base del eje 4, sino que a los 100 [mm] de la base en el eje 3, tomando un valor de 0.47

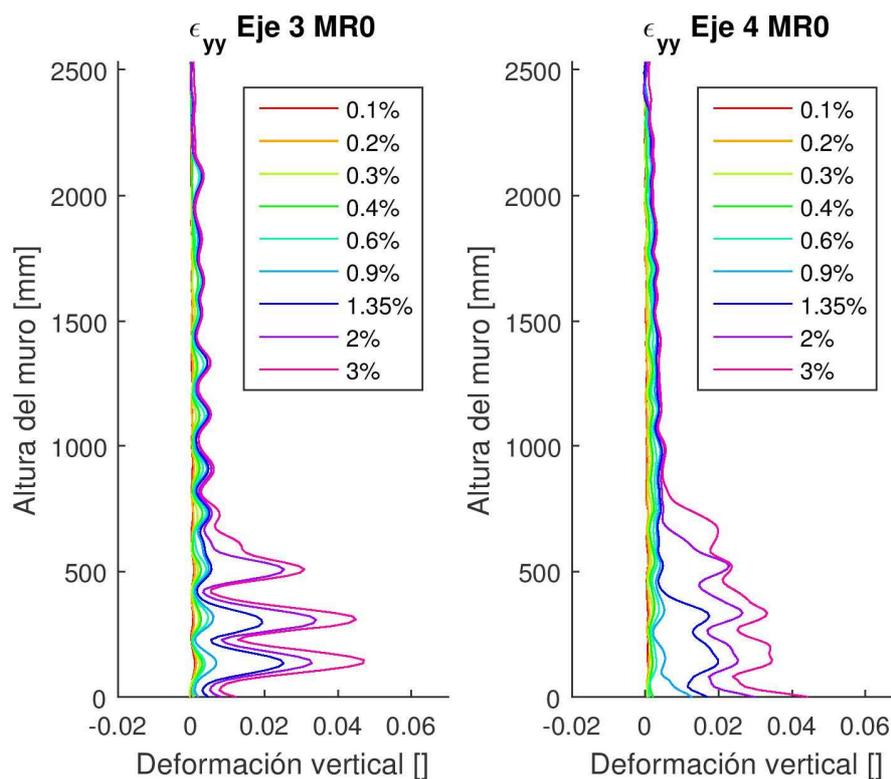


FIGURA 5.56: DEFORMACIÓN VERTICAL: EJE 3 (IZQ) Y EJE 4 (DER) MRO.

La Figura 5.57 muestra el perfil de deformaciones verticales en la sección para la primera capa. La hipótesis de Bernoulli es evidentemente más cercana al comportamiento real de la sección, al igual que en las capas dos, cuatro y diez (Figura 5.58, Figura 5.59 y Figura 5.60). La

zona sin información entre los 600 [mm] y 800 [mm] que tienen las capas uno y dos corresponden a una barra de anclaje que impide obtener información para fotogrametría en esa zona, similar a lo ocurrido con MR2. La máxima deformación se tiene justo cerca de la zona tapada por la barra en la segunda capa, pero por la forma que tiene el perfil a ambos lados se puede suponer que no varía en esa zona, tomando un valor de 0.04 al 3% de deriva.

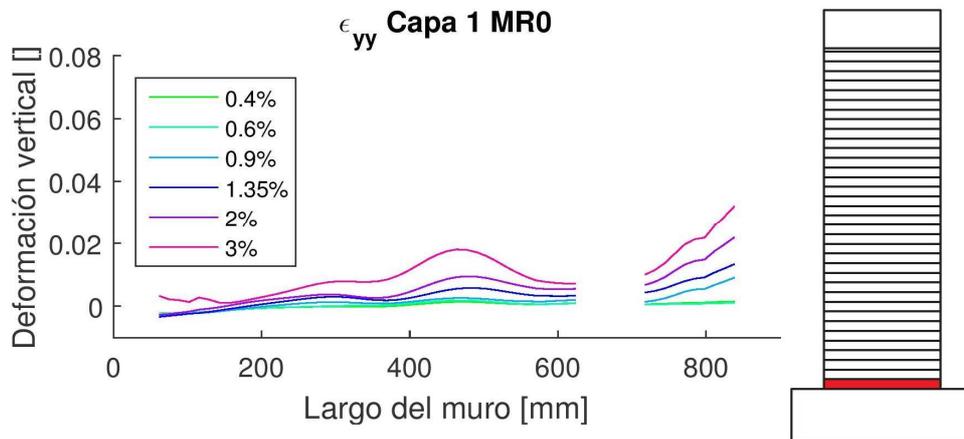


FIGURA 5.57: DEFORMACIÓN VERTICAL CAPA 1 MR0.

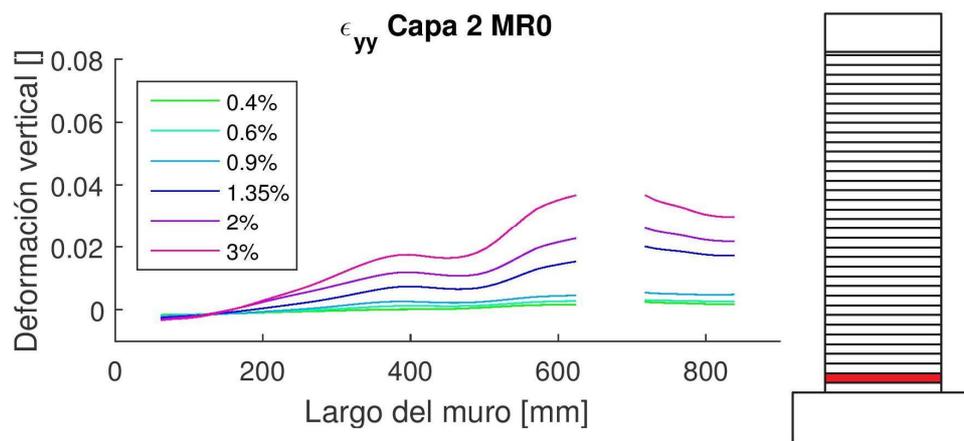


FIGURA 5.58: DEFORMACIÓN VERTICAL CAPA 2 MR0.

El perfil de deformación de la cuarta capa se muestra en la Figura 5.59, la cual muestra la mayor deformación vertical de todas las capas. Dado que pareciera que dicho valor ocurre en la zona tapada por la barra de carga axial, no se puede determinar su valor, pero intersectando el perfil desde ambos lados se puede esperar una deformación cercana a 0.045 al 3% de deriva. La décima capa es mostrada en la Figura 5.60 en la cual se ve que el perfil ya incurre en pequeñas deformaciones (menores a 0.5%) y el perfil es muy bien representado por la hipótesis de Bernoulli.

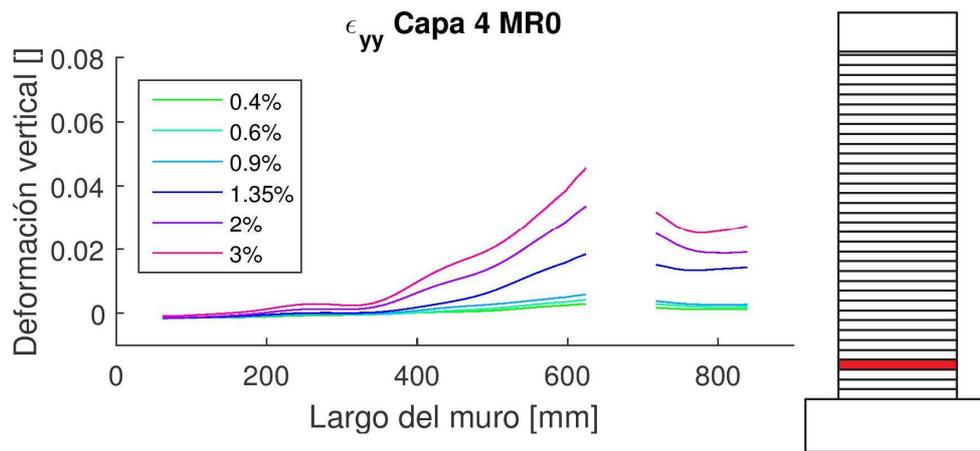


FIGURA 5.59: DEFORMACIÓN VERTICAL CAPA 4 MR0.

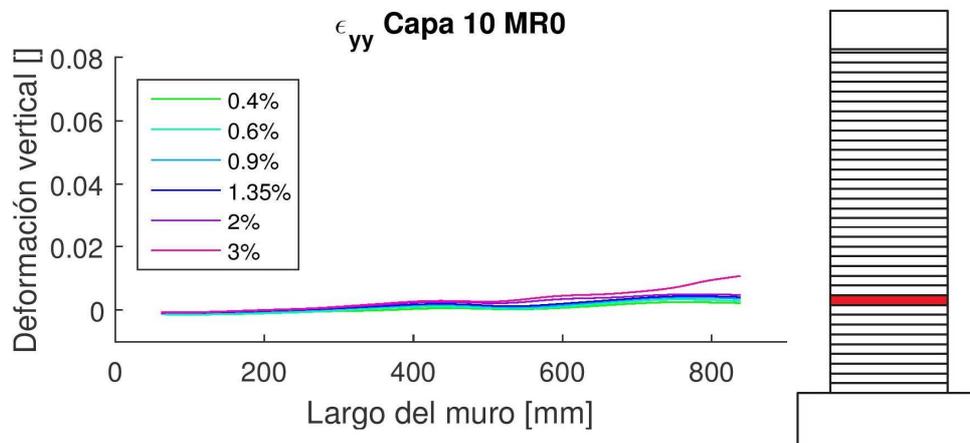


FIGURA 5.60: DEFORMACIÓN VERTICAL CAPA 10 MR0.

Finalmente, el patrón de deformaciones principales (mayor) para los primeros máximos del 1.35%, 2% y 3% de deriva se muestra en la Figura 5.61. Se puede ver una progresión paulatina en las zonas de altas deformaciones de la parte inferior del muro. Al 3% de deriva se notan tres grietas que concentran el daño y generan una zona sobre la barra de anclaje con deformaciones mayores al 4%. Es dicha zona la que al ser comprimida es la que da origen a la degradación de capacidad del muro. Es interesante notar que se aprecian altos valores de deformación incluso por sobre del largo de rótula plástica, el cual por lo general se fija cercano al largo del muro. Dichos valores son generados por grietas de corte.

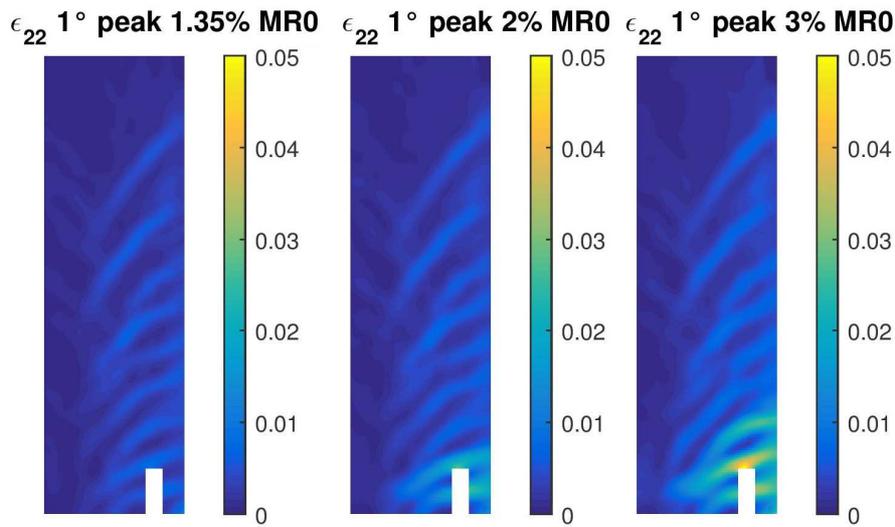


FIGURA 5.61: DEFORMACIÓN PRINCIPAL MAYOR MRO.

Después de mostrados los resultados para el muro base, Las grietas diagonales mostradas en la Figura 5.27, Figura 5.28, Figura 5.29 y Figura 5.30 son identificadas por las deformaciones principales como concentraciones de tracción. Dado que el inicio de las grietas mencionadas marca la degradación de capacidad resistente, se puede inducir una falla de compresión generada por corte. Para poder verificar lo anterior, lo ideal sería determinar el valor de la deformación de compresión (o principal menor) en el puntal o en algún punto de éste (como el punto inferior extremo) y determinar el estado del hormigón a dicha deformación. Sin embargo, dado que los valores de deformación por compresión son pequeños, éstos entran en el rango de error de la metodología de fotogrametría. Además, pequeñas variaciones en las cámaras pueden generar ruido en estos niveles de deformación.

De acuerdo a lo anterior, el valor de compresión en el extremo más comprimido podría ser el parámetro que explique la pérdida de capacidad resistente en los muros, pero dado a que los valores son similares al error del método el estudio podría estar sujeto a errores considerables y ruido. Así, debido a que existen demasiadas limitantes para realizar el estudio de las deformaciones a compresión mediante fotogrametría, se dará paso al estudio analítico mediante modelos numéricos para poder identificar la variación de dicho parámetro para cada muro y confirmar que justifica el orden en el cual se generó la degradación de resistencia entre las distintas probetas.

6. MODELACIÓN Y RESULTADOS ANALÍTICOS

6.1 INTRODUCCIÓN

El capítulo anterior cierra la etapa experimental del estudio, donde de acuerdo a los alcances de las metodologías usadas no se pudo determinar un factor que explicara el orden de desempeño de las probetas ensayadas. Sin embargo se propuso como elemento determinante en el rendimiento de los muros la deformación a compresión alcanzada en la diagonal que une la esquina superior de la abertura con el extremo inferior del muro, y como ésta podría capturar la influencia de la abertura sobre el muro.

El presente capítulo pretende capturar el comportamiento observado en los ensayos, tanto el comportamiento global a través de sus relaciones carga desplazamiento como el comportamiento local a través del estudio de las deformaciones unitarias. Además, se realizará un análisis paramétrico con el fin de extender los resultados obtenidos a casos de interés.

Para realizar lo anterior primero se detallará el procedimiento de modelación, indicando la forma en la cual fueron representados numéricamente los muros, describiendo su geometría, composición, forma de análisis y leyes constitutivas para tener una noción del modo en el cual se representaron los muros, y así identificar sus alcances y limitaciones.

6.2 MODELAMIENTO

El primer paso en el modelamiento usado a través del programa SAFE Toolbox (Rojas, 2012) es la creación de la malla, la cual debe poseer elementos finitos lo suficientemente pequeños para capturar el proceso por el cual pasa el muro al ser ensayado. Sin embargo, lo anterior puede llevar a elementos demasiados pequeños que generan un altísimo costo computacional, además de presentar mayores problemas en la degradación del material. Además de lo anterior, existen recomendaciones de modelaciones anteriores con respecto a creación de la malla.

Iterando entre todos los aspectos señalados, se llega a tener cuatro elementos a cada lado de la abertura, de 75 [mm] en la base y aumentando en la altura, dado a que no es necesario disponer de elementos pequeños en todo el muro. Para reducir costos computacionales, el pedestal es modelado elásticamente, y dado que el punto de aplicación es en la mitad de la viga de transferencia, el muro es modelado de 2800 [mm] de alto (150 [mm] más que el muro formal). La Tabla 6-1 muestra la cantidad de nodos y elementos usados para cada muro, mientras que la Figura 6.1 muestra un esquema de los muros modelados.

TABLA 6-1: ELEMENTOS Y NODOS USADOS PARA MODELACIÓN.

	Elementos	Nodos
MR1	360	411
MR2	360	411
MR3	352	407
MR4	412	478

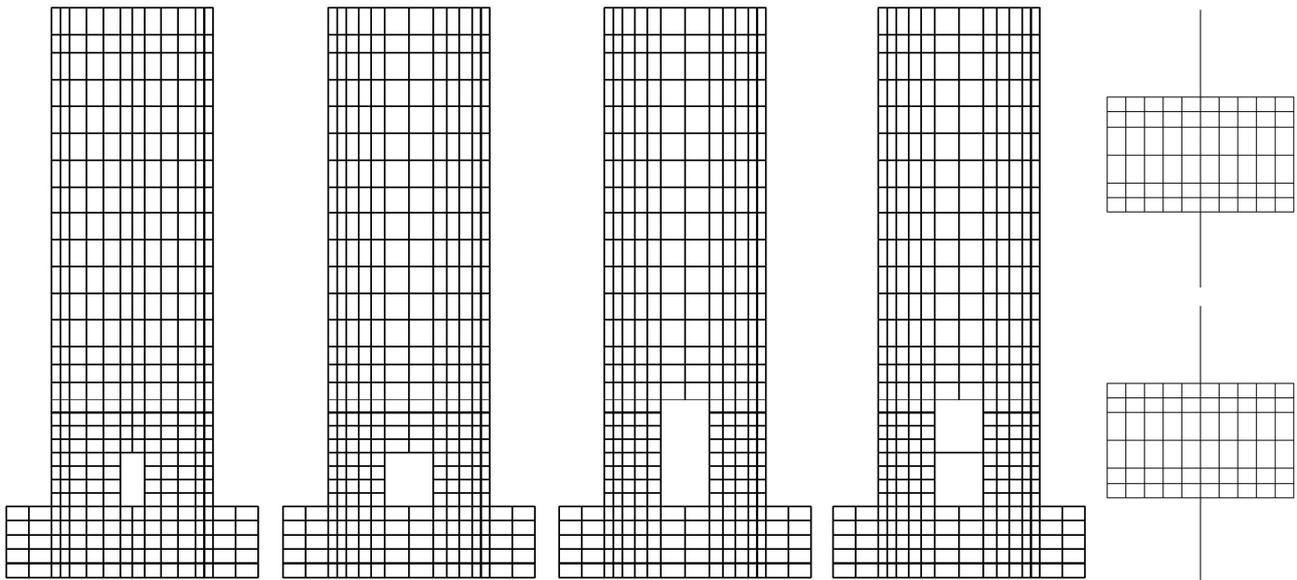


FIGURA 6.1: BOSQUEJO DE ELEMENTOS FINITOS. DE IZQUIERDA A DERECHA: MR1, MR2, MR3, MR4 Y AMBAS LOSAS DE MR4.

Una vez fijados los tamaños y la distribución de los elementos finitos, se procede a definir parámetros para caracterizar los materiales que constituyen los muros: hormigón y acero. Usando la nomenclatura de la sección Modelación numérica del capítulo 3, la Tabla 6-2 muestra las principales variables definidas para llevar a cabo el análisis.

TABLA 6-2: MATERIALES USADOS EN MODELACIÓN.

Parámetro	MR1	MR2	MR3	MR4
Densidad, ρ	2.5 E-9 [N/mm ³]			
Coef Poisson, ν	0.2			
f_y	495 [MPa]			
ϵ_y	0.0025			
Recubrimiento	15 [mm]			
f'_c	40 [MPa]			
ϵ_{c0}	0.004			
E_{c0}	29725 [MPa]			
ϵ_{c0conf}	0.0073			
β_c	1.16			
f_{cr}	1.96 [MPa]			
ϵ_{cr}	0.00008			
α_1	0	0.05	0.04	0
α_2	0	0.28	0.175	0
Carga axial	403.9 [kN]			

Los valores asociados al acero son calibrados a partir de los ensayos realizados a las barras de 16 [mm] de diámetro ya que son el principal refuerzo del muro (refuerzo longitudinal del

elemento de borde), mientras que para el hormigón sólo se pudo obtener el valor de f'_c de manera experimental (ϵ_{c0} es obtenido a través de literatura).

Con los valores mostrados anteriormente, se presentan las curvas que caracterizan a los materiales. La Figura 6.2 muestra la relación tensión deformación para el hormigón, tanto confinado como no confinado, la Figura 6.3 muestra una relación tensión deformación mono tónica a tracción para el acero en donde se muestra la curva calibrada para el modelo usando las reducciones propuestas por Belarbi para aceros embebidos en hormigón (Belarbi & Hsu, 1994) y los resultados del ensayo de las barras como referencia, y la Figura 6.4 muestra una curva de comportamiento cíclico del acero modelado. Exceptuando las curvas de las barras ensayadas, todas las relaciones fueron obtenidas a través de las presentadas en la sección 3.3.

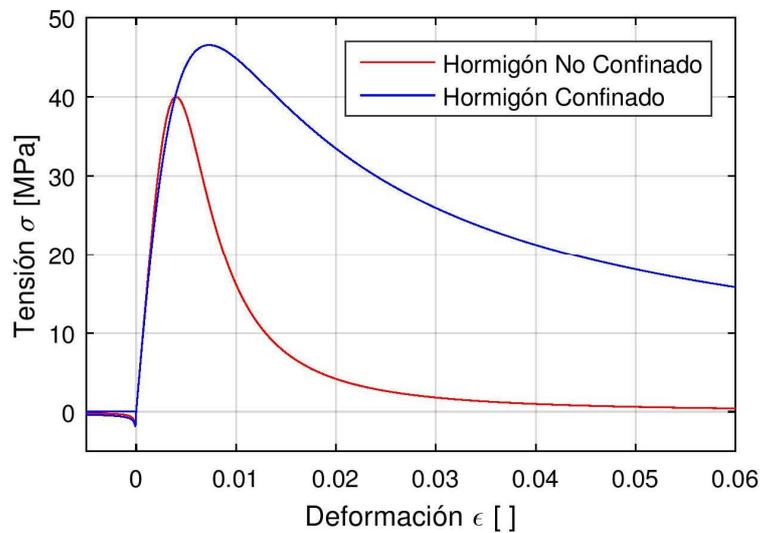


FIGURA 6.2: HORMIGONES USADOS EN MODELACIÓN

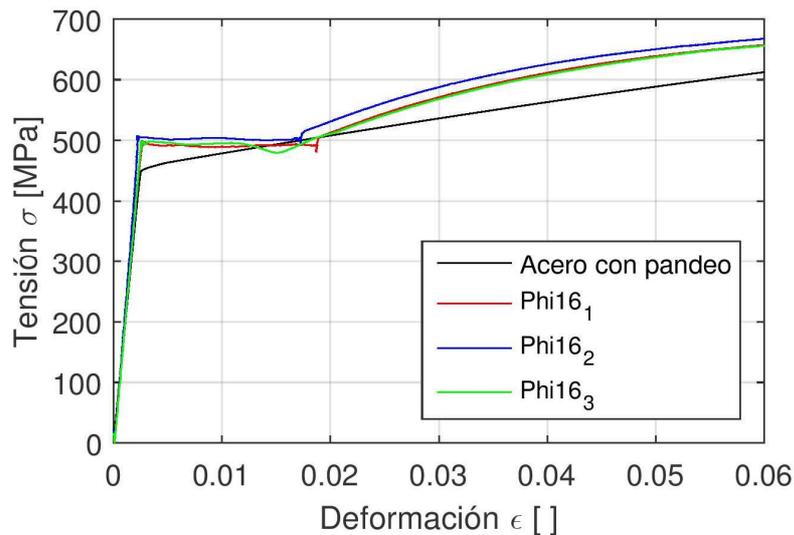


FIGURA 6.3: CURVAS MONO TÓNICAS DEL ACERO (ENSAYO Y MODELO).

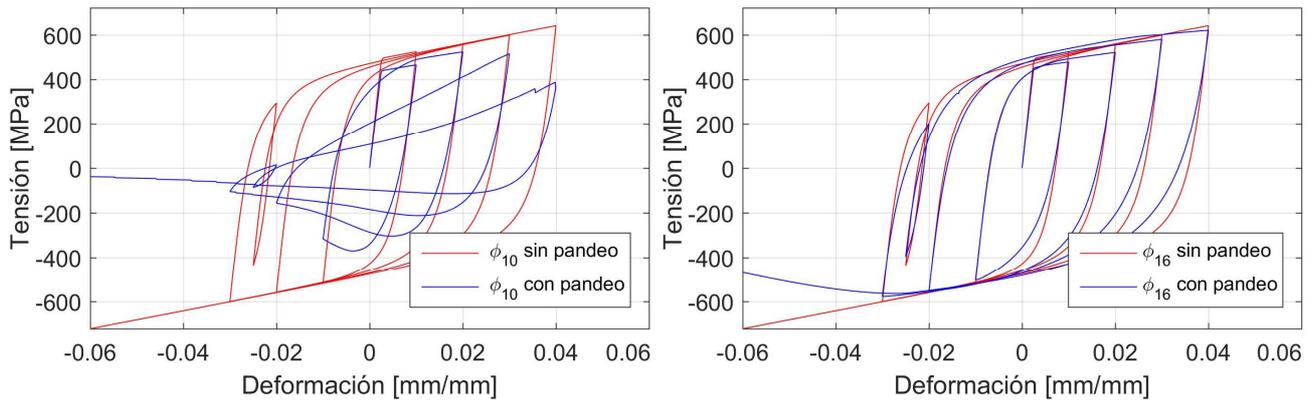


FIGURA 6.4: CURVAS CÍCLICAS DE ACEROS MODELADOS (BARRAS PHI 10 A LA IZQUIERDA Y PHI 16 A LA DERECHA).

A continuación es necesario asignar las capas de materiales a los elementos definidos en el primer paso. De manera general cada elemento quedó modelado con dos capas de hormigón no confinado como recubrimiento, una capa central de hormigón que puede ser confinada o no confinada dependiendo de la zona y dos capas de acero que pueden considerar o no el pandeo con diferentes cuantías tanto horizontal como vertical. Para explicar mejor lo anterior, la Figura 6.5 muestra los distintos grupos de elementos que tienen en común las capas entre sí y posteriormente la Tabla 6-3 presenta los valores de cuantías para cada grupo, distinguiendo entre cuantía horizontal y vertical.

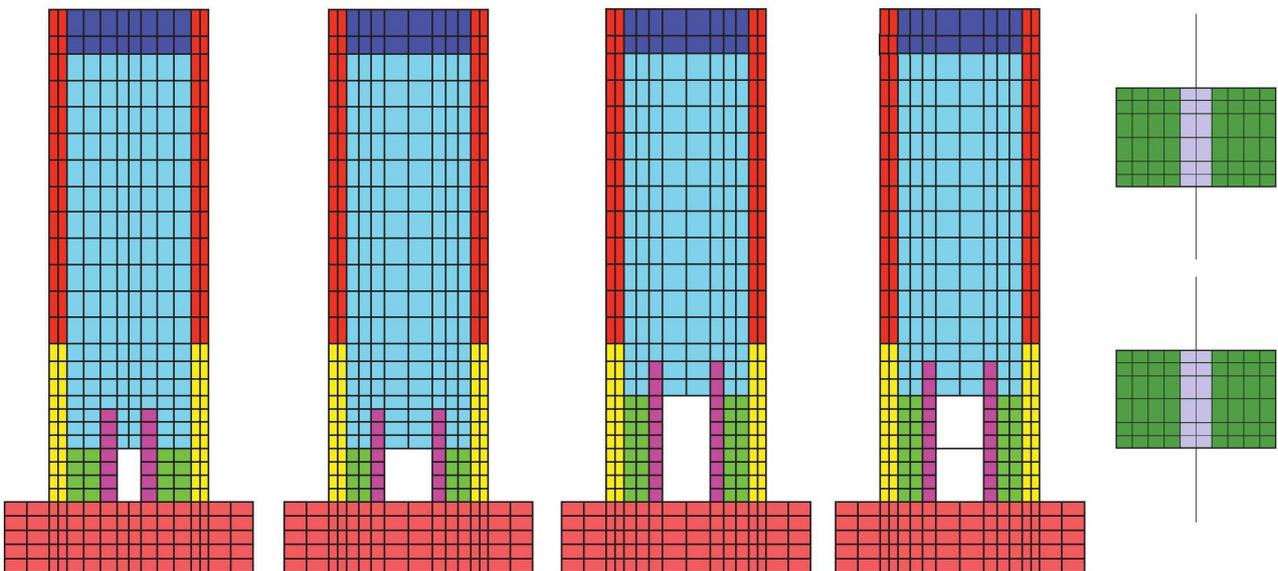


FIGURA 6.5: ZONAS CON DIFERENTES CUANTÍAS. DE IZQUIERDA A DERECHA: MR1, MR2, MR3, MR4 Y LOSAS MR4.

TABLA 6-3: CUANTÍAS POR ZONA MODELADA.

Número	Color	Cuantía horizontal	Cuantía vertical
1		No aplica (hormigón elástico)	No aplica (hormigón elástico)
2		0.43%	0%
3		0.84%	3.97%
4		0.34%	0.21%
5		0.72%	3.97%
6		0.68%	0.42%
7		0.34%	0.78%
8		0.42% (longitudinal)	0.78% (transversal)
9		1.72% (longitudinal)	0.78% (transversal)

Para tener una mejor noción de cada zona de los muros modelados, se detalla de qué consta cada zona a continuación:

- Zona 1: Pedestal modelado con hormigón elástico. Dado que se diseña para mantenerse elástico y además se vio dicho comportamiento durante los ensayos, se usa la aproximación para simplificar el modelo sin tanta falta a lo real.
- Zona 2: Parte central en la base. Se considera hormigón no confinado y sólo armadura horizontal, dado que no existen barras verticales en dicha zona.
- Zona 3: Elemento de borde en la base. Se modela hormigón confinado en el centro de la sección y dos capas de hormigón no confinado como recubrimiento, y se considera la armadura de borde para calcular la cuantía vertical mientras que la armadura de confinamiento y la malla horizontal se considera para la cuantía horizontal.
- Zona 4: Parte central en altura. Consta de hormigón no confinado y ambas mallas para la cuantía respectiva.
- Zona 5: Elemento de borde en altura. Se usa hormigón no confinado, la armadura de borde como cuantía vertical y los estribos junto a la malla horizontal para la cuantía horizontal.
- Zona 6: Parte central en el techo. Hormigón no confinado y el doble de la cuantía de la parte central en altura, dado un refuerzo en ambas mallas.
- Zona 7: Elemento de borde de abertura. Se considera hormigón no confinado, el refuerzo de la abertura para la cuantía vertical y la malla horizontal de la base para la cuantía horizontal.
- Zona 8: Losas. Constan de hormigón no confinado, y las armaduras dadas por plano.
- Zona 9: Refuerzo de losa. Se modela con hormigón no confinado y la armadura de refuerzo de losa en la dirección longitudinal, mientras que se usa la misma armadura que en el resto de las losas para la dirección transversal.

Con el muro ya modelado, se aplican las cargas que representan la compresión generada por los gatos y el desplazamiento aplicado por el actuador. Dichas fuerzas son aplicadas a los nodos de las dos capas superiores, descartando los nodos de los extremos para tener menos problemas de convergencia. Se define al nodo central de la capa superior como el de control para desplazamiento, verificando con el desplazamiento de ese nodo si se cumple con los niveles de deriva reales del ensayo. Realizado lo anterior, se procede a realizar el análisis y obtener los resultados que se presentarán a continuación.

6.3 RESPUESTA GLOBAL: RELACIÓN CARGA DESPLAZAMIENTO

El comportamiento global de los muros queda muy bien representado a través de la histéresis que genera al someterse al ensayo, siendo la principal información que puede entregar el ensayo. En esta sección se mostrará la histéresis obtenida a través de la modelación, comparándola con su versión obtenida en el ensayo.

La Figura 6.6 muestra la histéresis para el muro MR1, tanto el resultado de la modelación como el comportamiento real registrado en el ensayo. De inmediato se puede ver una notoria semejanza entre ambas curvas, en donde la modelación arroja una mayor rigidez, una mayor resistencia (máxima diferencia de un 14%), y una mayor pendiente post fluencia. Todo lo anterior podría anticipar que se presentará una degradación anticipada: mientras que en el muro se observó la falla (definida anteriormente) al 3.7% de deriva de techo, en el modelo ocurre al 3.3%. Mientras que en el último ciclo del 4% se aprecia una pérdida de resistencia que se mantiene estable en cerca de 150 [kN] hasta casi llegar al máximo, en la modelación dicha pérdida no ocurre, y la degradación ocurre bruscamente, al igual como ocurre al final del ciclo mencionado.

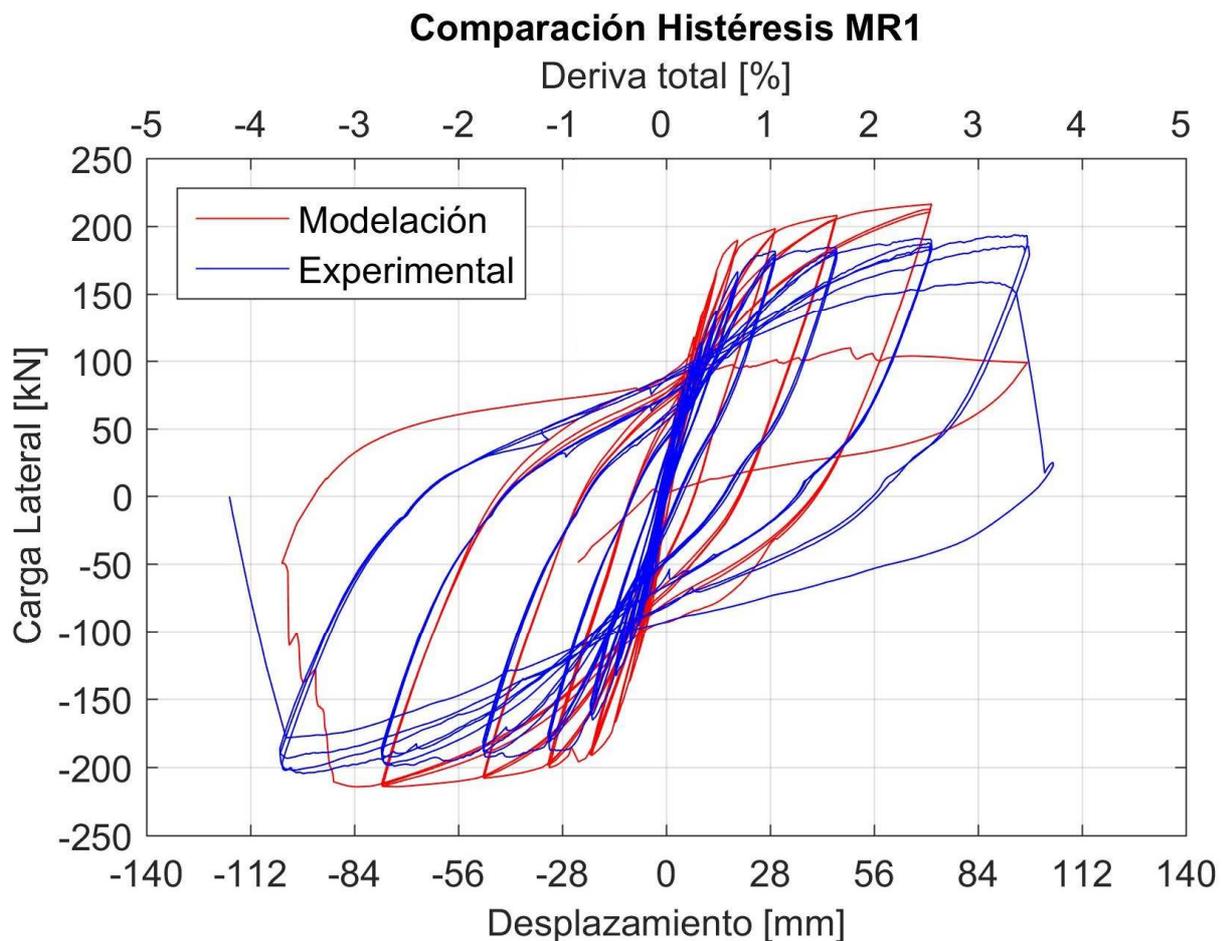


FIGURA 6.6: RELACIÓN CARGA DESPLAZAMIENTO MR1.

La respuesta del muro -tanto modelado como experimental- se muestra en la Figura 6.7. Al igual que en el caso anterior se aprecia una notoria similitud, con pequeñas diferencias en el muro modelado marcadas por una mayor rigidez, una mayor resistencia (13% extra en el punto de mayor diferencia) y una mayor pendiente post fluencia. Sin embargo, la falla ocurre prácticamente al mismo nivel de deriva de techo: mientras en el ensayo se registró a 2.7%, en la modelación ocurre a un 2.6%. En este caso la degradación tuvo la misma forma que en la curva real, hasta llegar al máximo. Posterior a este punto la modelación se vuelve muy inestable y no es posible continuar con el análisis.

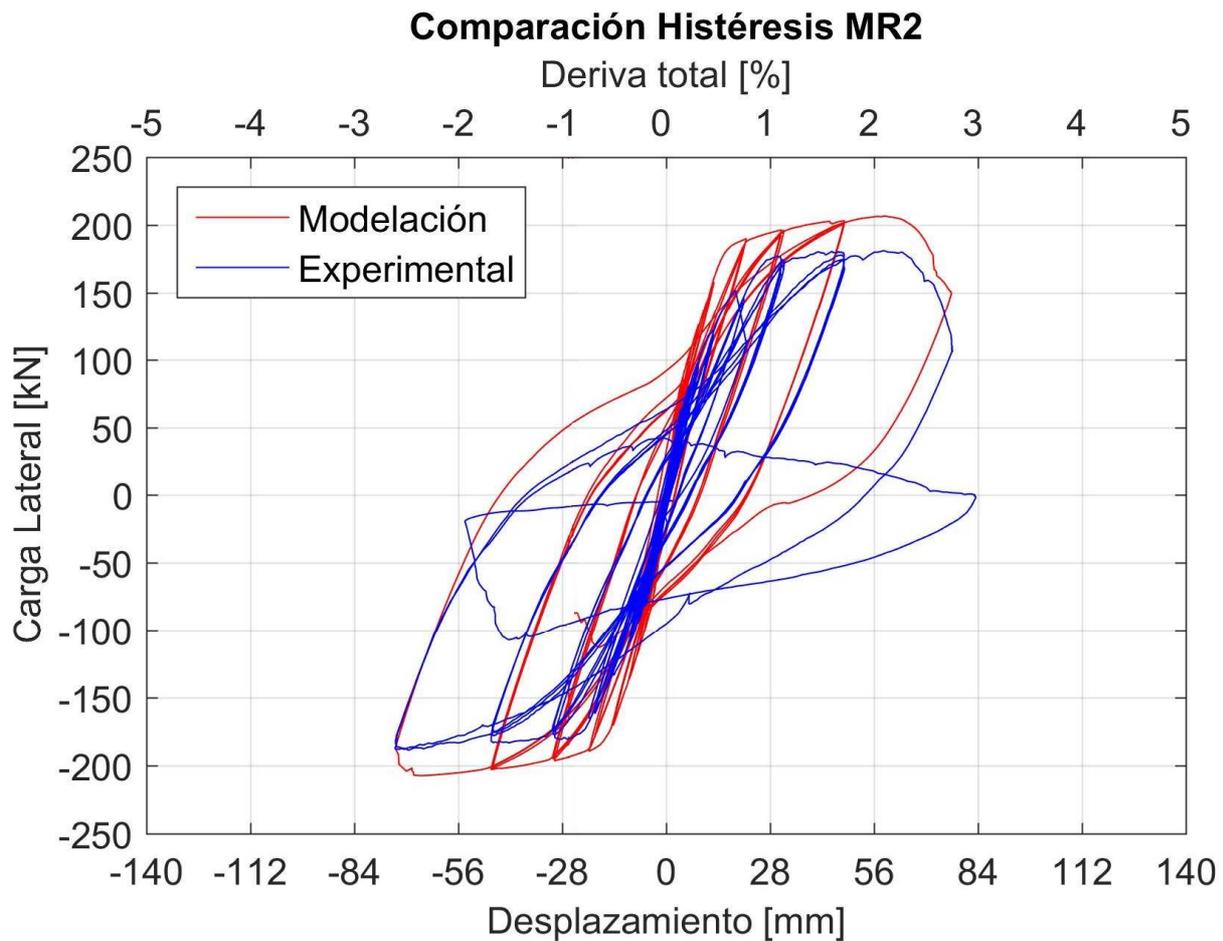


FIGURA 6.7: RELACIÓN CARGA DESPLAZAMIENTO MR2.

La Figura 6.8 muestra la respuesta carga desplazamiento para el muro MR3, tanto la modelación como el resultado experimental. Tanto las similitudes como las diferencias mostradas en los gráficos anteriores se repiten para este caso, sin embargo la sobre resistencia es menor aquí (la máxima diferencia es de un 11% al inicio de la degradación en la capacidad de desplazamiento). Mientras que en el ensayo la falla se tiene documentada al 2.6% de deriva, en la modelación el muro inicia su falla al 2.4% de deriva. En este caso la forma en la cual degrada es bastante similar a la observada en el ensayo, y posterior a este punto no es recomendable considerar válida la información otorgada por la modelación, dado los alcances

de ésta (concentración de daño en los elementos finitos, validez de las leyes constitutivas en las zonas de descarga o frente a un alto daño).

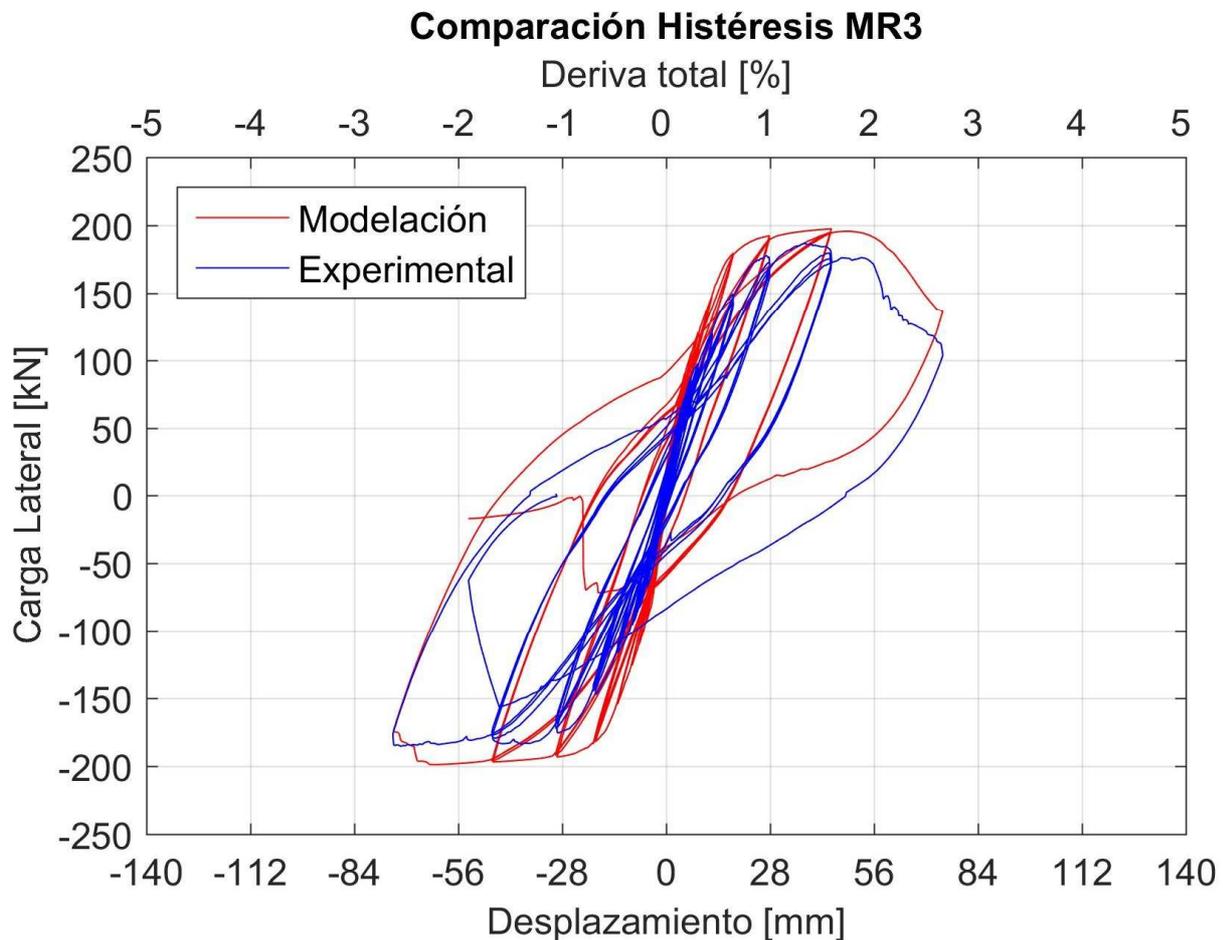


FIGURA 6.8: RELACIÓN CARGA DESPLAZAMIENTO MR3.

Finalmente, la Figura 6.9 muestra la comparación entre el modelo y la histéresis obtenida en el ensayo para el muro MR4. Nuevamente, en el modelo se muestra una mayor rigidez, una mayor resistencia (13% extra en el punto de mayor diferencia) y una mayor pendiente post fluencia (la diferencia es más leve que en los casos anteriores). Esta modelación tuvo una degradación anticipada con respecto a los demás modelos y al muro mismo, detectando la falla al 2.2% de deriva de techo, versus la falla registrada durante el ensayo al 3.2% de deriva. Una discrepancia entre el modelo de MR4 con respecto al muro ensayado es que la losa es de menor largo en la dirección del largo del muro: mientras la losa real tiene un largo de 600 [mm], en el modelo mide 540 [mm]. Lo anterior se produce debido a que la losa debe estar unida a los nodos del muro y las mejores alternativas era tener una losa 40 [mm] más corta o tener una losa 100 [mm] más larga, optando por la opción menos conservadora. Lo anterior puede explicar la falla anticipada del modelo.

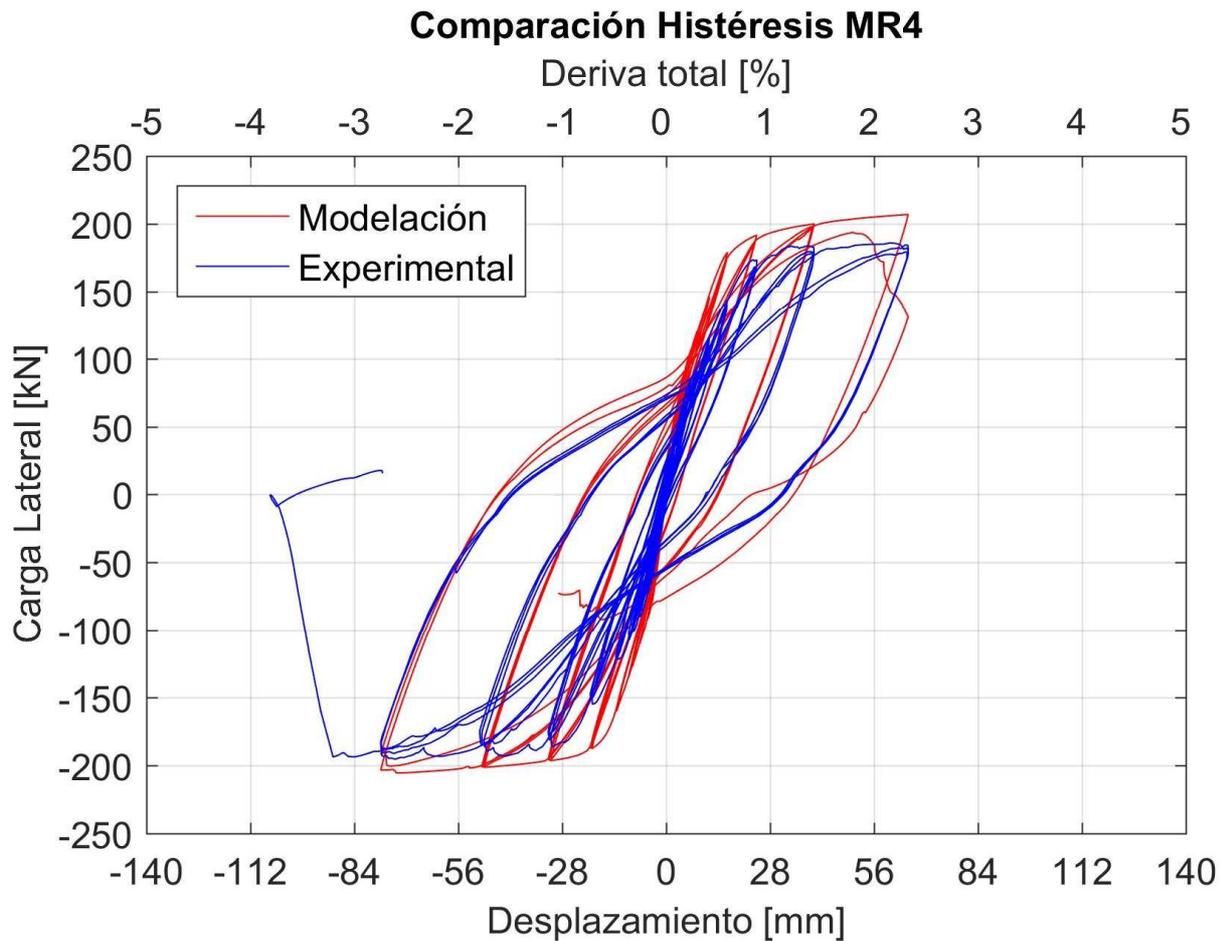


FIGURA 6.9: RELACIÓN CARGA DESPLAZAMIENTO MR4.

En las cuatro modelaciones presentadas se repiten las mismas tendencias: una mayor rigidez inicial, una mayor resistencia que varía entre un 11% a un 14%, una pendiente post fluencia mayor y una degradación en la capacidad de deformación anticipada. La sobre resistencia puede ser atribuida a que la cuantía que representa al elemento de borde está considerada desde los extremos del muro y no se consideran los 15 [mm] de recubrimiento y los 6 [mm] que existen a cada lado y acortan el brazo de palanca real que tienen las armaduras de borde. Sobre la rigidez inicial, se puede mencionar cualquier manipulación que se haya realizado a la probeta desde su fraguado hasta su ensayo que podría haber generado pequeñas grietas que afecten su rigidez inicial. Además, el pedestal está modelado con elementos planos, aportando la totalidad de su sección a la rigidez del muro, mientras que en la realidad su aporte es un porcentaje del total del espesor el que actúa durante el ensayo, similar a lo que se ha visto con el ancho colaborante del ala en un muro de sección “T”.

A pesar de no ser exactas a las curvas reales, las modelaciones hechas capturan la esencia de los ensayos y se pueden considerar válidas. Las diferencias en las cuales se incurre son menores y, a pesar de tener distintas derivas para las fallas de muros, los modelos siguen manteniendo el orden de falla de las probetas ensayadas, excepto para el modelo de MR4. La

Tabla 6-4 muestra las derivas alcanzadas para cada muro modelado, además de las ya presentadas para las curvas reales.

TABLA 6-4: DERIVAS DE FALLA DE MUROS MODELADOS.

Muro	Deriva de falla real [%]	Deriva de falla modelo [%]
MR1	3.7	3.3
MR2	2.7	2.6
MR3	2.6	2.4
MR4	3.2	2.2

Con el comportamiento global ya analizado, se procede a estudiar el comportamiento local de los muros modelados. Para realizar lo anterior, se realizará el mismo estudio hecho con fotogrametría y así validar la modelación a través de la semejanza entre los resultados.

6.4 ESTUDIO DE DEFORMACIONES UNITARIAS

Ya presentado el comportamiento global de los muros modelados, se procede a estudiar el comportamiento local de los modelos, traduciéndose a una comparación entre las deformaciones unitarias obtenidas en los modelos y las deformaciones unitarias ya presentadas en la sección de fotogrametría. Los valores presentados corresponden al primer máximo para cada nivel de deriva, salvo indicación contraria.

6.4.1 PERFIL DE DEFORMACIÓN UNITARIA VERTICAL EN LA ALTURA

De acuerdo a los ejes definidos en la sección 5.3.1 y mostrados en la Figura 5.34, a continuación se presentan los resultados obtenidos en la modelación junto a los ya mostrados en la sección de fotogrametría. En todos los resultados obtenidos se aprecia una notoria similitud entre lo experimental y lo modelado, tanto en forma como en magnitud.

Los resultados para los cuatro muros ensayados se muestran en la Figura 6.10 para MR1, Figura 6.11 para MR2, Figura 6.12 para MR3, y Figura 6.13 para MR4. En todos los gráficos se puede ver que los modelos son capaces de identificar tanto la magnitud como la posición de la máxima deformación unitaria vertical con bastante precisión. Dado que la modelación en elementos finitos se basa en deformaciones unitarias promedio, las curvas son mucho más suavizadas que las obtenidas a través de fotogrametría, lo cual genera mayores diferencias a menores niveles de deriva. Además, las longitudes de rótulas plásticas o zonas de concentración de deformaciones son bastante similares, sobre todo para los últimos niveles de deriva. Como las principales diferencias entre los resultados, se puede mencionar que el gráfico del eje 3 de MR1 (Figura 6.10, izquierda) presenta la zona de mayor deformaciones en altura (cercana a los 300[mm]), mientras que los resultados de fotogrametría registran las máximas deformaciones a nivel basal. Sin embargo, el valor de la deformación es bastante similar para ambos casos. Además, si se observan los mismos resultados para el muro MR3 (Figura 6.12, izquierda), el enfoque de deformaciones promedio considera los dos máximos de deformación vistos en fotogrametría como sólo uno, pero de valor muy similar. Finalmente, si se revisa el eje 4 del muro MR4 (Figura 6.13, derecha) se aprecia que la modelación de la losa tiene un mayor efecto en dicha sección, reduciendo drásticamente la deformación vertical unitaria a dicha cota, a pesar de que la losa no alcanza a llegar al eje 4.

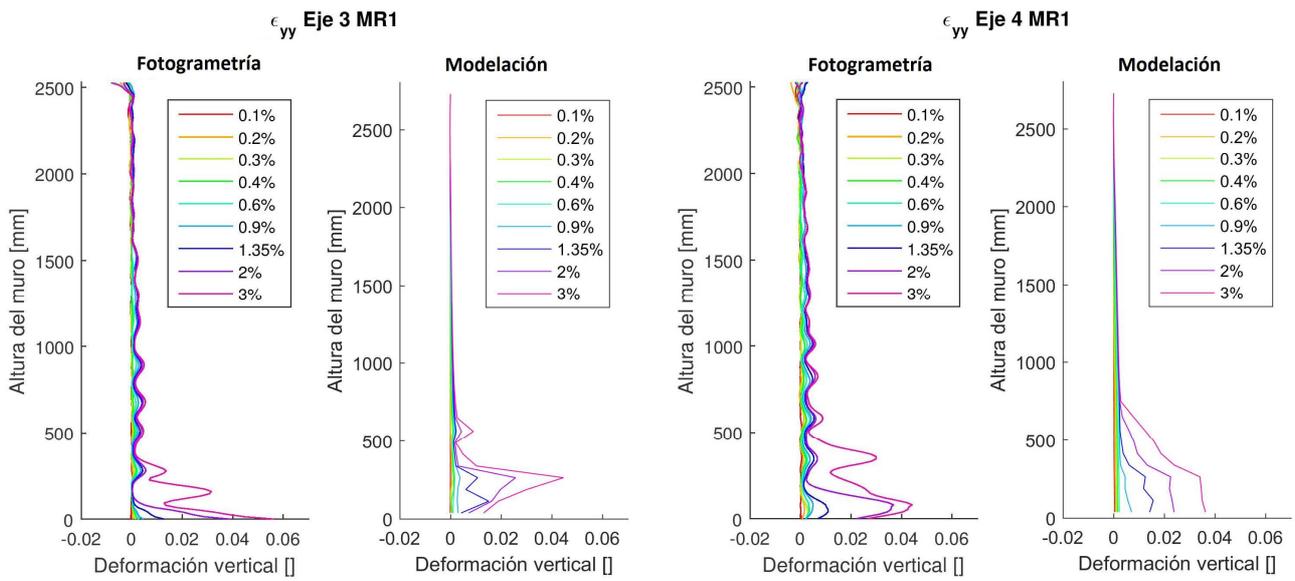


FIGURA 6.10: COMPARACIÓN DE DEFORMACIÓN VERTICAL EN LA ALTURA PARA EJES 3 Y 4, MR1.

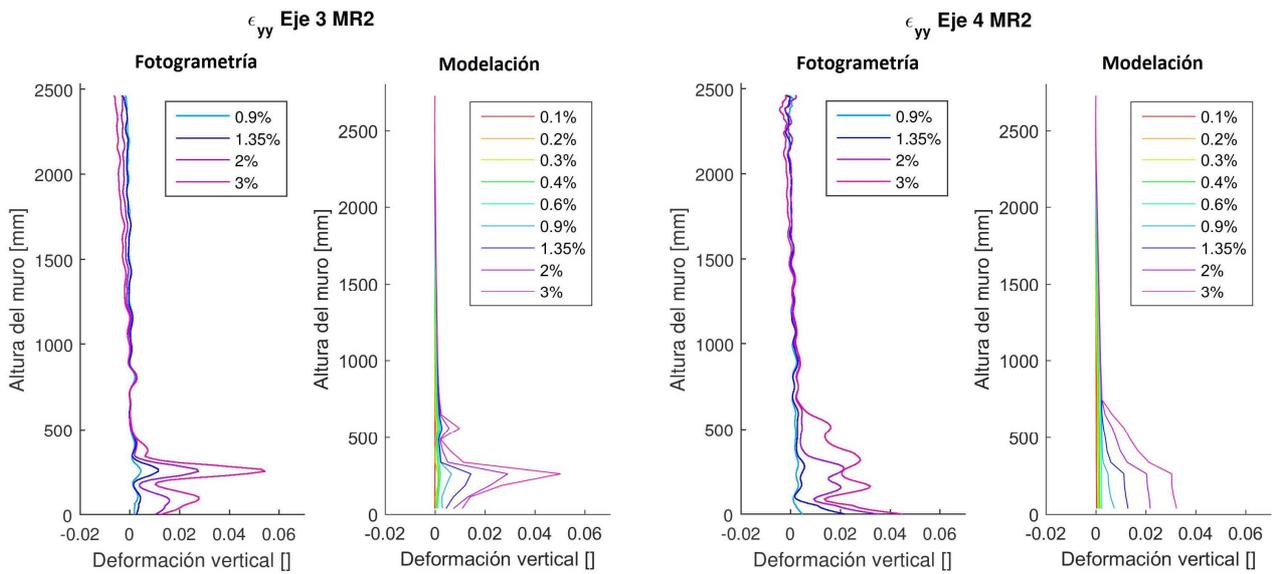


FIGURA 6.11: COMPARACIÓN DE DEFORMACIÓN VERTICAL EN LA ALTURA PARA EJES 3 Y 4, MR2.

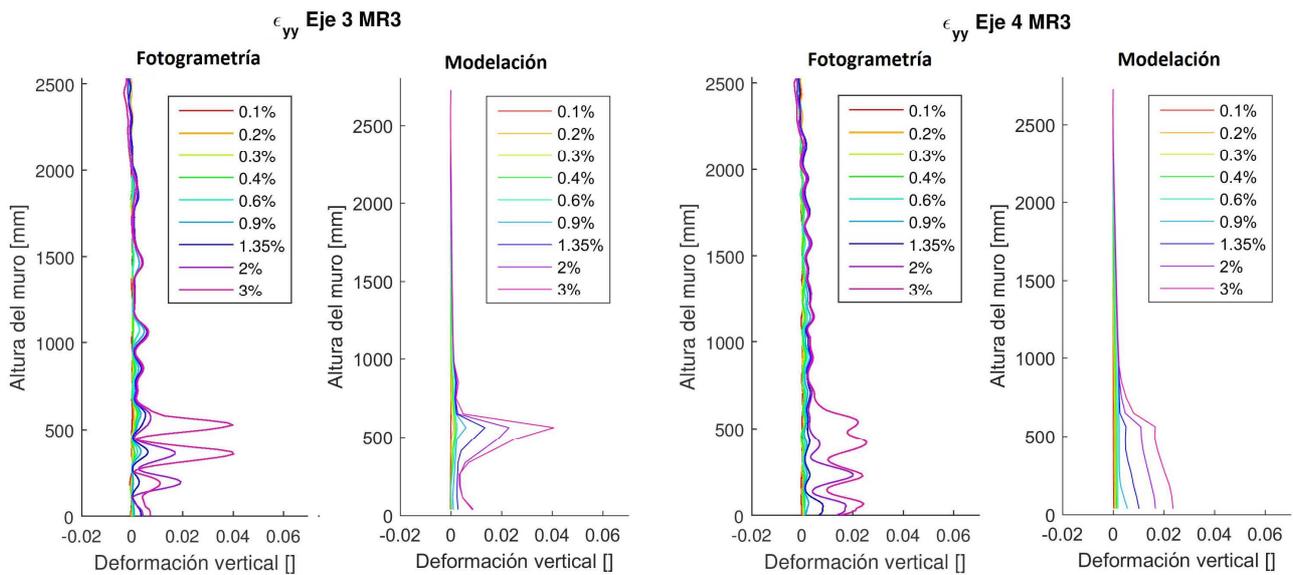


FIGURA 6.12: COMPARACIÓN DE DEFORMACIÓN VERTICAL EN LA ALTURA PARA EJES 3 Y 4, MR3.

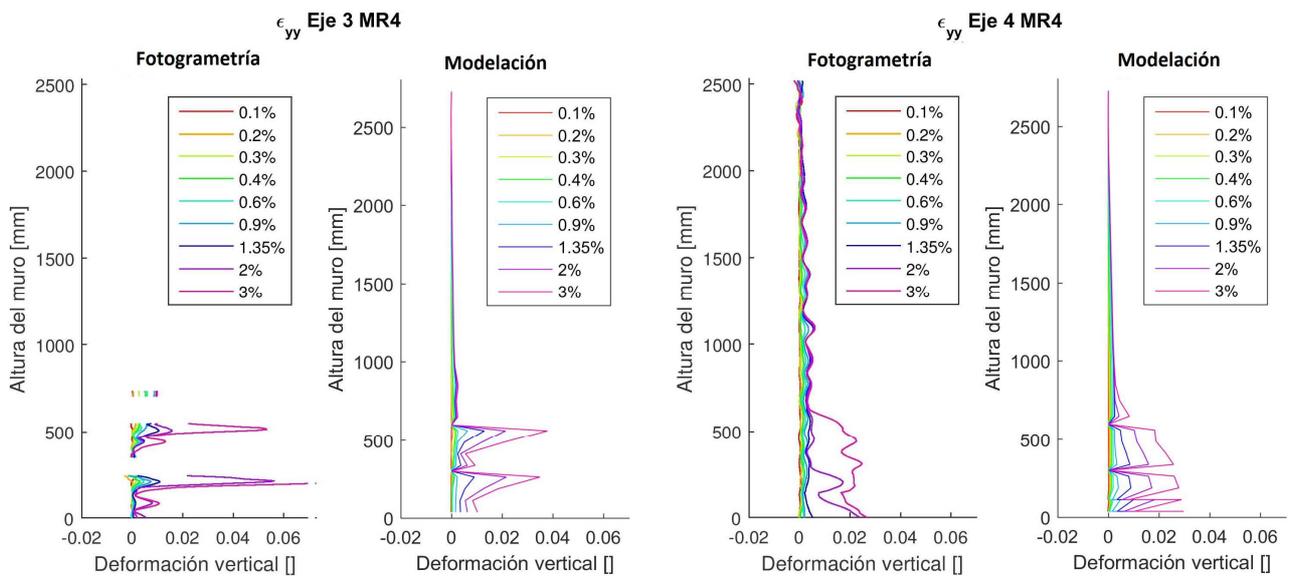


FIGURA 6.13: COMPARACIÓN DE DEFORMACIÓN VERTICAL EN LA ALTURA PARA EJES 3 Y 4, MR4.

En el caso del eje 3 del muro MR4 (Figura 6.13, izquierda), los resultados mostrados corresponden a la cámara local, dado que la global revela poca información en la base del muro. A pesar de tener mayores oscilaciones y valores mayores que los mostrados con las cámaras globales, los comentarios anteriores siguen aplicando para este caso en particular.

De acuerdo a los gráficos mostrados, y a pesar de existir pequeñas diferencias entre la modelación y los resultados obtenidos a través de fotogrametría, se validan los resultados analíticos de la sección. Simulando a la presentación de los datos experimentales, a continuación se estudiará el perfil de deformaciones unitarias en la sección para los muros ensayados.

6.4.2 PERFIL DE DEFORMACIÓN UNITARIA VERTICAL EN LA SECCIÓN

Con la idea de verificar si la modelación es capaz de reflejar la distribución de las deformaciones unitarias verticales a lo largo de la sección y así estudiar la validez de la hipótesis de Bernoulli en distintas capas, se presentan a continuación los perfiles de las primeras diez capas, de acuerdo a como se definieron en la sección de fotogrametría. La Figura 6.14 muestra las capas mostradas a continuación, tanto para los resultados por fotogrametría como para los obtenidos numéricamente. Como se puede ver, las capas en la modelación cubren una mayor distancia, dado que las últimas dos tienen un espesor de 100 [mm] en vez de los 75 [mm] que tienen las primeras ocho, y los cerca de 72 [mm] que tienen todas las capas en fotogrametría. A pesar de lo anterior, los resultados no muestran una gran diferencia puesto que a esas alturas las deformaciones unitarias son pequeñas.

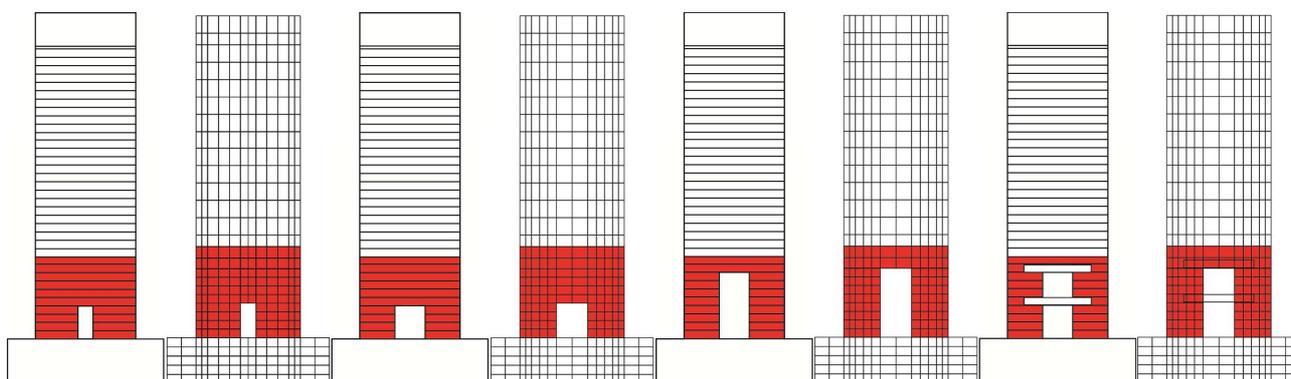


FIGURA 6.14: PRIMERAS 10 CAPAS PARA TODOS LOS MUROS, TANTO FOTOGAMETRÍA COMO MODELACIÓN.

La Figura 6.15 muestra los resultados obtenidos para MR1, donde en general se ve una buena correlación entre los dos enfoques. Sin embargo, al promediar valores en fotogrametría para cumplir con el espesor de la capa disminuyen notoriamente los valores de deformación (exceptuando los valores del 3% de deriva de techo), algo que no ocurre tan evidentemente en los demás ensayos. En las primeras cuatro capas (que cubren la altura de la abertura) el modelo es capaz de detectar tracciones a la izquierda de la abertura, y sin contar con el máximo de tracción que se ve en la primera capa en fotogrametría, el modelo muestra siempre valores mayores de deformación (tanto a tracción como a compresión) que fotogrametría, lo cual se encuentra por el lado conservador para diseño y detallamiento.

Las Figura 6.16 y Figura 6.17 muestran los resultados para los muros MR2 y MR3, respectivamente. El resultado más interesante visto en fotogrametría es el cambio en la pendiente (que sería equivalente a un cambio de signo en curvatura) visto en la sección traccionada para ambos muros, y el modelo es capaz de representarlo con bastante precisión. En MR2 identifica que existen deformaciones importantes sobre la abertura (quinta capa en adelante), mientras que en MR3 las deformaciones importantes no superan la abertura (novena capa en adelante).

Debido a la presencia de las losas, no existe mucha información de los resultados por fotogrametría para MR4, por lo que no se puede realizar una comparación con su par numérico. Sin embargo, se ven grandes deformaciones bajo la losa en la modelación (capas 4 y 8), similar a lo visto en la Figura 5.55.

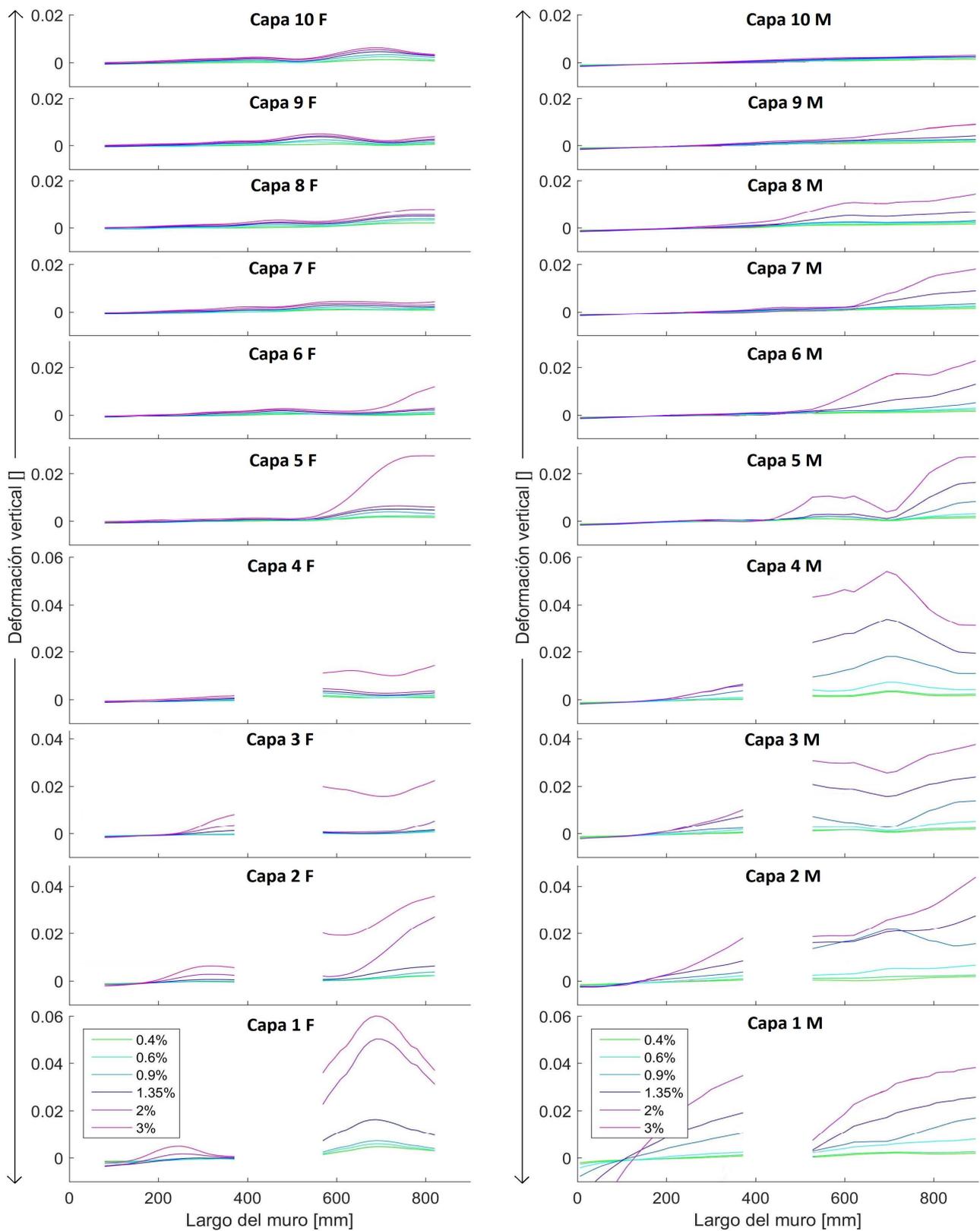


FIGURA 6.15: DEFORMACIONES EN LA SECCIÓN (IZQ, FOTOGAMETRÍA, DER, MODELACIÓN), MR1.

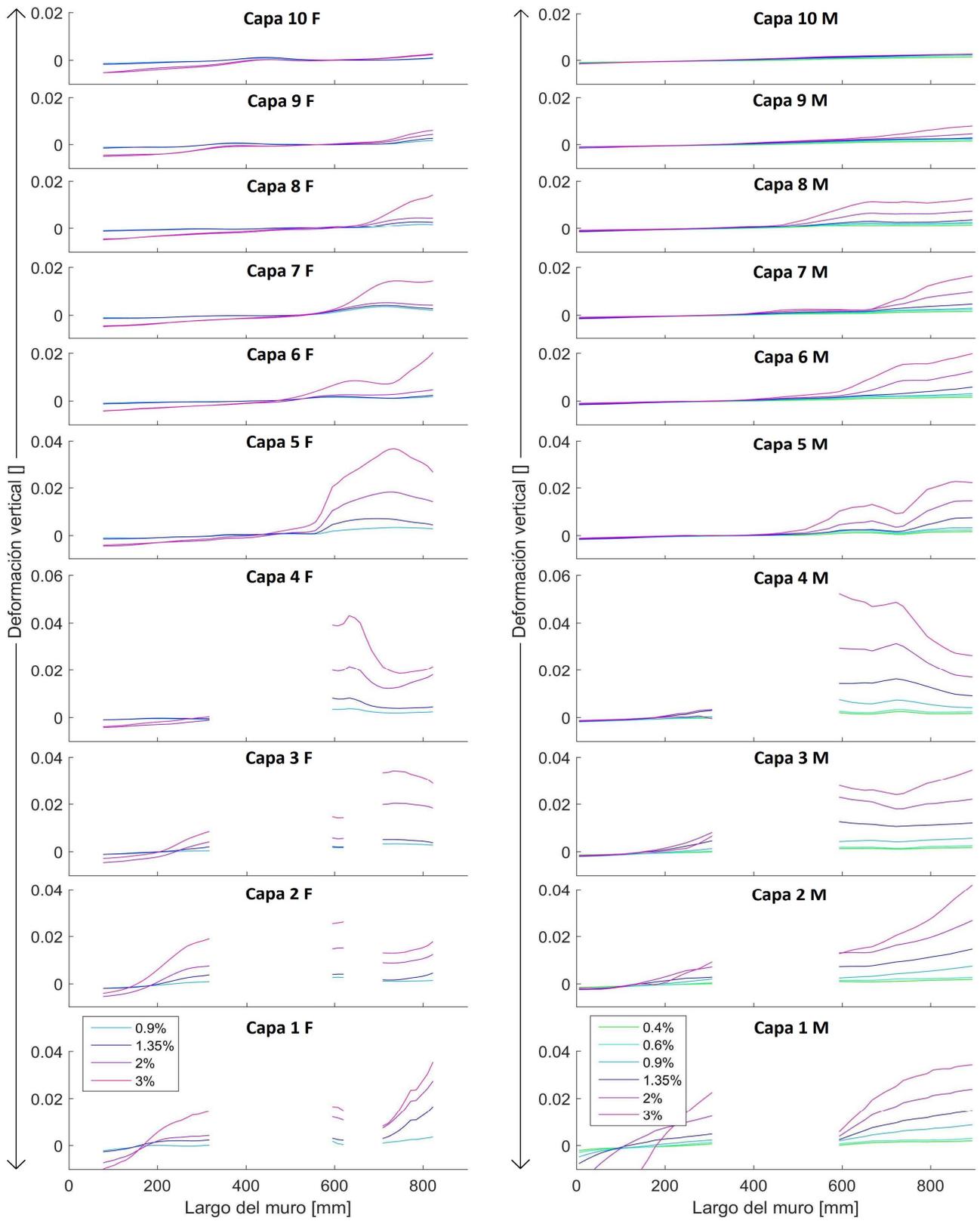


FIGURA 6.16: DEFORMACIONES EN LA SECCIÓN (IZQ, FOTOGAMETRÍA, DER, MODELACIÓN), MR2.

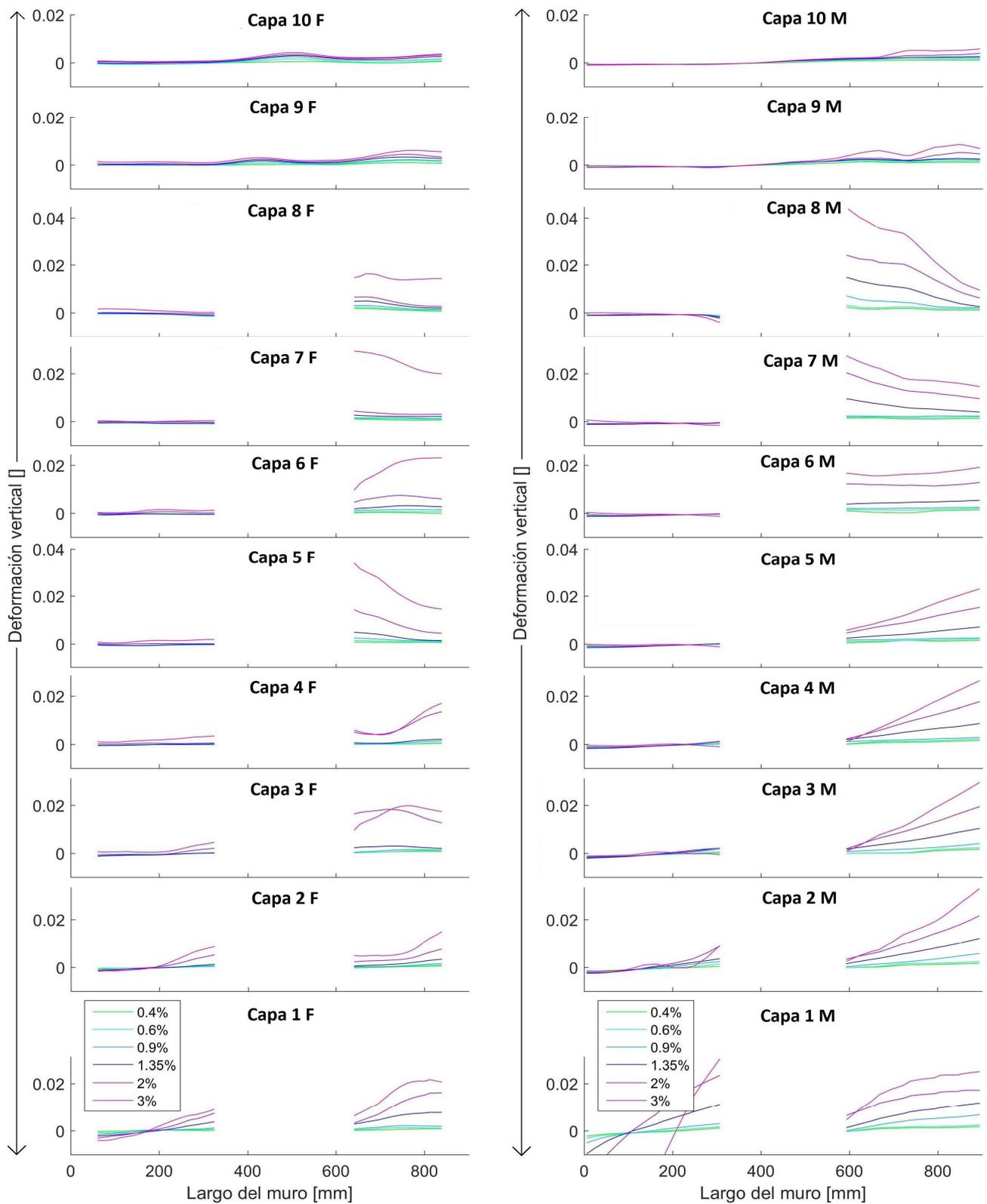


FIGURA 6.17: DEFORMACIONES EN LA SECCIÓN (IZQ, FOTOGRAMETRÍA, DER, MODELACIÓN), MR3.

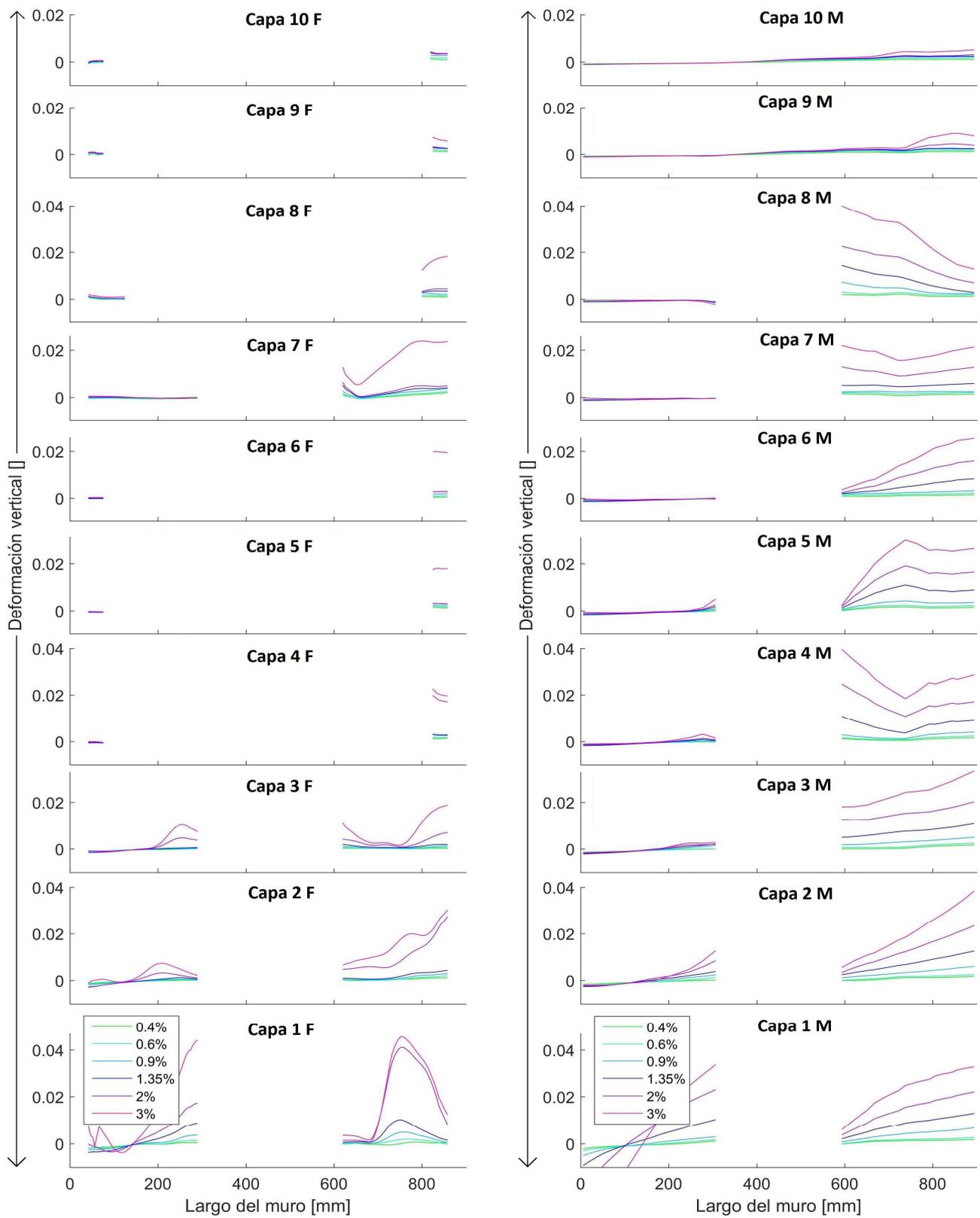


FIGURA 6.18: DEFORMACIONES EN LA SECCIÓN (IZQ, FOTOGRAMETRÍA, DER, MODELACIÓN), MR4.

Los resultados mostrados revelan que el modelo numérico es capaz de reflejar el comportamiento observado durante los ensayos, y en particular para esta sección determinar en qué casos se puede considerar la hipótesis de Bernoulli como válida y en cuáles no. Finalmente, se estudiará la deformación unitaria vertical en todo el muro para identificar si existe algún comportamiento no cubierto con los dos análisis anteriores.

6.4.3 DEFORMACIÓN UNITARIA VERTICAL EN EL MURO

Para estudiar la distribución de deformaciones en todo el muro, la Figura 6.19 muestra los valores de la deformación principal mayor para los cuatro muros ensayados, primero los resultados obtenidos a través de fotogrametría (con una F en su título) y luego los estudios numéricos (con una M en su título). En el caso de MR4, se muestran los resultados por fotogrametría dados por la cámara local (con una escala mayor para una mejor comparación).

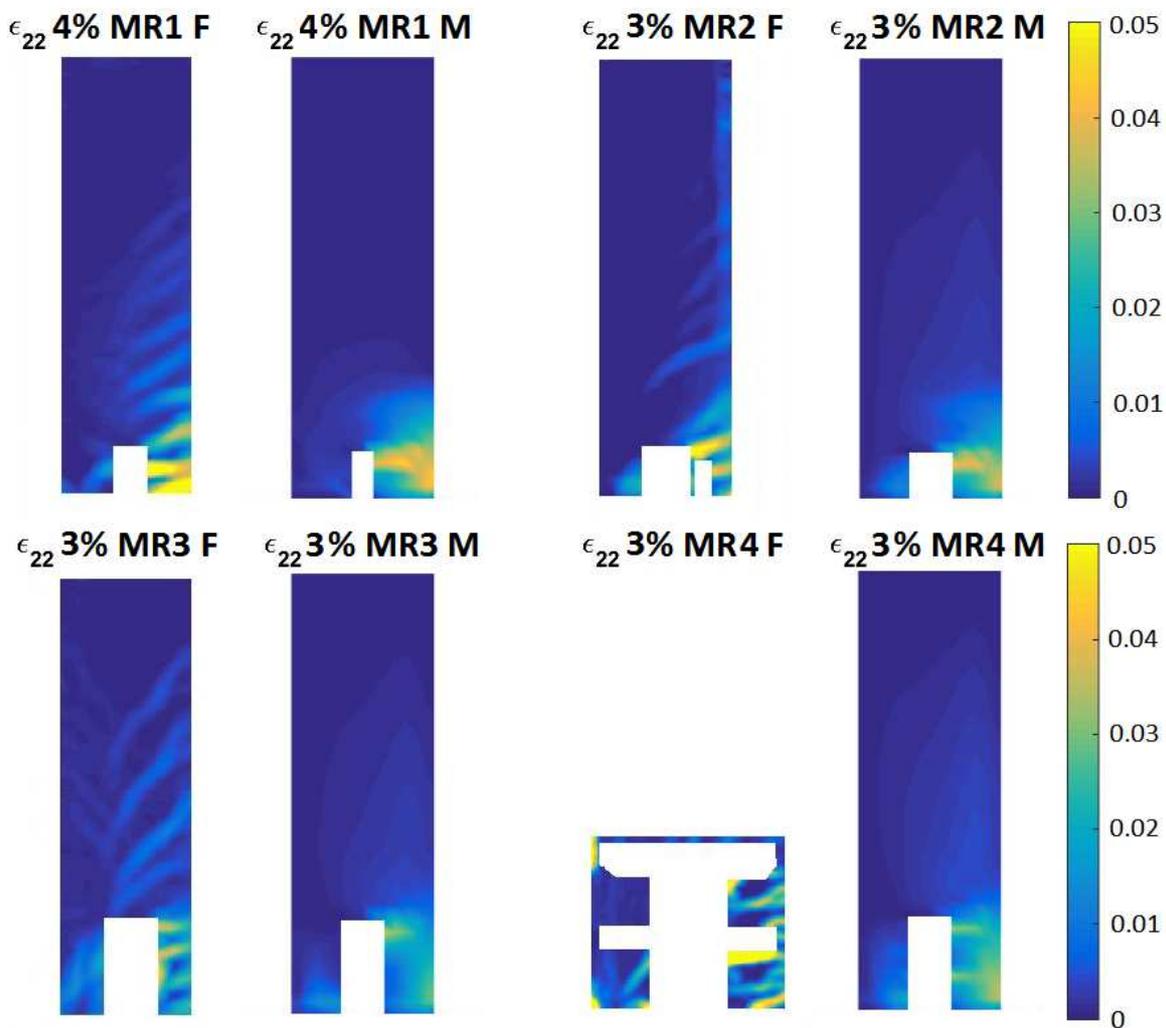


FIGURA 6.19: DISTRIBUCIÓN DE DEFORMACIONES PRINCIPALES MAYORES SOBRE LOS MUROS.

Recordando que la modelación en elementos finitos se basa en deformaciones promedio sobre el elemento, es fácil reconocer que los modelos tienen una superficie suavizada con respecto a

los datos obtenidos por fotogrametría. Tanto la forma como la concentración de los máximos son totalmente identificadas en los modelos, lo cual fundamenta la buena correlación vista en los análisis anteriores.

Al final del capítulo anterior se planteó la hipótesis que la diferencia en la capacidad de deformación de los muros ensayados se podía explicar a través de la deformación a compresión que se tiene en el extremo inferior del muro, pero dado el error asociado a fotogrametría no podía verificarse lo supuesto. Dada la excelente correlación entre los resultados experimentales y los obtenidos por fotogrametría, se considerará válido realizar el estudio de las deformaciones unitarias a compresión en los modelos con el fin de identificar el parámetro que se correlaciona con el orden de falla de los muros ensayados.

6.4.4 ESTUDIO DE DEFORMACIONES A COMPRESIÓN

Ligando la falla observada en los muros ensayados con algún parámetro relevante, se propuso como hipótesis que la deformación a compresión en el extremo inferior del muro (en estricto rigor en el puntal de compresión que iba desde el extremo superior de la abertura hasta el extremo inferior del muro) podía representar el comportamiento observado. Dado que el error asociado a la fotogrametría no permitía realizar un análisis para las deformaciones a compresión, se presenta a continuación un estudio de las mismas, pero a través de los resultados numéricos obtenidos en la modelación de los muros.

A partir de la malla de elementos descrita al comienzo de este capítulo, se promedian las deformaciones unitarias verticales de los nueve puntos de cuadratura de cada elemento cercano al extremo del muro. Así, la zona de interés queda definida con un largo de dos elementos (los dos elementos de borde usados en modelación) y un alto de dos elementos. La Figura 6.20 muestra en rojo los elementos usados para crear la zona de interés.

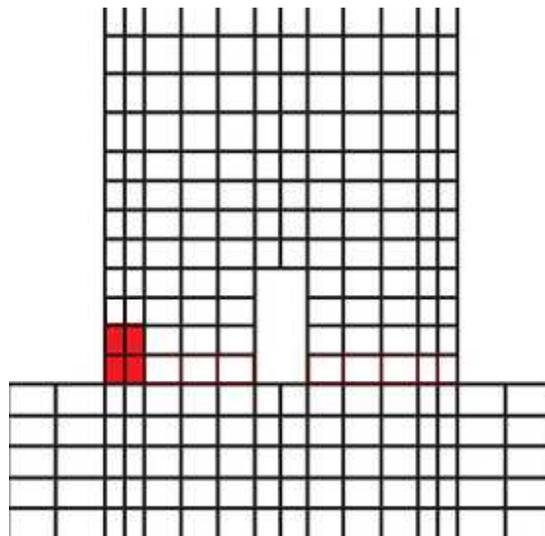


FIGURA 6.20: ZONA DE INTERÉS DE DEFORMACIONES A COMPRESIÓN.

La definición de la zona recién mostrada trata de ajustarse a dimensiones de mayor envergadura para tener una mejor calibración con deformaciones usadas en muros de edificios reales.

Si se considera la deformación obtenida en promedio en la zona para los cuatro muros ensayados, se puede crear el gráfico mostrado en la Figura 6.21, donde se muestra el resultado global (en MRO y MR1 no se muestra el valor del último nivel de deriva) para distintos niveles de deriva.

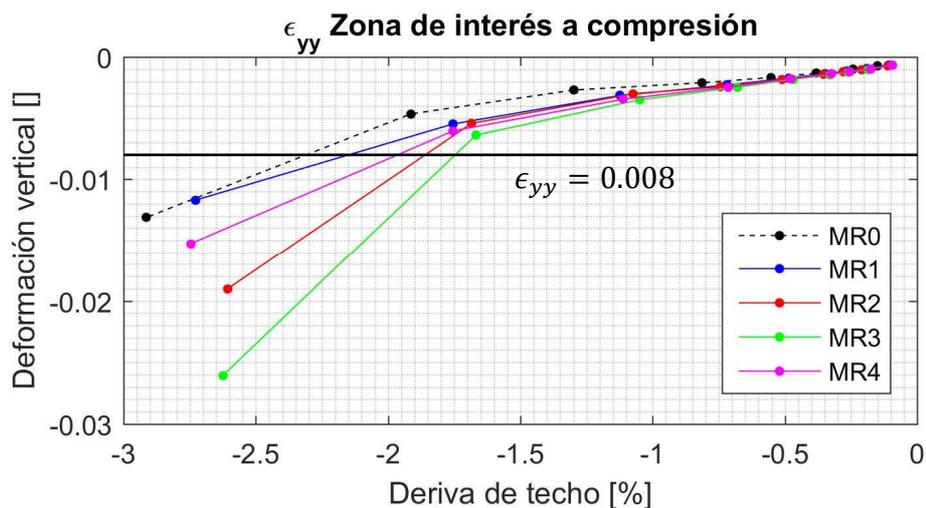


FIGURA 6.21: DEFORMACIÓN A COMPRESIÓN ZONA DE INTERÉS.

De los gráficos se puede ver que aunque al comienzo no hay diferencias notorias entre un ensayo y otro, siempre la curva de MRO está como cota superior y MR3 como cota inferior. Además, los valores mostrados en las deformaciones cercanas al 3% se correlacionan con el orden de falla observado durante los ensayos: de l con mayor capacidad de deformación al con menor capacidad de deformación, MRO, MR1, MR4, MR2 y MR3.

Si se establece como límite el valor de deformación unitaria dada por la norma, 0.008 (línea horizontal en el gráfico) se puede obtener una especie de factor de utilización del muro, comparando el nivel de deriva para dicha deformación con respecto al máximo desplazamiento alcanzado por el muro. Dichos valores se puede ver en la Tabla 6-5.

TABLA 6-5: FACTOR DE UTILIZACIÓN DE MUROS ENSAYADOS.

Muro	Máx desp [%]	Desp a $\epsilon_c = 0.008$ [%]
MRO	3.9	2.3 (59%)
MR1	3.7	2.15 (58%)
MR2	2.6	1.85 (71%)
MR3	2.6	1.75 (67%)
MR4	3.2	1.95 (61%)

Se puede ver de los resultados que los cuatro muros ensayados (más el muro base) tienen un factor de utilización entre el 60% y el 70% con respecto al requerimiento normativo. Lo

anterior es un buen antecedente de la restricción impuesta después del terremoto del 27 de Febrero de 2010 dado que los muros (de configuración similar a la ensayada) tienen entre un 40% a un 30% de capacidad de deformación remanente. Sin embargo el análisis realizado es muy acotado y se propone extender investigación en dicha línea.

Finalmente se ha podido establecer una relación directa entre el orden en el cual se produjo la falla y un parámetro relevante (en diseño y/o detallamiento) de los muros. Dado que el valor de la deformación unitaria vertical a compresión (o deformación de la fibra más comprimida de hormigón) es factor clave en el detallamiento de muros en la práctica nacional, la influencia de la presencia de aberturas tendrá una relación directa en la forma de detallar muros.

A continuación se realizará un análisis paramétrico con la idea de cubrir casos de interés que quedaron fuera de los muros ensayados, para posteriormente realizar un estudio analítico con respecto a las expresiones calibradas por Morales para la estimación de la deformación unitaria a compresión (Morales, 2015).

6.5 ANÁLISIS PARAMÉTRICO

Para tener una mayor base de casos para concluir el presente trabajo, en esta sección se presentan modelos creados a partir de los ya presentados, con pequeñas variaciones de tal modo de cubrir casos que quedaron fuera de los ensayos realizados. Quizás los casos más importantes a presentar corresponden a los modelos a flexión pura, dado que corresponden a la forma más tradicional de diseñar y detallar muros en la actualidad, y resulta importante saber la relación entre los resultados mostrados y lo que puede representar un modelo de este tipo. Además, se presentan otros casos en los cuales se varía la geometría del muro para forzar una respuesta en particular, o generar alcances en las conclusiones que se presentarán en el siguiente capítulo.

6.5.1 MODELOS A FLEXIÓN

En la actualidad, los modelos a flexión son la principal opción para el diseño y detallamiento de muros en el país, dada su vasta implementación en programas computacionales, lo directo que es aplicar los principios de la mecánica de sólidos (compatibilidad de deformaciones, ley constitutiva y equilibrio de fuerzas) y lo fácil de entender su funcionamiento. Además, dado que por lo general el muro a estudiar se considera esbelto según su relación de aspecto, se justifica el uso de modelos flexurales. Sin embargo existen diversos factores (relación de aspecto, sobre resistencia a flexión, amplificación dinámica de corte, entre otros) que generan que los supuestos recién nombrados merezcan una revisión más en detalle. En particular, en esta sección se presentan los mismos modelos descritos en la sección anterior, pero esta vez con elementos ficticios tipo vigas rígidas entre cada unión de elementos finitos (entre una fila de elementos y la inmediatamente superior a ella) de modo de forzar el comportamiento flexural en el modelo y ver si es capaz de representar el comportamiento observado.

La Figura 6.22 muestra la modelación a flexión del muro MR1, además del modelo completo y la histéresis experimental. De inmediato se aprecia similitud en rigidez y resistencia, pero una notoria diferencia en su capacidad de deformación, fallando al 1.6% (sin embargo alcanzando el 2.6% sin pérdida de resistencia en el ciclo anterior).

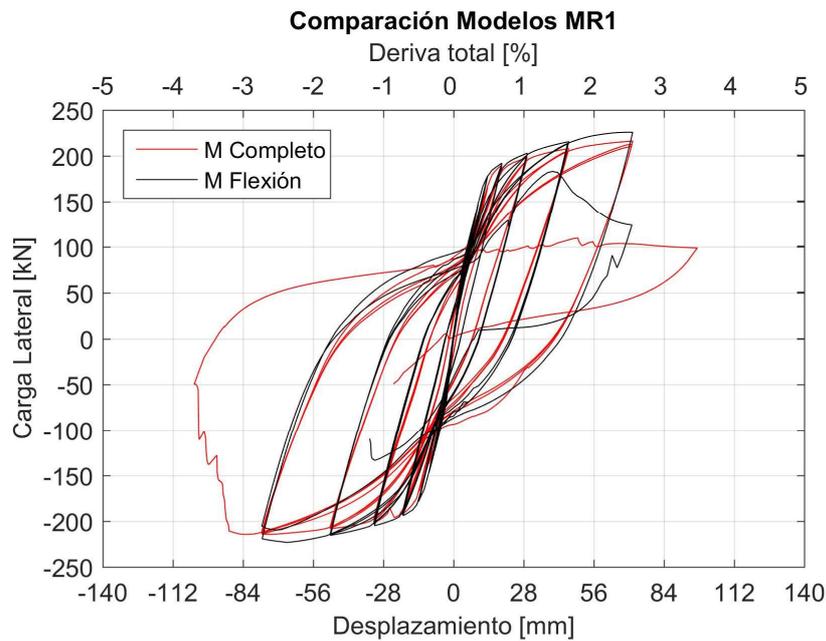


FIGURA 6.22: HISTÉRESIS MODELOS COMPLETO Y FLEXIÓN, MR1.

Lo anterior se puede entender después de notar que la propagación de daño en la altura en el modelo a flexión está más limitada que en el modelo completo: mientras en el primero las grietas horizontales se mantienen en esa dirección, en el segundo existen grietas diagonales de corte que permiten propagar más daño en la altura. Además de lo anterior, el cambio de sección que se produce cuando termina la abertura genera una barrera para que el daño suba. Lo anterior se puede ver en la Figura 6.23 en la cual se aprecia que mientras en el modelo completo las deformaciones verticales a tracción del eje 4 pasaban sin problema la cota de la abertura (300 [mm]), en el modelo a flexión no se pasa dicho valor. Dado esto, quizás un modelo a flexión con una abertura baja arroje resultados demasiado conservadores con respecto al modelo completo.

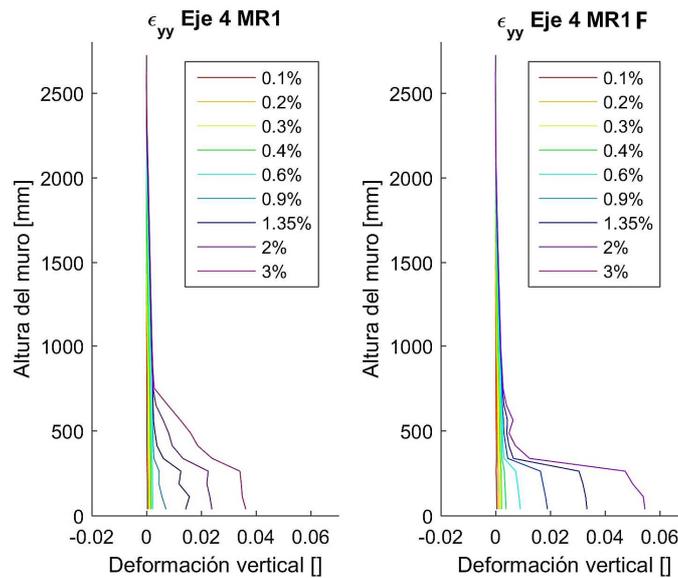


FIGURA 6.23: DEFORMACIONES VERTICALES (IZQ MODELO COMPLETO, DER MODELO FLEXIÓN), MR1.

La Figura 6.24, muestra la comparación de los modelos para el muro MR2. Nuevamente existe una gran similitud entre los modelos completo y de flexión, y a pesar de no recrear en la misma dirección de carga, la degradación ocurre a al mismo nivel de deriva. El análisis no pudo ser continuado por problemas de convergencia debido al inicio de la degradación en la capacidad de deformación del modelo. A pesar de no ser capaz de reproducir la cantidad de ciclos a partir del cual comienza la degradación, es capaz de indicar un nivel de deriva parecido al cual se aprecia en el caso experimental, el cual es un parámetro relevante en el detallamiento de muros de acorde a la práctica nacional.

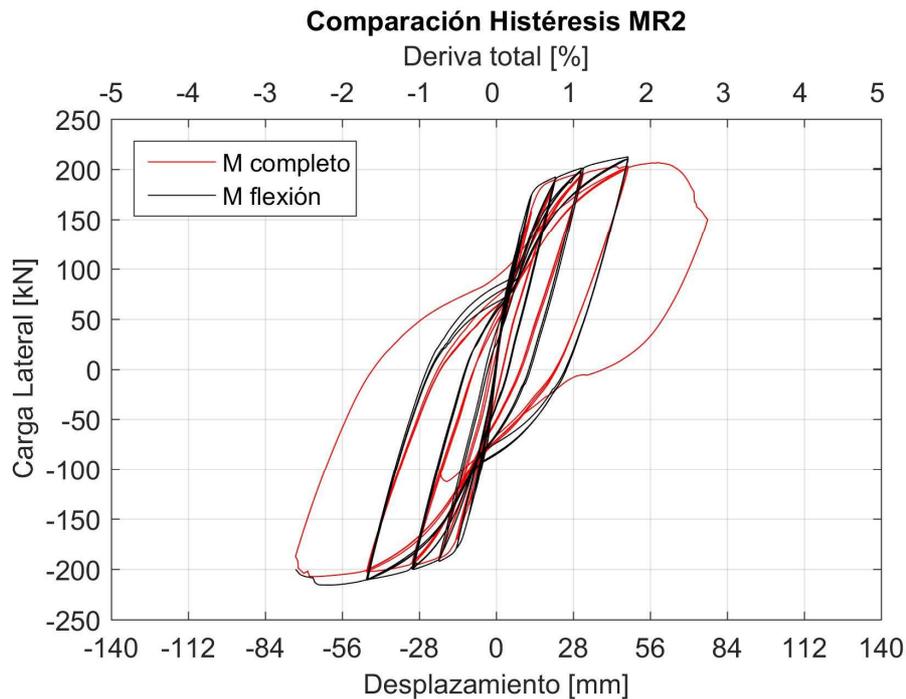


FIGURA 6.24: HISTÉRESIS MODELOS COMPLETO Y FLEXIÓN, MR2.

La Figura 6.25 muestra las histéresis de los modelos completo y a flexión para el muro MR3. Tanto la resistencia como la rigidez son idénticas entre los modelos pero, opuesto a los casos anteriores, la degradación no está presente. A pesar de existir el mismo fenómeno que adelanta la degradación en MR1 a flexión, en este caso no genera una degradación anticipada debido a que la abertura es demasiado alta para crear una real limitación. Lo anterior se puede apreciar al ver las deformaciones a tracción en el eje 4 para el modelo flexión, comparado con su símil que considera tanto flexión como corte (Figura 6.26).

Hasta ahora los modelos de flexión han variado su respuesta desde un caso conservador para MR1, preciso para MR2 (con respecto al desplazamiento al cual se inicia la degradación) y no conservador para MR3. Lo anterior genera un problema dado que dependiendo de las dimensiones de la abertura se puede pasar de un caso favorable a otro desfavorable en los modelos a flexión. Para estudiar este comportamiento, se considerará en la siguiente sección la fórmula propuesta por Morales para amplificar las deformaciones unitarias a compresión de los modelos a flexión para considerar la influencia del corte y/o de una abertura en la base.

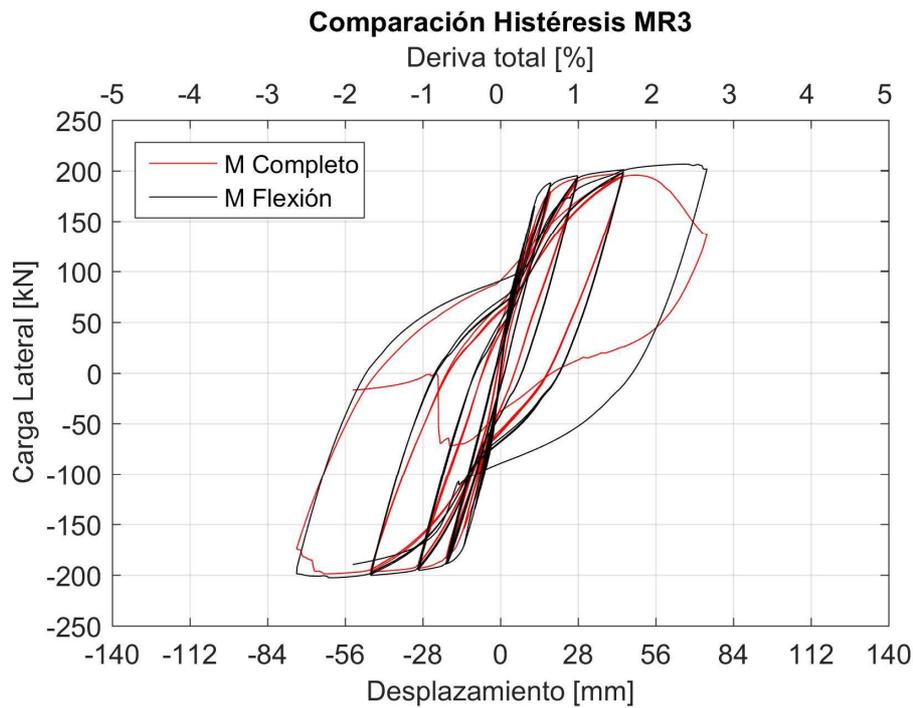


FIGURA 6.25: HISTÉRESIS MODELOS COMPLETO Y FLEXIÓN, MR3.

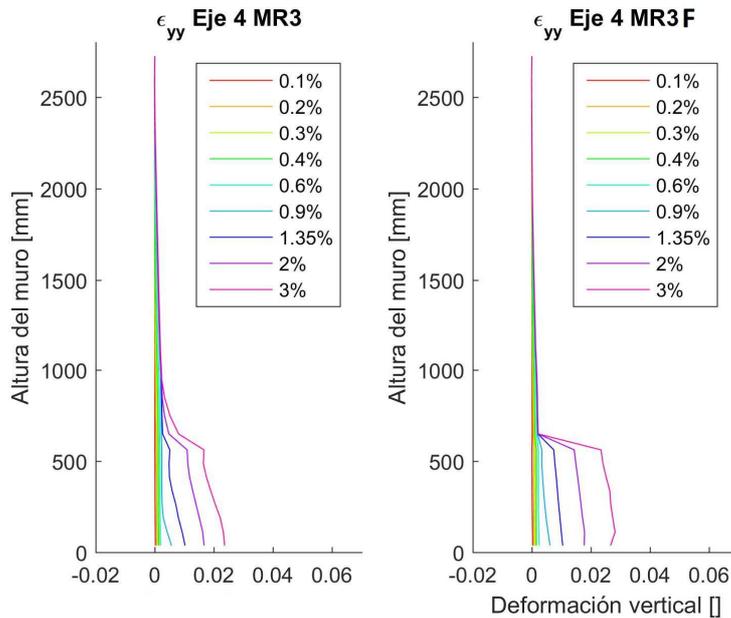


FIGURA 6.26: DEFORMACIONES VERTICALES (IZQ MODELO COMPLETO, DER MODELO FLEXIÓN), MR3.

Finalmente, la Figura 6.27 muestra la histéresis obtenida para los modelos a flexión (comparadas con la histéresis del modelo completo y el ensayo) para el muro MR4. Al igual que en los casos anteriores, existe una buena correlación entre los dos tipos de modelos, tanto en rigidez y resistencia. Lo interesante ocurre al notar que la degradación ocurre en el mismo

nivel de deriva, en el mismo ciclo, similitud que no ocurrió de manera tan exacta para los muros anteriores. Esto es atribuible a la presencia de las losas que tiene MR4, que acoplado el comportamiento de cada sección de muro genera una influencia similar a la modelación a flexión. Dada esta configuración, de un muro con aberturas y con losas que las crucen, el modelo a flexión podría ser suficiente para tener una estimación bastante precisa de la capacidad de deformación de un muro. Claramente existe una mayor diferencia entre las dos modelaciones realizadas y el resultado experimental visto, pero lo interesante es que sin importar si se considera sólo la flexión o la flexión y el corte, las modelaciones generadas generan resultados prácticamente idénticos, dando pie al uso de modelos a flexión para estudiar la influencia de aberturas en muros rectangulares.

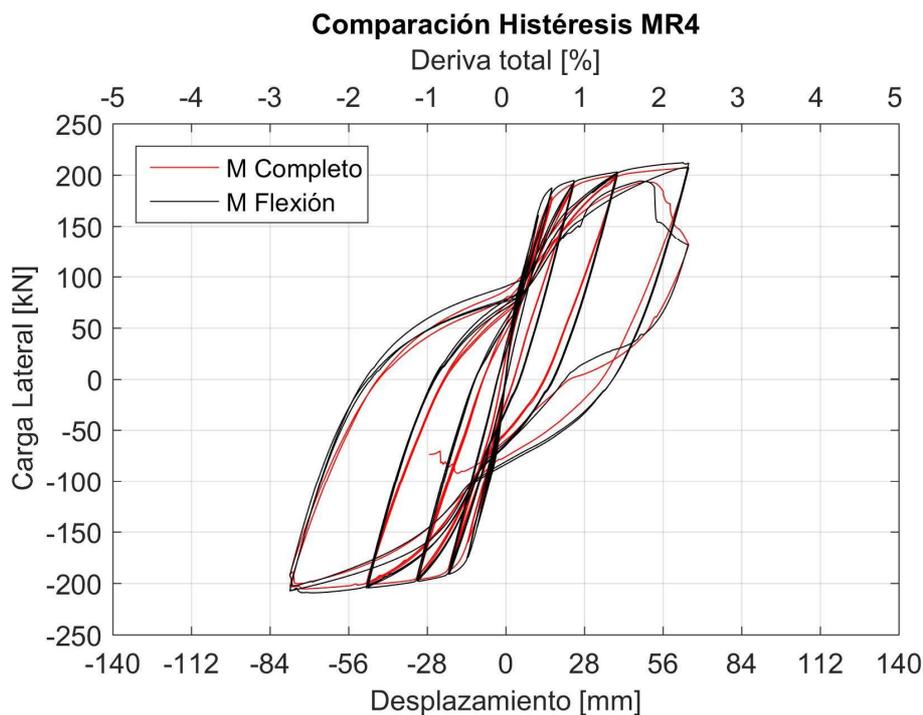


FIGURA 6.27: HISTÉRESIS MODELOS COMPLETO Y FLEXIÓN, MR4.

Finalmente, a partir de los resultados vistos en los ensayos y los modelos completos que consideran tanto flexión como corte en los cuales se aprecia una doble curvatura en las secciones de muros adyacentes a la abertura, se pretende estudiar si los modelos a flexión son capaces de reproducir las dobles curvaturas que se ven desde la capa 1 hasta la capa 4 para MR2 en la Figura 6.16 y desde la capa 1 hasta la capa 8 para MR3 en la Figura 6.17. Dichas capas, pero modeladas a flexión, se muestran en la Figura 6.28, en las cuales se puede apreciar que mientras en MR3 la modelación es capaz de invertir la curvatura desde la capa 1 hasta la capa 8, en MR2 no se logra invertir la curvatura desde la capa 1 a la capa 4. Por otro lado, en MR3 no se apreció degradación en la capacidad, mientras que en MR3 sí. Lo anterior muestra que no hay correlación entre la capacidad de recrear la doble curvatura y la degradación mostrada en los modelos. Así, a pesar de ser ideal que los modelos sean capaces de reflejar este comportamiento, no es grave si no se representa.

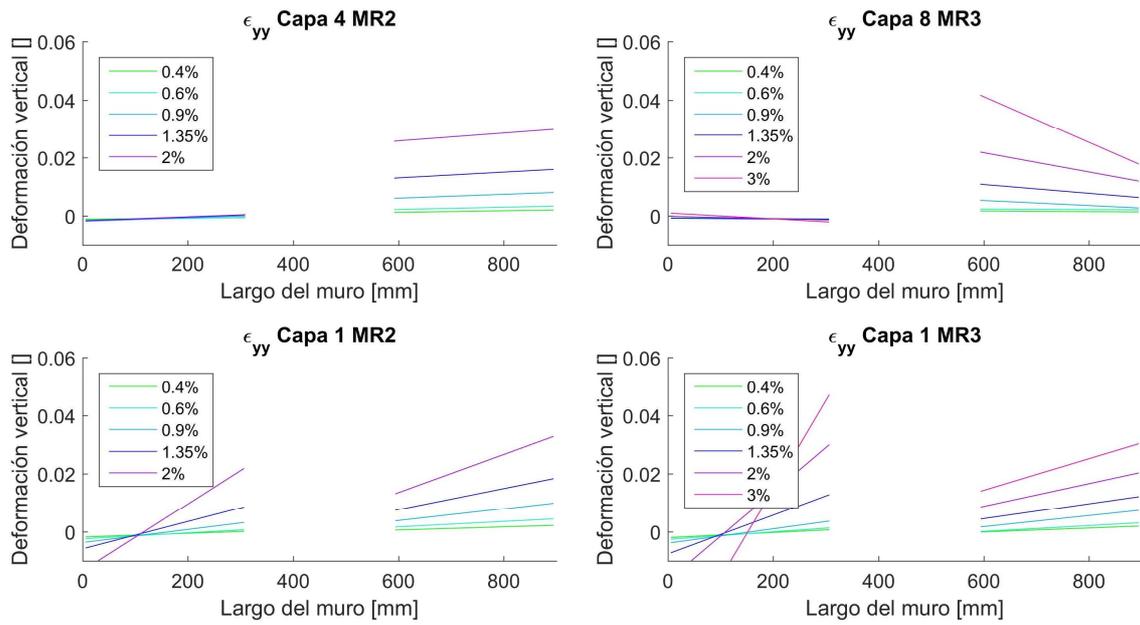


FIGURA 6.28: CAPAS QUE INDICAN DOBLE CURVATURA PARA MR2 Y MR3, MODELOS A FLEXIÓN.

Si se considera la primera capa para todos los modelos presentados y se estudia la ubicación por donde pasa por cero, se puede determinar qué tan acertado resulta el modelo a flexión para indicar el largo del muro en el cual se deberá confinar. La Figura 6.29 muestra lo anterior, donde se ve que para los últimos niveles de deriva de todos los muros la profundidad de la línea neutra es similar o sobreestimada en los modelos a flexión (conservador).

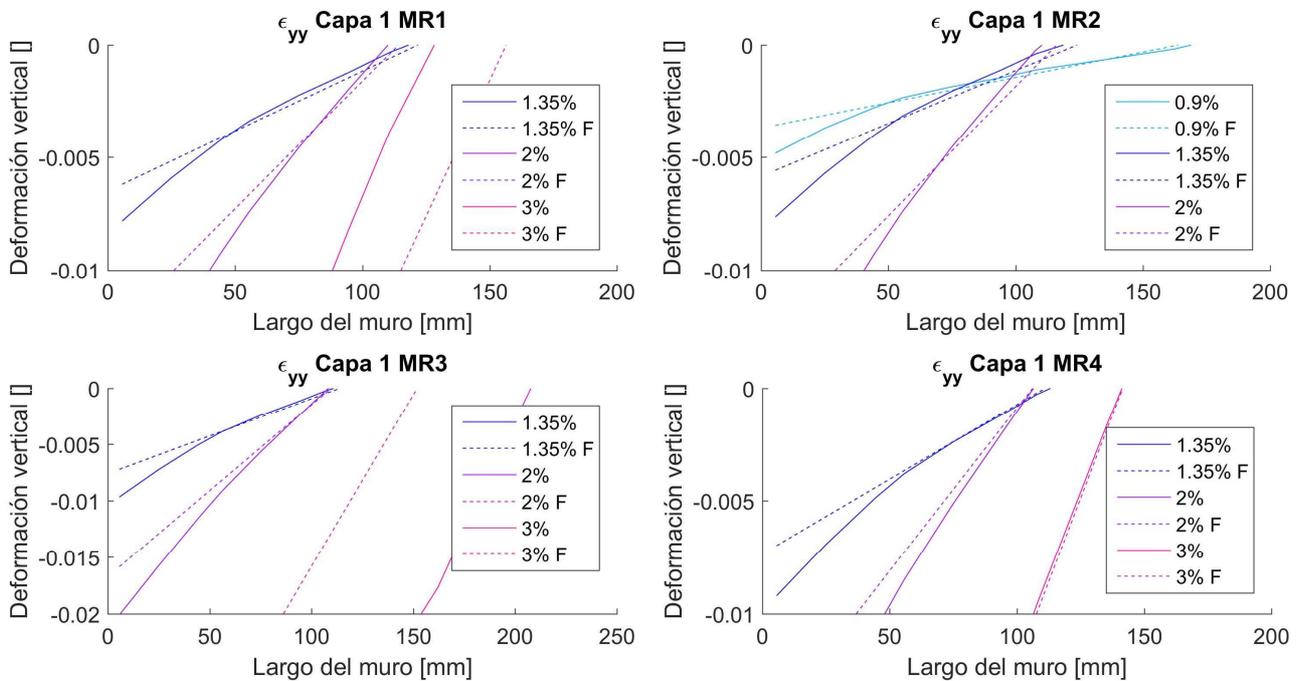


FIGURA 6.29: PROFUNDIDAD DE LÍNEA NEUTRA.

De los resultados obtenidos en los modelos a flexión se podría mencionar que son válidos (o conservadores) para muros con aberturas cercanas a un piso, y quedan sujeto a mayor detalle si la abertura es más alta. Sin embargo, si la abertura es cruzada con un elemento que pueda acoplar las dos secciones de muro (como una losa o una viga), el modelo vuelve a ser válido y con bastante precisión.

6.5.2 MR2 con primer piso confinado

Dado el modo de falla observado en los muros ensayados, el cual consta de una grieta diagonal que va desde el extremo superior de la abertura hasta el extremo inferior del muro, se puede atribuir la influencia de un puntal de compresión en dicha zona. Para evaluar si es posible mejorar el desempeño del muro en dicha zona se modela nuevamente la probeta MR2 pero esta vez usando hormigón confinado (Figura 6.2) en todo el largo del muro, desde la base hasta el cambio de sección que genera la abertura. La influencia de confinar la zona en la cual se vio un comportamiento no lineal, concentración de daño y deterioro del hormigón se puede ver en la Figura 6.30, en donde se compara con respecto a la modelación del muro MR2 fiel a la probeta ensayada. Se puede apreciar que tiene una mejor respuesta global, permitiendo completar el primer ciclo del 3% sin pérdida de capacidad. Recién en la dirección positiva del segundo ciclo del 3% muestra una incipiente pérdida de capacidad, para degradar cercano al 2% del tercer ciclo del 3% en la dirección negativa.

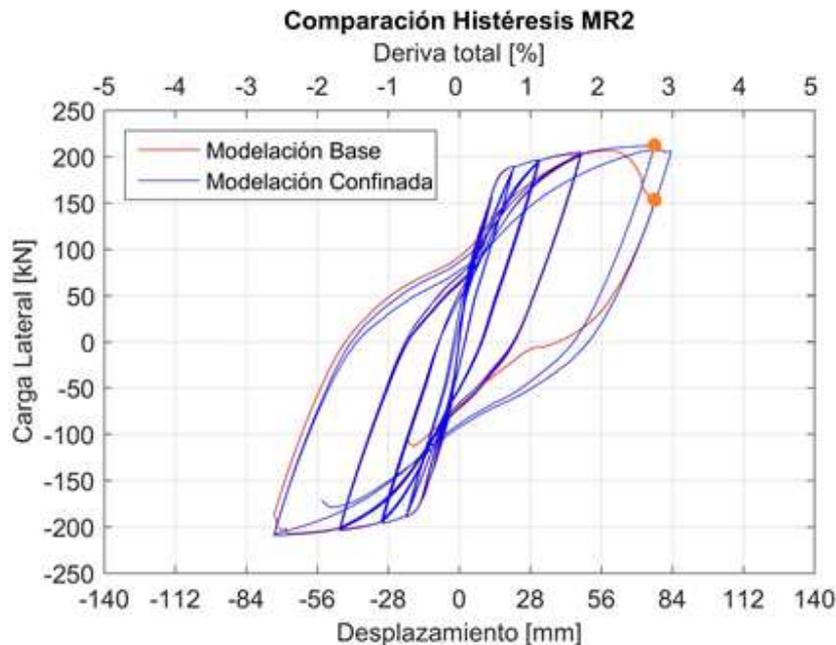


FIGURA 6.30: INFLUENCIA DE CONFINAR LA ZONA DE COMPORTAMIENTO INELÁSTICO (PARA MR2).

Si se compara la distribución de las deformaciones verticales unitarias en el muro (ver Figura 6.31, a la izquierda el caso base y a la derecha el modelo propuesto) para el segundo peak del 3% se puede ver que el modelo con más confinamiento presenta una mayor zona con altas deformaciones (colores azules concentrados en el extremo inferior derecho del muro), lo cual indica que para el mismo nivel de deriva los valores más altos de deformaciones se tienen en

el modelo base. Sin embargo, la mejora propuesta sigue teniendo una capacidad de deformación menor a la alcanzada por el modelo del muro MR1, indicando que a pesar de mejorar la ductilidad del muro confinando una mayor área, la presencia de la abertura por si sola condiciona más la degradación anticipada del muro.

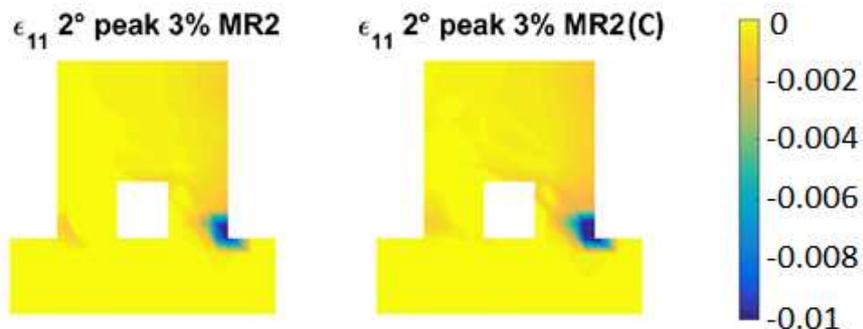


FIGURA 6.31: DISTRIBUCIÓN DE DEFORMACIONES VERTICALES: IZQUIERDA MURO MR2 BASE, DERECHA MURO MR2 CON PRIMER PISO CONFINADO.

6.5.3 MR1 con abertura más alta

Dado que la gran diferencia en las capacidades de deformación de los muros ensayados radica en el largo de la abertura más que en su alto, se presenta una modelación con una abertura con el largo de la probeta MR1 (135 [mm], 15% del largo del muro) y el alto de la probeta MR3 (600 [mm], equivalente a dos pisos). Cualitativamente, se espera que el modelo tenga un comportamiento intermedio entre MR1 y MR3, y dado que el largo tiene mayor influencia que el alto de una abertura se espera que tenga un mejor comportamiento que MR2. La modelación mencionada se muestra en la Figura 6.32, en donde se puede ver que efectivamente el muro tiene un mejor comportamiento que MR3 y MR2, pero sigue estando bajo MR1, tal a como se predijo.

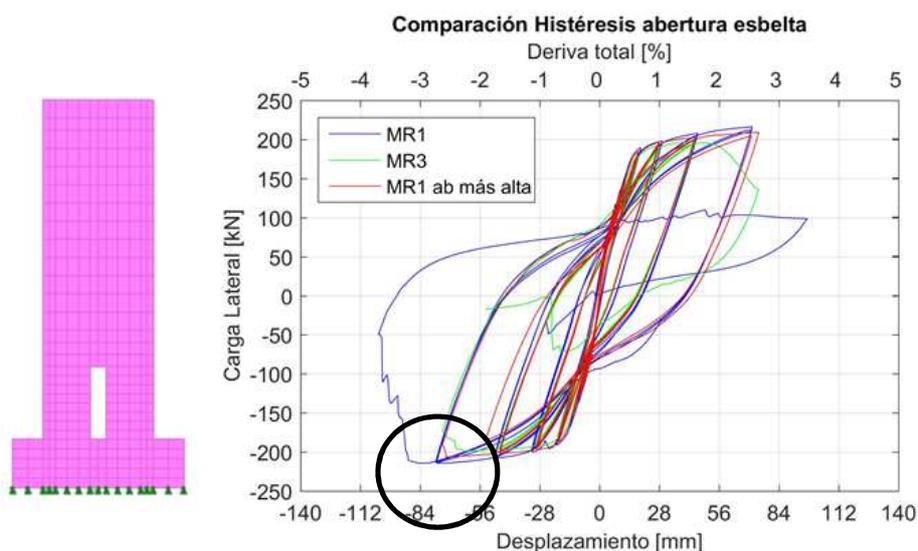


FIGURA 6.32: (IZQ) MODELO GENERADO. (DER) HISTÉRESIS.

Claramente existe una influencia en la altura de la abertura (como se pudo comparar entre las respuestas de los muros MR2 y MR3), pero no es tan determinante como el largo de la misma. De hecho, tanto el presente modelo como MR1 tienen una abertura del mismo largo, pero las capacidades de deformación varían entre uno y otro. Así, se puede considerar que aberturas con largo relativo al largo del muro pequeño no tienen gran influencia en la capacidad de deformación del muro siempre y cuando la altura sea relativamente baja (mientras que en MR1 la altura de la abertura representa un 10.7%, en este modelo es el doble, 21.4%)

6.5.4 MR2 con abertura más baja

De acuerdo a diversos resultados de investigaciones sobre el comportamiento de muros de hormigón armado frente al terremoto del 27 de Febrero de 2010, la carga axial aplicada sobre éstos toma un valor relevante. Lo anterior motiva a estudiar la variación de los resultados obtenidos al aumentar la carga axial a valores cercanos a los registros en edificios reales ((Estay, 2008)). Para realizar lo anterior, se considera el muro base sin perforación y el muro MR2 y se les aplica el triple de la carga axial vista en los ensayos, pasando de un 7% de la capacidad a compresión de la sección completa a un 21%. Se realizan modelos completos que consideran tanto flexión como corte, y modelos tradicionales de flexión pura. Las histéresis para el muro base se muestra en la Figura 6.33 (tanto flexión como flexión más corte), mientras que su análogo para MR2 se muestra en la Figura 6.34.

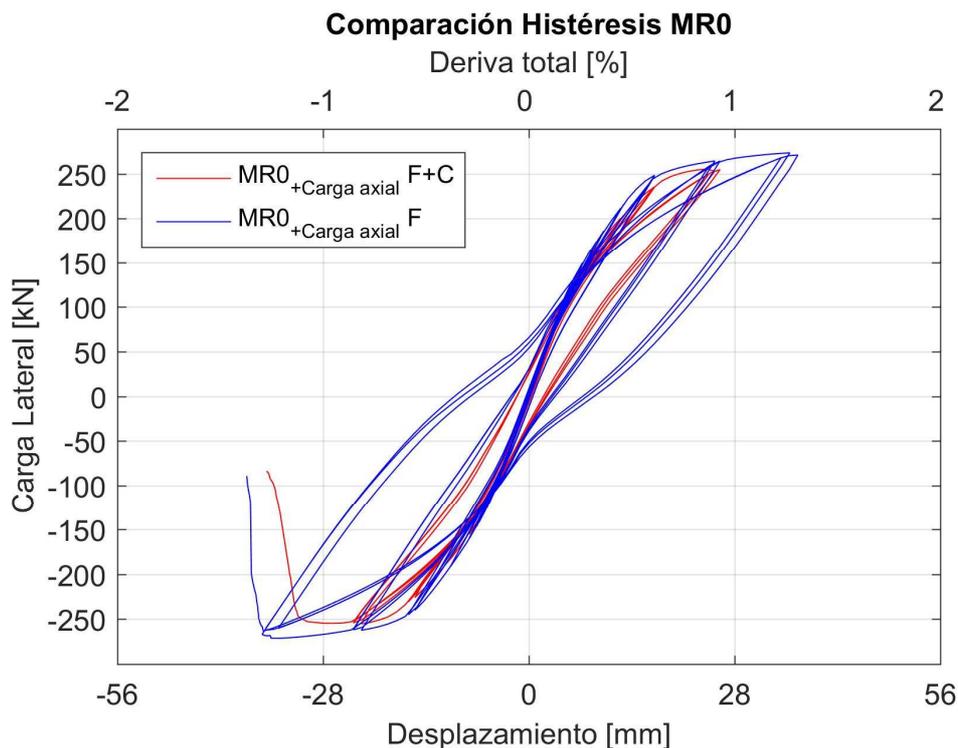


FIGURA 6.33: HISTÉRESIS MR0 CON MAYOR CARGA AXIAL.

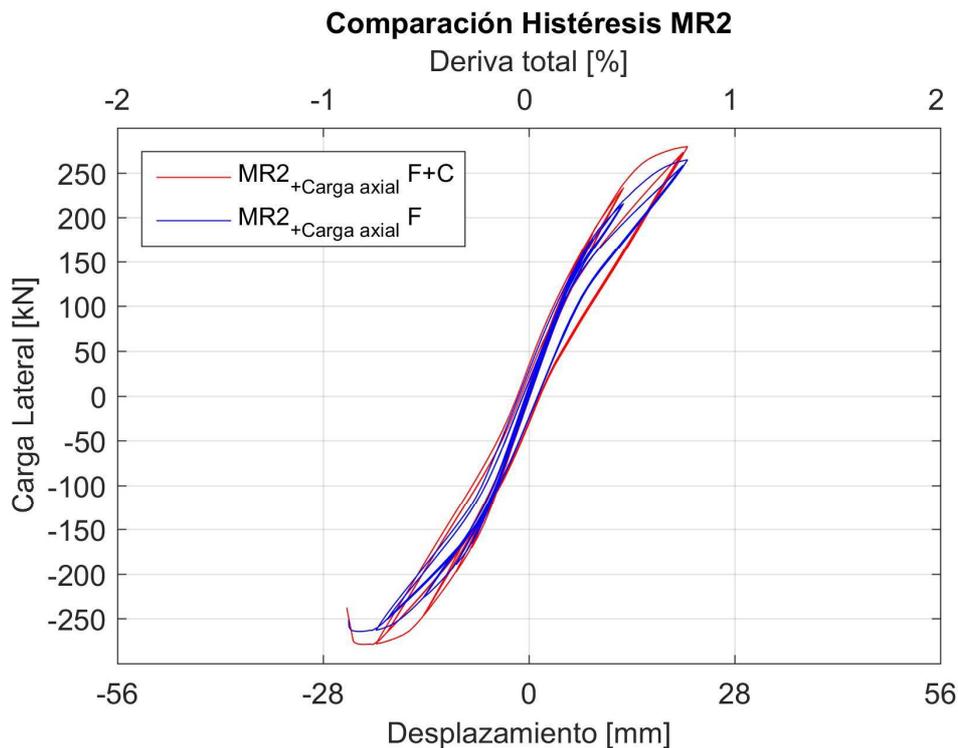


FIGURA 6.34: HISTÉRESIS MR2 CON MAYOR CARGA AXIAL.

En ambos casos se muestra que el modelo a flexión captura de manera precisa el comportamiento del muro al compararlo con el modelo completo, ya sea resistencia, rigidez y capacidad de desplazamiento. Con respecto a este punto, el modelo de muro rectangular a flexión pura alcanza un máximo desplazamiento sin pérdida de capacidad de 1.25% de deriva, mientras que el modelo completo llega a 1.08% (diferencia relativa de un 14%). En el caso de MR2 las diferencias son aún menores: el modelo a flexión llega a un 0.87%, y el modelo que considera flexión y corte llega a un 0.85% (diferencia relativa de un 2%). Lo anterior muestra que al realizar un aumento de la carga axial a valores usuales en edificaciones nacionales, es más relevante considerar la presencia de la abertura que la influencia del corte para determinar la capacidad de desplazamiento del muro

6.5.5 Muro más alto

Todos los muros estudiados en el presente trabajo mantienen la relación de aspecto de los muros ensayados (3.1) para no introducir otra variable al momento de la comparación. En esta sección, se modelan muros similares a los base pero aumentando su altura hasta los 8400 [mm], para triplicar la relación de aspecto del muro y asemejarse más a un muro de un edificio de mayor altura. En particular, se modelan el muro rectangular (en sus variantes a flexión y flexión más corte) y un muro con una abertura idéntica a la del muro MR2 (en las mismas variantes que el muro rectangular). La Figura 6.35 muestra un esquema de los muros modelados.

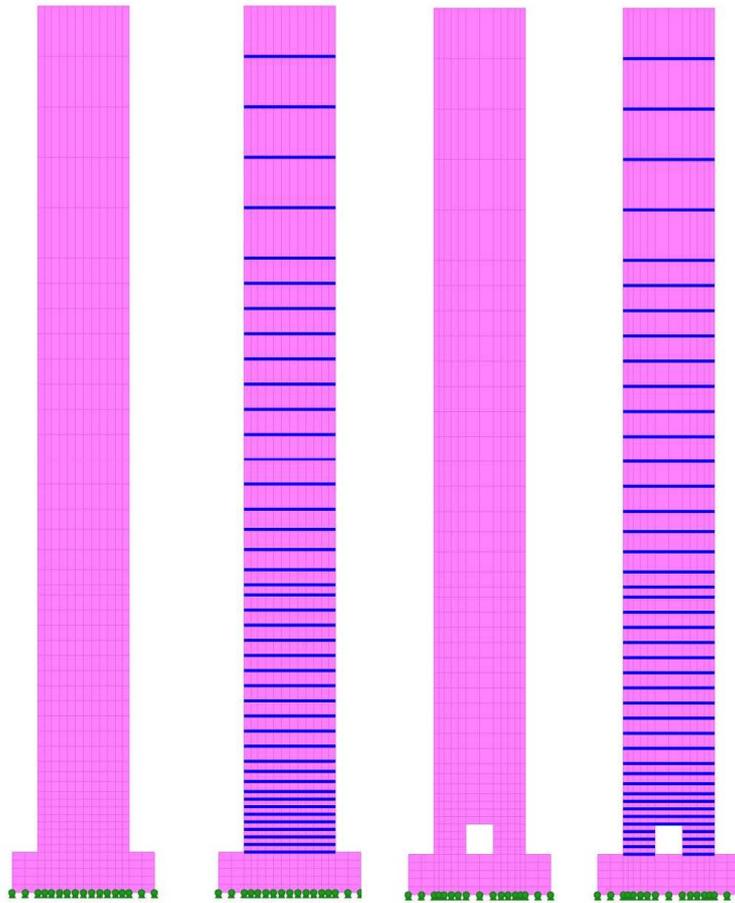


FIGURA 6.35: MUROS MÁS ESBELTOS (DE IZQUIERDA A DERECHA: RECTANGULAR COMPLETO, RECTANGULAR A FLEXIÓN, CON ABERTURA COMPLETO Y CON ABERTURA A FLEXIÓN).

A los muros modelados se les somete a desplazamientos equivalentes a los usados en el laboratorio, y se continúa hasta llegar al inicio de la degradación de capacidad. La Figura 6.36 muestra las histéresis del muro sin abertura (tanto flexión como flexión y corte), mientras que la Figura 6.37 muestra los resultados para el muro con abertura idéntica a la de MR2.

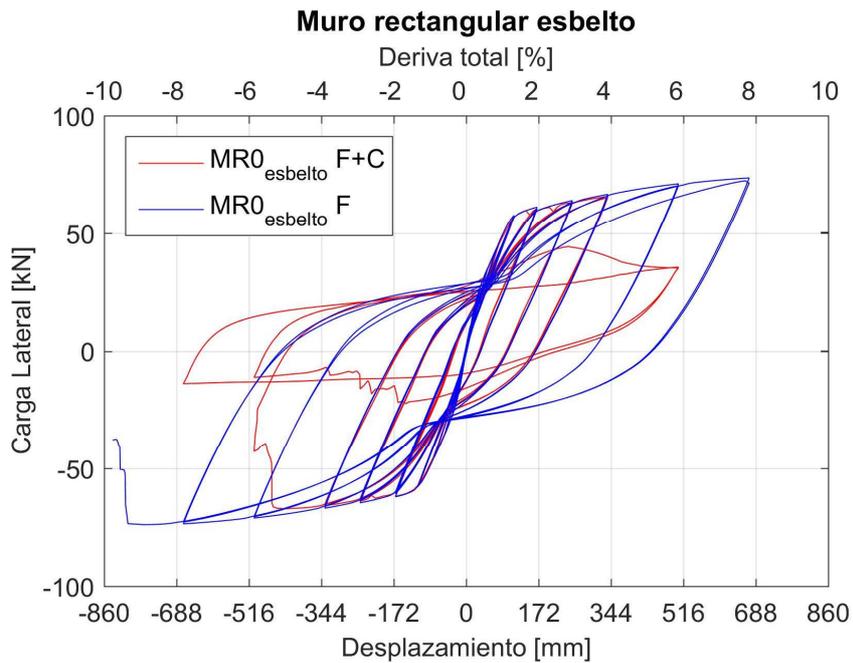


FIGURA 6.36: HISTÉRESIS MODELOS RECTANGULARES.

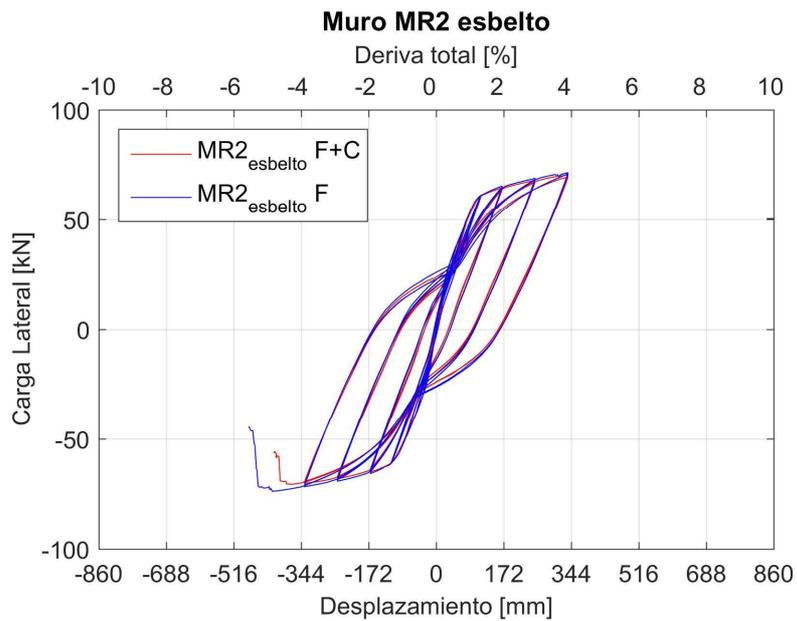


FIGURA 6.37: HISTÉRESIS MODELOS CON ABERTURA EQUIVALENTE A LA DE MR2.

De los resultados mostrados se puede ver que la diferencia entre los modelos de un mismo muro es despreciable con respecto a la diferencia entre los modelos sin abertura y los modelos con abertura (ya sea al comparar modelos de flexión o flexión más corte). Esta gran diferencia entre estos modelos y los estudiados anteriormente se puede entender que desde un modelo a flexión de un muro rectangular a un modelo de flexión y corte con abertura existen dos

factores que generan diferencias: la influencia del corte y la presencia de la abertura. Mientras que para los muros ensayados ambos factores tenían similar relevancia, al aumentar la relación de aspecto el corte comienza a tener menos protagonismo, y la principal diferencia para este caso es la presencia de la abertura. Al no acoplar el comportamiento de ambas secciones de muro, el modelo a flexión es capaz de representar correctamente el comportamiento del muro, a pesar de desprestigiar el efecto del corte.

6.6 ESTUDIO ANALÍTICO

El trabajo realizado por Morales entrega fórmulas que permiten considerar los efectos del corte y la presencia de aberturas en un muro modelado a flexión (Morales, 2015). Luego de estudiar cien modelos con diferentes dimensiones de abertura y formas de modelación, calibra dos fórmulas para considerar una amplificación tanto en la deformación unitaria vertical a compresión máxima como en la deformación unitaria vertical a tracción máxima. De la comparación de los resultados obtenidos detecta que el largo de la abertura es una variable más influyente que el alto de la misma, y considera a la primera como variable en las fórmulas propuestas. Así, el factor de amplificación que propone para las compresiones es el siguiente,

$$FA = \left(1 + 0.64 \left(\frac{Area_{Abertura}}{Area_{piso}} \right)^{0.31} \right) \quad (25)$$

donde la única variable que determina en cuánto se amplifica la deformación unitaria a compresión es la relación entre el área de la abertura con respecto al área del piso. Dado que las aberturas consideradas siempre son de por lo menos un piso de alto (y el factor propuesto está calibrado sólo para aberturas de un piso) la variable se traduce en la relación entre el largo de la abertura y el largo del muro.

De los resultados vistos tanto en los ensayos como en las modelaciones se confirma que el largo de la abertura es el factor más determinante para determinar la deformación unitaria vertical a compresión en el extremo inferior del muro, variable determinante en el detallamiento de muros. Además, se ha visto que considerar muros con aberturas de un piso y largos pequeños como modelos a flexión es una buena aproximación, haciendo necesario el factor de amplificación para aberturas con largos mayores. Sin embargo, la calibración fue realizada para muros esbeltos de dimensiones reales para muros de edificios altos (llega a usar muros de 37.5 [m]) y los aquí estudiados presentan un factor de escala para que pudieran ser ensayados en el laboratorio. Dado lo anterior no se considera prudente estudiar la efectividad de la fórmula propuesta para los muros estudiados.

A pesar de lo anterior, se mantiene la correlación más importante: tanto en los muros ensayados como en la formulación de la expresión propuesta por Morales, el largo de la abertura es la variable más influyente para determinar la deformación vertical unitaria a compresión en los muros a estudiar.

7. CONCLUSIONES

7.1 RESUMEN

La evidencia de daño en muros de hormigón armado de edificios de altura para el terremoto del 27 de febrero de 2010 impulsó un mayor interés en entender el comportamiento de dichos elementos. De acuerdo a la usanza nacional es recurrente la existencia de discontinuidades en el primer piso y/o primer subterráneo por requerimientos arquitectónicos, generando condiciones más exigentes para el comportamiento del muro, puesto que es en esta zona donde se espera un mayor comportamiento inelástico frente a sollicitaciones sísmicas. El presente trabajo se centra en las discontinuidades centrales en la base tipo puerta.

Para poder estudiar el problema se divide el trabajo en dos partes: una experimental y otra numérica. La primera consta del diseño, la construcción, la instrumentación y el ensayo de cuatro probetas de hormigón armado con diferentes dimensiones de aberturas centradas en la base, además de la existencia de losas en la zona de la discontinuidad en una probeta para estudiar la influencia de dichos elementos en la respuesta del muro. El ensayo consta en la aplicación de una carga cíclica pseudo estática en el extremo superior del muro, el cual se encuentra anclado a una losa de reacción y sometido a una carga axial constante. La medición de datos se obtiene a través de celdas de carga, strain gages en las barras de acero, LVDT's dispuestos en una cara del muro (además de LVDT's externos que capturan los movimientos de cuerpo rígido), y el uso de un análisis de correlación de imágenes digitales (DIC en inglés) a través de fotogrametría en la otra cara para capturar desplazamientos y deformaciones sobre todo el muro. El presente trabajo considera sólo el uso de los LVDT's externos y el análisis de fotogrametría. De los ensayos se registra su comportamiento global, evolución de grietas, forma de falla e histéresis, además de un estudio de deformaciones unitarias obtenidas por fotogrametría que se centra en su distribución en ejes verticales, en la sección y en el muro entero.

La parte numérica se basa en la modelación de los muros ensayados a través del método de los elementos finitos. Se usan elementos tipo membrana y tipo placa ambos de cuatro nodos, de 12 grados de libertad los primeros y 24 grados de libertad los segundos. Permiten capturar la deformación por corte y pueden ser ensamblados en su espesor por diversas capas de materiales, cada uno con su propia ley constitutiva, asumiendo adherencia perfecta entre todas las capas. Para los muros ensayados, se dispone de hormigón confinado y no confinado dependiendo de la ubicación del elemento dentro de la probeta. El acero dispuesto en las zonas en las que se espera un comportamiento no lineal considera el pandeo como factor degradante en su capacidad, mientras que en el resto del muro se considera un acero bilineal que genera un menor costo computacional. Luego de someter el modelo a los mismos desplazamientos corregidos de los muros, se obtiene la misma información estudiada por fotogrametría para realizar una comparación directa, además de realizar un análisis de las deformaciones verticales unitarias a compresión en una zona de interés. Posterior a establecer una correlación entre la presencia de la abertura en la base del muro y la deformación a compresión en el extremo del mismo, se estudian modelos paramétricos con el fin de extender los resultados obtenidos a casos que quedaron fuera de la parte experimental y permiten dar conclusiones más robustas. En particular se estudian modelos a flexión pura, con distintas características en el hormigón, con diferentes dimensiones de abertura y muros con una mayor relación de aspecto.

7.2 CONCLUSIONES

A partir de los ensayos realizados a los cuatro muros se pudo ver una notoria diferencia entre ellos. Aunque en un comienzo sus comportamientos eran similares (forma y deriva en la cual aparecen las primeras grietas, desprendimiento del hormigón de recubrimiento e histéresis), y tanto la rigidez como la resistencia durante todo el ensayo eran idénticas, existe una evidente diferencia en su capacidad de deformación: mientras que MRO y MR1 alcanzan desplazamientos máximos similares (3.9% el primero y 3.7% el segundo), MR2 y MR3 degradan su capacidad de manera anticipada (ambos a 2.6%) y MR4 se posiciona como un caso intermedio (3.2%). De acuerdo a lo observado en las histéresis la influencia de la presencia de una abertura se traduce en la ductilidad del muro, sin influir significativamente en su rigidez o capacidad resistente, y la variable más relevante es la relación del largo de la abertura con respecto al largo del muro. Además, según lo visto en los resultados de los ensayos y los estudios previos, una abertura de un piso y de un largo de un 15% del largo del muro tiene poco impacto en la capacidad de deformación del muro y por lo tanto puede modelarse como un muro rectangular (que usa la hipótesis de Bernoulli) restando la zona donde se encuentra la abertura. Al considerar la limitante de deformación unitaria de 0.008 impuesta por la normativa nacional, se tiene que los muros están entre un 60% a un 70% de su máximo desplazamiento sin pérdida de capacidad, similar a un factor de utilización. Sin embargo los valores son muy acotados a los casos ensayados, por lo cual se propone estudiar lo anterior para un mayor número de casos y validar si los muros efectivamente se encuentran en dicho rango de utilidad.

Al observar fotografías de las probetas ya ensayadas, en los cuatro muros del presente estudio se aprecia la aparición de un puntal de compresión que nace desde la esquina superior de la abertura y llega al extremo inferior del muro, además del pandeo de las barras de refuerzo de la abertura. Ambas situaciones no fueron observadas en el muro base (MRO), por lo cual se muestra que la presencia de la abertura influye en la forma de falla. Después de realizar un análisis detallado del campo de deformaciones del muro –tanto experimentalmente a través del análisis por fotogrametría como numéricamente a través de la modelación en elementos finitos- se concluye que la influencia de la abertura en el muro afecta a la deformación unitaria vertical a compresión, lo cual resulta bastante acertado dado que dicho parámetro es factor relevante en el detallamiento de muros, pero no en el diseño (lo cual va correlacionado con lo visto en la histéresis en las variaciones en capacidad de deformación, pero no en resistencia).

Después de observar el pandeo de las barras de refuerzo de abertura y estudiar la distribución de deformaciones unitarias verticales en ejes de interés, se muestra que en los cuatro muros la máxima tracción está siempre presente en el eje adyacente a la abertura, y no en el extremo del muro donde podría predecir la hipótesis de Bernoulli. Dado que la armadura de refuerzo de la abertura por lo general tiene un menor diámetro que el refuerzo del elemento de borde, está menos restringida al pandeo (la primera por lo general sólo tiene como restricción a la armadura de repartición horizontal, y la segunda tiene la misma armadura además de estribos) y está sometida a una mayor tracción, es más propensa a incurrir en pandeo que la armadura del elemento de borde. Para evitar lo anterior, se propone limitar el espaciamiento de la armadura de repartición horizontal a no más de seis veces el diámetro de la barra de refuerzo de abertura (análogo a las restricciones sobre las armaduras longitudinales del

elemento de borde), dado que de las fotografías del ensayo se pudo ver que dicha armadura controla el pandeo de la barra en cuestión.

Estudiando el comportamiento del muro MR4, se desprende que la presencia de losas en la zona de la discontinuidad tiene un impacto importante. Más allá de tener una mejor respuesta que el muro MR3, tiene una mejor respuesta que MR2, el cual se podría suponer como cota superior. Lo anterior motiva a realizar una investigación en mayor detalle sobre la presencia de losas en discontinuidades en muros, y cómo afectan en su respuesta. En particular sobre las losas, la práctica nacional suele disponer de “refuerzos de losa” que corresponden a una cantidad no despreciable de armadura que unen en planta a dos muros, mejorando la capacidad a flexión en esa zona. Sin embargo, no existen estudios que avalen su uso ni que determinen su resistencia o ductilidad. Lo anterior toma relevancia al notar lo influyente que puede ser un elemento que actúe acoplado muros en su respuesta global.

La modelación en elementos finitos es una herramienta potente que permite identificar sin problemas tanto el comportamiento global de los muros como su comportamiento local, recordando que los modelos trabajan con deformaciones promedio al momento de considerar las concentraciones de deformaciones que pueden generar la aparición de grietas. Considerar tanto los efectos del corte como de la flexión siempre generan resultados más precisos, y para efectos de investigación son la mejor opción para reflejar el comportamiento real de lo que se vaya a estudiar. Sin embargo, en el mundo laboral por lo general se opta por modelos más simples, teniendo como principal referente a los modelos a flexión pura. A pesar de dar resultados más conservadores para el muro MR1 pero menos conservadores para los muros MR2 y MR3, al aumentar la relación de aspecto al triple se observa que el modelo a flexión es bastante similar al modelo completo cuando el muro tiene una abertura similar a la de MR2. Lo anterior da cuenta que al considerar relaciones de aspecto mayores (similares a las que se pueden encontrar en muros de edificios de altura) usar un modelo flexural es aceptable para conocer la capacidad de deformación de un muro con abertura en su base (la flexión en la base no considera acoplamiento entre las dos secciones de muro, es decir, cada una cumple la hipótesis de Bernoulli pero no necesariamente la cumplen en conjunto). Lo anterior se cumple dado que en relaciones de aspecto bajas (como las del ensayo) tanto la influencia del corte como la presencia de la abertura generan diferencias entre el modelo completo y el modelo flexural. Sin embargo, al aumentar la relación de aspecto el efecto del corte toma menos relevancia y el modelo a flexión (pero que considera la abertura y las dos secciones trabajando de manera independiente) es capaz de reflejar el inicio de la degradación del muro. Además, como se pudo observar de los resultados del muro MR4, la presencia de las losas genera un mayor comportamiento flexural, reforzando más el punto anterior.

Al estudiar el perfil de deformaciones unitarias verticales en la sección en distintas capas, se aprecia que tanto en MR2 como en MR3 –tanto para los resultados de fotogrametría como los vistos en los modelos a flexión y corte, y flexión pura– se genera un cambio de curvatura en una sección del muro desde la base hasta el término de la abertura. Lo anterior pone en duda la hipótesis de Bernoulli al considerar el muro completo, pero el modelo a flexión pura con las dos secciones desacopladas entrega resultados aceptables para los casos estudiados en el presente trabajo. Este cambio de curvatura puede ser explicado por el puntal a compresión ya mencionado, que generó la falla en las cuatro probetas ensayadas. En base a esto se propone realizar un análisis a través del modelo puntal tensor para muros con aberturas centrales, con la idea de entender mejor el flujo de carga en la zona de la discontinuidad.

De acuerdo a los resultados vistos para el muro MR4 tanto en el modelo a flexión pura como en el modelo a flexión más corte, se aprecia que la respuesta es bastante similar en ambos casos. Por consiguiente, la presencia de las losas en MR4 es suficiente para imponer un mayor acoplamiento en las secciones del muro, generando pocos cambios entre modelo a flexión y corte versus modelo a flexión.

Se concluye que ante la presencia de una abertura en la base de un muro de hormigón armado de largo mayor al quince por ciento del largo del muro y alta relación de aspecto, se realice un modelo a flexión simple pero que no considere acoplamiento entre las dos secciones de muro para estimar su capacidad de deformación. Además, para controlar el pandeo de las barras de refuerzo de abertura, se limita el espaciamiento de la malla horizontal a no más de seis veces el diámetro de la barra de refuerzo. El confinamiento en todo el muro desde la base hasta el término de la discontinuidad genera un impacto positivo en la respuesta, pero no lo suficiente para descartar la presencia de la abertura.

BIBLIOGRAFIA

- ACI Committee 318. (2008). Building code requirement for structural concrete and commentary. *Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute.*
- Ahumada, M. (2014). *Modelación en elementos finitos de muros esbeltos de hormigón armado con discontinuidades en la base. Recomendaciones para el diseño.* Universidad de Chile.
- Ali, A., & Wight, J. (1990). *Reinforced concrete structural walls with staggered opening configurations under reversed cyclic loading.*
- Belarbi, A., & Hsu, T. (1994). Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete. *ACI Structural Journal.*
- Belarbi, A., & Hsu, T. (1995). Constitutive laws of softened concrete in biaxial tension compression. *ACI Structural Journal.*
- Blaber, J., Adair, B., & Antoniou, A. (2015). NCorr. Retrieved from <http://www.ncorr.com>
- D.S. N°60. (2011). Reglamento que fija los requisitos de diseño y cálculo para el hormigón armado y deroga Decreto N° 118.
- Díaz, S. (2016). *Estudio experimental y modelamiento en elementos finitos de muros esbeltos de hormigón armado con discontinuidades tipo bandera.* Universidad de Chile.
- Estay, C. (2008). *Características de muros de hormigón armado diseñados en Chile.* Universidad de Chile.
- 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.*
- Harilal, R., & Ramji, M. (2014). Adaptation of open source 2D DIC software Ncorr for solid mechanics applications. *9th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics*, (November), 1–6.
- Manríquez, I. (2016). *Ensayo de muros bandera de hormigón armado con carga lateral cíclica medido por fotogrametría y comparado con modelo puntal-tensor.* Universidad de Chile.

- Manríquez, I., Díaz, S., & Massone, L. (2017). Analytical and experimental cyclic response of RC walls with setback discontinuities. Santiago.
- Massone, L. (2006). *RC Wall Shear - Flexure interaction: analytical and experimental responses*. Universidad de California, Los Angeles.
- Massone, L., Beltrán, J., Lacaze, C., & Rojas, F. (2010). Modelación del pandeo de refuerzo longitudinal de elementos de hormigón armado. *X Congreso Chileno de Sismología E Ingeniería Antisísmica*.
- Massone, L., & Moroder, D. (2009). Buckling modeling of reinforcing bars with imperfections. *Engineering Structures*, 31(3), 758–767.
- Massone, L., & Rojas, F. (2012). Comportamiento de Edificios de Hormigón Armado. In *Mw =8.8: Terremoto en Chile, 27 de Febrero 2010* (pp. 167–185). Universidad de Chile.
- McKenna, F., Fenves, G., & Scott, M. H. (2000). *Open system for earthquake engineering simulation*. Pacific earthquake engineering research center. University of California, Berkeley, CA.
- 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. In *IABSE Symposium on the Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-Defined Repeated Loads*.
- Morales, P. (2015). *Modelación de muros esbeltos con aberturas centrales a través de un análisis no lineal y su impacto en el comportamiento estructural*. Universidad de Chile.
- Mosoarca, M. (2013). Seismic behaviour of reinforced concrete shear walls with regular and staggered openings after the strong earthquakes between 2009 and 2011. *Engineering Failure Analysis*.
- Mosoarca, M. (2014). Failure analysis of RC shear walls with staggered openings under seismic loads. *Engineering Failure Analysis*.
- Muñoz, G., Rivas, J., Massone, L., Rojas, F., & Herrera, R. (2017). Experimental response of RC walls with openings under cyclic loading. *16th World Conference on Earthquake*.
- Palermo, D., & Vecchio, F. (2003). Compression field modeling of reinforced concrete subjected to reversed loading: formulation. *ACI Structural Journal*.
- Peña, E. (2016). *Implementación del programa de elementos finitos "SafePy" para análisis*

no lineal dinámico con factor de convergencia de carga. Universidad de Chile.

- Rivas, J. (2016). *Construcción y ensayo de probetas de hormigón armado con discontinuidades centrales en la base*. Universidad de Chile.
- Rojas, F. (2012). *Development of a nonlinear quadrilateral layered membrane element with drilling degrees of freedom and a nonlinear quadrilateral thin flat layered shell element for the modeling of reinforced concrete walls*. University of Southern California.
- Saatcioglu, M., & Razvi, S. (1992). Strength and ductility of confined concrete. *Journal of Structural Engineering*.
- Slominski, C., Niedostatkiewicz, M., & Tejchman, J. (2006). Deformation measurements in granular bodies using a particle image velocimetry technique. *Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 53(1), 71–94. [https://doi.org/ISSN 1231-3726](https://doi.org/ISSN%201231-3726)
- Taylor, C., Cote, P., & Wallace, J. (1998). Design of Slender Reinforced Concrete Walls with Openings.
- The MathWorks Inc. (1994). Matlab. Retrieved from <https://www.mathworks.com/products/matlab>
- Thomsen, J., & Wallace, J. (1995). Displacement-Based design of reinforced concrete structural walls: An experimental investigation of walls with rectangular and T-shapes cross section.
- Thorenfeldt, E., Tomaszewics, A., & Jensen, J. (1987). Mechanical properties of high strength concrete and application in design. *Proceedings of the Symposium on Utilization of High Strength Concrete*.
- Todut, C. (2014). Theoretical and experimental study on precast reinforced concrete wall panels subjected to shear force. *Engineering Structures*, 80, 323–338.
- Wang, J. (2012). Shear behaviour of reinforced concrete structural walls with eccentric openings under cyclic loading: experimental study. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, (July 2014), 421–439.

ANEXOS

ANEXO 1: PLANOS COMPLEMENTARIOS

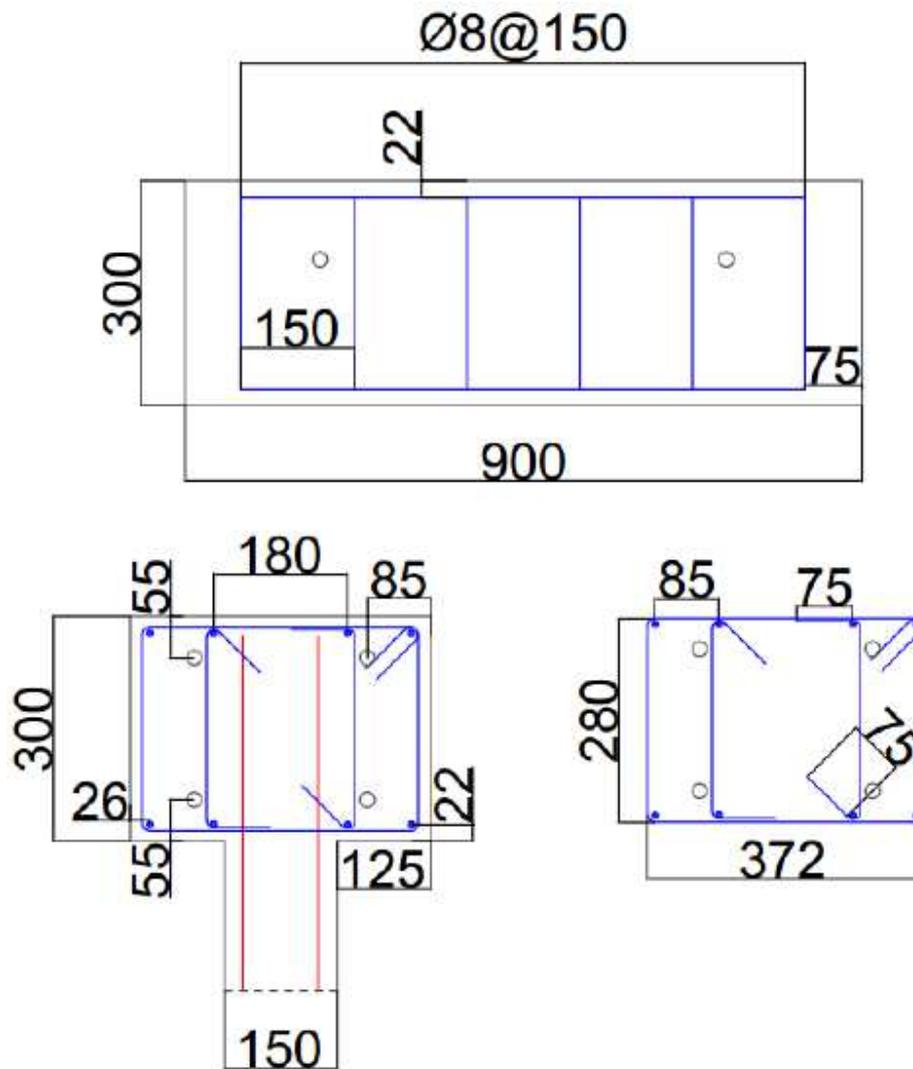


FIGURA A1.1: PLANOS VIGA DE TRANSFERENCIA. (ARRIBA VISTA LONGITUDINAL. ABAJO VISTA TRANSVERSAL Y DETALLE DE ENFIERRADURA).

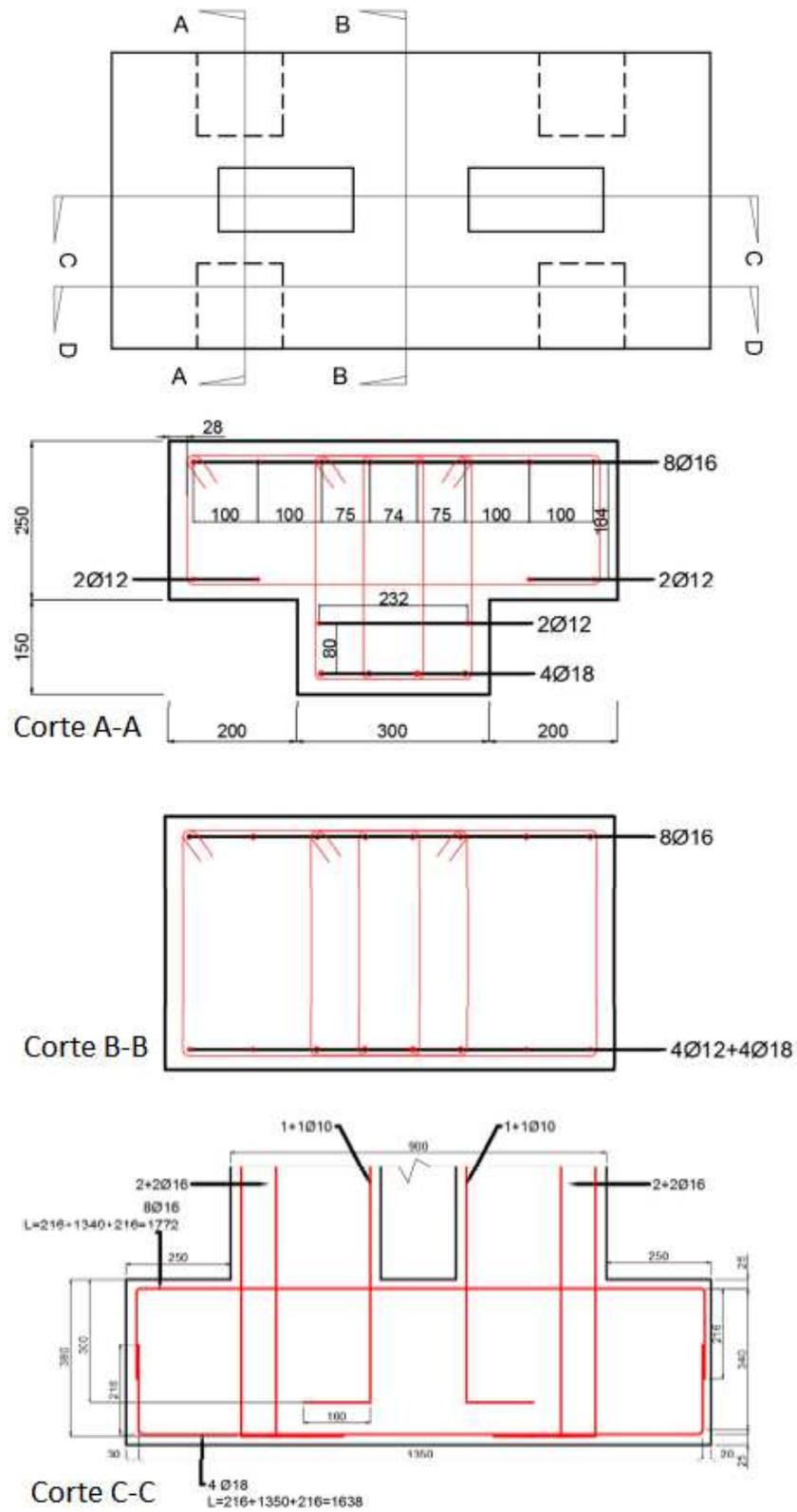


FIGURA A1.2: PLANOS FUNDACIÓN

ANEXO 2: CURVAS TENSIÓN DEFORMACIÓN DE BARRAS DE ACERO.

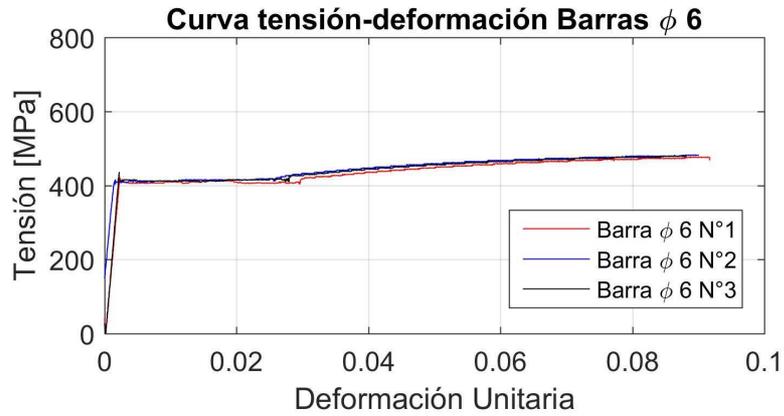


FIGURA A2.1: ENSAYO BARRAS DE 6 [MM].

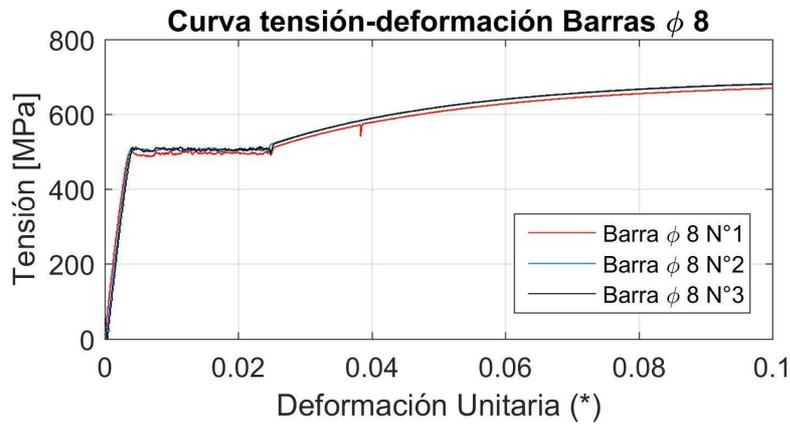


FIGURA A2.2: ENSAYO BARRAS DE 8 [MM]

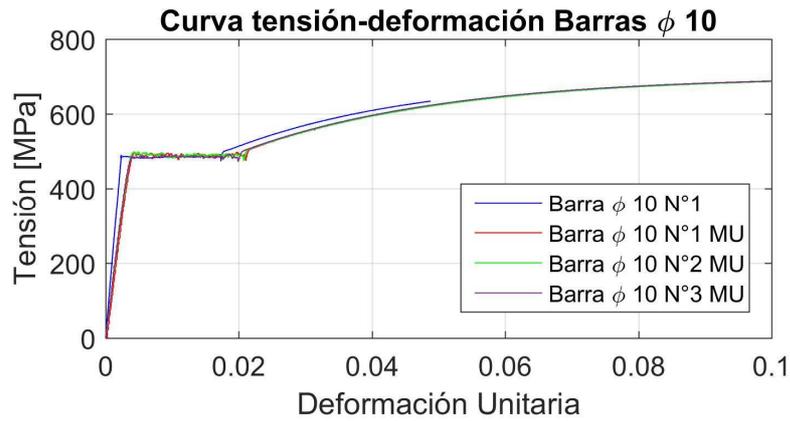


FIGURA A2.3: ENSAYO DE BARRAS DE 10 [MM].

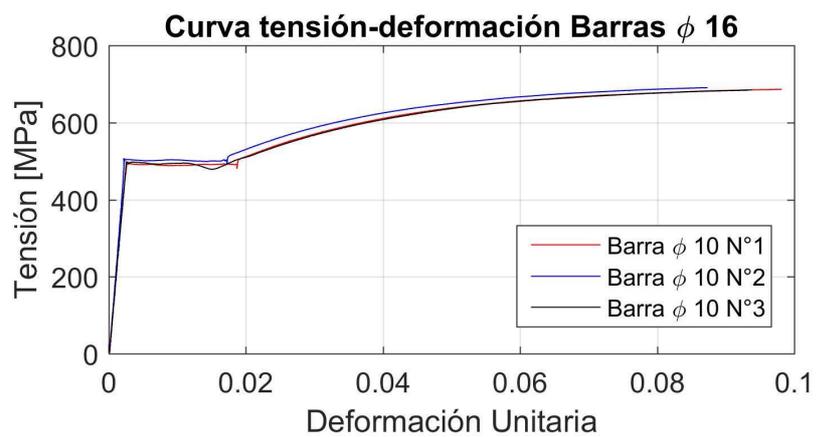


FIGURA A2.4: ENSAYO BARRAS DE 16 [MM].