



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

**ESTUDIO EXPERIMENTAL Y ANALÍTICO DE LA RESPUESTA DE
SISTEMAS DE MUROS RECTANGULARES DE HORMIGÓN ARMADO
ACOPLADOS CON VIGAS**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,
MENCION INGENIERÍA ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FRANCISCO ELÍAS BUSTOS PÉREZ

PROFESOR GUÍA:
FABIÁN ROJAS BARRALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ
WILMER JULIÁN CARRILLO LEÓN

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

SANTIAGO DE CHILE

2023

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN
INGENIERÍA ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA
RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: FRANCISCO ELÍAS BUSTOS PÉREZ
FECHA: 2023
PROF. GUÍA: FABIÁN ROJAS BARRALES

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y ANALÍTICO DE LA RESPUESTA DE SISTEMAS DE MUROS RECTANGULARES DE HORMIGÓN ARMADO ACOPLADOS CON VIGAS

Chile es un país altamente sísmico, lo cual ha implicado tener que desarrollar diseños estructurales y construcciones que sean capaces de adaptarse a dicha condición. Bajo esta premisa, los sistemas de muros de hormigón armado acoplados con vigas son ampliamente utilizados para resistir demandas sísmicas, por lo que estudiar su funcionamiento es de sumo interés para comprender la respuesta no lineal de las estructuras de nuestro país, los cuales se presentan principalmente en edificios altos, tanto de uso habitacional como de oficinas.

Esta investigación presenta un estudio analítico y experimental para comprender el comportamiento y la respuesta cíclica no lineal de muros estructurales rectangulares de hormigón armado acoplados por vigas. Para el estudio experimental, se analizaron los resultados del ensayo de una probeta compuesta por dos muros esbeltos conectados con dos vigas de acople, construidos a escala 1:3, e instrumentados con sensores de desplazamiento (LVDTs) y fotogrametría. En el estudio de la probeta, el muro de mayor rigidez fue sometido a un protocolo de desplazamientos horizontales cíclicos pseudo-estáticos de amplitud creciente y con carga vertical constante. Para el procesamiento de la data experimental obtenida mediante fotogrametría, se hace uso del software de código abierto *Ncorr* desarrollado en MATLAB, obteniendo los desplazamientos y deformaciones en los elementos de la probeta durante el ensayo. Por otro lado, para el estudio analítico, se desarrolla un modelo numérico en la herramienta de elementos finitos SAFE-Toolbox, utilizando elementos del tipo *Shell*.

Para alcanzar derivas nominales del 3 % y -3 % se aplicó una carga lateral sobre el muro de mayor rigidez de 42.82 [tonf] y -38.08 [tonf] respectivamente, reflejando un comportamiento asimétrico de la probeta en términos de capacidad. Adicionalmente, se determinó que la probeta posee un grado de acoplamiento intermedio, cercano al 40 %. En particular, los perfiles de deformaciones unitarias en la base de los muros evidenciaron que, para derivas positivas, el grado de acoplamiento del sistema es mayor que para derivas negativas. Además, se identificó fisuramiento del hormigón a partir del 0.3 % de deriva, y posteriormente, en el primer ciclo del 2.50 %, pandeo global en la base del muro en que se aplicó la carga, y en el segundo ciclo del 3.0 % fractura como modo de falla de las barras de refuerzo de borde del muro cargado axialmente en su nivel basal. También, se observó falla diagonal en las vigas de acople, evidenciando control de esfuerzos a cortante en dichos elementos. El modelo analítico realizado representa adecuadamente la respuesta experimental, capacidad y distribución de deformaciones, disminución de rigidez y magnitud de desplazamientos de la probeta.

*A mi padre,
que vive en mis acciones.*

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi familia, por haberme acompañado durante todo este largo camino de formación profesional desde mi niñez hasta la actualidad. A mis padres, Max y Aurora, por haberme entregado siempre lo mejor para poder desarrollarme como persona, por las infinitas horas de conversaciones para guiarme cuando estaba perdido, y por entregarme tanto amor. A mis 3 hermanos, Max, Jacob y Nicolás, y 2 hermanas, Natalia y Aurora, por haberme enseñado tanto a través del ejemplo y por siempre guiarme como hermano menor. Los amo mucho.

Estoy agradecido de las infinitas amistades y personas que conocí a lo largo de mi etapa escolar y universitaria de pre y postgrado. No puedo nombrarlos a todos porque estos agradecimientos serían interminables y tampoco quiero que se me escape alguno. Gracias a mis compañeros de la media con quienes aprendí de códigos de amistad y de vida, a mis amigos y compañeros de la U con quienes pude descubrir la pasión por la ingeniería estructural y sísmica, pero también pude aprender lo que es la amistad incondicional. Agradezco también a los profesores y auxiliares que tuve en mi etapa universitaria, todos increíbles, que me ayudaron a fundar los conocimientos necesarios para desempeñarme como profesional.

Quiero agradecer al Team Muros Acoplados; Betza, Nico, César, Coni y Jerko, por las incontables horas en el laboratorio, las cuales se extendían por más horas de las que queríamos día a día (y noche también) para poder sacar adelante los ensayos experimentales. El esfuerzo mental y físico que pusimos es impagable. Admiro a cada uno de ustedes por su total entrega y aporte a los estudios, pero también por su honestidad y esfuerzo, siempre buscando el bien común. Pude encontrar en ustedes grandes amistades que llevaré siempre.

Agradezco al Team Hospitales de IDIEM, quienes en este último medio año se han convertido en gente muy especial para mí, he podido encontrar un lugar de trabajo buenísimo, en el cual aprendo un montón día a día en los distintos proyectos que trabajamos. Gracias por haberme integrado tan bien en el equipo de trabajo desde el primer día, depositando muchísima confianza en mí.

También quiero agradecer a mi profesor guía, Fabián Rojas, por tantas horas de reuniones para resolver detalles y consultas, y de acompañamiento en este proceso de investigación. Su entrega siempre fue total. Gracias también al profe Pedro Soto, por toda la ayuda que entregó en la etapa experimental de esta investigación, sin sus infinitos conocimientos esto no hubiera sido posible.

Gracias.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivos	3
1.3. Hipótesis	3
1.4. Estructura de la Tesis	4
2. Antecedentes de Estudio	5
2.1. Muros Acoplados de Hormigón Armado en Chile	5
2.2. Vigas de Acoplamiento	7
2.3. Grado de Acoplamiento	10
2.4. Rótula Plástica	11
3. Probeta de Ensayo	14
3.1. Descripción de la Probeta	14
3.2. Geometría	15
3.3. Armadura	16
3.4. Caracterización de los Materiales	18
3.4.1. Acero	19
3.4.2. Hormigón	21
4. Montaje y Metodología Experimental	24
4.1. Laboratorio de Estructuras	24
4.2. Enfierradura y Traslado de la Probeta	25
4.3. Correcciones de Enfierradura y Moldaje	26
4.4. Hormigonado	29
4.5. Postensado de Barras	31
4.6. Elementos del Ensayo	32
4.6.1. Actuador (Carga Lateral)	32
4.6.2. Gatos Hidráulicos, Celda de Carga y Bomba Hidráulica	34
4.6.3. Sistema de Carga Axial	36
4.6.4. Marco de Acero y Montaje Completo	37
4.7. Instrumentación	40
5. Fotogrametría	42
5.1. Preparación de la Probeta	42
5.2. Cámaras y Distribución	43
5.3. Software <i>Ncorr</i>	50
5.4. Precisión de las Mediciones Realizadas	53

5.5. Corrección de las Mediciones Realizadas	56
6. Resultados Experimentales	58
6.1. Respuesta Global	58
6.2. Correlación entre LVDTs y Fotogrametría	64
6.3. Evolución de Grietas y Daño en Muros	65
6.3.1. Derivas Positivas	66
6.3.2. Derivas Negativas	74
6.4. Desplazamiento Lateral en Altura	81
6.5. Deformación Basal de Muros	83
6.6. Perfiles de Deformación en Altura	85
6.7. Perfiles de Curvatura en Altura	87
6.8. Rótula Plástica	89
6.9. Desplazamiento por Corte y Flexión en Muros	90
6.10. Evolución de Grietas y Daño en Vigas de Acople	95
6.10.1. Derivas Positivas	95
6.10.2. Derivas Negativas	101
6.11. Deformación Axial en Vigas de Acople	109
6.12. Perfiles de Curvatura de Vigas de Acople	112
6.13. Desplazamiento por Corte y Flexión en Vigas de Acople	114
6.14. Comportamiento Fuera del Plano de la Probeta	116
7. Modelo Numérico	121
7.1. SAFE-Toolbox	121
7.1.1. Agrietamiento	122
7.1.2. Hormigón	122
7.1.3. Acero	126
7.2. Modelamiento y Mallado de la Probeta	128
8. Resultados Numéricos	131
8.1. Respuesta Global	131
8.2. Desplazamiento Lateral en Altura	136
8.3. Deformación Basal de Muros	138
8.4. Perfiles de Deformación en Altura	139
8.5. Perfiles de Curvatura en Altura	141
8.6. Rótula Plástica	143
8.7. Desplazamiento por Corte y Flexión en Muros	143
8.8. Deformación Axial en Vigas de Acople	147
8.9. Perfiles de Curvatura de Vigas de Acople	149
8.10. Desplazamiento por Corte y Flexión en Vigas de Acople	151
8.11. Análisis Paramétrico	152
8.11.1. Resultados del Análisis Paramétrico	155
9. Conclusiones	161
Bibliografía	163
Anexos	167

A.	Planimetría	167
B.	Ensayos a Tracción de Barras de Acero	172
C.	Resultados Adicionales Fotogrametría	175
D.	Resultados Adicionales Modelo Numérico	180
E.	Resultados Adicionales Variaciones Paramétricas del Modelo Numérico . . .	184
E.1.	Variación en Armadura Transversal en Vigas de Acople	184
E.2.	Incorporación de Armadura Diagonal en Vigas de Acople	188
E.3.	Incorporación de Carga Axial sobre MR2	192

Índice de Tablas

3.1.	Dimensiones por piso de cada muro de la probeta	15
3.2.	Detalle de Armadura por Sección de la Probeta	18
3.3.	Resultados Ensayos a Tracción de Barras de Acero	20
3.4.	Resultados Promedio de Ensayos a Tracción de Barras de Acero	21
3.5.	Resistencia a la compresión de las probetas cilíndricas ensayadas	23
3.6.	Valores promedio de resistencia a la compresión del hormigón por día	23
4.1.	Valores del Protocolo de Carga	34
5.1.	Altura de las cámaras	48
5.2.	Propiedades Cámaras	49
5.3.	Parámetros de Análisis Ncorr para todas las Cámaras	52
5.4.	Parámetros de Análisis utilizados en Ncorr por Cámara	52
5.5.	Error en el cálculo de deformación	53
5.6.	Error por procesamiento y montaje en desplazamientos	55
5.7.	Error por procesamiento y montaje en deformaciones	56
7.1.	Características de Secciones de Elementos Finitos del Modelo Numérico	129
8.1.	Variación de armadura transversal propuesta para vigas de acople	153
8.2.	Barras y Cuantías de Armadura de Refuerzo Diagonal Propuesta	153
8.3.	Siglas de cada caso estudiado en las variaciones paramétricas	155

Índice de Ilustraciones

2.1.	Muro cantiléver y muros acoplados [20]	6
2.2.	Edificio O'Higgins (Concepción) después del terremoto del Maule del 2010 [31]	6
2.3.	Modos de Falla en Muros de Hormigón Acoplados con Vigas [43]	7
2.4.	Ejemplos de armado de refuerzo de vigas de acople [13]	8
2.5.	Vigas de acople y comportamiento histerético [15]	9
2.6.	Esfuerzos en Muros Acoplados y Grado de Acoplamiento (DOC) [42]	10
2.7.	Perfil de deformación basal para diferentes grados de acoplamiento [8]	11
2.8.	Diagrama de Rótula Plástica [23]	12
3.1.	Partes de la Probeta de Estudio	15
3.2.	Dimensiones de la Probeta de Estudio	16
3.3.	Distribución de Armadura en la Probeta de Estudio	17
3.4.	Montaje Ensayo de Barras a Tracción	19
3.5.	Montaje de Barra de Acero en Máquina Universal con Extensómetro	20
3.6.	Moldes de probetas cilíndricas llenadas y selladas	21
3.7.	Probetas cilíndricas previo a ser ensayadas (14 [días])	22
3.8.	Ensayo probeta cilíndrica de hormigón a compresión	22
4.1.	Planta Laboratorio de Estructuras y Zona Utilizada [11]	24
4.2.	Enfierradura de la Probeta	25
4.3.	Transporte de la Probeta	25
4.4.	Correcciones Enfierradura [36]	26
4.5.	Enfierradura Probeta en su Posición Final	27
4.6.	Escotilla en Moldaje de Pedestal	28
4.7.	Moldaje de la Probeta y Tubos de PVC	28
4.8.	Camión con Hormigonera y Camión Bomba	29
4.9.	Hormigonado de la Probeta	29
4.10.	Camión con Hormigonera y Camión Bomba	30
4.11.	Hormigonado Manual y Vibrado de la Probeta	30
4.12.	Montaje Utilizado para Postensado de Barras	31
4.13.	Postensado en cada una de las barras del pedestal en la probeta. Vista en planta, valores en [tonf]	32
4.14.	Actuador	33
4.15.	Actuador anclado al Muro de Reacción	33
4.16.	Protocolo de Ensayo	34
4.17.	Gato Hidráulico	35
4.18.	Bomba Hidráulica	35
4.19.	Celda de Carga	36
4.20.	Sistema de Carga Axial	37
4.21.	Marco de Acero	38

4.22.	Izaje del Sistema de Carga Axial con el Marco de Acero	38
4.23.	Barras de Restricción Lateral y Carga Axial	39
4.24.	Montaje Experimental	39
4.25.	Hilos sin fin en la probeta	40
4.26.	Esquema LVDTs de control	41
5.1.	Cal Hidráulica	42
5.2.	Aspecto de la Probeta durante el pintado de puntos	43
5.3.	Foto capturada por Cámara Global	44
5.4.	Foto capturada por Cámara Local MR1	44
5.5.	Foto capturada por Cámara Local MR2	45
5.6.	Foto capturada por Cámara de Interacción 1	45
5.7.	Foto capturada por Cámara de Interacción 2	46
5.8.	Foto capturada por Cámara de Canto Izquierdo	46
5.9.	Foto capturada por Cámara de Canto Derecho	47
5.10.	Distribución de Cámaras	47
5.11.	Distancia entre Cámaras y Probeta. Vista en Planta.	48
5.12.	Laboratorio el día del ensayo	49
5.13.	Ejemplo de error por procesamiento y montaje en desplazamientos - Cámara Interacción 2	54
5.14.	Ejemplo de error por procesamiento y montaje en deformaciones - Cámara Interacción 2	55
5.15.	Esquema de corrección de desplazamientos de un punto arbitrario	57
6.1.	Registro de Carga Axial durante el ensayo	58
6.2.	Deriva de Techo Corregida - MR1	59
6.3.	Deriva de Techo Corregida - MR2	60
6.4.	Comparación Protocolo de Carga Nominal y Experimental	60
6.5.	Histéresis MR1 - Fotogrametría	61
6.6.	Histéresis MR2 - Fotogrametría	62
6.7.	Comparación Histéresis MR1 y MR2 - Fotogrametría	63
6.8.	Correlación Deriva MR1 entre LVDT y Fotogrametría	64
6.9.	Comparación Histéresis MR1 - LVDT y Fotogrametría	65
6.10.	Grietas Muros a 0.3 % Drift	66
6.11.	Grietas Muros a 0.4 % Drift	67
6.12.	Grietas Muros a 0.6 % Drift	68
6.13.	Grietas Muros a 0.9 % Drift	69
6.14.	Grietas Muros a 1.35 % Drift	70
6.15.	Grietas Muros a 2 % Drift	71
6.16.	Grietas Muros a 3 % Drift	72
6.17.	Barras de refuerzo cortadas producto del pandeo local	73
6.18.	Grietas Muros a -0.3 % Drift	74
6.19.	Grietas Muros a -0.4 % Drift	75
6.20.	Grietas Muros a -0.6 % Drift	76
6.21.	Grietas Muros a -0.9 % Drift	77
6.22.	Grietas Muros a -1.35 % Drift	78
6.23.	Grietas Muros a -2 % Drift	79
6.24.	Grietas Muros a -3 % Drift	80
6.25.	Desplazamiento Lateral en Altura - MR1	81

6.26.	Desplazamiento Lateral en Altura - MR2	82
6.27.	Perfiles de Deformación Basal	83
6.28.	Barra y Tuerca del postensado en la base del MR1	83
6.29.	Deformación vertical unitaria en esquinas inferiores traccionadas - MR1	84
6.30.	Deformación vertical unitaria en esquinas inferiores traccionadas - MR2	85
6.31.	Perfiles de Deformación en Altura en Bordes a Tracción - MR1	86
6.32.	Perfiles de Deformación en Altura en Bordes a Tracción - MR2	87
6.33.	Esquema de Curvatura Muros	88
6.34.	Perfiles de Curvatura en Altura - MR1	88
6.35.	Perfiles de Curvatura en Altura - MR2	89
6.36.	Rótula Plástica	90
6.37.	Diagrama de Desplazamientos de Modelo Flexural [25]	91
6.38.	Desplazamiento por Corte por Piso	92
6.39.	Comparación Desplazamiento por Corte, Flexión y Total por Piso - MR1	93
6.40.	Comparación Desplazamiento por Corte, Flexión y Total por Piso - MR2	94
6.41.	Grietas Vigas a 0.3 % Drift	95
6.42.	Grietas Vigas a 0.4 % Drift	96
6.43.	Grietas Vigas a 0.6 % Drift	97
6.44.	Grietas Vigas a 0.9 % Drift	98
6.45.	Grietas Vigas a 1.35 % Drift	99
6.46.	Grietas Vigas a 2 % Drift	100
6.47.	Grietas Vigas a 3 % Drift	101
6.48.	Grietas Vigas a -0.3 % Drift	102
6.49.	Grietas Vigas a -0.4 % Drift	103
6.50.	Grietas Vigas a -0.6 % Drift	104
6.51.	Grietas Vigas a -0.9 % Drift	105
6.52.	Grietas Vigas a -1.35 % Drift	106
6.53.	Grietas Vigas a -2 % Drift	107
6.54.	Grietas Vigas a -3 % Drift	108
6.55.	Estado Final de las Vigas de Acople al finalizar el ensayo	109
6.56.	Deformación Axial de la Viga Superior de Acople en su Fibra Superior	109
6.57.	Deformación Axial de la Viga Superior de Acople en su Fibra Inferior	110
6.58.	Deformación Axial de la Viga Inferior de Acople en su Fibra Superior	111
6.59.	Deformación Axial de la Viga Inferior de Acople en su Fibra Inferior	111
6.60.	Esquema de Curvatura Vigas de Acople	112
6.61.	Curvatura de la Viga Superior de Acople	113
6.62.	Curvatura de la Viga Inferior de Acople	113
6.63.	Diagrama de Desplazamientos de Modelo Flexural Modificado para Vigas	114
6.64.	Desplazamiento por Corte en Vigas de Acople	115
6.65.	Comparación Desplazamiento por Corte, Flexión y Total en Vigas de Acople	116
6.66.	Vista canto izquierdo antes del ensayo, a 3 % y -3 % de deriva	117
6.67.	Vista canto derecho antes del ensayo, a 3 % y -3 % de deriva	117
6.68.	Desplazamiento Fuera del Plano - Canto Izquierdo	118
6.69.	Zona Izquierda de la Base del MR1 vista desde el canto al finalizar el ensayo	118
6.70.	Desplazamiento Fuera del Plano - Canto Derecho	119
6.71.	Zona Derecha de la Base del MR2 vista desde el canto al finalizar el ensayo	119
6.72.	Barra de refuerzo en el borde inferior derecho del MR2 al finalizar el ensayo	120

7.1.	elementos finitos Tipo <i>Shell</i> [37]	122
7.2.	Distribución de tensiones en acero y hormigón de un elemento agrietado [33]	122
7.3.	Curva de tensión deformación del hormigón a compresión propuesta por Thorenfelt [44]	123
7.4.	Curva de tensión deformación del hormigón a tracción propuesta por Belarbi y Hsu [3]	123
7.5.	Curva del comportamiento histerético del hormigón [33]	124
7.6.	Modelo de reducción o amplificación de la capacidad del hormigón [11]	125
7.7.	Curva del comportamiento del hormigón confinado [39]	125
7.8.	Curva de tensión deformación del acero propuesta por Menegotto y Pinto [27]	127
7.9.	Mesh de la Probeta	130
8.1.	Histéresis MR1 Numérica vs Experimental	131
8.2.	Carga Axial en la Base	132
8.3.	Corte en la Base	133
8.4.	Porcentaje del Corte Basal Total en cada Muro de la Probeta	134
8.5.	Momento en la Base	135
8.6.	Grado de Acoplamiento	136
8.7.	Desplazamiento Lateral en Altura - MR1	137
8.8.	Desplazamiento Lateral en Altura - MR2	137
8.9.	Perfiles de Deformación Basal	138
8.10.	Perfiles de Deformación en Altura en Bordes a Tracción - MR1	139
8.11.	Perfiles de Deformación en Altura en Bordes a Tracción - MR2	140
8.12.	Perfiles de Curvatura en Altura - MR1	141
8.13.	Perfiles de Curvatura en Altura - MR2	142
8.14.	Rótula Plástica	143
8.15.	Desplazamiento por Corte por Piso	144
8.16.	Comparación Desplazamiento por Corte, Flexión y Total por Piso - MR1	145
8.17.	Comparación Desplazamiento por Corte, Flexión y Total por Piso - MR2	146
8.18.	Deformación Axial de la Viga Superior de Acople en su Fibra Superior	147
8.19.	Deformación Axial de la Viga Superior de Acople en su Fibra Inferior	148
8.20.	Deformación Axial de la Viga Inferior de Acople en su Fibra Superior	149
8.21.	Deformación Axial de la Viga Inferior de Acople en su Fibra Inferior	149
8.22.	Curvatura de la Viga Superior de Acople	150
8.23.	Curvatura de la Viga Inferior de Acople	150
8.24.	Desplazamiento por Corte en Vigas de Acople	151
8.25.	Comparación Desplazamiento por Corte, Flexión y Total en Vigas de Acople	152
8.26.	Esquema de conjuntos de barras diagonales propuestos	154
8.27.	Elementos modificados (verde y azul) para incorporar la armadura diagonal en vigas de acople	154
8.28.	Comparación de Capacidad a Carga Lateral de la Probeta por Caso, hasta 3% de deriva	156
8.29.	Comparación Pushovers Monotónicos por Caso	157
8.30.	Comparación de Porcentaje del Corte Basal Total en Cada Muro por Caso	158
8.31.	Comparación del Grado de Acoplamiento por Caso	159
8.32.	Comparación del Largo de Rótula Plástica por Caso	160
A.1.	Plano Muros de la Probeta CWB	167
A.2.	Plano Vigas de Acople de la Probeta CWB	168

A.3.	Plano Pedestal de la Probeta CWB	169
A.4.	Plano Vigas de Carga de la Probeta CWB	170
A.5.	Plano de Diagrama de Elementos y Diagrama de Carga de la Probeta CWB	171
B.1.	Ensayo a Tracción - Barras $\phi 6$	172
B.2.	Ensayo a Tracción - Barras $\phi 8$	172
B.3.	Ensayo a Tracción - Barras $\phi 10$	173
B.4.	Ensayo a Tracción - Barras $\phi 12$	173
B.5.	Ensayo a Tracción - Barras $\phi 16$	174
C.1.	Corrección Angular a Nivel de Techo - MR1	175
C.2.	Corrección Angular a Nivel de Techo - MR2	175
C.3.	Desplazamiento Lateral del Pedestal	176
C.4.	Desplazamientos por Corte Pisos MR1	177
C.5.	Desplazamientos por Corte Pisos MR2	178
C.6.	Desplazamientos por Corte Vigas	179
D.1.	Histéresis Model vs Fotogrametría	180
D.2.	Desplazamientos por Corte Pisos MR1	181
D.3.	Desplazamientos por Corte Pisos MR2	182
D.4.	Desplazamientos por Corte Vigas	183
E.1.	Histéresis MR1 con Variación en Armadura Transversal en Vigas de Acople	184
E.2.	Grado de Acoplamiento con Variación en Armadura Transversal en Vigas de Acople	185
E.3.	Deformación Axial en Viga de Acople Superior con Variación en Armadura Transversal	186
E.4.	Deformación Axial en Viga de Acople Inferior con Variación en Armadura Transversal	187
E.5.	Desp. Total, por Corte y Flexión en Vigas de Acople con Variación en Armadura Transversal	188
E.6.	Histéresis MR1 con Incorporación de Armadura Diagonal en Vigas de Acople	188
E.7.	Grado de Acoplamiento con Incorporación de Armadura Diagonal en Vigas de Acople	189
E.8.	Deformación Axial en Viga de Acople Superior con Incorporación de Armadura Diagonal	190
E.9.	Deformación Axial en Viga de Acople Inferior con Incorporación de Armadura Diagonal	191
E.10.	Desp. Total, por Corte y Flexión en Vigas de Acople con Incorporación de Armadura Diagonal	192
E.11.	Histéresis MR1 con Incorporación de Carga Axial sobre MR2	192
E.12.	Carga Axial Basal con Incorporación de Carga Axial sobre MR2	193
E.13.	Corte Basal con Incorporación de Carga Axial sobre MR2	193
E.14.	Momento Basal con Incorporación de Carga Axial sobre MR2	194
E.15.	Grado de Acoplamiento con Incorporación de Carga Axial sobre MR2	194
E.16.	Rótula Plástica con Incorporación de Carga Axial sobre MR2	195

Capítulo 1

Introducción

Nuestro país históricamente ha poseído una alta sismicidad, lo cual ha implicado tener que realizar diseños estructurales y construcciones que sean capaces de adaptarse a dicha condición, donde los sistemas de muros de hormigón han jugado un rol fundamental, siendo capaces de soportar cargas sísmicas satisfactoriamente. En particular para el caso de edificios habitacionales de gran altura, se tiene que una de las estructuraciones más comúnmente utilizadas corresponde a sistemas de muros rectangulares de hormigón armado acoplados con vigas. Dichos elementos de acoplamiento reciben los esfuerzos de corte y momento que son producidos en los muros, y a su vez transmiten dichos esfuerzos a otros muros estructurales del sistema.

Dado que actualmente los estudios se enfocan principalmente en ensayos de muros aislados y existen muy pocos estudios que tengan relación con sistemas de muros acoplados, surge la necesidad de realizar estudios que puedan ayudar a comprender de mejor forma el comportamiento de todos los elementos estructurales de dichos sistemas. En esta misma línea, es de sumo interés realizar estudios no lineales de dichos sistemas, ya que se ha prestado poca atención al análisis post fluencia de las enferraduras de acero y post fisuración del hormigón de losas, vigas y muros.

Considerando lo anterior, en este Trabajo de Tesis se busca realizar un estudio experimental y analítico de sistemas de muros rectangulares de hormigón armado acoplados con vigas. Para ello se diseña una probeta a escala que represente correctamente la tipología de sistemas de muros de hormigón armado en nuestro país, considerando geometrías, distribución de refuerzos y cuantías de acero.

Para la etapa experimental, se construye una probeta a escala de hormigón armado del sistema a estudiar, la cual es ensayada en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, con el fin de comprender su respuesta en el tiempo ante cargas cíclicas.

Para la etapa analítica, se genera un modelo de elementos finitos basado en elementos del tipo *Shell* de la probeta estudiada, a través de la herramienta SAFE Toolbox desarrollada por Rojas [37]. Dicho modelo es validado mediante la comparación con los resultados experimentales obtenidos previamente. Una vez que el modelo es validado, se busca estudiar el comportamiento cíclico de los sistemas de muros rectangulares de hormigón armado acoplados

con vigas realizando variaciones en las armaduras de refuerzo que poseen y sus características. Se espera poder obtener resultados y conclusiones que puedan servir de herramienta para mejorar la normativa de diseño y construcción actual en nuestro país.

1.1. Motivación

Chile es un país caracterizado por poseer históricamente una gran cantidad de eventos sísmicos de magnitud considerable, por lo que ha sido necesario desarrollar estructuras resilientes, que sean capaces de tener un buen desempeño sísmico, lo cual se ha obtenido a partir del diseño y construcción de sistemas estructurales de muros de hormigón armado. A modo de contextualización, durante el año 2021 el Centro Sismológico Nacional localizó casi 7500 sismos en el territorio nacional [7].

Bajo esta premisa, para las edificaciones en altura en nuestro país, como edificios habitacionales, se tiene que algunas de las estructuraciones más típicas se basan en sistemas de muros rectangulares de hormigón armado acoplados. Es por este motivo que es importante conocer su comportamiento, con el propósito de mejorar los diseños estructurales, apuntando más allá de simplemente evitar el colapso ante eventos sísmicos.

De esta forma, surge la necesidad de realizar estudios experimentales y numéricos de muros rectangulares de hormigón armado acoplados con vigas sometidos a cargas cíclicas, debido a que arquitectónicamente están muy presentes en nuestro país. Podemos afirmar que en general, la mayoría de los estudios realizados en nuestro país en esta materia son de muros aislados, los cuales no consideran el acoplamiento con otros elementos estructurales, principalmente considerando que las vigas y losas de acople funcionan a modo de fusible estructural de disipación de energía.

Dentro de este estudio es importante considerar las características típicas (tipología) de las edificaciones chilenas, es decir, sus dimensiones y características geométricas predominantes, cuantías, distribución de refuerzos y cargas de demandas sísmicas. Dichas características deben ser plasmadas en la probeta a utilizar en los ensayos experimentales y en los modelos numéricos no lineales de elementos finitos, con el fin de obtener resultados y conclusiones que puedan ser útiles como herramienta para generar recomendaciones respecto a la normativa de diseño y construcción de dichos sistemas estructurales en nuestro país.

Adicionalmente, cabe mencionar que este estudio permite realizar la validación de los modelos numéricos mencionados, es decir, de modelos no lineales de elementos finitos que intentan predecir la respuesta de sistemas de muros de hormigón armado acoplados, utilizando elementos del tipo *Shell*. Dicha validación se obtiene a través de la comparación con los datos experimentales obtenidos de la probeta a escala, la cual es ensayada en el Laboratorio de Estructuras ubicado en dependencias de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

1.2. Objetivos

Objetivo General

Estudiar la respuesta de un sistema de muros rectangulares acoplados con vigas considerando la influencia de las características geométricas y cuantías de acero en los elementos estructurales de acople, mediante el ensayo de una probeta de muros acoplados a escala y modelos analíticos de elementos finitos de dicho sistema.

Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica de distintos ensayos experimentales de sistemas de muros acoplados y de los parámetros relevantes para estudiar su comportamiento, considerando la tipología de sistemas de muros rectangulares acoplados con vigas en Chile.
- Realizar el diseño estructural (geometría y cuantía de acero) de la probeta de un sistema de muros acoplados a escala a ensayar en laboratorio, junto con supervisar su construcción (armado de enfierradura, moldaje, hormigonado, curado y desmoldaje).
- Ejecutar ensayos para la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales a utilizar en la construcción de la probeta de hormigón armado, junto con la ejecución del ensayo del sistema de muros rectangulares acoplados con vigas ante cargas axiales y cíclicas laterales, utilizando mediciones con sensores LVDT y fotogrametría para los desplazamientos y deformaciones.
- Recopilar y procesar los datos experimentales obtenidos, considerando desplazamientos, carga y deformación en el tiempo de la probeta de un sistema de muros acoplados de hormigón armado.
- Desarrollo de modelos de elementos finitos de la probeta de hormigón armado utilizada, con el fin de estudiar su respuesta.
- Efectuar una comparación entre los resultados experimentales y analíticos obtenidos para validar el modelo numérico.
- Estudiar, a través de modelos numéricos, la influencia de las variaciones de cuantías de acero y de cargas sobre el sistema en la respuesta cíclica de sistemas de muros acoplados.

1.3. Hipótesis

La respuesta (desplazamientos, deformaciones y tensiones) de un sistema de muros rectangulares de hormigón armado acoplados con vigas, junto a la influencia de las características geométricas y cuantías de acero en los elementos estructurales de acople de éste, puede ser estudiado a través de metodologías experimentales de una probeta a escala en el laboratorio, junto con el análisis numérico de un modelo de elementos finitos de dicho sistema.

1.4. Estructura de la Tesis

El presente Trabajo de Tesis se compone por 9 capítulos, los cuales son descritos a continuación:

1. **Introducción:** Se presenta la motivación y fundamentos del presente Trabajo de Tesis, su alcance y sus objetivos (generales y específicos).
2. **Antecedentes de Estudio:** Se muestran los antecedentes recopilados a partir de la literatura de trabajos similares o afines desarrollados anteriormente, los cuales serán utilizados como base para poder conocer qué parámetros de estudio son relevantes para la investigación para describir el comportamiento de la probeta, y cómo realizar la ejecución de los ensayos.
3. **Probeta de Ensayo:** Se detalla el diseño, geometría, cuantías de refuerzo y elementos de la probeta de estudio a ensayar. Adicionalmente, se presenta la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales utilizados.
4. **Montaje y Metodología Experimental:** Se describe el proceso constructivo de la probeta de estudio, junto con el detallamiento del montaje experimental realizado para su ensayo dentro del laboratorio. También, se describe la instrumentación utilizada durante el ensayo.
5. **Fotogrametría:** Se detalla el procedimiento utilizado para realizar mediciones con fotogrametría a la probeta durante el ensayo. Se describe también el procesamiento de datos posterior al ensayo.
6. **Resultados Experimentales:** Se presentan los resultados experimentales obtenidos tras ensayar la probeta, en términos de capacidad, ductilidad, perfiles de desplazamiento, deformación y curvatura.
7. **Modelo Numérico:** Se detalla la metodología y herramientas computacionales utilizadas para estudiar el comportamiento de la probeta a través de modelos de elementos finitos. Se presenta el modelamiento y las consideraciones utilizadas.
8. **Resultados Numéricos:** Se presentan los resultados obtenidos a través del modelamiento numérico de la probeta de estudio, comparándolos con los resultados experimentales. Adicionalmente, se presentan los resultados obtenidos al realizar variaciones paramétricas en el modelo.
9. **Conclusiones:** Se resumen y analizan los principales resultados experimentales y numéricos obtenidos. Se hace revisión de los objetivos del Trabajo de Tesis y se entregan comentarios respecto al trabajo desarrollado.

Capítulo 2

Antecedentes de Estudio

En este capítulo se exponen estudios y conceptos de otros autores utilizados para el desarrollo del presente Trabajo de Tesis.

2.1. Muros Acoplados de Hormigón Armado en Chile

Dentro de la práctica constructiva de nuestro país, se tiene que la estructuración de gran parte de las obras se basa en muros de hormigón armado. Esto se debe principalmente a que los sistemas basados en dichos elementos estructurales han demostrado tener, históricamente, un buen desempeño sísmico.

El buen funcionamiento de sistemas estructurales basados en muros de hormigón armado ha quedado evidenciado en las últimas décadas en nuestro país, considerando el período dado por el terremoto de 1985 y el terremoto del 2010. Se observó que, de casi 10.000 edificios construidos sobre 3 pisos en la zona central del país, menos del 1% sufrió daños irreparables y menos del 0.5% colapsaron o tuvieron que ser demolidos [19]. Si bien este porcentaje puede parecer bajo, su valor no está dentro de lo admitido por la normativa chilena. Esto produce la necesidad de generar estudios que permitan identificar las causas de los problemas estructurales observados para poder implementar soluciones.

Bajo este contexto, se tiene que, en edificios altos de hormigón armado en nuestro país, los sistemas estructurales de muros se encuentran conectados entre sí por distintos elementos de acople, los cuales imponen compatibilidad de deformaciones y transmisión de esfuerzos entre los muros de dichos sistemas estructurales. En particular, los muros acoplados de hormigón armado presentan mejor disipación de energía, ya que ella es distribuida en una mayor cantidad de zonas de la estructura, formando así rótulas plásticas en la base de los muros y en los bordes de los elementos de acople. Esto implica que un sistema de muros acoplados presenta un amortiguamiento viscoso equivalente mayor que el de muros aislados tipo cantiléver [35].

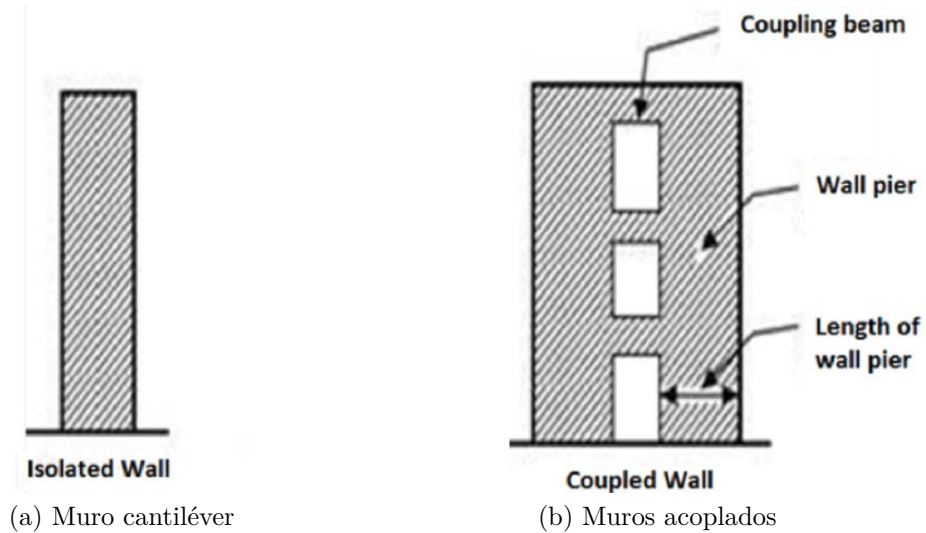


Figura 2.1: Muro cantiléver y muros acoplados [20]

Tanto en la edificación en altura para uso habitacional como de oficinas en Chile, se observa que la estructuración de las zonas interiores se basa en muros de hormigón acoplados con losas, mientras que en las zonas perimetrales y de balcones, la estructuración se basa en muros de hormigón acoplados con vigas. Estos últimos son el principal enfoque de esta investigación.



Figura 2.2: Edificio O'Higgins (Concepción) después del terremoto del Maule del 2010 [31]

Para el caso particular de un sistema de muros acoplados con vigas, se tiene que éste puede experimentar diferentes modos de falla en caso de una carga lateral. Según el estudio realizado por Subedi (1991) [43], podemos distinguir tres modos de falla (Figura 2.3):

- a) **Falla por flexión en las vigas:** Se produce en muros con vigas de acople bajas y con poca armadura longitudinal, donde se forman fisuras en la base del muro traccionado debido a flexión. En este caso, las vigas más cercanas a esta zona desarrollan fisuras de flexión en las juntas con los muros, que aumentan su longitud a medida que la carga lateral se incrementa y se propagan a las vigas superiores.

- b) **Falla por corte en las vigas:** Este modo de falla comienza de manera similar a la falla por flexión, pero a medida que la carga lateral aumenta, se observan fisuras diagonales en las vigas que comienzan cerca del centro de la viga y se propagan diagonalmente por el elemento. Este modo de falla se da en vigas más altas y de mayor refuerzo.
- c) **Falla con vigas con comportamiento rígido:** Se caracteriza por un elevado acoplamiento entre los muros y donde el muro más comprimido falla por aplastamiento, pero las vigas no se dañan mayormente debido a que son muy rígidas (y por ende no desarrollan toda su capacidad) y los muros actúan como si fuesen un muro aislado. En este caso, se desarrolla un gran número de fisuras a lo largo del muro traccionado.

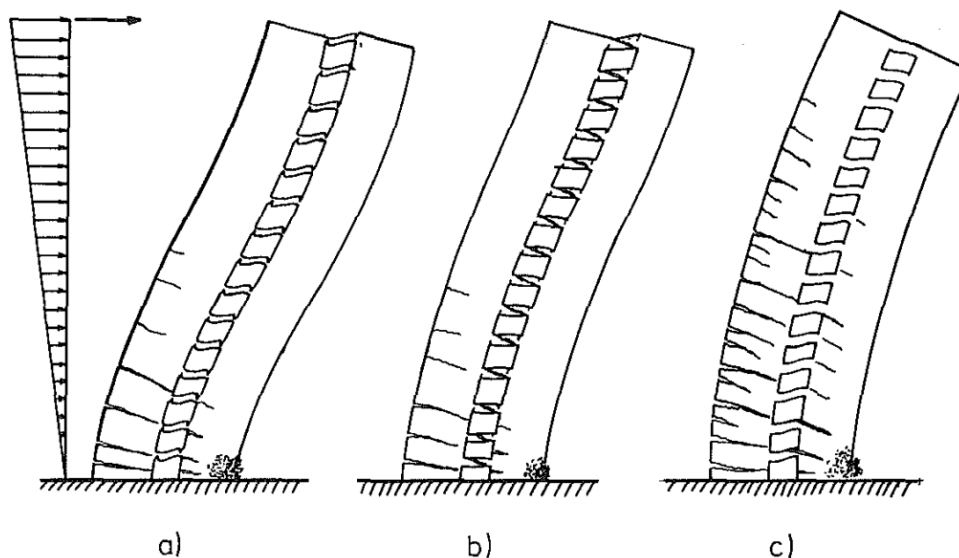


Figura 2.3: Modos de Falla en Muros de Hormigón Acoplados con Vigas [43]

Para estudiar los sistemas de muros de hormigón armado acoplados con vigas, es necesario comprender el funcionamiento de las vigas de acople y el grado de interacción entre los muros del sistema, cuantificado por el grado de acoplamiento. De esta forma, estos conceptos se revisan en las siguientes secciones del capítulo.

2.2. Vigas de Acoplamiento

Según Harries (2001) [14], para que el sistema de muros acoplados tenga un comportamiento óptimo, las vigas deben tener suficiente resistencia y rigidez, así como ductilidad y capacidad de absorción de energía adecuadas. También, deben fluir antes que los muros. El autor ha resumido varios estudios experimentales sobre vigas de acoplamiento y ha concluido que los niveles de ductilidad alcanzados por las vigas con refuerzo convencional están directamente relacionados con la relación de aspecto (L/h), donde las vigas más largas son más capaces de desarrollar juntas plásticas dúctiles debido a que el corte transmitido es proporcionalmente menor. Sin embargo, los niveles de ductilidad más altos se logran con vigas con refuerzo diagonal, independientemente de la relación de aspecto.

Respecto a las formas de distribuir la armadura de refuerzo en una viga de acople, podemos distinguir 3 principales tipos, según lo estudiado por Mohr (2007) [29]:

1. **Viga de acople reforzada de forma convencional:** Este refuerzo consiste en barras de acero longitudinales y transversales, que se disponen paralelas y perpendiculares a la dirección de la viga, respectivamente. El refuerzo transversal se encarga de resistir los esfuerzos cortantes, mientras que el refuerzo longitudinal resiste los esfuerzos de flexión.
2. **Viga de acople reforzada con barras diagonales:** Se utiliza para mejorar la ductilidad de la viga y se coloca adicionalmente y en la misma zona de la viga que el refuerzo convencional. Este refuerzo consiste en barras de acero que se disponen en ángulo con respecto a la dirección de la viga. El refuerzo diagonal se encarga de distribuir mejor los esfuerzos cortantes a lo largo de la viga, lo que aumenta su capacidad de deformación plástica y mejora su capacidad de disipar energía.
3. **Viga de acople reforzada con diagonales dobles:** El refuerzo doble diagonal es una variante del refuerzo diagonal, en la que se colocan dos capas de barras diagonales superpuestas ángulo con respecto a la dirección de la viga y además se utilizan estribos para cada par de barras. Este refuerzo se utiliza en vigas sometidas a cargas sísmicas importantes, donde se necesita mejorar aún más la ductilidad y la capacidad de disipación de energía de la viga.

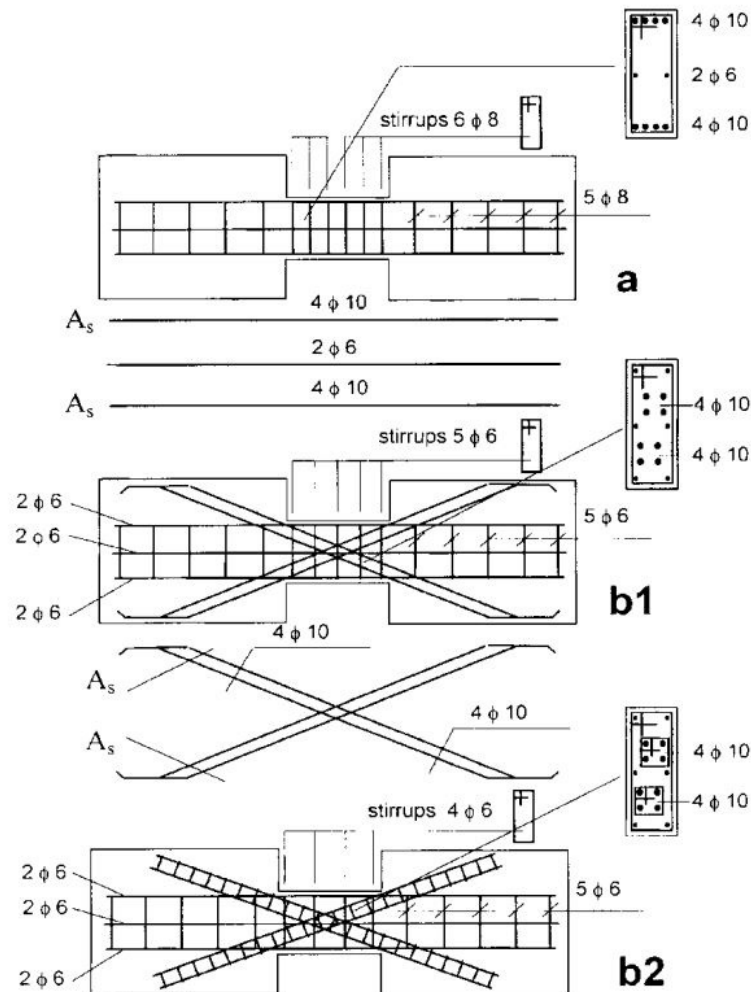


Figura 2.4: Ejemplos de armado de refuerzo de vigas de acople [13]

Según lo estudiado por Honarparast & Chaallal (2015) [15], se encontró que las vigas con refuerzo diagonal exhibían una histéresis más simétrica y uniforme, lo que indica un mejor comportamiento dúctil del sistema, en comparación con las vigas con refuerzo convencional (Figura 2.5).

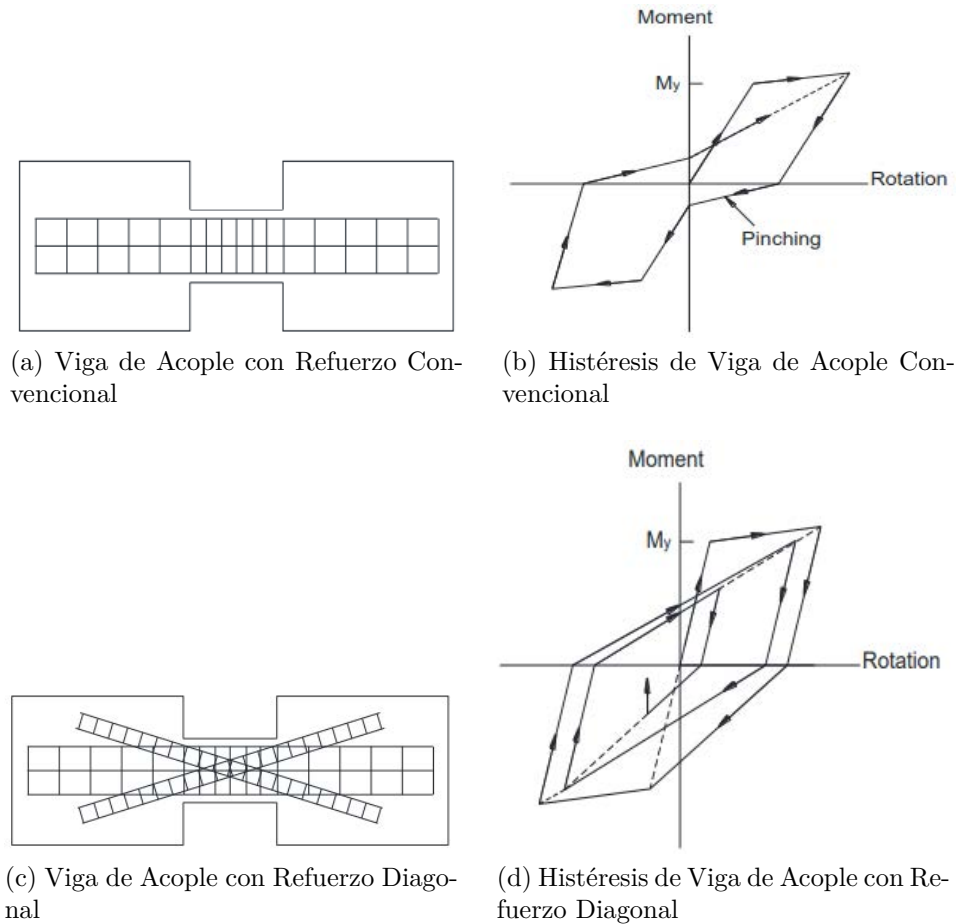


Figura 2.5: Vigas de acople y comportamiento histérico [15]

Kwan y Zhao (2002) [18] llevaron a cabo estudios experimentales enfocados en analizar el comportamiento de las vigas de acoplamiento mediante la realización de pruebas tanto monotónicas como cíclicas. En base a sus hallazgos, llegaron a la conclusión de que las vigas de acoplamiento con refuerzo diagonal presentan una mayor capacidad de disipación de energía en comparación con aquellas con refuerzo convencional. No obstante, la ductilidad en términos de desplazamiento resultó ser similar en ambos casos.

El diseño de las vigas de acople se rige en nuestro país por el DS N°60 [28], el cual a su vez dispone que los elementos y estructuras de hormigón armado se deberán diseñar y construir de acuerdo con los requisitos y exigencias establecidos en el ACI318-08 [1]. En dicha normativa, el diseño de las vigas de acople queda especificado en su capítulo 21.9.7. Allí se señala que el diseño de la armadura de refuerzo a disponer depende de la relación de aspecto de la viga (L/h). En particular, el refuerzo diagonal compuesto por dos grupos de barras es recomendado para vigas con relación de aspecto menores a 4 y se hace obligatorio para vigas de acople con relación de aspecto menor a 2.

2.3. Grado de Acoplamiento

Harries [14] establece que el grado de acoplamiento (Degree of Coupling, DOC) es una manera de medir la relación entre la rigidez de las vigas de acople y la rigidez de los muros de un sistema. La expresión utilizada para calcular el grado de acoplamiento se basa en la proporción de la resistencia al volcamiento generada por el acoplamiento versus la resistencia al volcamiento total del sistema. Dicha relación queda expresada en la siguiente ecuación:

$$DOC = \frac{N \cdot L}{M_{wall_1} + M_{wall_2} + N \cdot L} \quad (2.1)$$

Donde N corresponde a la carga axial basal de los muros (que es igual a la sumatoria de los cortes transmitidos por las vigas de acople), L es la distancia entre los centros de gravedad de los muros y M_{wall_1} y M_{wall_2} corresponden a los momentos basales de los muros.

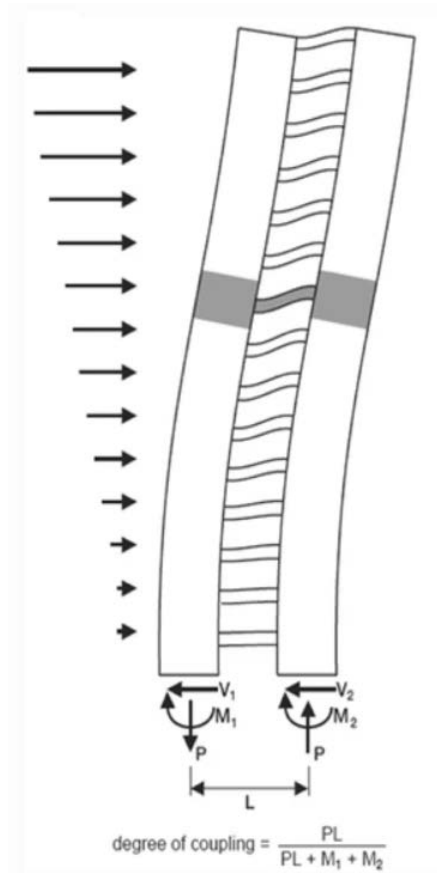


Figura 2.6: Esfuerzos en Muros Acoplados y Grado de Acoplamiento (DOC) [42]

Es importante tener en cuenta que un alto grado de acoplamiento puede mejorar la resistencia, pero va en contra del propósito fundamental de los muros acoplados, que es proporcionar una mayor capacidad de disipación de energía en comparación con un muro aislado. Por otro lado, un grado de acoplamiento muy bajo puede hacer que los muros funcionen de manera similar a dos muros aislados, lo que resulta en una menor resistencia global como sistema estructural [40].

Chaallal [8] categoriza las estructuras de muros de hormigón armado acoplados con vigas en tres tipos según su grado de acoplamiento, clasificándolos en: muros aislados conectados (bajo acoplamiento), muros de corte con acoplamiento efectivo y muros con aberturas (alto acoplamiento). En la Figura 2.7 se presenta el perfil de deformaciones en la base de los muros acoplados en función del grado de acoplamiento.

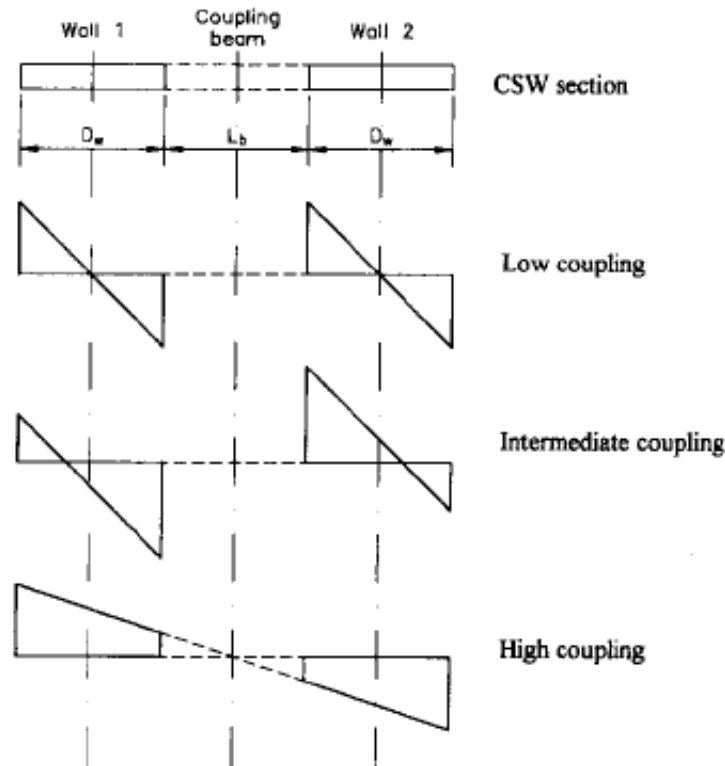


Figura 2.7: Perfil de deformación basal para diferentes grados de acoplamiento [8]

Se observa que los muros con bajo nivel de acoplamiento se comportan como dos muros independientes (aislados), mientras que los muros con un alto grado de acoplamiento se comportan como un muro aislado (cantiléver) con aberturas.

2.4. Rótula Plástica

La rótula plástica corresponde a un estado plástico que se produce en una sección de un elemento estructural debido a la aparición de deformaciones inelásticas en esa zona. Este parámetro, que se mide por su longitud o altura, es un parámetro esencial en el diseño estructural y se estudia de manera constante. Para el caso particular de muros de hormigón armado, se ubica generalmente en su base, y divide la región de deformaciones plásticas de la región de deformaciones elásticas en dicho elemento estructural.

Después del terremoto del 2010 ocurrido en el país, se propuso la ecuación 2.2 en el decreto DS N°60 [28] con el objetivo de limitar las deformaciones unitarias en la fibra más comprimida. Esta ecuación establece que cuando se alcanza el desplazamiento de diseño del edificio (δ_u), las deformaciones no deben superar los 0.008 [mm/mm]. Por lo tanto, para

cumplir con esta restricción, es necesario calcular o estimar la longitud de la rótula plástica.

$$\phi_u = \phi_y + \frac{(\delta_u - \delta_y)}{L_p(h_w - L_p/2)} \leq \frac{0.008}{c} \quad (2.2)$$

En la ecuación anterior, ϕ_u y ϕ_y representan las curvaturas últimas y de fluencia respectivamente, δ_u y δ_y representan los desplazamientos de diseño y de fluencia respectivamente, L_p corresponde a la altura de la rótula plástica, h_w corresponde a la altura del muro y c corresponde a la profundidad del eje neutro. Lo anterior queda representado en la Figura 2.8.

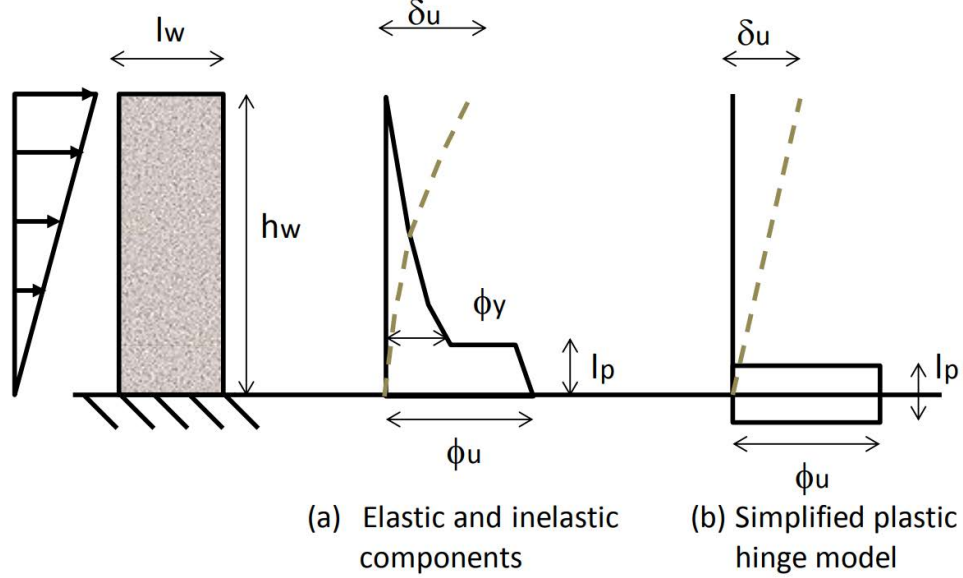


Figura 2.8: Diagrama de Rótula Plástica [23]

El largo de la rótula plástica se estima típicamente como la mitad de la distancia desde la base del muro hasta el punto donde la barra de refuerzo sometida a tracción alcanza la deformación de fluencia ($L_p = 0.5 \cdot L_p^*$) [24], que se puede visualizar mediante el esquema de la Figura 2.8. En este esquema, el rectángulo equivalente de curvaturas plásticas (b) se asemeja a una distribución lineal de curvatura sobre L_p^* , mostrado en (a), que generalmente se define como la primera fluencia vertical en la barra de refuerzo de la zona extrema del muro, donde se concentran las deformaciones por tracción.

Basándose en lo estudiado por Bohl [5], las estimaciones del largo de rótula plástica para derivas pequeñas no son precisas, ya que el muro aún no ha alcanzado la fluencia. Además, los perfiles de deformación se vuelven menos lineales con el aumento del drift. Asimismo, Bohl y Adebar [6] investigaron la distribución de curvatura en muros altos mediante elementos finitos y encontraron que el largo de rótula plástica L_p disminuye a medida que aumenta la carga axial a la que se encuentra sometido el muro. De esta forma, la ecuación 2.3 propuesta por Bohl y Adebar [6] para estimar L_p se basa en factores como el ancho del muro l_w , el alto del muro h_w , la carga axial a la que éste se encuentra sometido (P), la resistencia a la compresión del hormigón (f'_c) y el área bruta del hormigón (A_g).

$$L_p = (0.2l_w + 0.05h_w) \left(1 - \frac{1.5P}{f'_c A_g}\right) \leq 0.8l_w \quad (2.3)$$

Posteriormente, Massone y Alfaro [23] ampliaron la investigación anterior, considerando la variación de la rótula plástica en relación al desplazamiento del techo, ya que el estudio previo de Bohl y Adebar [6] se realizó para un valor de deriva fija, proporcionando así un valor fijo para la longitud de la rótula plástica. Los investigadores concluyen que la longitud aumenta con un mayor desplazamiento plástico, y proponen la ecuación 2.4 con $\Delta_p = \frac{\delta_u - \delta_y}{h_w}$, donde δ_u es el desplazamiento total del techo y δ_y es el desplazamiento en el cual comienza la fluencia del muro.

$$L_p = (0.2l_w + 0.05h_w) \left(1 - \frac{1.5P}{f'_c A_g} \right) (5.1\Delta_p^{0.3}) \quad (2.4)$$

Capítulo 3

Probeta de Ensayo

El presente Trabajo de Tesis contempla la construcción, ensayo, procesamiento de datos, análisis de resultados experimentales y modelamiento numérico de una probeta de hormigón armado.

Los muros de la probeta fueron diseñados por Valdivia, M. (2023) [45]. El diseño se basó en la tipología de muros acoplados en Chile, es decir, se busca generar un espécimen que sea representativo de los sistemas estructurales de muros con elementos de acople de hormigón armado de nuestro país. Posteriormente, el diseño de la probeta fue ajustado y terminado por Segura, N. (2023) [41], quien diseñó las vigas de acople.

El nombre adoptado para la probeta corresponde a “CWB” (del inglés Coupled With Beams, es decir, Acoplado con Vigas).

3.1. Descripción de la Probeta

La probeta de estudio corresponde a dos muros rectangulares de hormigón armado acoplados mediante vigas idénticas de hormigón armado, en escala 1:3. El detallamiento y diseño de los muros fue realizado considerando la normativa ACI318-08 [1] y el Decreto Supremo N°60 [28]. Respecto a los materiales, se considera hormigón G25 ($f'_c = 25$ [MPa]) y acero A630-420H ($f_y = 420$ [MPa] y $f_u = 630$ [MPa]).

Los muros rectangulares considerados en la probeta varían en tamaño y distribución de armadura. El muro más grande posee una relación de aspecto menor ($b/h=0.33$) y es denominado como MR1. El muro de menor tamaño posee una relación de aspecto mayor ($b/h=0.38$) y es denominado como MR2. Ambos muros poseen 3 pisos, los cuales varían en altura.

A nivel de techo del tercer piso de ambos muros se ubica una viga de carga. Sin embargo, experimentalmente solo se utiliza la viga de carga del muro de mayor rigidez (MR1). Dicha viga es diseñada con el propósito de transferir la carga axial que se aplica a la probeta durante el ensayo (cíclico, pseudo-estático, a desplazamiento controlado). Adicionalmente, en la viga de carga se conecta el actuador hidráulico encargado de desplazar lateralmente la probeta. Cabe mencionar que tanto la carga axial como lateral son aplicadas sobre el MR1 debido al ensayo de un muro aislado similar realizado en el trabajo de Díaz [11].

Los muros del sistema se encuentran empotrados sobre un pedestal de hormigón diseñado para trabajar en el rango lineal y elástico, el cual cumple la función de empotrarse a la losa del laboratorio de ensayo y de resistir las cargas transmitidas por los muros en su base. La Figura 3.1 esquematiza las partes de la probeta.

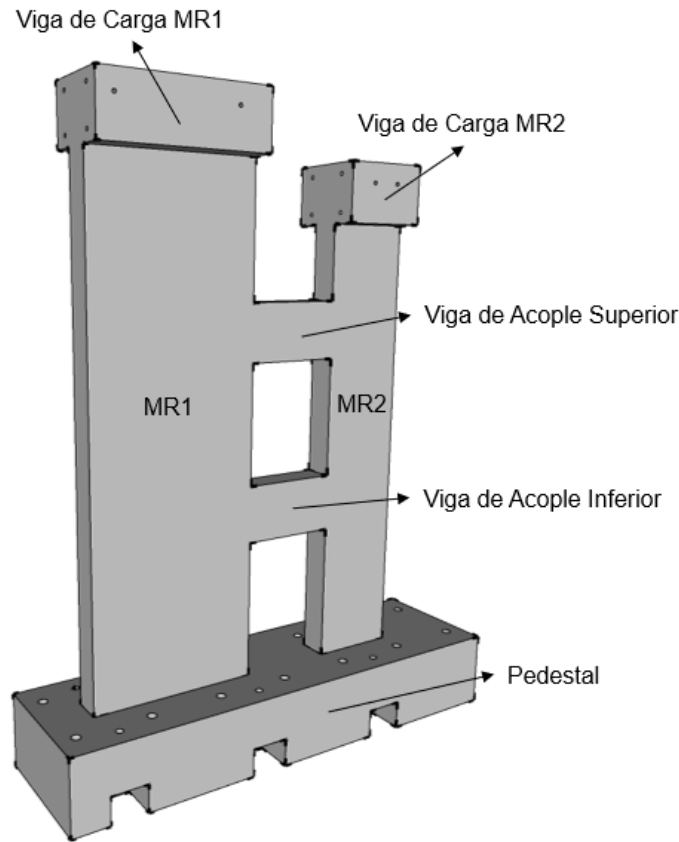


Figura 3.1: Partes de la Probeta de Estudio

3.2. Geometría

El propósito de esta sección es detallar la geometría de la probeta de estudio. Tal como se mencionó anteriormente, ambos muros de la probeta poseen 3 pisos. Sin embargo, éstos poseen alturas diferentes. Sus valores se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Dimensiones por piso de cada muro de la probeta

Muro	Piso	Altura [cm]	Ancho [cm]	Espesor [cm]
MR1	1	73	90	15
	2	63		
	3	69		
MR2	1	73	45	15
	2	63		
	3	39		

Por otro lado, las vigas de acople presentan dimensiones idénticas. Su largo es de 50 [cm], su altura es de 30 [cm] y su espesor es de 15 [cm].

Las vigas de carga presentes sobre cada uno de los muros son de 40 [cm] de espesor y 30 [cm] de alto. Su largo varía, siendo idéntico al ancho del muro sobre el que se encuentran, es decir, 90 [cm] para la viga de carga sobre el MR1 y 45 [cm] para la viga de carga sobre el MR2.

El pedestal ubicado en la base de la probeta es de 40 [cm] de alto, 260 [cm] de largo y 70 [cm] de ancho. De esta forma, las dimensiones de la probeta CWB se resumen en la Figura 3.2.

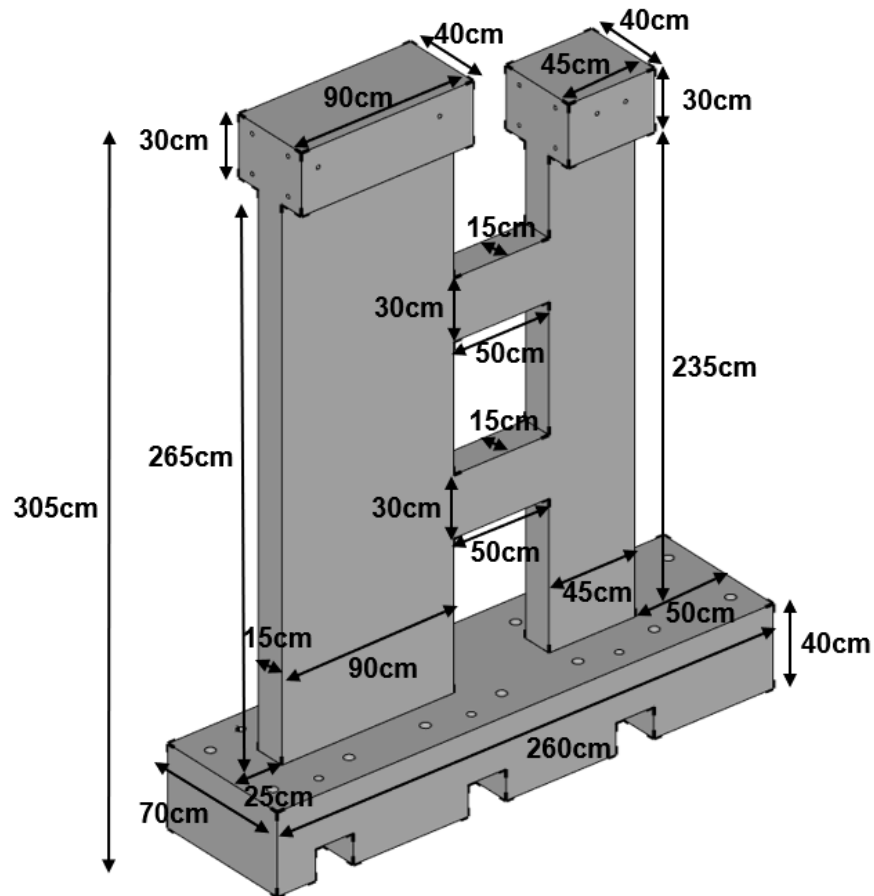


Figura 3.2: Dimensiones de la Probeta de Estudio

3.3. Armadura

En cuanto a la armadura dispuesta en la probeta, el muro grande (MR1) posee 4 barras longitudinales de diámetro $\phi 16$ en cada borde, mientras que el muro más pequeño (MR2) posee 4 barras longitudinales de diámetro $\phi 12$ en cada uno de sus bordes. Ambos muros son confinados desde su base hasta la altura de la viga de acople superior, mediante estribos $\phi 6$, espaciados entre sí cada 70 [cm] en el MR1 y cada 100 [cm] en el MR2. Los bordes de la zona superior de los muros, es decir, sobre la viga de acople superior hasta la altura de techo del

tercer piso, no se encuentra confinada.

Por otro lado, la armadura de refuerzo horizontal del MR1 corresponde a barras de diámetro $\phi 8$ espaciadas a 200 [mm] desde la base hasta la altura de la viga de acople superior y espaciadas a 100 [mm] desde dicha altura hasta el nivel superior del muro. La armadura de refuerzo vertical del MR1 consta de una doble malla de barras de diámetro $\phi 8$ con una separación de 200 [mm] y con trabas $\phi 8$.

El muro más pequeño (MR2) posee, como armadura de refuerzo horizontal, barras de diámetro $\phi 8$ espaciadas cada 100 [mm]. Su armadura longitudinal corresponde a 4 barras de diámetro $\phi 8$.

Las vigas de acople presentan un armado convencional para este tipo de elementos. En su dirección longitudinal, presentan 4 barras de diámetro $\phi 12$ (2 en el extremo superior y 2 en el extremo inferior) y 4 barras $\phi 8$ en su zona central. En cuanto a la armadura a corte (transversal), poseen estribos $\phi 8$ espaciados cada 60 [mm].

De esta forma, la Figura 3.3 esquematiza la distribución de armadura en cada zona de la probeta.

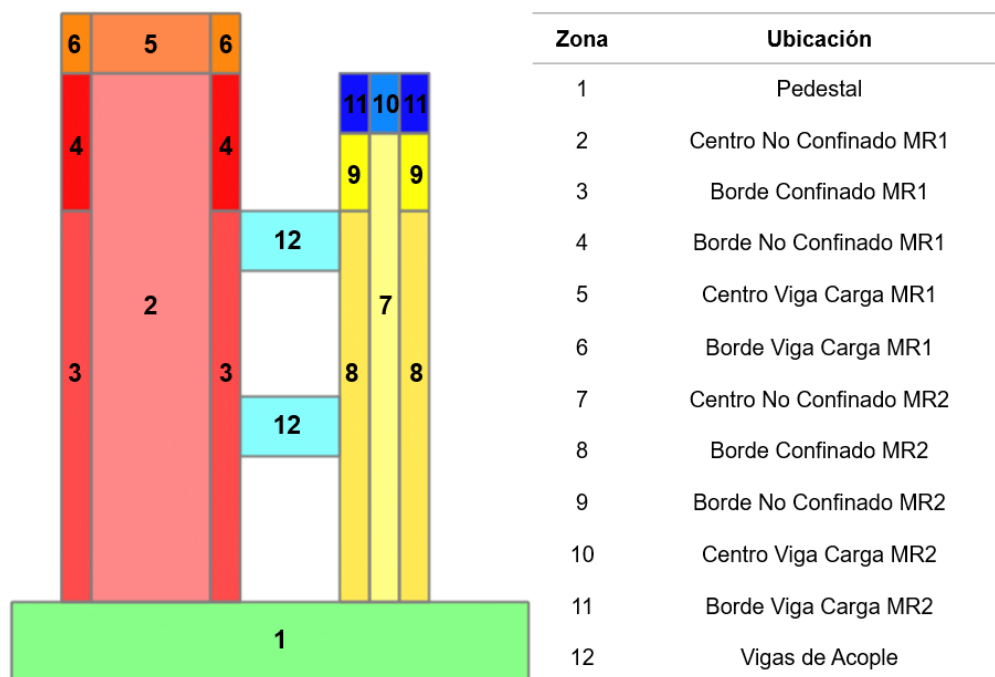


Figura 3.3: Distribución de Armadura en la Probeta de Estudio

Luego, la Tabla 3.2 resume la armadura dispuesta en cada una de las secciones de la probeta CWB.

Tabla 3.2: Detalle de Armadura por Sección de la Probeta

Sección	Refuerzo	Dirección	Armadura dispuesta	Cuantía ρ [%]
MR1	Armadura Central	Longitudinal	6 ϕ 8	0.32
		Transversal	DM ϕ 8@200 [mm]	0.34
	Borde Confinado	Longitudinal	4 ϕ 16	3.97
		Transversal	E ϕ 6@70 [mm]	0.87
	Borde No Confinado	Longitudinal	4 ϕ 16	3.97
		Transversal	DM ϕ 8@200 [mm]	0.34
Viga de Carga MR1	Armadura Central	Longitudinal	14 ϕ 8 + 28 ϕ 8	0.84
		Transversal	14 ϕ 8	0.59
	Borde No Confinado	Longitudinal	4 ϕ 16 + 4 ϕ 8	1.86
		Transversal	14 ϕ 8	0.59
MR2	Armadura Central	Longitudinal	4 ϕ 8	0.71
		Transversal	DM ϕ 8@100 [mm]	0.67
	Borde Confinado	Longitudinal	4 ϕ 12	2.32
		Transversal	E ϕ 6@100[mm]	1.05
	Borde No Confinado	Longitudinal	4 ϕ 12	2.32
		Transversal	DM ϕ 8@100 [mm]	0.67
Viga de Carga MR2	Armadura Central	Longitudinal	4 ϕ 8 + 4 ϕ 8	0.53
		Transversal	14 ϕ 8	0.59
	Borde No Confinado	Longitudinal	4 ϕ 16 + 8 ϕ 8	2.32
		Transversal	14 ϕ 8	0.59
Vigas de Acople	Armadura Distribuida	Longitudinal	4 ϕ 12 + 4 ϕ 8	1.45
	Armadura Distribuida	Transversal	ϕ 8@60[mm]	1.12
Pedestal	$f'_c = 45$ [MPa] y $E_c = 31529$ [MPa]			

El detalle de planimetría de armaduras de la probeta es presentado en la sección de Anexos A. de este Trabajo de Tesis.

3.4. Caracterización de los Materiales

Los materiales que componen a los elementos estructurales de la probeta de ensayo son hormigón y acero. En particular, el hormigón corresponde a un G25, es decir, posee una resistencia nominal a la compresión de $f'_c=25$ [MPa]. El acero de refuerzo corresponde a uno de grado A630-420H, es decir, posee una tensión de la fluencia de 420 [MPa] y una resistencia a la tracción (tensión máxima) de $f_u=630$ [MPa].

Ahora bien, con el propósito de conocer las propiedades mecánicas reales de los materiales utilizados en la construcción de la probeta, se realizan ensayos de compresión a cilindros del hormigón a utilizar y ensayos de tracción a las barras de acero de refuerzo asociadas.

Las propiedades mecánicas obtenidas son fundamentales en la etapa de modelamiento numérico de la probeta, para poder ajustar su comportamiento a la realidad de la forma más fidedigna posible.

Tanto los ensayos realizados al acero como al hormigón son realizados en una máquina hidráulica de ensayo universal de marca INSTRON®, modelo 600LX, la cual se encuentra en

el Laboratorio Francisco Domínguez del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

3.4.1. Acero

Las barras de acero que se utilizan en la construcción de la probeta son compradas a la empresa CAP Aceros S.A., y tal como se mencionó anteriormente, éstas poseen un grado A630-420H. Las barras de acero que se utilizan en los ensayos a tracción corresponden a muestras que son retiradas del mismo grupo de barras que se utilizan en la construcción de la probeta.

Para caracterizar el comportamiento del acero, se realizan ensayos a tracción de 3 barras de acero de cada uno de los diámetros utilizados en la confección de la probeta. Dichos diámetros corresponden a $\phi 16$, $\phi 12$, $\phi 10$, $\phi 8$ y $\phi 6$. Las barras a ensayar poseen un largo L_0 de 20 [cm] y son sometidas a una tasa de deformación de 3 [mm/min].

Adicionalmente, se midió el desplazamiento de las barras durante el ensayo a tracción a través de un extensómetro marca EPSILON®, modelo 3542. Éste se utiliza principalmente para medir la deformación de la barra en el rango lineal, ya que la barra puede tender a acomodarse entre las mordazas de la máquina universal. Una vez que el comportamiento de la barra incurre en el rango no lineal, el extensómetro es retirado. De esta forma se obtiene con mayor precisión el módulo de Young de las barras ensayadas a tracción. En las Figuras 3.4 y 3.5 se presenta el montaje del ensayo de las barras de refuerzo de acero.

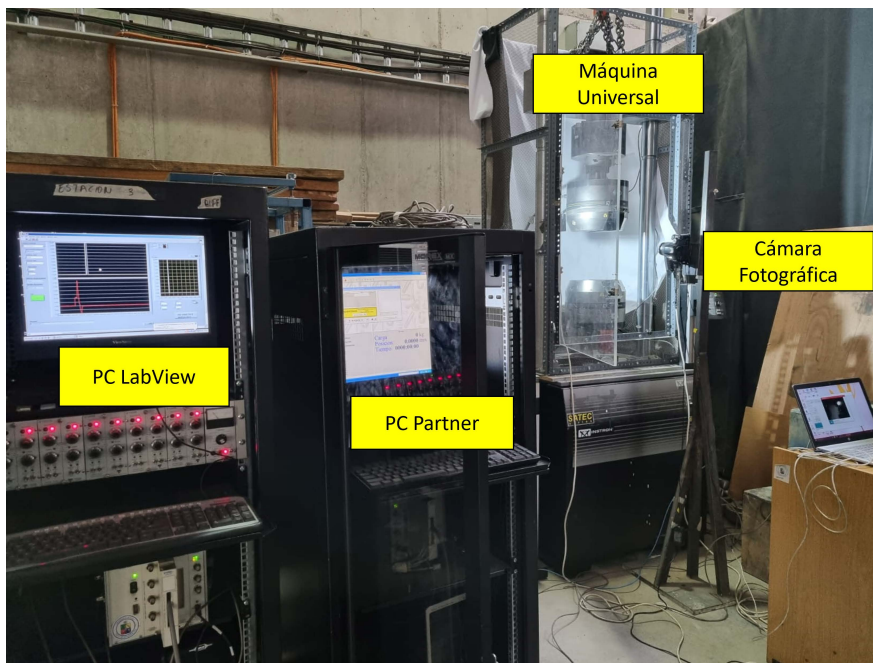


Figura 3.4: Montaje Ensayo de Barras a Tracción

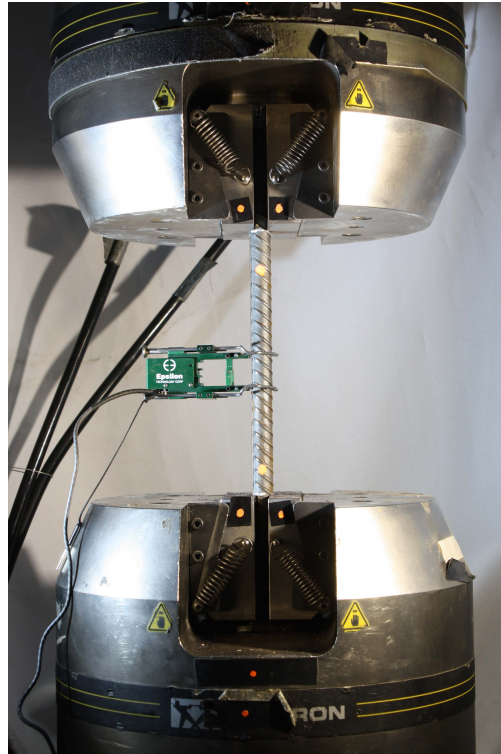


Figura 3.5: Montaje de Barra de Acero en Máquina Universal con Extensómetro

De esta forma, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Resultados Ensayos a Tracción de Barras de Acero

Díámetro	Ensayo	E [MPa]	f_y [MPa]	f_u [MPa]	f_u/f_y [-]	e_y [-]	e_u [-]	e_u/e_y [-]
$\phi 6$	1	260230	448	607	1.35	0.0016	0.154	96.3
	2	207870	488	638	1.31	0.0023	0.149	64.8
	3	223280	478	630	1.32	0.0020	0.167	83.5
$\phi 8$	1	181490	498	816	1.64	0.0027	0.104	38.5
	2	198370	485	821	1.69	0.0024	0.09	37.5
	3	202900	491	809	1.65	0.0024	0.078	32.5
$\phi 10$	1	186020	468	735	1.57	0.0025	0.145	58.0
	2	194820	455	737	1.62	0.0023	0.155	67.4
	3	194940	475	737	1.55	0.0024	0.156	65.0
$\phi 12$	1	183300	475	740	1.56	0.0026	0.123	47.3
	2	174820	472	750	1.59	0.0026	0.121	46.5
	3	190440	520	759	1.46	0.0027	0.126	46.7
$\phi 16$	1	145990	473	694	1.47	0.0032	0.215	67.2
	2	196450	474	700	1.48	0.0024	0.228	95.0
	3	187170	470	696	1.48	0.0025	0.204	81.6

Finalmente, los valores promedio obtenidos para cada diámetro de barra se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Resultados Promedio de Ensayos a Tracción de Barras de Acero

Diámetro	E [MPa]	fy [MPa]	fu [MPa]	fu/fy [-]	ey [-]	eu [-]	eu/ey [-]
$\phi 6$	230460	471	625	1.33	0.20	15.67	82
$\phi 8$	204213	491	815	1.66	0.25	9.07	36
$\phi 10$	201047	466	736	1.58	0.24	15.20	63
$\phi 12$	194253	489	750	1.54	0.26	12.33	47
$\phi 16$	195763	472	697	1.47	0.27	21.57	81

Los gráficos de las curvas de tensión-deformación obtenidos para cada una de las barras ensayadas se presentan en la sección de Anexos B. del presente Trabajo de Tesis.

3.4.2. Hormigón

Con el propósito de conocer la resistencia a la compresión del hormigón utilizado en la construcción de la probeta, durante el proceso de hormigonado de la misma, se extraen muestras cilíndricas de 10.5 [cm] de diámetro y 21 [cm] de altura. La extracción de las muestras de hormigón se realiza según lo especificado en la NCh1017Of.2019 [17] y son confeccionadas según la NCh171Of.2008 [16].



Figura 3.6: Moldes de probetas cilíndricas llenadas y selladas

Particularmente, se realizan ensayos a compresión de 4 probetas cilíndricas de hormigón a los 7 días, 14 días, 28 días y el día del ensayo de la probeta CWB.



Figura 3.7: Probetas cilíndricas previo a ser ensayadas (14 [días])

Los ensayos a compresión son realizados en la misma máquina universal anteriormente descrita para los ensayos a tracción de las barras de acero. Para los ensayos a compresión, se ubica cada probeta cilíndrica en un anillo metálico de compresión y se mide su deformación mediante el uso de LVDTs. Se utiliza una tasa de deformación de 3 [mm/min].



Figura 3.8: Ensayo probeta cilíndrica de hormigón a compresión

De esta forma, los resultados obtenidos de los ensayos a compresión de las probetas cilíndricas de hormigón se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Resistencia a la compresión de las probetas cilíndricas ensayadas

Tiempo [días]	Probeta Cilíndrica			
	f'_{c1} [MPa]	f'_{c2} [MPa]	f'_{c3} [MPa]	f'_{c4} [MPa]
7	27.83	27.17	28.8	23.71
14	33.62	31.82	31.68	31.89
28	28.51	32.58	31.35	31.97
Test Day CWB	38.51	33.11	34.05	37.38

Finalmente, los resultados promedio obtenidos se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Valores promedio de resistencia a la compresión del hormigón por día

Tiempo [días]	Resistencia a la compresión f'_c [MPa]
7	26.88
14	32.25
28	31.10
Test Day CWB	35.76

Capítulo 4

Montaje y Metodología Experimental

4.1. Laboratorio de Estructuras

Dentro de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile se encuentra el Laboratorio de Estructuras Arturo Arias, el cual posee características idóneas para llevar a cabo el desarrollo de ensayos como el presentado en este Trabajo de Tesis.

El laboratorio cuenta con un muro y una losa de reacción, los cuales poseen orificios equiespaciados a 40 [cm] (en forma de grilla), lo cual permite anclar probetas y equipos a los mismos. Adicionalmente, poseen el espesor suficiente para resistir grandes cargas y trabajar dentro del rango lineal. Cabe mencionar que existen zonas de la losa de reacción sin orificios debido a que bajo dichas zonas se encuentran los elementos estructurales que actúan como soporte de la misma.

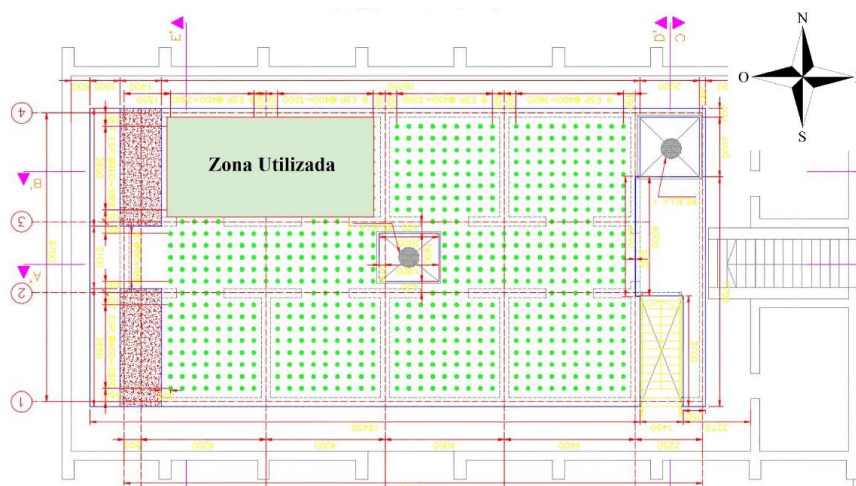


Figura 4.1: Planta Laboratorio de Estructuras y Zona Utilizada [11]

Los procesos de moldaje, hormigonado y posterior ensayo son realizados en este laboratorio.

4.2. Enfierradura y Traslado de la Probeta

El proceso de enfierrado de la armadura de la probeta de ensayo es realizado en dependencias de la sede Cerrillos del Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (IDIEM).

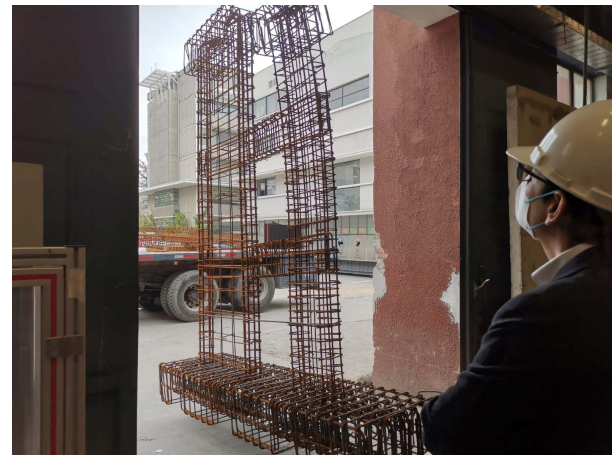


Figura 4.2: Enfierradura de la Probeta

Una vez finalizada la enfierradura, se procede a realizar el traslado de la misma hacia el Laboratorio de Estructuras. Allí, se realiza el posicionamiento final de la enfierradura de la probeta a ensayar.



(a) Traslado de la Probeta en Camión Pluma



(b) Ingreso de la Probeta al Laboratorio de Estructuras

Figura 4.3: Transporte de la Probeta

El traslado de la probeta es realizado en un camión pluma, y posteriormente es posicionado

en su ubicación final a través del puente grúa del Laboratorio de Estructuras, el cual posee una capacidad de 10 [tonf], lo cual es suficiente para sostener y mover la enfierradura.

4.3. Correcciones de Enfierradura y Moldaje

Una vez posicionada la enfierradura de la probeta, se procede a contrastar la distribución y espaciado de barras con los planos de armadura. En esta etapa se realizan todas las correcciones necesarias para ajustar la enfierradura, cortando y volviendo a amarrar las barras en sus posiciones correctas en caso de ser necesario, debido al movimiento de la armadura durante el transporte de ésta.



Figura 4.4: Correcciones Enfierradura [36]

Adicionalmente, se realiza la limpieza de la enfierradura con el propósito de eliminar la capa de óxido generada por las condiciones ambientales a la que estuvo sometida en la sede de Cerrillos de IDIEM.



Figura 4.5: Enfierradura Probeta en su Posición Final

Con la enfierradura lista, se procede a confeccionar el moldaje de madera de la probeta. Cabe mencionar que en el moldaje se proyecta dejar trozos de madera que sean removibles temporalmente (a modo de “escotilla”) en vigas y pedestal para poder realizar el proceso de vibrado a través de ellas en la posterior etapa de hormigonado.



Figura 4.6: Escotilla en Moldaje de Pedestal

Dentro del moldaje, se ubican tubos de PVC en el pedestal en las posiciones donde posteriormente se ubicarán las barras que anclarán la probeta a la losa de reacción (empotramiento). También se consideran tubos de PVC en la viga de carga del muro grande donde se ubicarán las barras para anclar el actuador a la probeta y la carga axial.



(a) Tubos de PVC en Pedestal de la Probeta



(b) Aspecto Final del Moldaje de la Probeta

Figura 4.7: Moldaje de la Probeta y Tubos de PVC

4.4. Hormigonado

Para el proceso de hormigonado se contrata a la empresa MELÓN, los cuales se encargan de suministrar el hormigón. Para este proceso la empresa dispone de un camión hormigonera (tipo “mixer”) y de un camión bomba para el bombeo del hormigón hacia el moldaje de la probeta.



(a) Camión con Hormigonera



(b) Camión de Bombeo

Figura 4.8: Camión con Hormigonera y Camión Bomba

El proceso de hormigonado se realiza con la probeta en posición vertical, es decir, en su posición definitiva de ensayo. El hormigonado es vertido de forma vertical desde la zona superior de la viga de carga a través de la manguera de la bomba. Adicionalmente, se incorpora hormigón de forma manual al moldaje a través de las aperturas tipo “escotilla” ubicadas en las zonas de pedestal y vigas.



Figura 4.9: Hormigonado de la Probeta

El hormigón suministrado por la empresa corresponde a un GB25(90)1312, es decir, hormigón de calidad G25 ($f'_c = 25$ [MPa]) a 90% de nivel de confianza, con un tamaño máximo de árido de 13 [mm] y 12 [cm] de asentamiento de cono. Sin perjuicio de lo anterior, en paralelo al proceso de hormigonado, se confeccionan probetas cilíndricas según lo dispuesto en la NCh1017Of.2009 [17] con el propósito de ensayarlas y obtener el valor de la resistencia máxima a la compresión del hormigón utilizado, cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.6. Adicionalmente, se lleva a cabo el ensayo de cono de Abrams del hormigón suministrado por la empresa MELÓN, con el fin de obtener su consistencia según lo establecido por la NCh1019Of.2009. En particular, se obtiene un asentamiento de cono de 16 [cm].

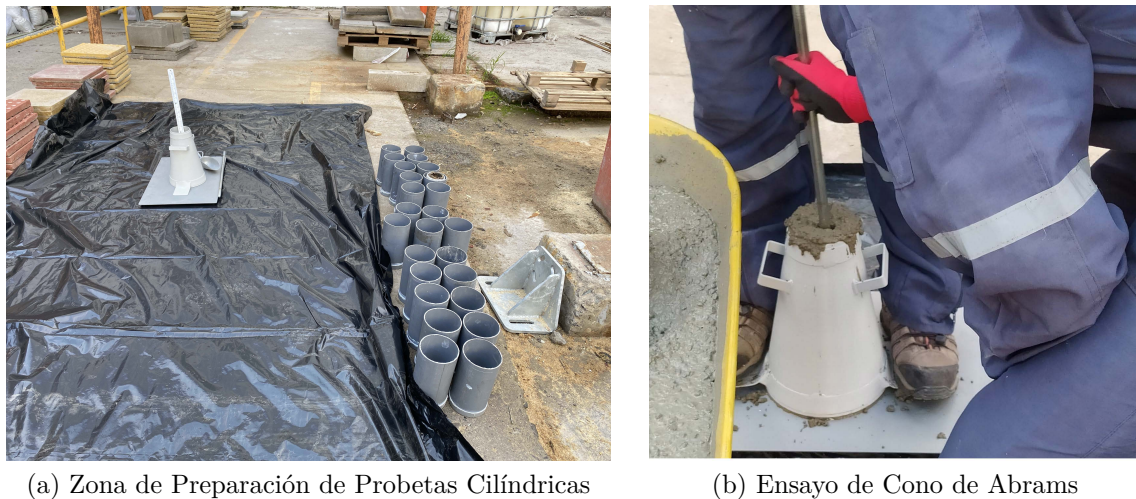


Figura 4.10: Camión con Hormigonera y Camión Bomba

Cabe mencionar que posterior al vertido de hormigón dentro del moldaje, se hace uso de vibrador en la probeta. Esto se realiza buscando reducir la generación de nidos de aire y de zonas sin hormigón.



Figura 4.11: Hormigonado Manual y Vibrado de la Probeta

4.5. Postensado de Barras

Una de las etapas más importantes del montaje experimental corresponde al postensado de las barras de acero (Dywidag® de diámetro 32 [mm]), ubicadas en el pedestal de la probeta. Este procedimiento se realiza con el objetivo de asegurar el anclaje entre la losa de reacción y la probeta, es decir, que exista empotramiento del pedestal. Esto implica la restricción de la rotación, del deslizamiento y del levantamiento de la probeta al momento del ensayo.

El proceso de postensado de las barras se realiza con una bomba hidráulica conectada a una celda de carga y un gato hidráulico, junto con una silla de acero, tuercas y múltiples placas de acero utilizadas como apoyo.



Figura 4.12: Montaje Utilizado para Postensado de Barras

En total se postensan 11 de las 12 barras de acero del pedestal, hasta alcanzar un valor aproximado de 15 [tonf] en cada una, produciendo así un postensado total en la base de la probeta de 165 [tonf]. En particular, se opta por no postensar una de las barras debido a que su largo no permitiría captar fotografías en la base del muro de menor tamaño (MR2) y el

postensado generado por todo el resto de las barras se considera suficiente para asegurar el empotramiento de la probeta a la losa de reacción.

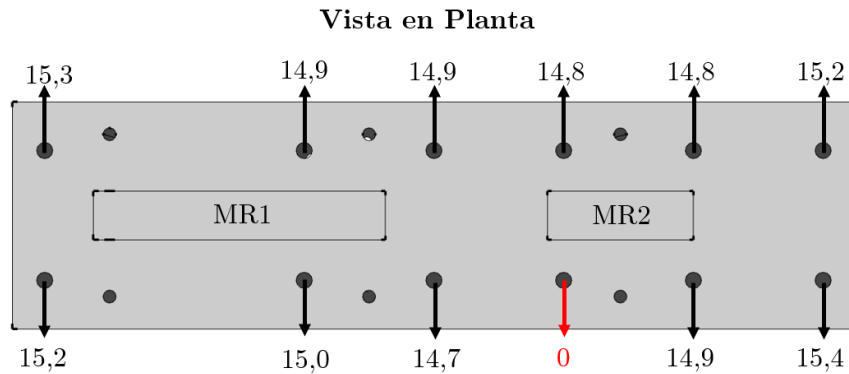


Figura 4.13: Postensado en cada una de las barras del pedestal en la probeta.
Vista en planta, valores en [tonf]

4.6. Elementos del Ensayo

A continuación se presentan los distintos elementos utilizados durante el montaje y el desarrollo del ensayo de la probeta.

4.6.1. Actuador (Carga Lateral)

El actuador corresponde a un gato hidráulico de grandes dimensiones que se ubica a una altura tal que coincida con el centro de la viga de carga del muro de mayor rigidez (MR1). Éste posee dos principales funciones en el ensayo de la probeta, las cuales son:

- Control del desplazamiento lateral de la probeta: El desplazamiento lateral a nivel de techo del muro grande (MR1) de la probeta es generado por la acción del actuador. Para este estudio, se aplica un protocolo cíclico pseudo-estático de desplazamiento. El control de desplazamientos se realiza a través de una bomba hidráulica conectada al actuador, la cual suministra aceite al actuador (a través de la regulación manual con una botonera) con el propósito de comprimir o traccionar su movimiento.
- Medición de la carga necesaria para alcanzar determinado nivel de desplazamiento (derivada): El actuador posee una celda de carga (marca Interface, modelo 1200HC.1244, cuya capacidad asciende a 1200 [kN]) la cual es capaz de monitorear durante el ensayo el valor de la carga lateral ejercida sobre la probeta.

Cabe mencionar que el actuador no posee un sistema de medición del desplazamiento lateral que induce sobre la probeta, por lo que sobre él se posiciona un transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT) para realizar dicha medición.



Figura 4.14: Actuador

El actuador es anclado al muro de reacción a través de pernos helicoidales de alta resistencia (Dywidag® de diámetro 32 [mm]), asegurando así que la rótula no presente rotación ni desplazamiento en ninguna dirección.



Figura 4.15: Actuador anclado al Muro de Reacción

Adicionalmente, el otro extremo del actuador se encuentra anclado a la probeta, fijando la rótula con pernos Dywidag® de diámetro 15 [mm].

El protocolo de ensayo de la probeta corresponde a desplazamientos cíclicos pseudo-estáticos, los cuales son impuestos a nivel de techo del muro grande (MR1). El carácter

cíclico del ensayo implica que, en este caso, se somete a la probeta 3 veces a un mismo nivel de deriva (tanto positiva como negativa) antes de proseguir con el siguiente valor de deriva.

Los valores de desplazamientos laterales de la probeta son definidos a partir de los criterios impuestos por el ACI 374.1-14, el cual busca estandarizar este tipo de ensayos a nivel nacional e internacional. En particular, se asegura la inclusión de al menos dos derivas en que el comportamiento del sistema esté dentro del rango lineal, para posteriormente aumentar gradualmente hasta la falla global de la probeta. De esta manera, el protocolo de desplazamiento se muestra a continuación:

Tabla 4.1: Valores del Protocolo de Carga

Deriva [%]	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.9	1.35	2	3
Desplazamiento [mm]	2.8	5.6	8.4	11.2	16.8	25.2	37.8	56.0	84.0

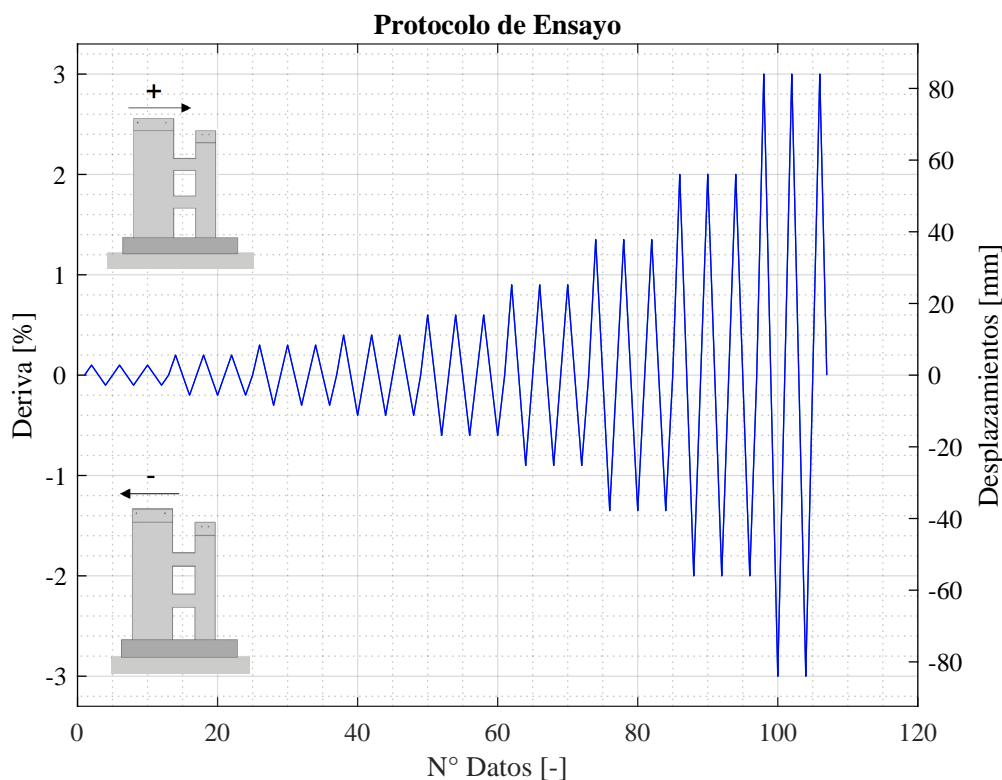


Figura 4.16: Protocolo de Ensayo

4.6.2. Gatos Hidráulicos, Celda de Carga y Bomba Hidráulica

En esta sección se incluye la descripción de los gatos hidráulicos, la celda de carga y la bomba hidráulica. Su descripción se realiza en un mismo apartado debido a que funcionan en conjunto.

Los gatos hidráulicos corresponden a cilindros con un interior hueco, los cuales poseen un émbolo capaz de, a través de presión, generar cargas de tracción o compresión de hasta 150

[tonf]. Durante el montaje experimental, son utilizados durante el postensado de las barras que anclan la probeta a la losa de reacción, mientras que durante la ejecución del ensayo, cumplen la función de generar la carga axial impuesta sobre el muro grande (MR1) de la probeta.



Figura 4.17: Gato Hidráulico

El sistema de control de los gatos hidráulicos es realizado a través de una bomba hidráulica, la cual se conecta a ellos a través de mangueras por las que fluye aceite. Dicha bomba posee la capacidad de controlar (con un panel táctil) de 1 a 4 gatos hidráulicos en paralelo.



Figura 4.18: Bomba Hidráulica

Ahora bien, para controlar el valor de la carga generada por un gato hidráulico, se hace

uso de una celda de carga. Este dispositivo corresponde a un cilindro de acero capaz de medir, a través de Strain Gages, un nivel de carga. La celda de carga es conectada a su vez a la bomba hidráulica, con el fin de poder monitorear y variar la carga del gato hidráulico hasta el valor deseado.



Figura 4.19: Celda de Carga

La celda de carga es utilizada en el montaje del ensayo para monitorear el valor del postensado sobre cada barra de acero del pedestal hasta alcanzar el valor deseado. Durante el ensayo, la celda de carga se utiliza para controlar el valor de la carga axial deseada que se impone sobre el muro grande de la probeta.

4.6.3. Sistema de Carga Axial

El sistema de carga axial se compone de un conjunto de perfiles de acero con agujeros y 4 gatos hidráulicos encargados de inducir carga axial a la probeta.

A través de los agujeros de los perfiles de acero, se ubican 4 barras de acero Dywidag® de diámetro 32 [mm], las cuales se disponen a lo largo de toda la altura de la probeta y se fijan al pedestal con placas y tuercas. Dichas barras de acero se encuentran fijadas a los gatos hidráulicos en su extremo superior y son tensadas con ellos, con el fin de generar la carga axial deseada en la probeta.

El control de la carga axial durante el ensayo se realiza a través de la bomba hidráulica conectada a los 4 gatos en paralelo y a una celda de carga que monitorea el valor de la tensión impuesta en las barras.



Figura 4.20: Sistema de Carga Axial

En particular, para este ensayo se impone una carga axial sobre la viga de carga del muro grande (MR1) con un valor de 40 [tonf], es decir, cada una de las 4 barras se encuentra tensada con un valor de 10 [tonf], que son transmitidos axialmente a la probeta. La carga axial que se utiliza corresponde a un 10 % de la capacidad a compresión de la probeta, es decir, $0.1A_g f'_c = 40$ [tonf].

4.6.4. Marco de Acero y Montaje Completo

El marco de acero corresponde a un conjunto de perfiles de acero, el cual puede ser trasladado debido a que cuenta con ruedas en cada una de sus columnas. Sus dimensiones son de 2.7[m]x2[m]x4.8[m]. Durante el montaje del ensayo, es utilizado para movilizar e izar el actuador y la carga axial a través de teclas.

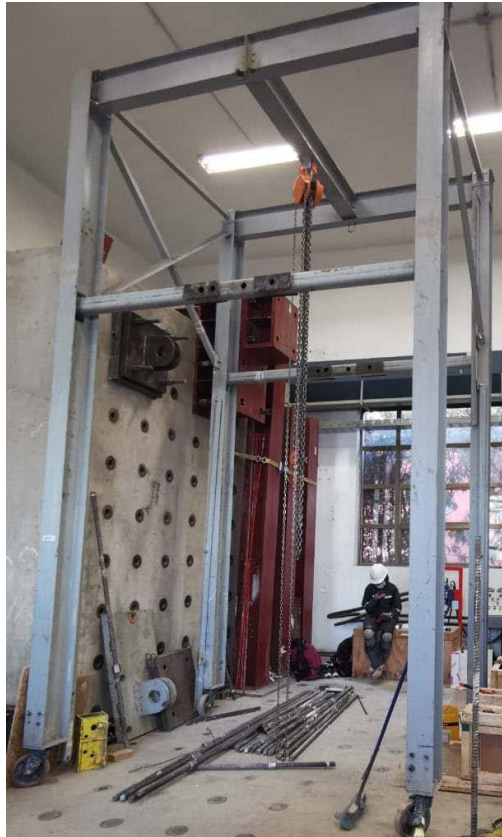


Figura 4.21: Marco de Acero

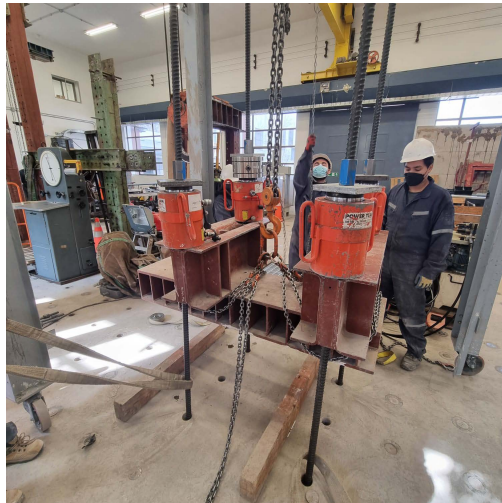


Figura 4.22: Izaje del Sistema de Carga Axial con el Marco de Acero

Durante el ensayo, cumple dos funciones importantes. En primer lugar, en él se posicionan barras a modo de restricción lateral de la probeta, las cuales restringen su movimiento fuera del plano. Dichas barras poseen punta en forma de esfera. Adicionalmente, el sistema de carga axial es amarrado a un tecele ubicado en el centro del marco de acero, el cual podría soportarlo en caso de producirse una falla frágil de la probeta (o de algún otro sistema) durante la ejecución del ensayo, lo cual corresponde a una medida de seguridad.



Figura 4.23: Barras de Restricción Lateral y Carga Axial

Respecto a las columnas del marco de acero, se anclan únicamente 2 de las 4 existentes a la losa de reacción con el propósito de evitar el deslizamiento del marco de acero. De esta manera, las 2 columnas ubicadas hacia el lado sur del laboratorio son ancladas, mientras que las 2 columnas ubicadas hacia el lado norte del laboratorio no lo son. Esto último se debe a que no existen agujeros en la losa de reacción en esa zona que permitiesen anclar el marco de acero. Sin perjuicio de lo anterior, esto no supone ningún problema para la correcta ejecución del ensayo. De esta forma, la configuración del ensayo luce como se presenta a continuación:

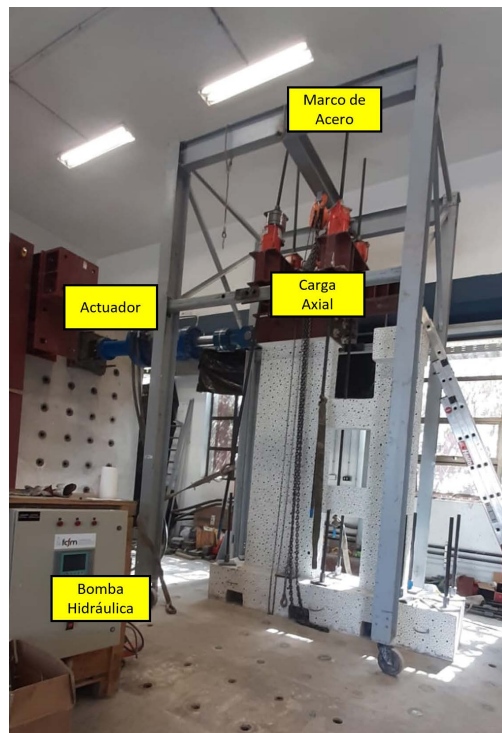


Figura 4.24: Montaje Experimental

4.7. Instrumentación

Para monitorear y medir el comportamiento de la probeta durante el ensayo se emplean dos técnicas de instrumentación. El primero corresponde al uso de transductores de desplazamiento lineal variable (LVDT) y el segundo a Fotogrametría.

Los LVDT son sensores que pueden medir desplazamientos a través de la variación de voltaje que registran debido al movimiento de un cilindro macizo al interior de un cilindro hueco, el cual se mueve solidariamente con el movimiento de dos puntos de interés a monitorear.

Previo al hormigonado de la probeta, se dispuso de hilos sin fin (de diámetro 1/4”) en una de las caras el moldaje, los cuales atravesarían los muros de la probeta y quedarían en el interior del hormigón. Dichos hilos serían utilizados como puntos de referencia para la medición con LVDT.

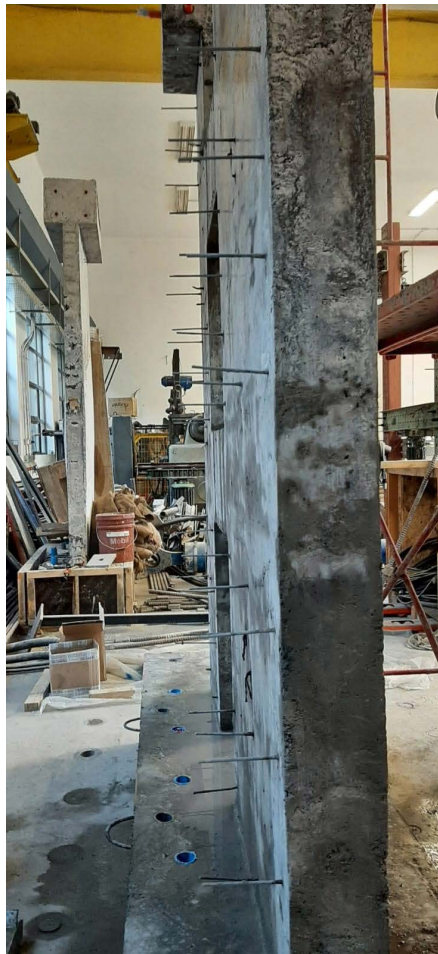


Figura 4.25: Hilos sin fin en la probeta

En total, se disponen 47 LVDT en la probeta, de los cuales se ubican 2 a nivel de techo de cada muro para monitorear su desplazamiento lateral. Adicionalmente, se ubica un LVDT sobre el actuador para monitorear su desplazamiento y un LVDT a nivel del pedestal para controlar su deslizamiento lateral. También se ubican sensores entre el pedestal y la losa de reacción para medir la rotación de la probeta.

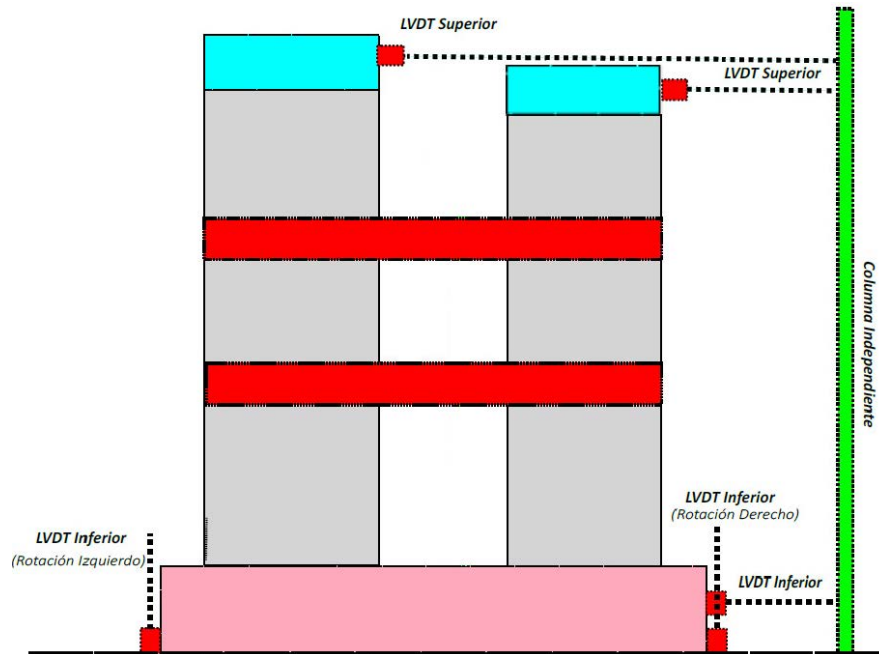


Figura 4.26: Esquema LVDTs de control

El resto de los LVDT se utilizan para realizar mediciones de flexión y corte en los pisos de los muros y en las vigas. El trabajo de título realizado por Raffo, J (2023) [36] trata en profundidad todo lo relacionado a calibración, distribución, sistema de adquisición y resultados del ensayo de esta probeta a través del uso y procesamiento de estos sensores.

La técnica de fotogrametría empleada para la medición de datos del ensayo de la probeta será descrita en detalle en el próximo capítulo de este Trabajo de Tesis.

Capítulo 5

Fotogrametría

El presente capítulo tiene como objetivo detallar el procedimiento utilizado para estudiar el comportamiento de la probeta durante el ensayo haciendo uso de fotogrametría.

La fotogrametría corresponde a una técnica de medición que utiliza secuencias de imágenes consecutivas para cuantificar desplazamientos y deformaciones de objetos. Una de sus principales ventajas es que las mediciones se realizan sin contacto con el objeto que está siendo monitoreado. Durante este Trabajo de Tesis, es utilizada para estudiar el comportamiento de los muros y vigas de la probeta. Estos resultados pueden ser validados a través de su comparación con lo obtenido a través del uso de LVDTs. A continuación se profundiza en las etapas de la implementación de fotogrametría en el ensayo.

5.1. Preparación de la Probeta

Durante la etapa de montaje experimental, es decir, previo al ensayo, la probeta se cubre con cal hidráulica. Una vez que la cal se encuentra seca y adherida al hormigón, se procede a pintar puntos aleatorios de distinto tamaño de color negro en la totalidad de una de las caras de la probeta y también en los cantos.



Figura 5.1: Cal Hidráulica

La cal hidráulica es utilizada por dos motivos principales. Primero, brinda un fondo blanco que contrasta de gran manera con los puntos de color negro pintados en la probeta, lo cual facilita el procesamiento de datos y minimiza el error del procesamiento de desplazamientos a través de software. En segundo lugar, ésta posee un comportamiento frágil al estar adherida al hormigón y se quiebra de forma solidaria con el hormigón cuando en este último se generan grietas y/o fisuras. Este aspecto es importante debido a que cualquier pintura que posea un comportamiento más elástico podría inducir a ocultar fisuras o podría inducir a errores en el procesamiento de la data.

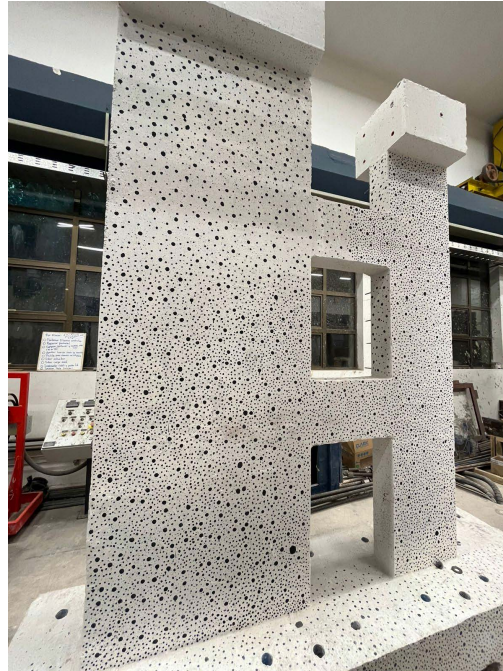


Figura 5.2: Aspecto de la Probeta durante el pintado de puntos

5.2. Cámaras y Distribución

Durante el ensayo se opta por distribuir 7 cámaras que capturen fotografías en distintas zonas de interés de la probeta. Ellas deben mantenerse fijas e inamovibles durante el transcurso del ensayo para evitar inducir desplazamientos erróneos en el procesamiento de datos. El nombre adoptado por cada cámara y su zona de captura se menciona a continuación:

1. **Cámara Global:** Captura la probeta completa por su cara sur, midiendo todos los pisos de los muros y las vigas de acople. Se encuentra instalada sobre un trípode.



Figura 5.3: Foto capturada por Cámara Global

2. **Cámara Local MR1:** Captura en detalle los dos primeros pisos del muro grande (MR1) y parte del pedestal de la probeta. Se encuentra instalada sobre un trípode.

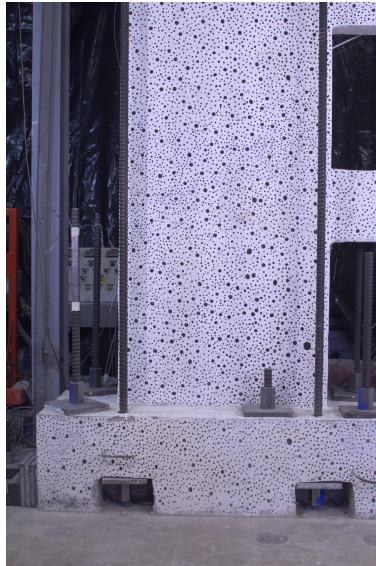


Figura 5.4: Foto capturada por Cámara Local MR1

3. **Cámara Local MR2:** Captura en detalle los dos primeros pisos del muro de menor tamaño (MR2) y parte del pedestal de la probeta. Se encuentra instalada sobre un trípode.



Figura 5.5: Foto capturada por Cámara Local MR2

4. **Cámara de Interacción 1:** Captura en detalle los dos primeros pisos de ambos muros y la viga de acople que los conecta. Se encuentra instalada sobre un trípode.



Figura 5.6: Foto capturada por Cámara de Interacción 1

5. **Cámara de Interacción 2:** Captura en detalle el segundo y tercer piso de ambos muros y las vigas de acople. Se encuentra instalada sobre un trípode.



Figura 5.7: Foto capturada por Cámara de Interacción 2

6. **Cámara de Canto Izquierdo:** Captura parte del canto izquierdo de la probeta (lateral izquierdo MR1) para estudiar el comportamiento fuera del plano. Se encuentra instalada sobre un trípode.

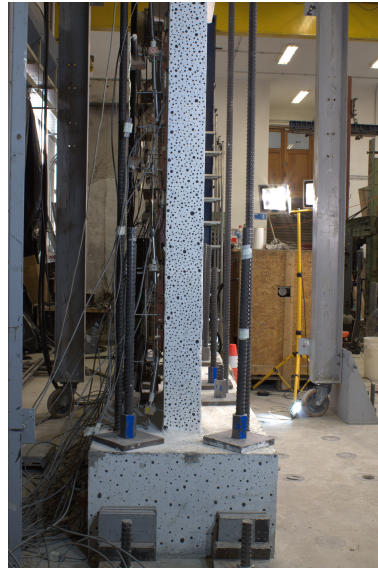


Figura 5.8: Foto capturada por Cámara de Canto Izquierdo

7. **Cámara de Canto Derecho:** Captura parte del canto derecho de la probeta (lateral derecho MR2) para estudiar el comportamiento fuera del plano. Se encuentra instalada sobre una columna de acero.

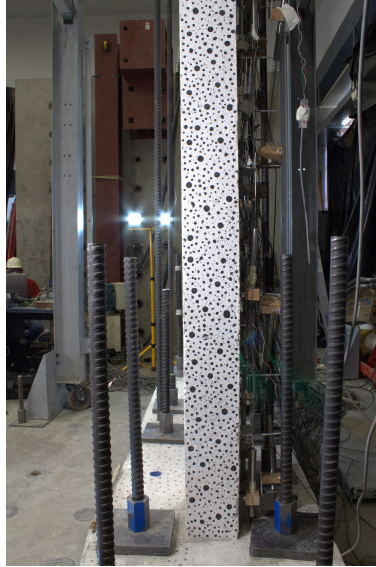


Figura 5.9: Foto capturada por Cámara de Canto Derecho

Cabe señalar que existen zonas de estudio que claramente son capturadas por más de una cámara. Esto es importante debido a que si por cualquier motivo una cámara presentase una falla (por movimiento, por corte eléctrico, por falla en su trípode/soporte) entonces se contaría con un respaldo generado por otra cámara.

La distribución de cámaras alrededor de la probeta se esquematizan en la siguiente figura:

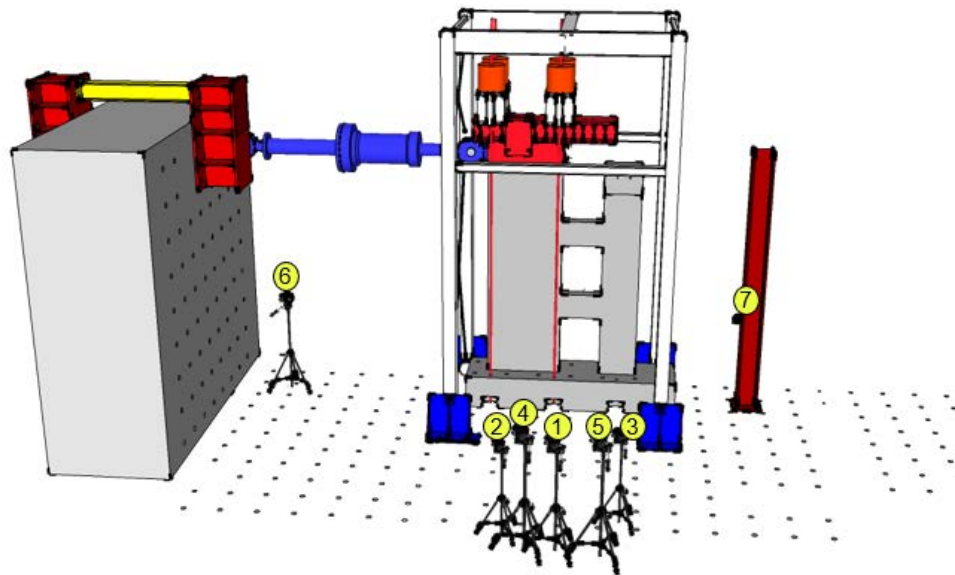


Figura 5.10: Distribución de Cámaras

En particular, la altura de cada cámara se muestra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Altura de las cámaras

Cámara	Nombre	Altura [m]
1	Global	1.35
2	Local MR1	1.03
3	Local MR2	1.03
4	Interacción 1	1.20
5	Interacción 2	1.30
6	Canto Izquierdo	1.20
7	Canto Derecho	1.10

Adicionalmente, la distancia en planta entre la probeta de ensayo y cada cámara se muestra a continuación.

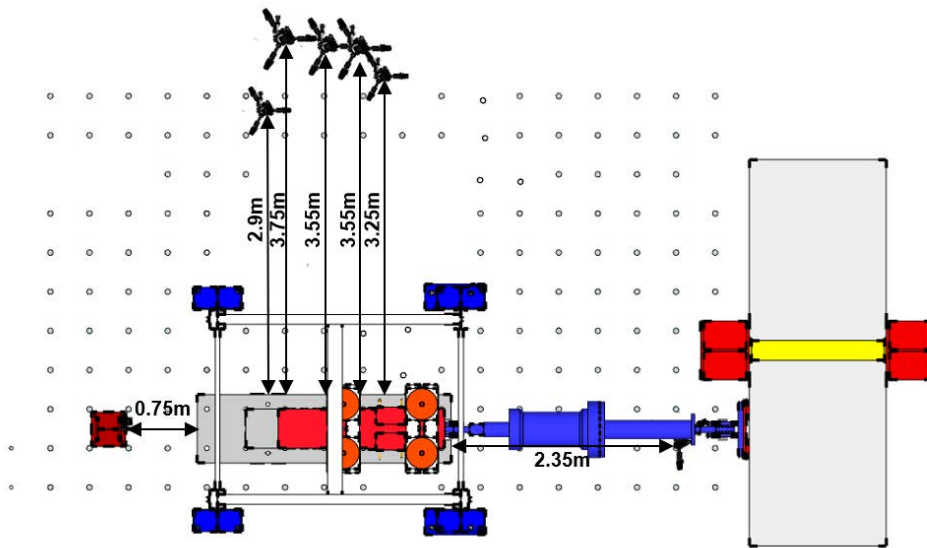


Figura 5.11: Distancia entre Cámaras y Probeta. Vista en Planta.

Las cámaras son configuradas en enfoque manual a lo largo de todo el ensayo de manera de poder utilizar valores constantes de sus propiedades (distancia focal, sensibilidad, exposición, apertura) a lo largo del ensayo para que todas las fotos de cada cámara sean lo más homogéneas entre sí respecto a sus propiedades ópticas. En particular, en todas las cámaras se utilizó sensibilidad ISO-400, exposición de 1/10 [s] y apertura F11. Estos valores se escogieron para adaptarse a la luz del laboratorio. En la tabla 5.2 se presentan propiedades específicas de cada cámara.

Tabla 5.2: Propiedades Cámaras

Cámara	Nombre	Modelo	Orientación	Distancia Focal [mm]
1	Global	Canon EOS Rebel T6	Vertical	18
2	Local MR1	Canon EOS REBEL T5	Vertical	33
3	Local MR2	Canon EOS Rebel T6	Vertical	28
4	Interacción 1	Canon EOS Rebel T6	Horizontal	23
5	Interacción 2	Canon EOS Rebel T6	Horizontal	30
6	Canto Izquierdo	Canon EOS Rebel T6	Vertical	18
7	Canto Derecho	Canon EOS REBEL T3i	Vertical	18

Para controlar y monitorear todas las cámaras durante el ensayo de la probeta, se hace uso del software *DSLR Remote Pro*[®], el cual permite configurar los parámetros de cada cámara, almacenar las fotografías de manera ordenada y coordinar el disparo del obturador de todas las cámaras de forma simultánea.

Dado que el ensayo se prolonga por bastantes horas, es importante mantener el nivel de luz lo más constante posible dentro del laboratorio durante la ejecución del ensayo. Para ello se cubren ventanas con plástico negro. Adicionalmente, se ubican focos de iluminación LED alrededor de toda la probeta para mejorar su iluminación.



Figura 5.12: Laboratorio el día del ensayo

Respecto a la captura de fotografías durante el ensayo, se realiza un mínimo de dos fotos en cada uno de los peaks y ceros del protocolo de desplazamiento (ver Figura 4.16). Adicionalmente, se capturan fotografías intermedias (entre peak y peak) equiespaciadas en lapsos de tiempo cercanos a 20 [s]. Cabe mencionar que, dado que todas las cámaras se encuentran coordinadas entre sí (por el uso *DSLR Remote Pro*[®], como se mencionó anteriormente), la cantidad de fotografías capturadas por cada cámara es la misma.

5.3. Software *Ncorr*

Ncorr es un software desarrollado por Blaber et al. (2015) [4] en MATLAB [26] y C++, el cual es de código abierto y tiene como propósito correlacionar imágenes digitales (DIC) en 2D. El algoritmo utilizado para el procesamiento de imágenes se basa en subconjuntos, es decir, consiste en dividir el total de píxeles de la imagen inicial en grupos más pequeños en forma circular (de radio fijo y definido). Posteriormente, cada uno de estos subconjuntos es buscado en el resto de imágenes a procesar y se obtiene el desplazamiento relativo entre cada par de fotografías consecutivas. El procesamiento asume que la cámara utilizada para capturar las fotos se mantiene siempre inmóvil.

Un aspecto relevante a mencionar corresponde a la resolución de las fotografías y su relación con el procesamiento. La resolución corresponde a la cantidad de píxeles que una fotografía posee, por ende, una foto con mayor resolución (mayor cantidad de píxeles) podrá entregar, una vez procesada, mejores resultados respecto al comportamiento (desplazamientos) de la probeta estudiada. En particular, todas las fotografías obtenidas durante el ensayo tienen una resolución de 3456 x 5184 [píxeles x píxeles]. Sin embargo, una mayor resolución implica fotos que tardan más tiempo en procesar y generan data más pesada. Es por estos motivos que se debe encontrar un equilibrio tal que permita obtener un radio de análisis en las fotos tal que permita capturar correctamente el comportamiento de la probeta, pero que también sea lo suficientemente grande para que el procesamiento computacional sea posible en un tiempo acotado y realizable por computadoras con capacidades convencionales de memoria RAM.

Tal como se mencionó, cada fotografía es dividida en conjuntos circulares de píxeles de radio fijo. Cada uno de estos subconjuntos es representado como una posición en una matriz que representa cada foto. El algoritmo de *Ncorr* asigna una posición (de coordenadas x_{ref_i}, y_{ref_i}) a cada subconjunto de la imagen inicial. Luego, la nueva posición de cada subconjunto en la siguiente imagen procesada se obtiene según las siguientes ecuaciones:

$$\hat{x}_{cur_i} = x_{ref_i} + u_{rc} + \frac{\partial u}{\partial x_{rc}}(x_{ref_i} - x_{ref_c}) + \frac{\partial u}{\partial y_{rc}}(y_{ref_i} - y_{ref_c}) \quad (5.1)$$

$$\hat{y}_{cur_i} = y_{ref_i} + v_{rc} + \frac{\partial v}{\partial x_{rc}}(x_{ref_i} - x_{ref_c}) + \frac{\partial v}{\partial y_{rc}}(y_{ref_i} - y_{ref_c}) \quad (5.2)$$

$$(i, j) \in S$$

Donde \hat{x}_{cur_i} e \hat{y}_{cur_i} son las coordenadas de un punto del subconjunto analizado actual, x_{ref_i} e y_{ref_i} son las coordenadas de un punto inicial del subconjunto de referencia, x_{rc} e y_{rc} son las coordenadas del punto central del subconjunto inicial, S corresponde a la vecindad del subconjunto actual analizado, y u y v hacen referencia a los desplazamientos en los ejes x e y respectivamente.

De esta forma, las variables a determinar por el algoritmo quedan representadas en el vector p :

$$p = \left(u \ v \ \frac{\partial u}{\partial x} \ \frac{\partial u}{\partial y} \ \frac{\partial v}{\partial x} \ \frac{\partial v}{\partial y} \right)^T \quad (5.3)$$

Para obtener una primera aproximación de los desplazamientos de los subconjuntos de las imágenes analizadas, el algoritmo emplea una metodología llamada Normalized Cross Correlation (NCC). Este método correlaciona las funciones de intensidad en escala de grises de los puntos de los subconjuntos de la imagen de referencia con los de la imagen actual analizada en cada punto en particular. Este cálculo permite obtener una primera aproximación de los desplazamientos, lo cual es utilizado en la siguiente etapa del algoritmo como partida de las iteraciones. Se tiene un mejor NCC mientras su valor sea más cercano a 1.

Posteriormente, el algoritmo de resolución introduce un optimizador no lineal que calcula el error de los desplazamientos mediante mínimos cuadrados, el cual es cuantificado con un factor denominado Least Square Correlation (LSC), en función de la escala de grises entre los subconjuntos de la fotografía de referencia y los de la imagen actual analizada. Dicho optimizador se denomina Inverse Compositional Gauss-Newton (IC-GN).

Cabe mencionar que las únicas zonas de la fotografía que son analizadas son las que corresponden a la región de interés definida (Region of Interest, ROI). Esta región puede abarcar únicamente zonas particulares de la fotografía, haciendo así que lo que se encuentre fuera del ROI no sea analizado por Ncorr. Por ejemplo, para el estudio del comportamiento de la probeta, los ROI considerados corresponden únicamente a las zonas de la probeta capturadas por las fotografías, mientras que todo el resto de elementos capturado en imagen (el fondo, el resto del laboratorio, etc) no son considerados en el análisis.

Luego, el campo de desplazamientos de todos los subconjuntos de la imagen analizada actual pertenecientes al ROI se utiliza un método llamado Reliability Guided (RG), es decir, de fiabilidad guiada. Dicho método consiste en obtener los parámetros de los subconjuntos de la vecindad S del subconjunto inicial, utilizando el coeficiente obtenido mediante LSC. Este procedimiento se repite hasta recorrer el análisis en toda la región de interés.

Finalmente, con el objetivo de minimizar el ruido en los resultados del algoritmo, Ncorr ajusta el plano de análisis mediante mínimos cuadrados para calcular los vectores de desplazamiento suavizados en cada imagen analizada y calcula el campo de deformaciones según las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{2} \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right) \quad (5.4)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{2} \left(2 \frac{\partial u}{\partial y} + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right) \quad (5.5)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (5.6)$$

De esta forma, se presentan en la Tabla 5.3 los parámetros comunes utilizados para todas las cámaras durante el procesamiento de fotografías en Ncorr.

Tabla 5.3: Parámetros de Análisis Ncorr para todas las Cámaras

Parámetro	Valor/Estado
Diff Norm C/O	1E-06
Iteration #C/O	50
Num Threads	6
High Strain Analysis Mode	Seed Propagation
Step Analysis	Enabled
Auto Propagation	Enabled
Subset Truncation	Enabled

Además, se presentan en la Tabla 5.4 los parámetros utilizados que difieren en cada cámara, debido a su distancia a la probeta.

Tabla 5.4: Parámetros de Análisis utilizados en Ncorr por Cámara

Cámara	Nombre	Subset Spacing [pixel]	Subset Radius [pixel]	Strain Radius [pixel]	Escala [mm/pixel]
1	Global	10	50	15	0.902
2	Local MR1	10	40	15	0.464
3	Local MR2	10	40	15	0.497
4	Interacción 1	10	40	15	0.549
5	Interacción 2	10	40	15	0.665
6	Canto Izquierdo	10	40	15	0.439
7	Canto Derecho	10	50	15	0.310

5.4. Precisión de las Mediciones Realizadas

En esta sección se busca identificar y cuantificar la precisión de las mediciones realizadas durante el ensayo a través de fotogrametría. El valor de la precisión queda determinado numéricamente por el valor del error.

En primer lugar, es importante mencionar que durante el procesamiento del algoritmo de Ncorr pueden escogerse píxeles erróneos dentro del subconjunto analizado, lo cual implicaría un mayor error de correlación entre imágenes sucesivas, lo que a su vez disminuiría la precisión. Es por este motivo que la escala de cada cámara influye en el nivel de precisión puesto que mientras mayor sea la razón [mm/píxel], mayor será el error asociado a la posibilidad de considerar píxeles incorrectos, ya que tendrá una menor cantidad de píxeles dentro de una distancia fija. Es decir, al haber menor cantidad de píxeles, bastaría con que uno de ellos sea incorrecto para que un mayor tramo de análisis (en milímetros) sea erróneo.

Las escalas asociadas a cada una de las cámaras están presentes en la Tabla 5.4. Su valor depende principalmente de tres parámetros: la resolución de las fotografías, la distancia focal y la distancia entre la probeta y la cámara durante el ensayo. Dado que la resolución de las fotografías es la misma para todas las cámaras (3456 x 5184 [píxeles x píxeles]), el valor de la escala será mayor para las cámaras que se encuentran más alejadas de la probeta (Cámara Global y Cámaras de Interacción) y será menor para las cámaras más cercanas (Cantos Izquierdo y Derecho).

Por otro lado, podemos identificar el error en la precisión de las deformaciones. Manríquez (2016) [21] explica que el error por distorsión queda determinado por el error de un píxel sobre la cantidad de píxeles incluidos en la vecindad del subconjunto del que forma parte. Matemáticamente, esto se expresa como:

$$e_s = \frac{1 \text{ [píxel]}}{(S_s + 1)(2R_s + 1)} \quad (5.7)$$

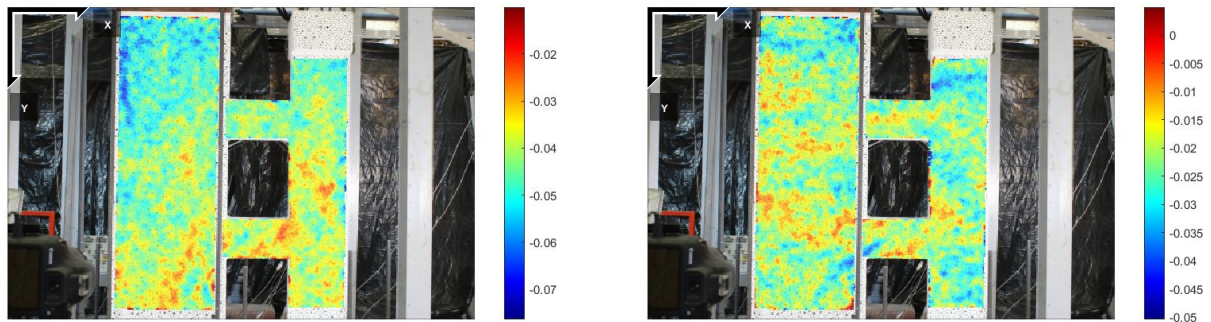
Donde e_s es el error por el cálculo de la deformación, S_s es el espaciamiento del subconjunto (cantidad de píxeles en él) y R_s es el radio de la vecindad de la deformación analizada. Aplicando esta expresión, y utilizando los parámetros mencionados en la Tabla 5.4, se obtiene el error en la precisión de las deformaciones mostrado en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Error en el cálculo de deformación

Cámara	Nombre	Error deformación e_s [mm/mm]
1	Global	0.0009
2	Local MR1	0.0011
3	Local MR2	0.0011
4	Interacción 1	0.0011
5	Interacción 2	0.0011
6	Canto Izquierdo	0.0011
7	Canto Derecho	0.0009

Adicionalmente, es posible cuantificar el error asociado a las condiciones de montaje iniciales durante la toma de datos en el ensayo de la probeta. Para ello, se toman dos fotografías consecutivas justo antes de comenzar el ensayo en cada una de las cámaras. Dichas imágenes son capturadas con la probeta en estado de reposo y sin deformar, de tal manera de que las condiciones entre una y otra foto sean idénticas. Bajo estas condiciones, se espera que las matrices de desplazamientos y deformaciones obtenidas por N_{corr} sean nulas. En caso de existir valores no-nulos en dichas matrices, se deberá a imprecisiones en el montaje, problemas de luminiscencia, errores en la obtención de puntos del algoritmo o algún otro error aleatorio implicado en el desarrollo del ensayo.

El análisis descrito anteriormente es realizado para cada una de las cámaras, con el propósito de cuantificar el error por procesamiento y montaje. A continuación se muestran, a modo de ejemplo, los desplazamientos y deformaciones obtenidos en forma de mapa de color para dos fotos consecutivas en condiciones idénticas de reposo y sin deformar antes de comenzar el ensayo:



(a) Desplazamiento en u (eje X)

(b) Desplazamiento en v (eje Y)

Figura 5.13: Ejemplo de error por procesamiento y montaje en desplazamientos - Cámara Interacción 2

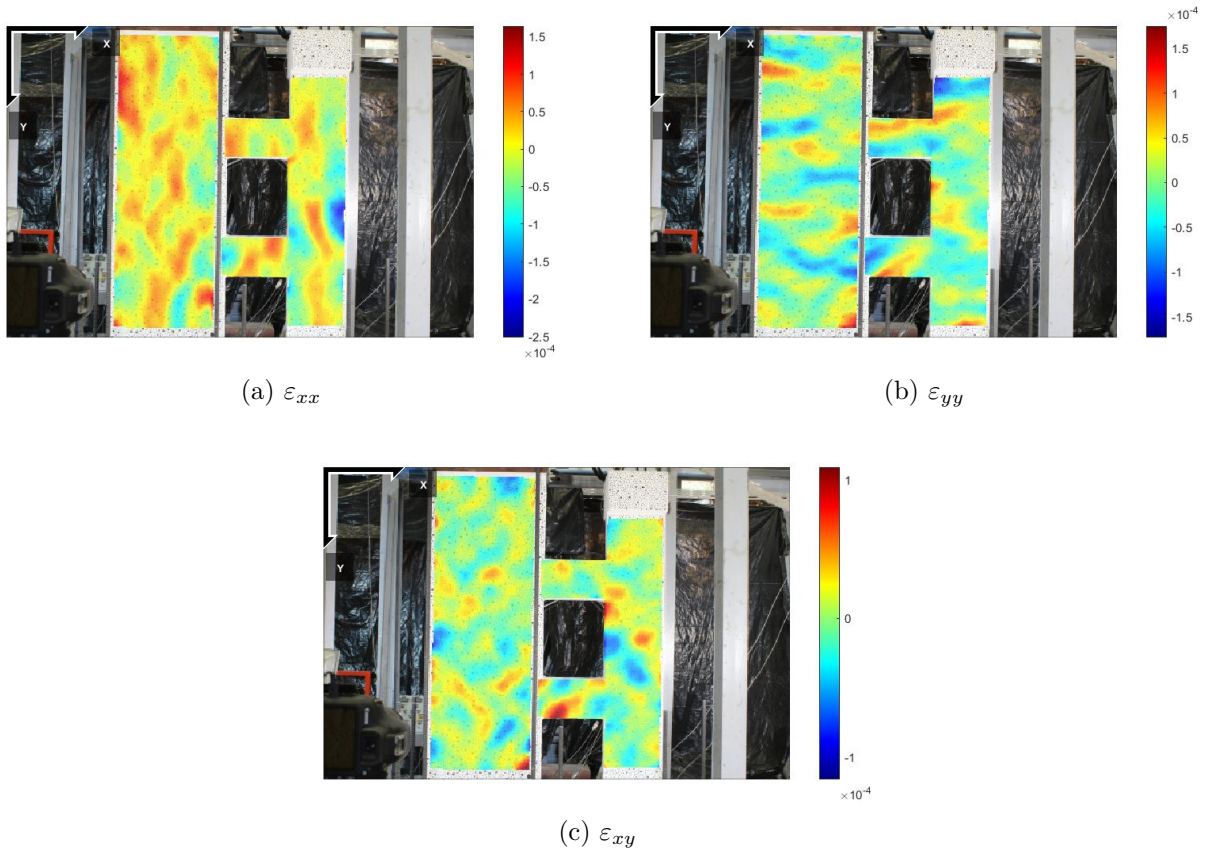


Figura 5.14: Ejemplo de error por procesamiento y montaje en deformaciones - Cámara Interacción 2

De esta forma, al repetir este procedimiento para cada una de las cámaras, se obtienen los resultados mostrados en las Tablas 5.6 y 5.7.

Tabla 5.6: Error por procesamiento y montaje en desplazamientos

Cámara	Nombre	Desplazamientos en u (eje X)			Desplazamientos en v (eje Y)		
		Max [mm]	Prom [mm]	Min [mm]	Max [mm]	Prom [mm]	Min [mm]
1	Global	0.3204	0.0427	-0.1193	0.085	-0.0356	-0.1191
2	Local MR1	0.0431	-0.0404	-0.0836	0.0102	-0.0938	-0.1987
3	Local MR2	0.0566	-0.0129	-0.068	0.0524	-0.0185	-0.0831
4	Interacción 1	0.0876	0.0272	-0.0222	0.0157	-0.0392	-0.1082
5	Interacción 2	0.0016	0.0425	-0.1042	0.0244	-0.0219	-0.0869
6	Canto Izquierdo	0.3107	0.2552	0.1824	0.0065	-0.3459	0.4187
7	Canto Derecho	0.0006	-0.0118	-0.0259	0.0279	-0.0053	-0.0095

Tal como se observa en la Tabla 5.6, se obtiene que el error asociado a procesamiento y montaje es, en promedio, del orden de 10^{-2} [mm] para todas las cámaras, lo cual se encuentra en un rango aceptable. Se observa que la cámara con mayor error corresponde a la cámara del canto izquierdo, lo cual se podría deber a la gran cantidad de objetos en el fondo y en cercanías de la probeta que pueden inducir en cambios de luz en la misma.

Tabla 5.7: Error por procesamiento y montaje en deformaciones

Cámara	Nombre	ϵ_{xx}			ϵ_{yy}			ϵ_{xy}		
		Max [mm]	Prom [mm]	Min [mm]	Max [mm]	Prom [mm]	Min [mm]	Max [mm]	Prom [mm]	Min [mm]
1	Global	2.E-04	0	-6.E-04	1.E-04	0	-2.E-04	6.E-04	0	-1.E-04
2	Local MR1	2.E-04	0	-3.E-04	3.E-04	0	-3.E-04	2.E-04	0	-3.E-04
3	Local MR2	1.E-04	0	-2.E-04	2.E-04	0	-1.E-04	1.E-04	0	-1.E-04
4	Interacción 1	1.E-04	0	-1.E-04	1.E-04	0	-2.E-04	2.E-04	0	1.E-04
5	Interacción 2	1.E-04	0	-2.E-04	2.E-04	0	-2.E-04	2.E-04	0	-1.E-04
6	Canto Izquierdo	1.E-04	-3.E-04	-6.E-04	8.E-03	-1.E-04	-6.E-04	1.E-04	0	-1.E-03
7	Canto Derecho	2.E-04	0	-2.E-04	1.E-04	0	-1.E-04	1.E-04	0	-1.E-04

En la Tabla 5.7 se observa que el error asociado a deformaciones es del orden de 10^{-4} [mm/mm] para la mayoría de las cámaras, siendo éste un valor bajo y aceptable considerando la magnitud de las deformaciones a medir durante el ensayo de esta investigación.

5.5. Corrección de las Mediciones Realizadas

A las mediciones de desplazamientos realizadas con fotogrametría se le realizan dos correcciones después de ser procesadas por $Ncorr$, las cuales se explican a continuación:

- **Corrección Por Rotación del Pedestal:** Corresponde a la corrección realizada a los desplazamientos laterales producida por la posible rotación del pedestal como cuerpo rígido durante el ensayo de la probeta.
- **Corrección Por Deslizamiento del Pedestal:** Corresponde a la corrección realizada a los desplazamientos laterales producida por el posible deslizamiento del pedestal durante el ensayo de la probeta.

En la Figura 5.15 se presenta un esquema ilustrativo de las correcciones realizadas.

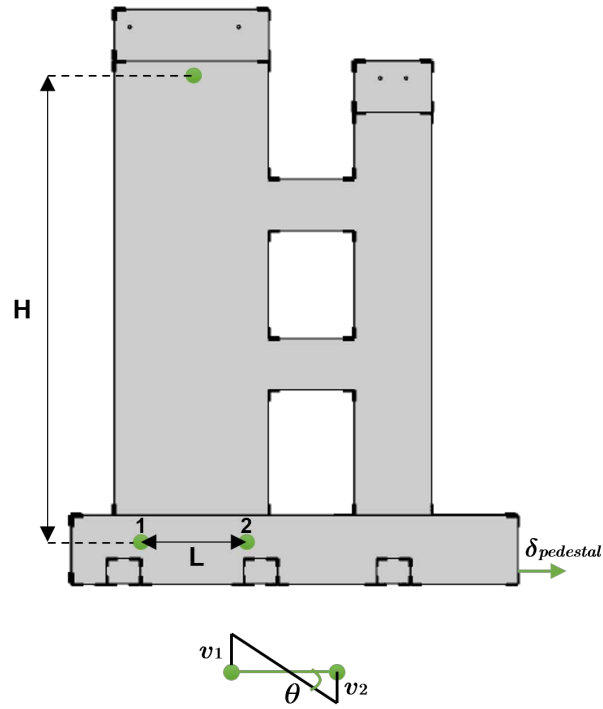


Figura 5.15: Esquema de corrección de desplazamientos de un punto arbitrario

De esta manera, el desplazamiento final de un punto arbitrario cualquiera a monitorear queda determinado por la ecuación 5.8.

$$\delta_i^c = \delta_i^{sc} - \delta_{pedestal} - \theta_{pedestal} \cdot H \quad (5.8)$$

$$\theta_{pedestal} = \frac{v_1 - v_2}{L}$$

Donde δ_i^c corresponde al desplazamiento corregido, δ_i^{sc} corresponde al desplazamiento sin corregir (obtenido en el procesamiento con *Ncorr*), $\delta_{pedestal}$ corresponde al deslizamiento del pedestal, v_1 y v_2 corresponden a los desplazamientos verticales de dos puntos (1 y 2) ubicados a una misma altura en el pedestal y distanciados entre sí a una distancia L entre los cuales se mide la rotación del pedestal ($\theta_{pedestal}$), y H corresponde a la altura del punto que se quiere corregir medida desde los puntos donde se mide la rotación en el pedestal.

Capítulo 6

Resultados Experimentales

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos al procesar los datos recopilados durante el ensayo de la probeta a través de fotogrametría, el LVDT de control (Figura 4.26) y las celdas de carga. Los resultados obtenidos a través del monitoreo experimental con el resto de LVDTs son presentados en el trabajo de Raffo [36].

Cabe mencionar que, a modo de convención, se utilizan valores positivos para las deformaciones asociadas a tracción y valores negativos para las deformaciones asociadas a compresión.

6.1. Respuesta Global

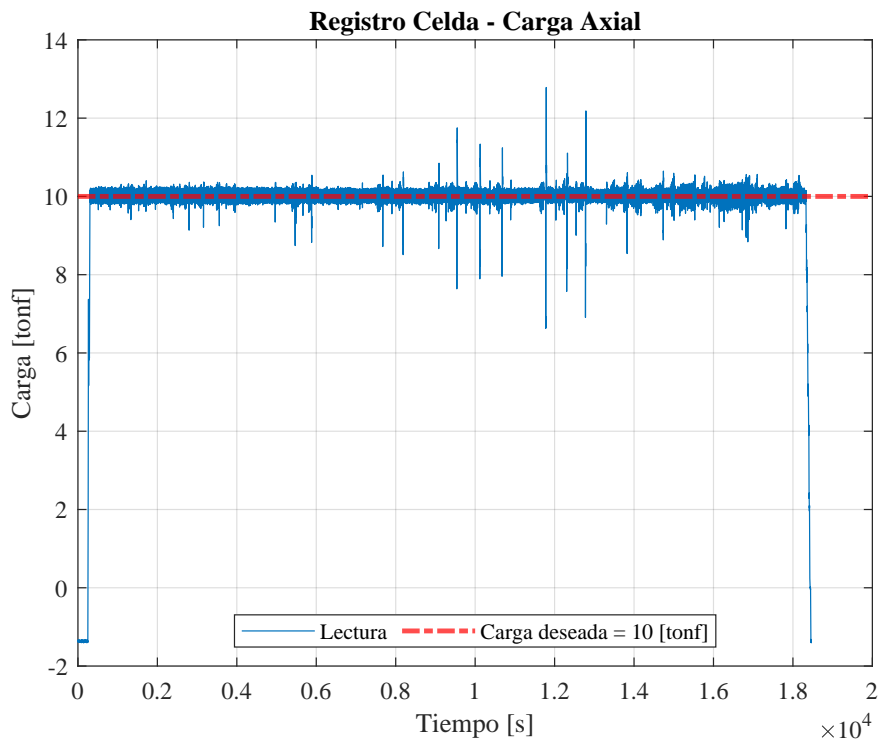


Figura 6.1: Registro de Carga Axial durante el ensayo

En la Figura 6.1 se observa que el registro de la celda de carga del gato utilizado para monitorear el sistema de carga axial se mantiene en el valor deseado (10 [tonf]) a lo largo de todo el ensayo, con fluctuaciones o saltos que están dentro de lo esperable. Considerando que el sistema de carga axial está compuesto por 4 gatos, se observa que la carga axial aplicada sobre el MR1 durante el ensayo es de las 40 [tonf] deseadas.

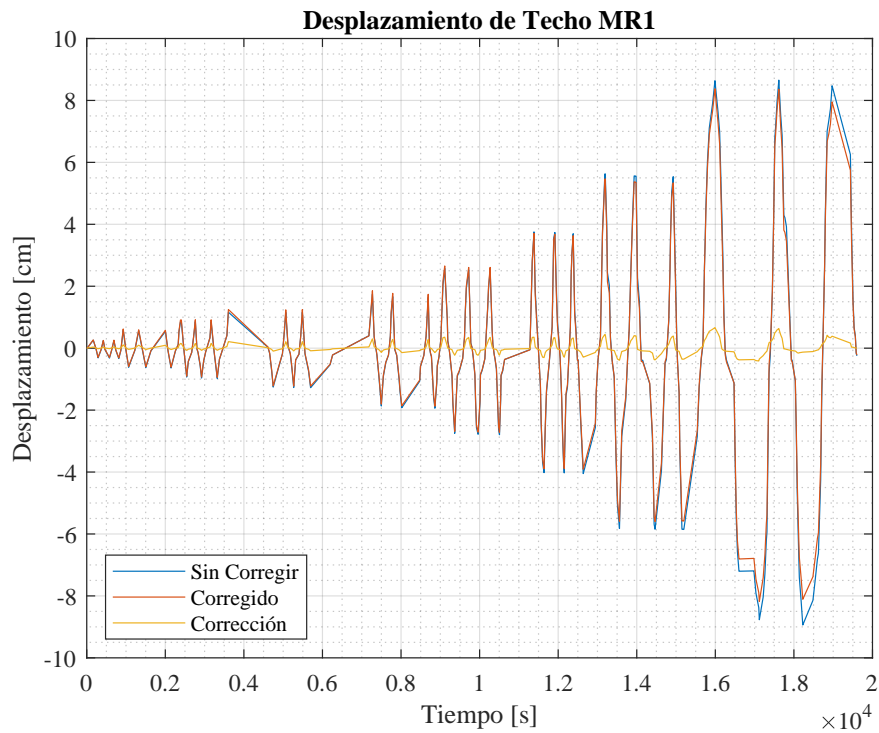


Figura 6.2: Deriva de Techo Corregida - MR1

Respecto a la deriva de techo del MR1, en la Figura 6.2 se presenta su valor corregido y la corrección aplicada, la cual fue determinada según lo descrito en el capítulo anterior. Se observa que el valor de la corrección es de orden bajo en comparación al desplazamiento a nivel de techo, presentando un valor máximo del orden de 0.5 [cm].

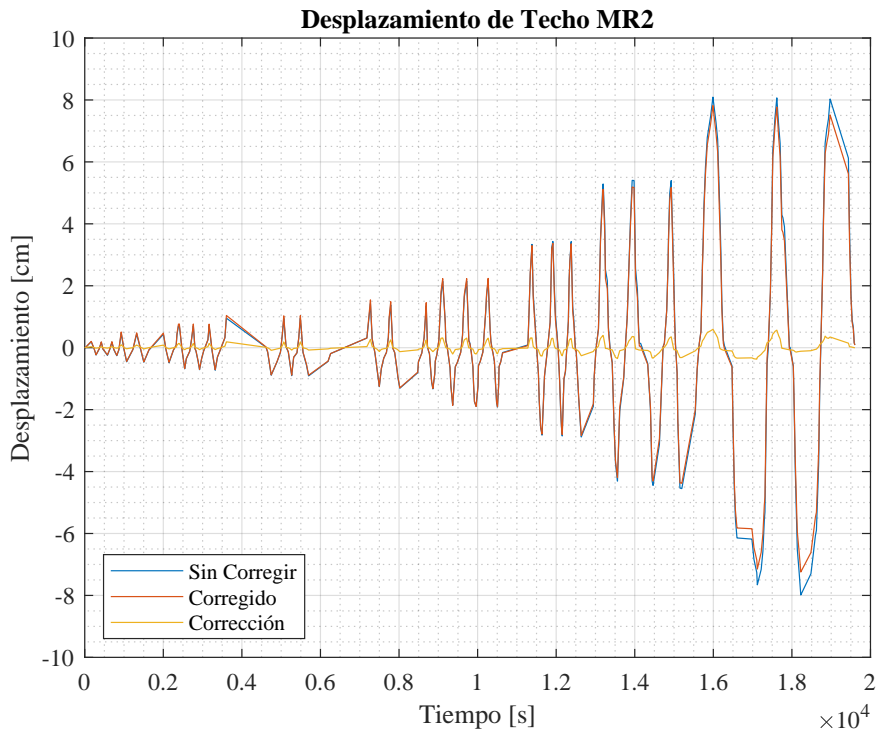


Figura 6.3: Deriva de Techo Corregida - MR2

Análogamente, en la Figura 6.3 se presenta la deriva a nivel de techo corregida para el MR2. Se tiene que la deriva a nivel de techo del MR2 es menor que la del MR1 a lo largo del ensayo de la probeta.

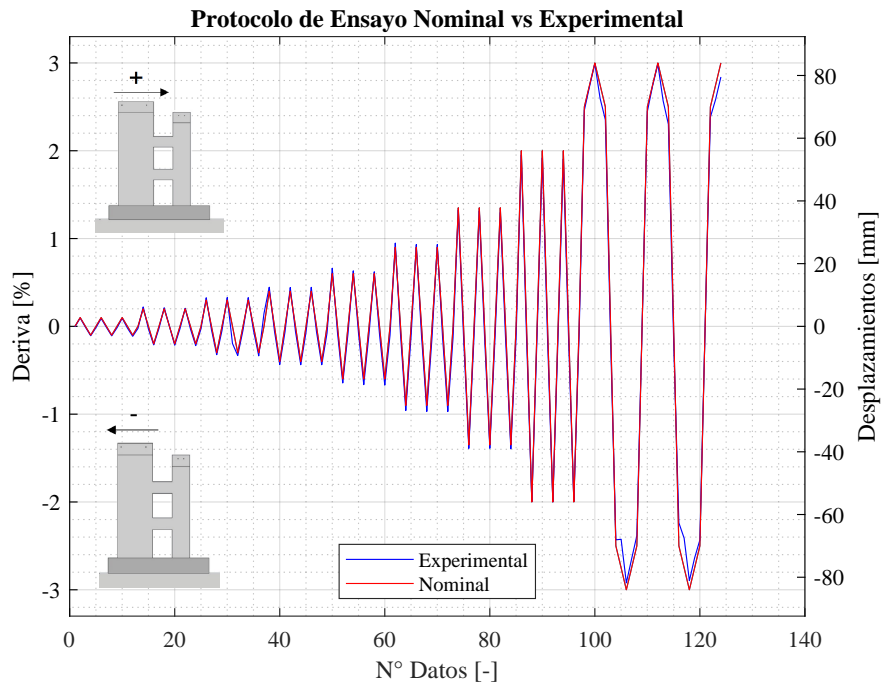


Figura 6.4: Comparación Protocolo de Carga Nominal y Experimental

En la Figura 6.4 se presenta la comparación entre el protocolo de desplazamientos nominal

del ensayo (presentado previamente en la Figura 4.16) y lo obtenido experimentalmente con fotogrametría. Se observa que para derivas hasta el 2 % los valores obtenidos son casi idénticos, mientras que para los ciclos asociados al 3 % de drift existen diferencias de bajo orden de magnitud que se consideran aceptables. Cabe mencionar que en el protocolo experimental mostrado en la Figura 6.4 se realizaron mediciones específicas al 2.5 % de deriva nominal.

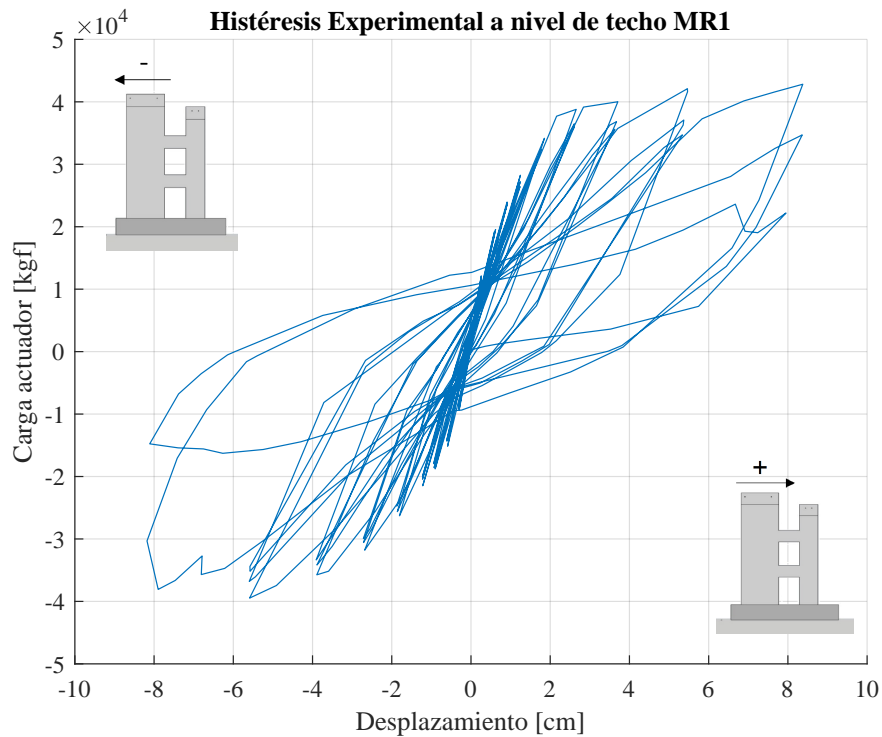


Figura 6.5: Histéresis MR1 - Fotogrametría

Para cada fotografía capturada se grafica el desplazamiento a nivel de techo versus la carga aplicada por el actuador en ese instante. Con ello se construye la histéresis, mostrada en la Figura 6.5. En ella se observa que la carga máxima asociada a las derivas positivas es de 43 [tonf], mientras que para derivas negativas es de 39 [tonf]. Se observa que así que, en general, para un mismo nivel de deriva, la probeta posee mayor capacidad para drifts positivos que para drifts negativos.

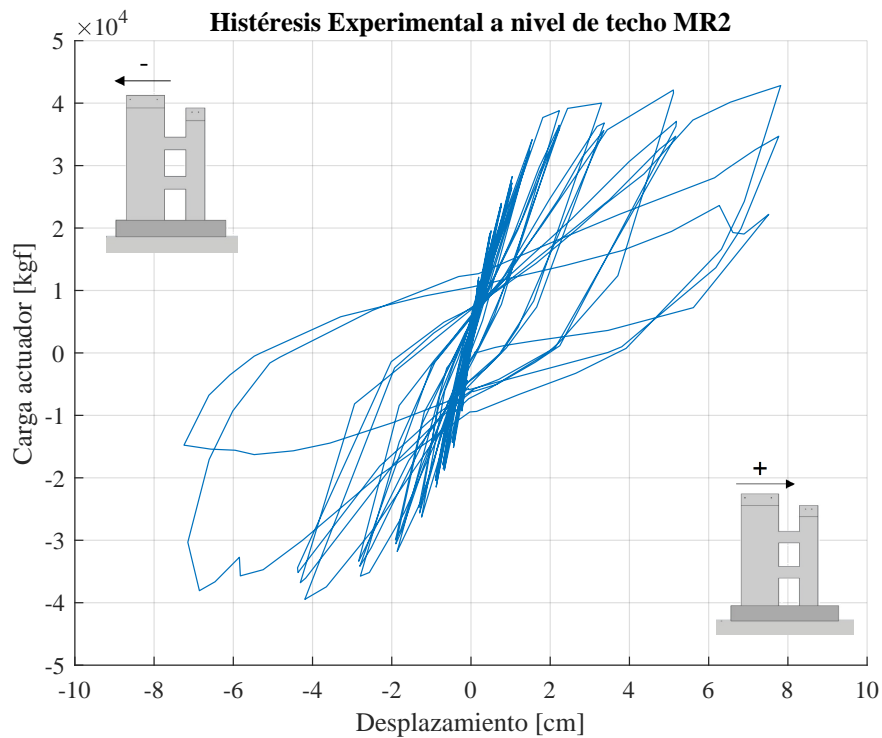


Figura 6.6: Histéresis MR2 - Fotogrametría

Análogamente, el comportamiento histerético del MR2 es presentado en la Figura 6.6. Se observa que existe asimetría respecto a los desplazamientos laterales a nivel de techo del MR2 según la dirección de movimiento, es decir, para derivas positivas se observa un desplazamiento máximo de 7.9 [cm] (asociado al 3% de drift del MR1), mientras que para derivas negativas el valor máximo es de cerca de 7 [cm] (asociado al -3% de drift del MR1). Esto puede deberse a que la carga aplicada por el actuador sobre la probeta es mayor para las derivas positivas. En adición a lo anterior, se tiene que el segundo y tercer ciclo asociado a cada deriva presenta mayores valores de desplazamiento que el primer ciclo, lo cual no sucede en el MR1 puesto que su desplazamiento es controlado. Esto se observa con mayor claridad para los ciclos asociados al 0.9%, 1.35%, 2% y 3% del MR1.

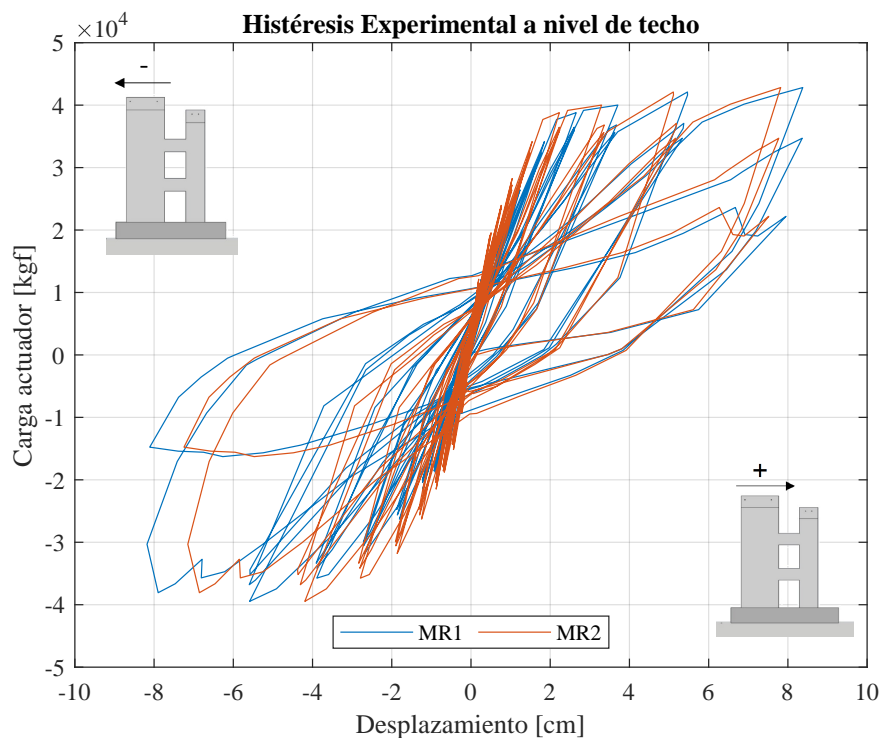


Figura 6.7: Comparación Histéresis MR1 y MR2 - Fotogrametría

A modo de comparación, en la Figura 6.7 se presentan las curvas de histéresis obtenidas mediante fotogrametría para ambos muros de la probeta. Se observa que el desplazamiento lateral a nivel de techo es mayor en el MR1 que en el MR2, pero esta diferencia se acentúa para derivas negativas.

6.2. Correlación entre LVDTs y Fotogrametría

A continuación se presentan los resultados de correlación entre el monitoreo por LVDTs y por fotogrametría de la probeta durante el ensayo.

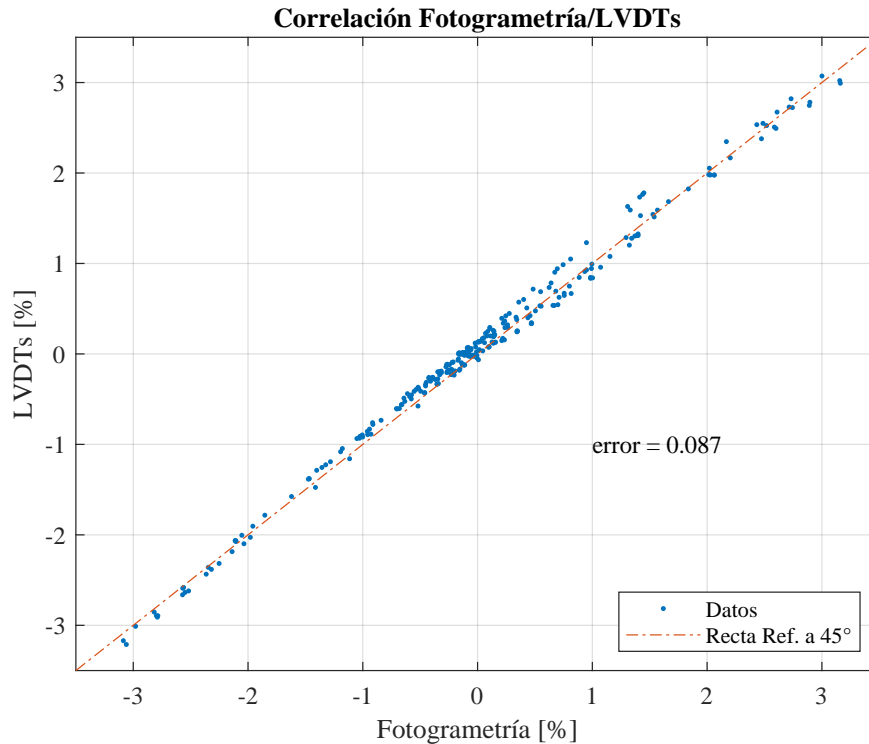


Figura 6.8: Correlación Deriva MR1 entre LVDT y Fotogrametría

En la Figura 6.8 se observa el resultado de graficar todos los puntos de medición de la deriva a nivel de techo del MR1 mediante fotogrametría y mediante el LVDT de control. Se grafica también una recta a 45° , ya que ésta representa el comportamiento de los puntos en el caso de que la correlación fuese total entre ambos métodos de medición. Se tiene que en general la correlación entre los resultados de ambas metodologías son similares, existiendo algunos puntos cuyo error es mayor para derivas positivas. Sin embargo, la correlación en general se considera aceptable.

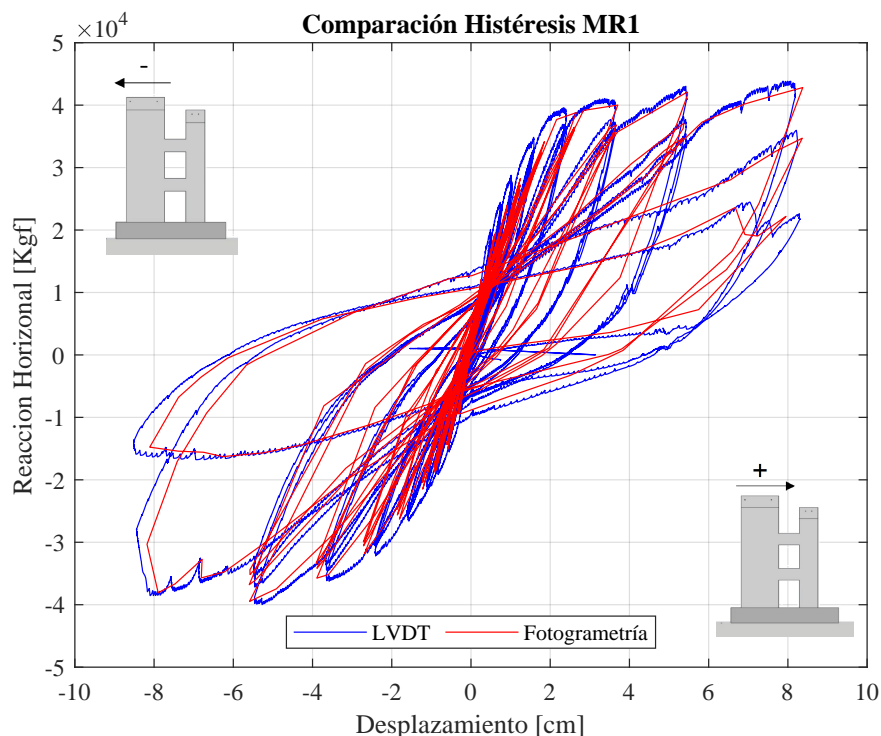


Figura 6.9: Comparación Histéresis MR1 - LVDT y Fotogrametría

En términos histeréticos, en la Figura 6.9 se presenta la comparación entre las curvas de carga-desplazamiento obtenidas mediante fotogrametría y mediante LVDT. Cabe mencionar que ambas curvas se encuentran ya corregidas por rotación y desplazamiento del pedestal. En particular, la curva de histéresis a nivel de techo del MR1 es obtenida del trabajo de Raffo [36]. Se observa que la curva obtenida mediante LVDT es más suave que la curva obtenida con fotogrametría. Esto se debe a la cantidad de puntos considerados en cada método de medición, ya que para la medición con LVDT se considera una tasa de 10 muestras por segundo, obteniendo así una gran cantidad de puntos en cada ciclo del ensayo, mientras que en las mediciones por fotogrametría las mediciones se realizan más espaciadas en el tiempo (entre 15 y 20 [s] aprox.), obteniendo así una curva conformada por rectas que unen a dichos puntos de medición. En términos de desplazamientos, se observa que en general los resultados son similares entre sí para cada método, existiendo diferencias máximas de 0.5 [cm], las cuales se identifican en las derivas más altas.

6.3. Evolución de Grietas y Daño en Muros

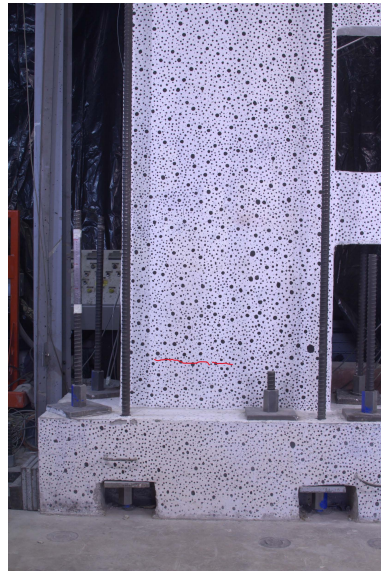
A continuación se presenta la evolución de grietas y daño en los muros para cada peak del ensayo. Cabe mencionar que si bien durante el ensayo existen 3 ciclos por cada deriva, las fotografías presentadas en esta sección corresponden al segundo ciclo asociado. Adicionalmente, se presentan los mapas de color de deformación unitaria vertical obtenidas mediante N_{corr} para cada nivel de drift.

En particular, se consideran únicamente los peaks desde el 0.3 % y -0.3 % (respectivamente, para derivas positivas y negativas) debido a que en ese nivel de deriva se comenzó a observar agrietamiento del hormigón durante el ensayo.

Los valores de drift mencionados en cada punto de esta sección corresponden a los del MR1. Cabe mencionar que las líneas de color rojo sobre los muros se utilizan para indicar nuevas fisuras, mientras que las líneas de color azul corresponden a fisuras ya existentes desde derivas anteriores del ensayo.

6.3.1. Derivas Positivas

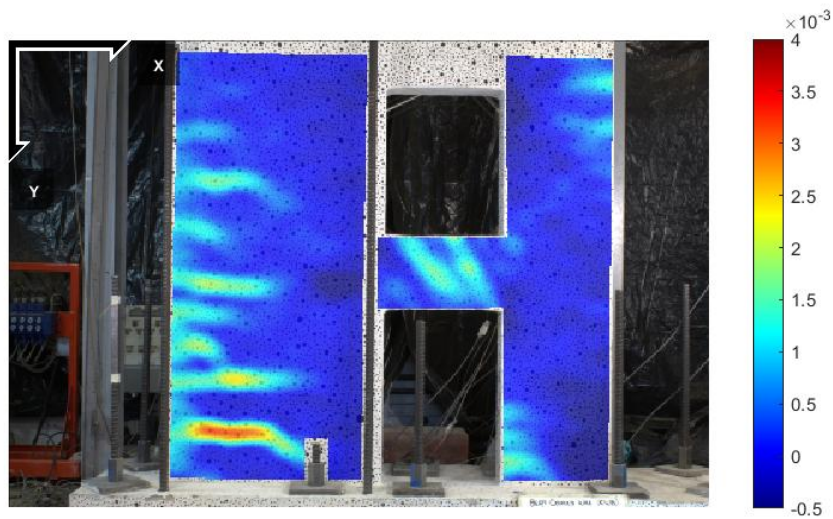
- 0.3% de Drift:



(a) MR1 a 0.3% de Drift



(b) MR2 a 0.3% de Drift

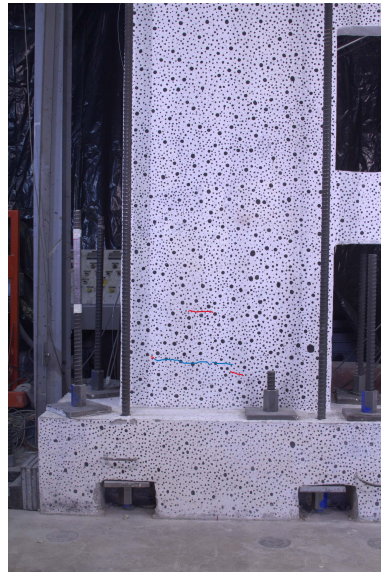


(c) Deformación Vertical Unitaria a 0.3% de Drift

Figura 6.10: Grietas Muros a 0.3% Drift

En la Figura 6.10 se observa una grieta de flexión en la base del MR1, la cual es concordante con las deformaciones obtenidas en Ncorr. Para el caso del MR2, no se observa ninguna grieta.

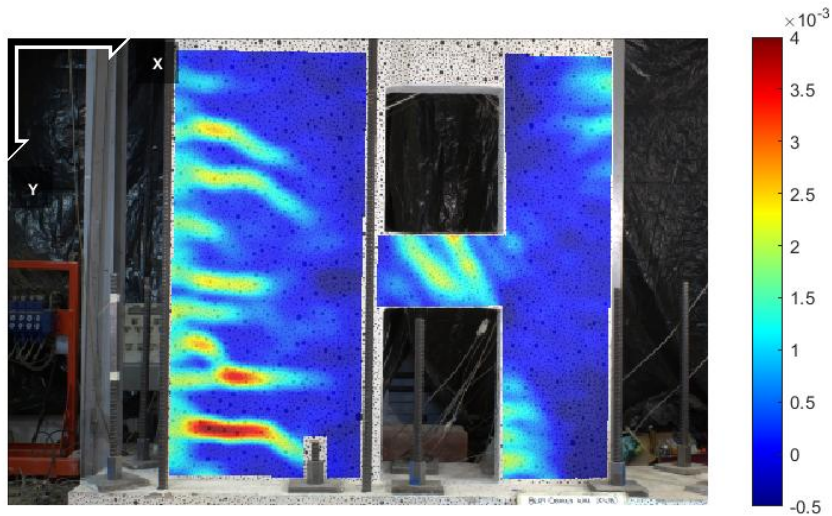
- 0.4% de Drift:



(a) MR1 a 0.4% de Drift



(b) MR2 a 0.4% de Drift

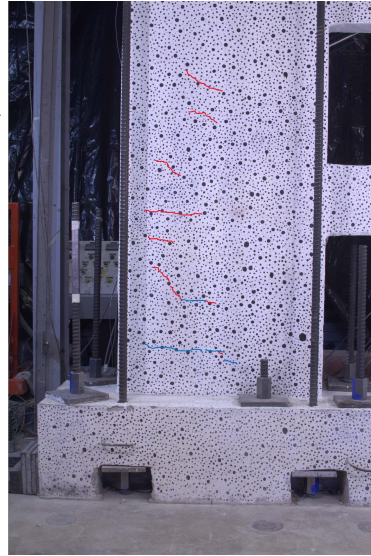


(c) Deformación Vertical Unitaria a 0.4% de Drift

Figura 6.11: Grietas Muros a 0.4% Drift

Al 0.4% de drift (Figura 6.11) nuevamente no se observan grietas en el MR2, lo cual concuerda con el mapa de color respectivo obtenido con fotogrametría. En el MR1 se observa propagación de la grieta ya existente y una nueva grieta de flexión, ambas en el primer piso de dicho muro.

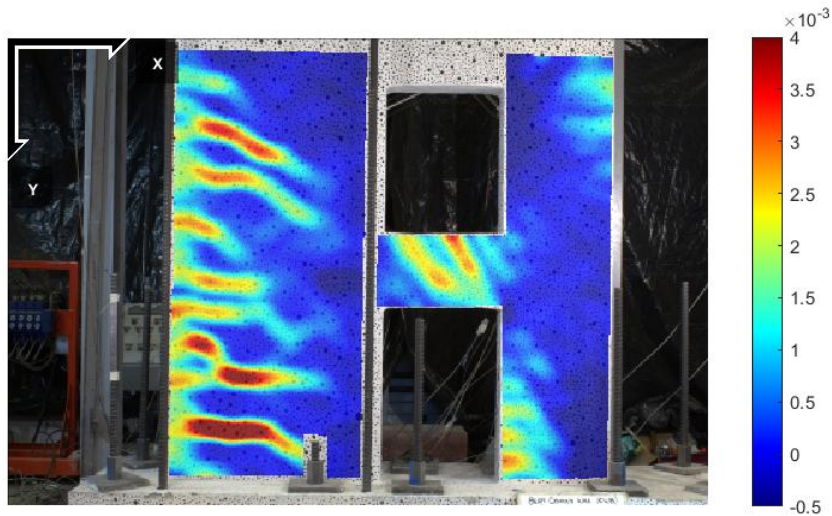
- 0.6 % de Drift:



(a) MR1 a 0.6 % de Drift



(b) MR2 a 0.6 % de Drift

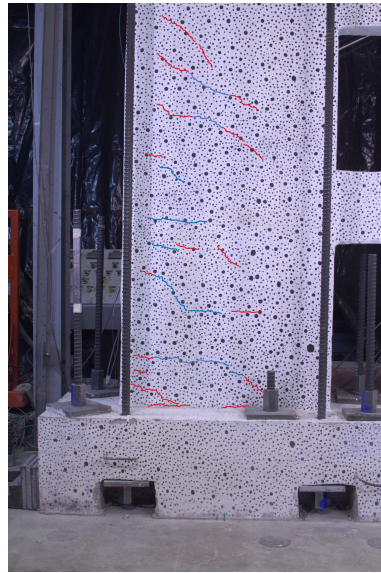


(c) Deformación Vertical Unitaria a 0.6 % de Drift

Figura 6.12: Grietas Muros a 0.6 % Drift

Para el 0.6 % de deriva, presentado en la Figura 6.12, se observan las primeras grietas en el MR2 asociadas a peaks positivos. Dichas grietas se asocian a la flexión del primer piso del MR2. Por su parte, en el MR1 se observa la extensión de las grietas por flexión ya existentes y la aparición de grietas en el segundo piso de dicho muro, lo cual es concordante con lo obtenido en *Ncorr*.

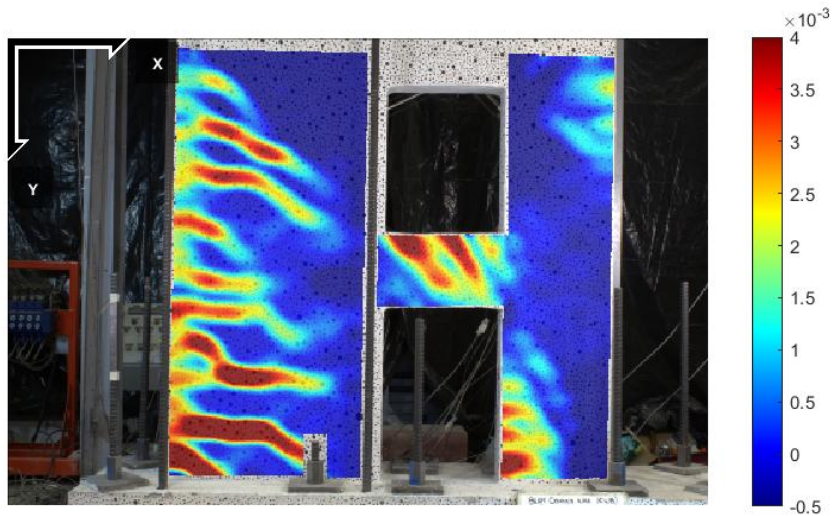
- 0.9% de Drift:



(a) MR1 a 0.9% de Drift



(b) MR2 a 0.9% de Drift

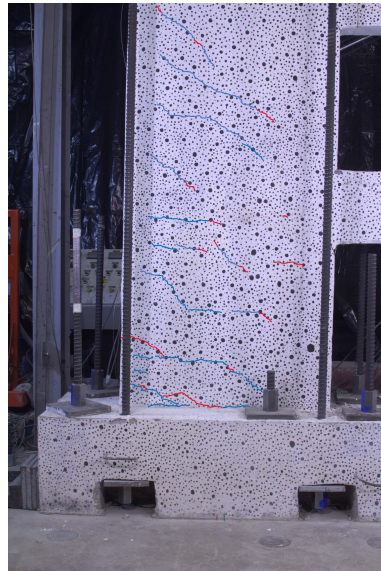


(c) Deformación Vertical Unitaria a 0.9% de Drift

Figura 6.13: Grietas Muros a 0.9% Drift

En la Figura 6.13 se observa la propagación de las grietas por flexión en el MR1 y la aparición de grietas nuevas desde la base hasta el segundo piso, estando claramente concentradas en el borde a tracción del muro y siendo más inclinadas a medida que se encuentran más altas. En el MR2 por su parte, se extienden las grietas ya existentes en el primer piso y se concentran en el borde izquierdo a tracción, confirmando así el comportamiento controlado por flexión en el primer piso del muro.

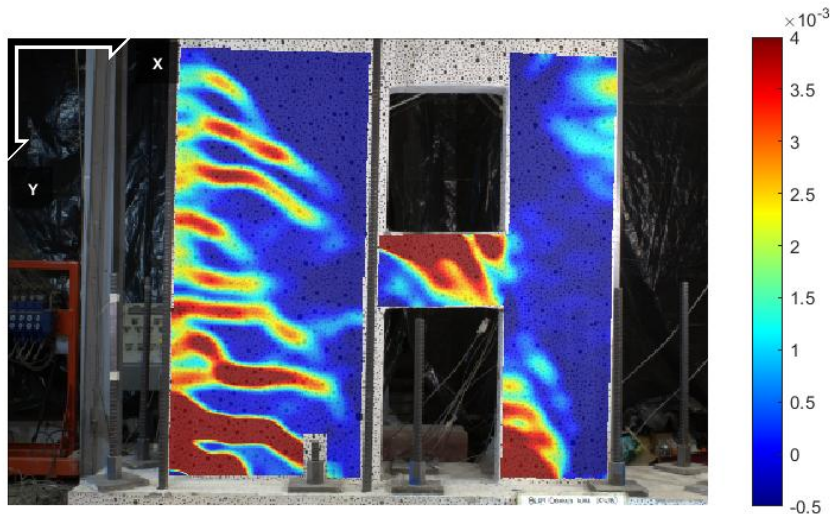
- 1.35 % de Drift:



(a) MR1 a 1.35 % de Drift



(b) MR2 a 1.35 % de Drift

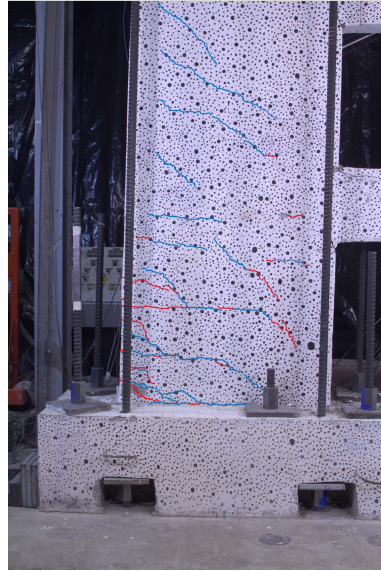


(c) Deformación Vertical Unitaria a 1.35 % de Drift

Figura 6.14: Grietas Muros a 1.35 % Drift

Para el 1.35 % de deriva (Figura 6.14) se identifica la aparición de nuevas grietas de flexión en el MR1 y la extensión de las ya existentes en el primer y segundo piso de dicho muro. Adicionalmente, en el lado izquierdo de la base se tiene descascaramiento del hormigón. En el MR2 se observa la extensión de las grietas a flexión ya existentes en el primer piso. Las grietas se correlacionan correctamente con las deformaciones unitarias verticales obtenidas a través de fotogrametría.

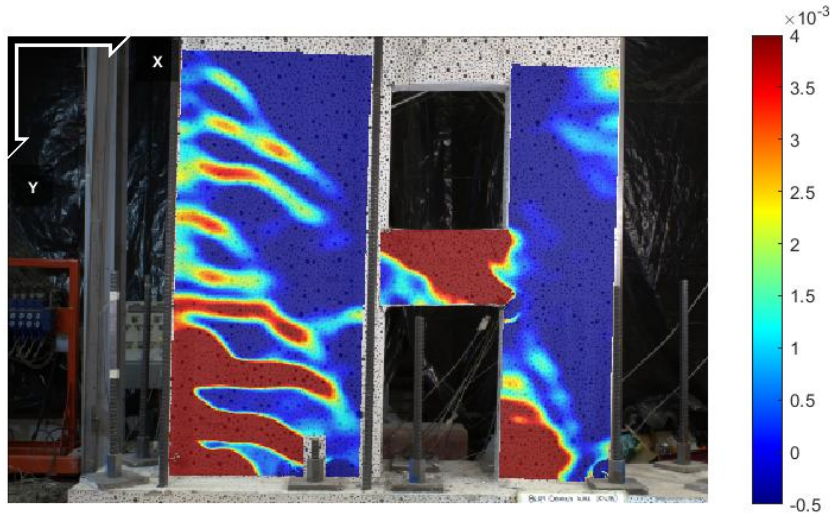
- 2% de Drift:



(a) MR1 a 2% de Drift



(b) MR2 a 2% de Drift



(c) Deformación Vertical Unitaria a 2% de Drift

Figura 6.15: Grietas Muros a 2% Drift

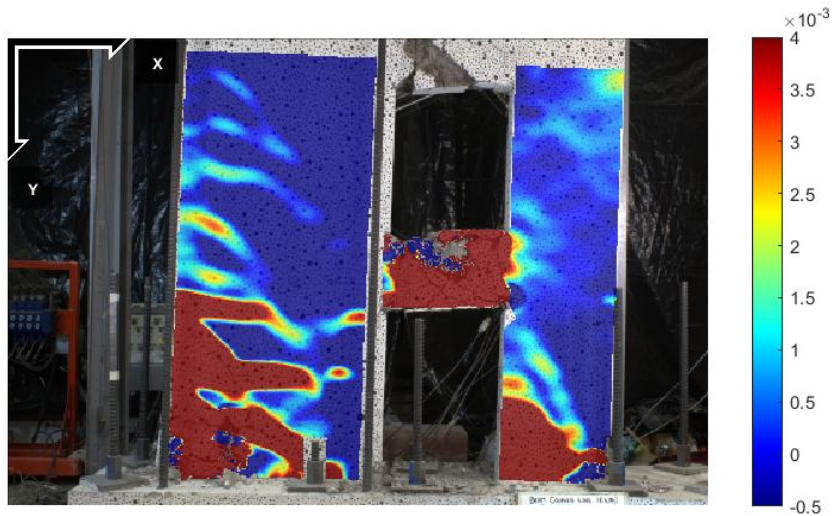
Para un nivel de drift del 2% (Figura 6.15) se identifica mayor descascaramiento del hormigón en el extremo inferior izquierdo del MR1 y del recubrimiento del hormigón en zonas del primer piso. En cuanto a las grietas del MR1, se observa que casi no aparecen nuevas grietas, pero las ya existentes se propagan bastante, concentrándose en el primer piso de dicho muro. En el MR2, por su parte, se observa propagación de las grietas a flexión en el primer piso, sin extenderse a los superiores. Respecto a los resultados de N_{corr} , se observa que son concordantes respecto al comportamiento plástico observado en gran parte del primer piso de cada uno de los muros, pero siendo mayor en el MR1.

- 3 % de Drift:



(a) MR1 a 3 % de Drift

(b) MR2 a 3 % de Drift



(c) Deformación Vertical Unitaria a 3 % de Drift

Figura 6.16: Grietas Muros a 3 % Drift

Para una deriva del 3 %, se tiene que, según lo presentado en la Figura 6.16, las grietas del primer piso del MR2 se extienden para abarcar casi la totalidad del ancho del muro. Por su parte, las grietas del MR1 se extienden a lo largo de todo el ancho del elemento a nivel del primer piso. Adicionalmente, se observa gran desprendimiento del hormigón, dejando así las barras de refuerzo a la vista. Durante el segundo ciclo al 3 %, se observa falla dúctil por pandeo local en las 4 barras de refuerzo verticales del borde izquierdo del MR1 a nivel de la base, lo cual marca el fin del ensayo. Los resultados de deformaciones unitarias obtenidos con fotogrametría muestran un predominante comportamiento plástico en gran parte del primer piso de ambos muros, el cual es mayor en el MR1. Un resultado interesante a destacar es que las deformaciones unitarias en el segundo piso del MR1

son menores para este nivel de deriva que para derivas menores (2%, 1.35%) lo cual se puede deber a la relajación del elemento como consecuencia posterior a la falla dúctil de las barras de refuerzo a nivel de la base en el extremo izquierdo.



(a) Pandeo Local en zona inferior izquierda del MR1

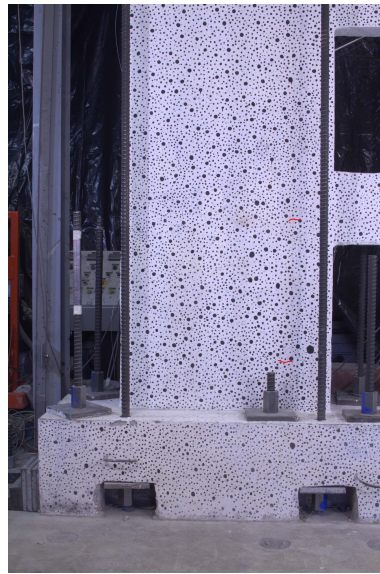


(b) Barras Cortadas

Figura 6.17: Barras de refuerzo cortadas producto del pandeo local

6.3.2. Derivas Negativas

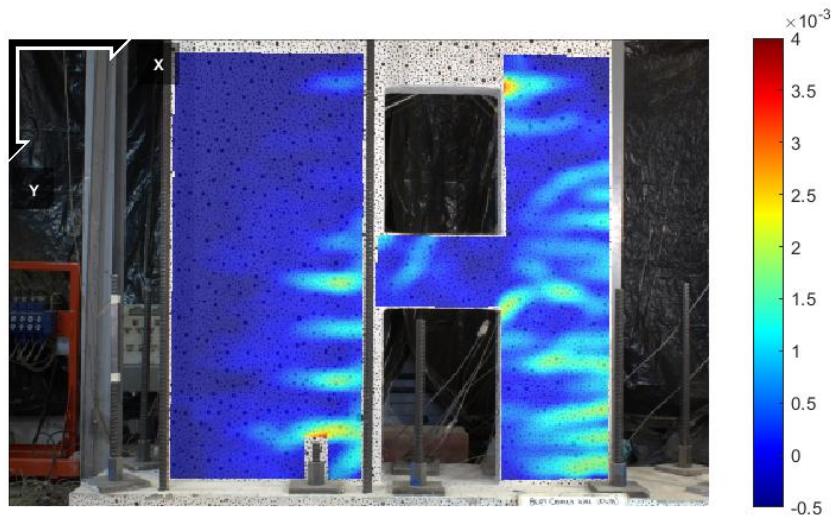
- -0.3% de Drift:



(a) MR1 a -0.3% de Drift



(b) MR2 a -0.3% de Drift

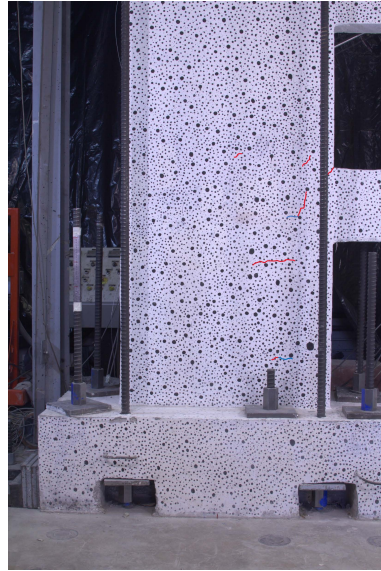


(c) Deformación Vertical Unitaria a -0.3% de Drift

Figura 6.18: Grietas Muros a -0.3% Drift

En la Figura 6.18, asociada al -0.3% de deriva, se identifica la aparición de pequeñas grietas cerca del borde derecho del MR1, mientras que en el MR2 no se observa ninguna grieta. Esto es concordante con lo mostrado por las deformaciones unitarias.

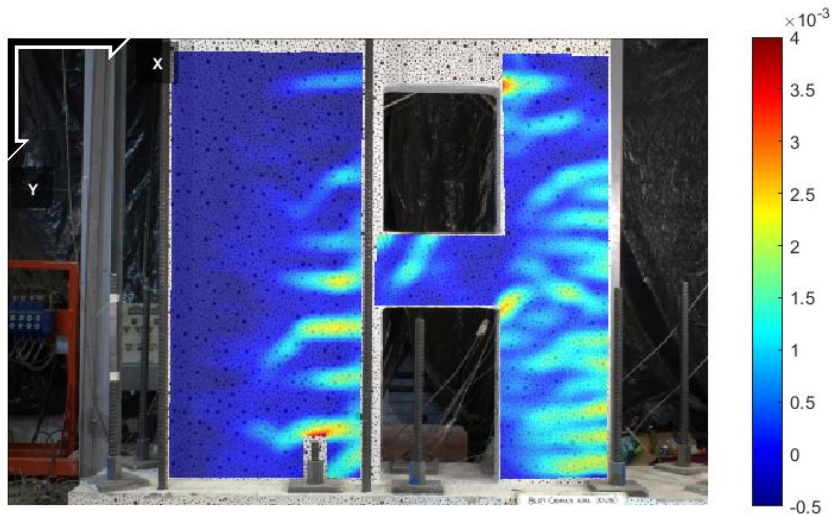
- -0.4% de Drift:



(a) MR1 a -0.4% de Drift



(b) MR2 a -0.4% de Drift

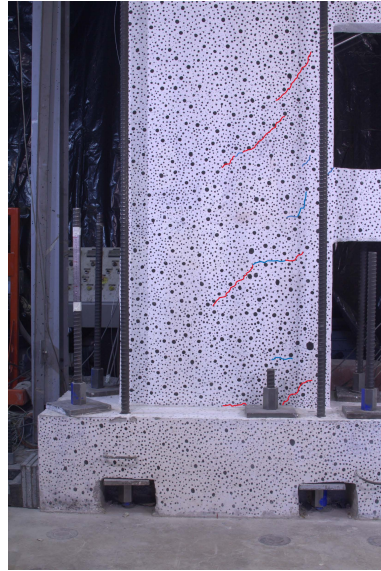


(c) Deformación Vertical Unitaria a -0.4% de Drift

Figura 6.19: Grietas Muros a -0.4% Drift

Para un -0.4% de deriva (Figura 6.19) se observa la aparición de nuevas grietas en el borde derecho del MR1 y en la junta con la viga inferior. En el MR2 por su parte, se observan grietas en el borde derecho del muro que responden a un comportamiento a flexión. Lo anterior es representado correctamente por las deformaciones unitarias obtenidas en N_{corr} para este nivel de drift.

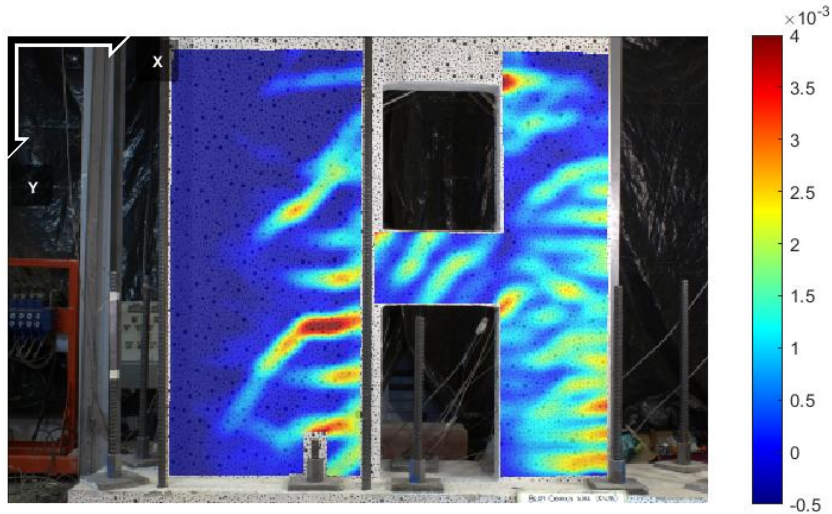
- -0.6% de Drift:



(a) MR1 a -0.6% de Drift



(b) MR2 a -0.6% de Drift

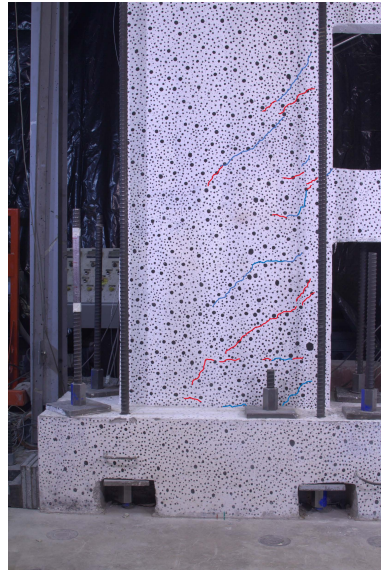


(c) Deformación Vertical Unitaria a -0.6% de Drift

Figura 6.20: Grietas Muros a -0.6% Drift

En la Figura 6.20 se observa, para un nivel de deriva del -0.6%, la aparición de nuevas grietas en el lado derecho del MR1 a nivel de la base y a nivel del segundo piso. A su vez, las grietas ya existentes del primer piso se prolongan. Dado que las grietas se distribuyen desde el borde derecho hacia el centro, se tiene que responden al comportamiento a flexión del muro. Por su parte, las grietas del primer piso del MR2 se extienden, siendo concordantes con lo obtenido en N_{corr} en términos de deformaciones unitarias para este nivel de deriva.

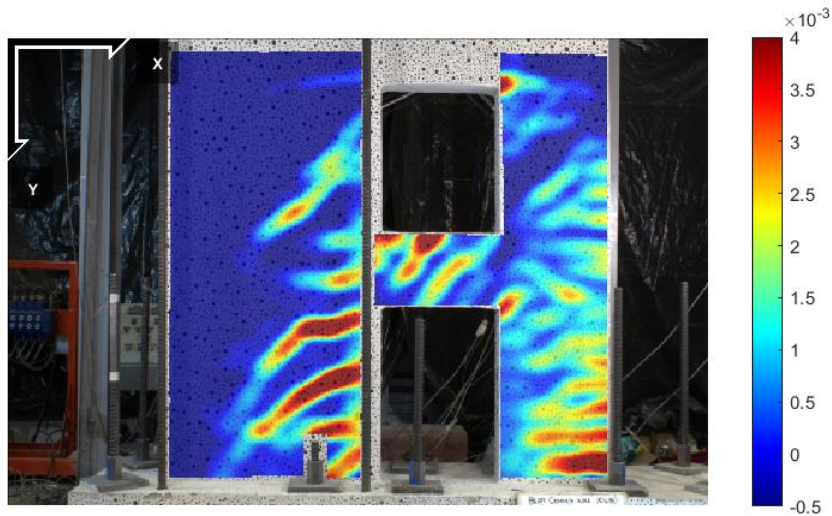
- -0.9% de Drift:



(a) MR1 a -0.9% de Drift



(b) MR2 a -0.9% de Drift

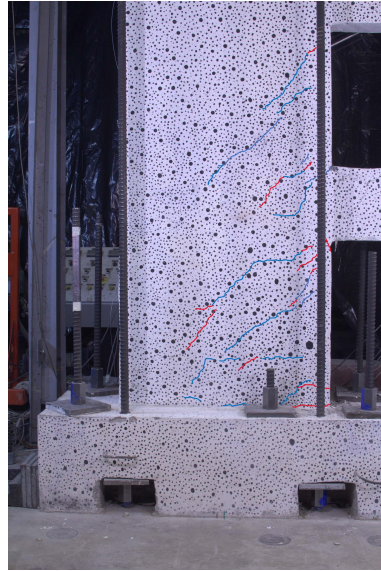


(c) Deformación Vertical Unitaria a -0.9% de Drift

Figura 6.21: Grietas Muros a -0.9% Drift

Para un nivel de deriva del -0.9% (Figura 6.21) se identifica la generación de nuevas grietas a flexión a nivel del primer piso del MR1 y la extensión de las grietas ya existentes en dicho muro. En el MR2 se observa la prolongación de las grietas a flexión ya existentes, alcanzando más de la mitad del ancho del muro, y la aparición de nuevas grietas a flexión en el primer piso. Nuevamente se observa concordancia con los resultados de deformaciones unitarias obtenidos por fotogrametría.

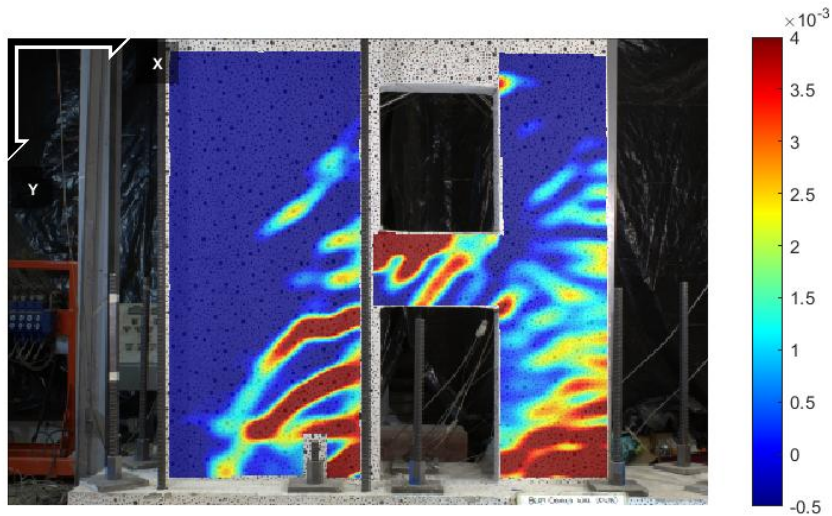
- -1.35 % de Drift:



(a) MR1 a -1.35 % de Drift



(b) MR2 a -1.35 % de Drift

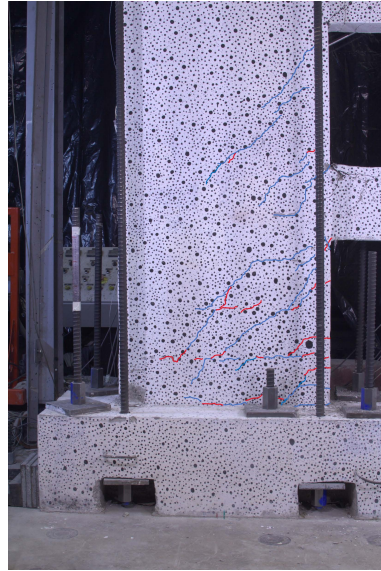


(c) Deformación Vertical Unitaria a -1.35 % de Drift

Figura 6.22: Grietas Muros a -1.35 % Drift

Para un drift del -1.35 % (Figura 6.22) se observa que las grietas existentes a flexión cercanas al borde derecho del MR1 se prolongan, sobrepasando así más de la mitad del ancho del muro. Principalmente, se observa mayor concentración de grietas en el primer piso. En el MR2 se observa prolongación de las grietas a flexión cercanas a la base, las cuales alcanzan a cubrir gran parte del ancho del muro. No se observa la generación de grietas en pisos superiores del MR2. Los resultados obtenidos en N_{corr} para este nivel de deriva muestran una concentración de deformaciones a nivel basal del MR2 que evidencian un comportamiento plástico de dicha zona. Se observan deformaciones plásticas concordantes con las grietas más largas identificadas en el primer piso del MR1.

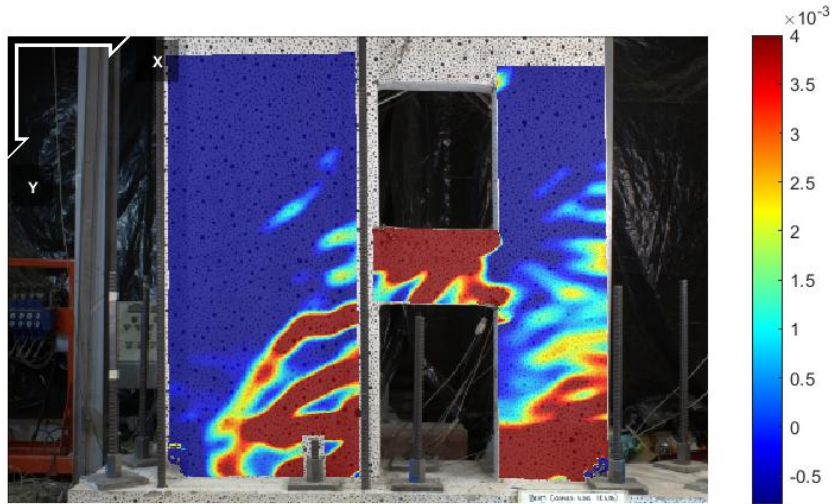
- -2% de Drift:



(a) MR1 a -2% de Drift



(b) MR2 a -2% de Drift

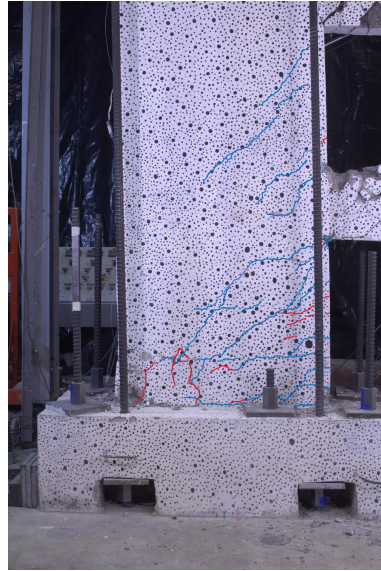


(c) Deformación Vertical Unitaria a -2% de Drift

Figura 6.23: Grietas Muros a -2% Drift

Para un drift del -2% (Figura 6.23) se observa desprendimiento del hormigón en los extremos inferiores derechos de ambos muros, siendo éstos mayores en el MR2. En el MR1 se observa la prolongación de las grietas ya existentes producto de la flexión a la que es sometida el muro. Dichas grietas se prolongan desde el borde derecho hasta gran parte del ancho del MR1 y se concentran principalmente en el primer piso. En el MR2 se observa que las grietas a flexión existentes en el primer piso se extienden, abarcando así casi la totalidad del ancho del muro. Las grietas más largas se ubican cercanas a la base de dicho elemento. Se observa así un comportamiento plástico del primer piso de ambos muros, el cual se ve más acentuado en el primer piso del MR2, lo cual es concordante con las deformaciones unitarias obtenidas con fotogrametría.

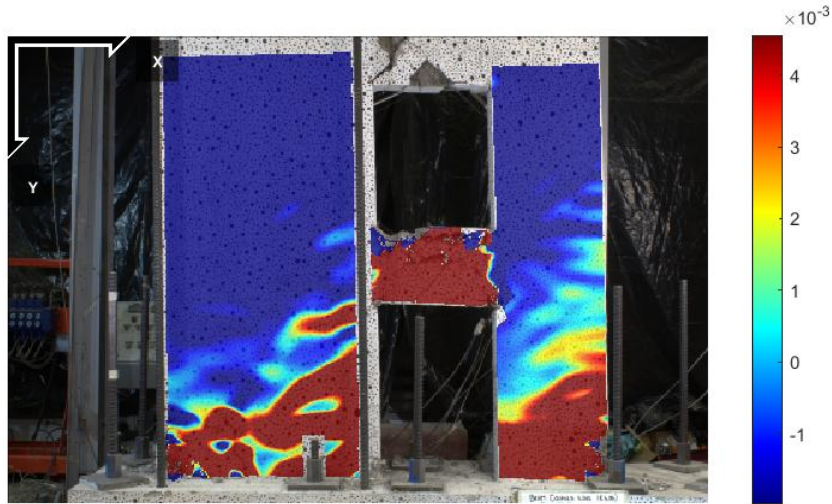
- -3% de Drift:



(a) MR1 a -3% de Drift



(b) MR2 a -3% de Drift



(c) Deformación Vertical Unitaria a -3% de Drift

Figura 6.24: Grietas Muros a -3% Drift

En la Figura 6.24, asociada a un nivel de deriva del -3%, se observa que las grietas a flexión en el primer piso de ambos muros se prolongan, abarcando así ambos muros en todo su ancho. Se identifica nuevamente desprendimiento del hormigón en los extremos derechos inferiores de los muros y también de la junta entre MR1 y viga inferior. No se observa la aparición de grietas el tercer piso del MR2 o en el segundo o tercer piso del MR2. Adicionalmente, se observa pandeo local en las barras de refuerzo verticales del borde derecho del MR2 a nivel de la base.

6.4. Desplazamiento Lateral en Altura

A continuación se presentan los resultados de desplazamiento lateral en altura de ambos muros de la probeta según el nivel de deriva durante el ensayo, medidos en su fibra central, obtenidos a través de fotogrametría. Cabe mencionar que estos resultados se encuentran corregidos por rotación y desplazamiento del pedestal.

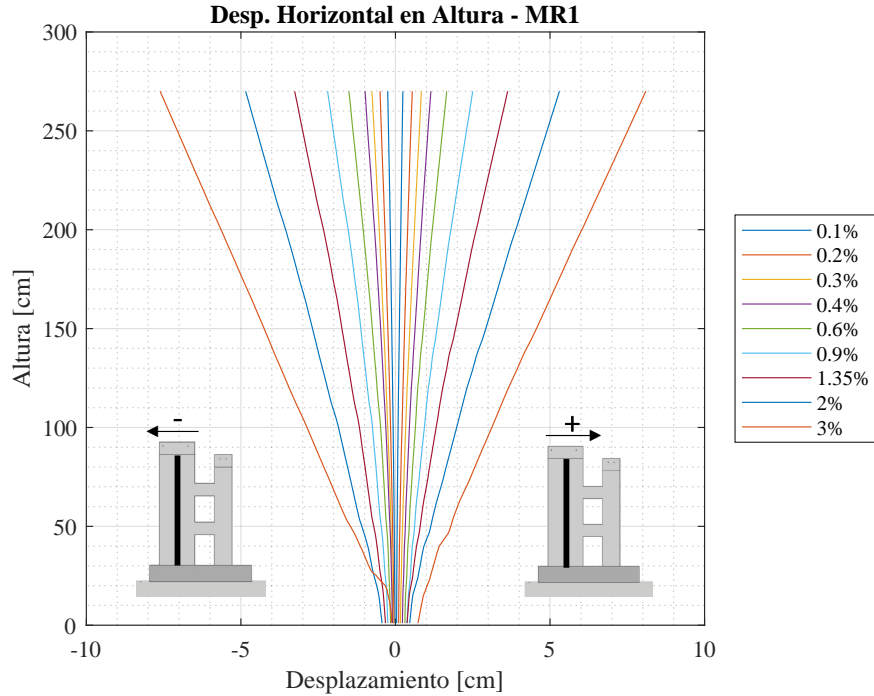


Figura 6.25: Desplazamiento Lateral en Altura - MR1

En la Figura 6.25 se observa que el desplazamiento lateral es simétrico en el MR1 con respecto a las derivas negativas y positivas, lo cual es lógico considerando que su nivel de desplazamiento a nivel de techo se encuentra controlado por el ensayo.

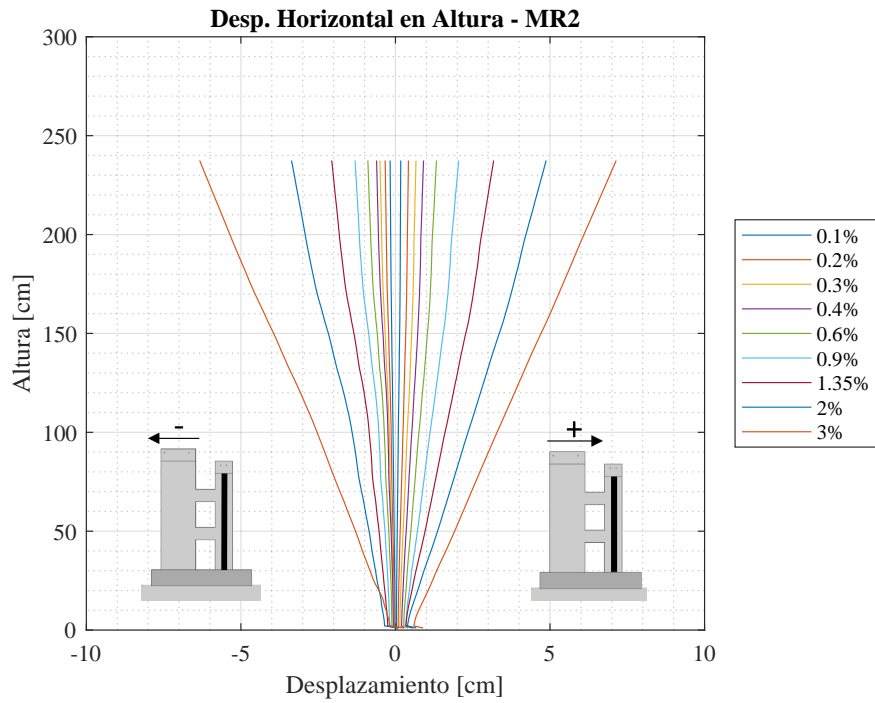


Figura 6.26: Desplazamiento Lateral en Altura - MR2

Por su parte, el perfil de desplazamiento lateral en altura de la fibra central del MR2, mostrado en la Figura 6.26, evidencia que en dicho muro no existe simetría respecto a las derivas positivas y negativas. Se tiene que los desplazamientos son mayores para derivas positivas a lo largo de todo el muro en comparación al mismo nivel de deriva negativa. Este mismo resultado fue identificado previamente en el análisis de las curvas de histéresis (Figura 6.6).

6.5. Deformación Basal de Muros

A continuación se presentan los resultados de deformación unitaria en la base de los muros de la probeta durante el ensayo, para distintos niveles de drift.

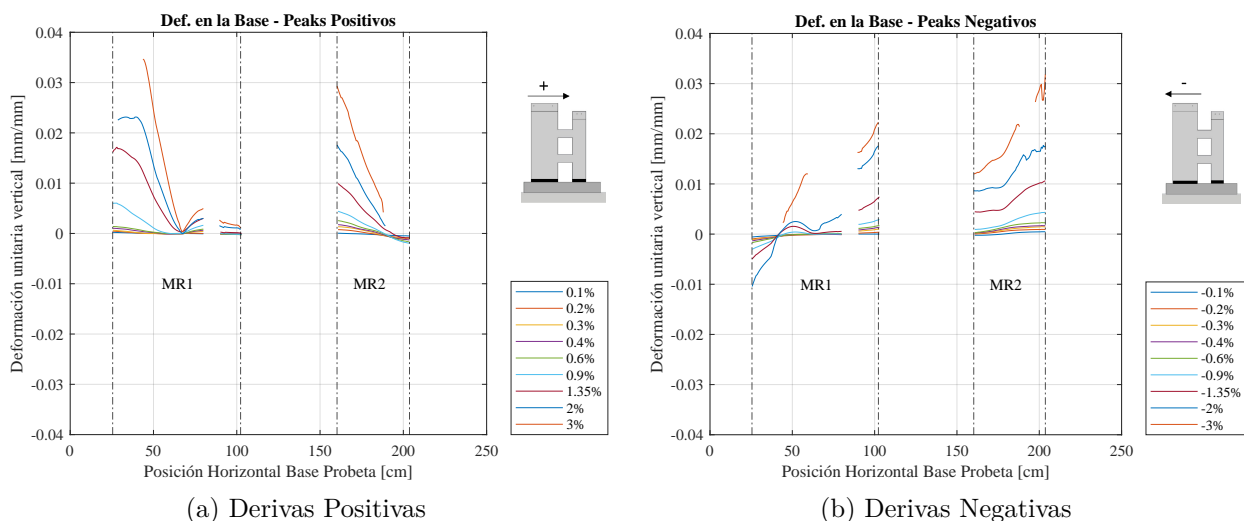


Figura 6.27: Perfiles de Deformación Basal

En la Figura 6.27 se presentan los perfiles de deformación a lo largo de la base de ambos muros de la probeta. La tracción se presenta con signo positivo y la compresión con signo negativo. Se identifica un comportamiento que evidencia un acoplamiento intermedio para los muros, similar a lo presentado previamente en la Figura 2.7. Para derivas positivas (Figura 6.27.a) se identifica tracción en los bordes izquierdos de cada muro y compresión hacia el borde derecho, a excepción de las derivas del 1.35 %, 2 % y 3 % en el borde derecho del MR1, evidenciando así una distribución de esfuerzos en la base de ambos muros. Adicionalmente, se observa una zona en el MR1 sin datos. Esto se debe a la presencia de una barra y tuerca del sistema de empotrado de la probeta a la losa de reacción, lo cual no permite realizar mediciones con fotogrametría en esa zona y también induce a menor precisión en las deformaciones obtenidas a su alrededor (Figura 6.28).

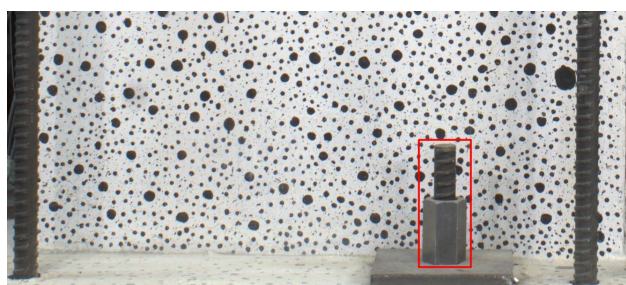
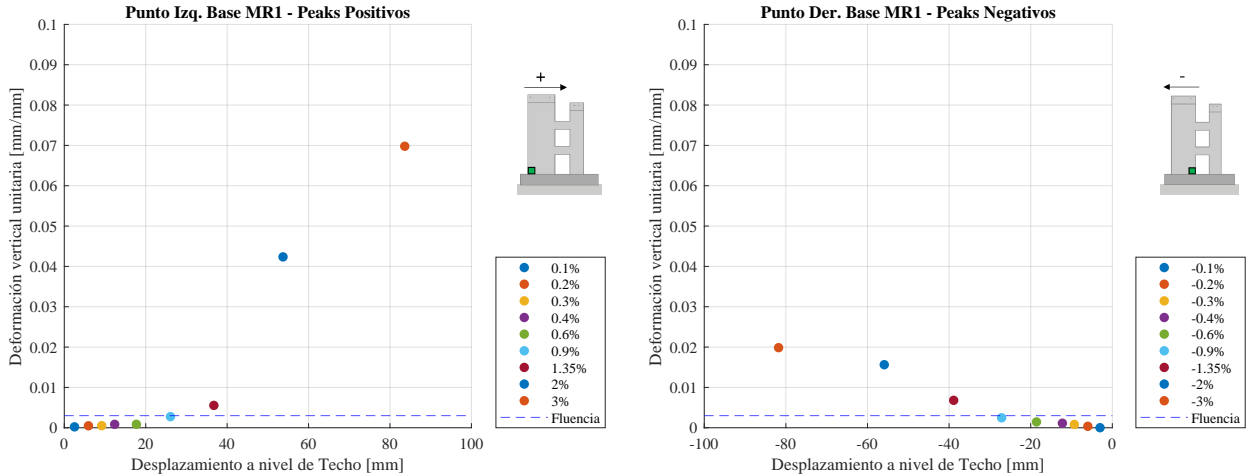


Figura 6.28: Barra y Tuerca del postensado en la base del MR1

Por otro lado, para derivas negativas (Figura 6.27.b) se observa que la base del MR2 se encuentra en tracción para todos los niveles de deriva y el MR1 en tracción en su borde derecho y compresión hacia el lado izquierdo. De esta forma, se identifica que para derivas negativas el MR1 posee mayores deformaciones a compresión que para derivas positivas,

debido a que el MR2 se encuentra trabajando solo a tracción para este sentido de movimiento.

También es posible identificar que las tracciones medidas son mayores que las compresiones, tanto para derivas positivas como para derivas negativas. Esto se puede explicar por dos factores. Primero, la alta resistencia a la compresión del hormigón en comparación con su resistencia a la tracción; y segundo, la menor precisión de la fotogrametría para medir compresiones en comparación con las tracciones.



(a) Esquina Inf. Izquierda MR1 - Derivas Positivas

(b) Esquina Inf. Derecha MR1 - Derivas Negativas

Figura 6.29: Deformación vertical unitaria en esquinas inferiores traccionadas - MR1

En las Figuras 6.29 y 6.30 se observa la deformación unitaria vertical de un punto traccionado en la base del MR1 o MR2, respectivamente, en función del desplazamiento a nivel de techo del MR1. Como es lógico, se identifica que la deformación unitaria en la base aumenta a medida que aumenta el nivel de deriva. Se indica también una línea que representa la deformación de fluencia del acero obtenida en los ensayos de barras de acero descritos anteriormente, la cual es de $\varepsilon_y = 0.0023$ [mm/mm].

En el caso del MR1, para derivas positivas (Figura 6.29.a) se observa fluencia del borde inferior izquierdo del MR1 para un drift del 0.9%. Análogamente, para derivas negativas (Figura 6.29.b) se observa fluencia del borde inferior derecho del MR1 para una deriva del -0.9%. Sin embargo, para derivas superiores (1.35%, 2%, 3% y -1.35%, -2%, -3%, respectivamente) se observa que la deformación unitaria es mayor para derivas positivas que para derivas negativas. Esto coincide con la zona donde se produce mayor desprendimiento del hormigón en la base.

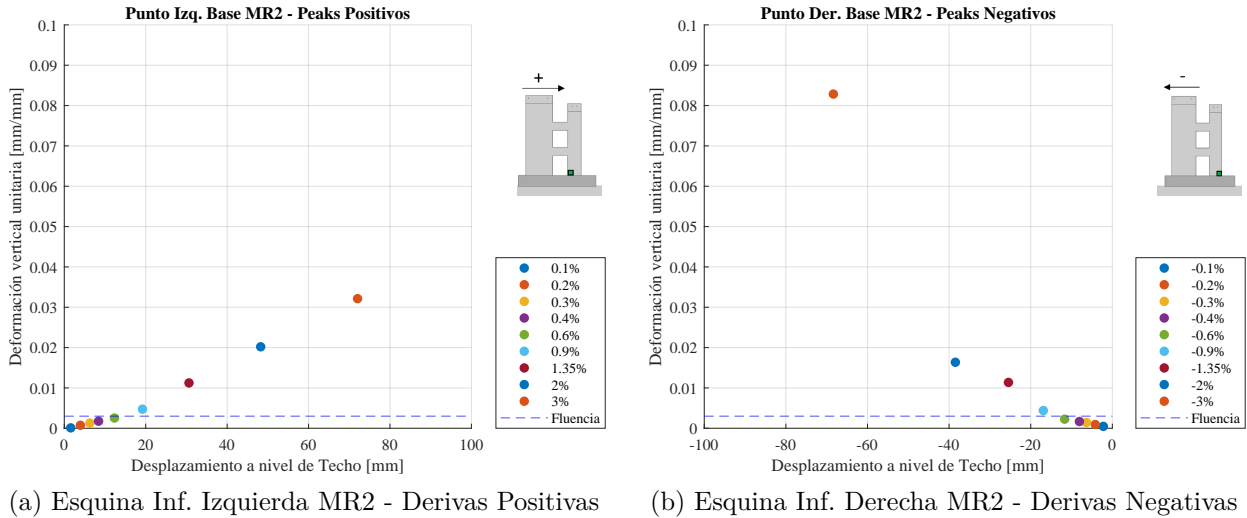


Figura 6.30: Deformación vertical unitaria en esquinas inferiores traccionadas - MR2

De forma similar, para el MR2 (Figura 6.30) se observa que para derivas positivas (Figura 6.30.a) existe fluencia del borde inferior izquierdo para un drift levemente superior al 0.6 %. A su vez, para las derivas negativas, mostradas en la Figura 6.30.b, se observa fluencia del borde inferior derecho para un drift levemente superior al -0.6 %. Para derivas mayores (0.9 %, 1.35 %, 2 % y -0.9 %, -1.35 %, -2 % respectivamente) se observan valores similares en ambos extremos de la base del MR2 (izquierdo y derecho). Sin embargo, para derivas del 3 % y -3 % se identifica que la deformación unitaria es mayor en el borde derecho a tracción que en el borde izquierdo del MR2. Esto coincide con el hecho de que se observó mayor desprendimiento del hormigón en dicha zona durante el ensayo.

6.6. Perfiles de Deformación en Altura

En esta sección se muestran los perfiles de deformación unitaria en función de la deriva de techo del MR1, obtenidos con fotogrametría, para una franja ubicada en cada uno de los bordes de los muros de la probeta, la cual lo recorre en su altura. En particular, se presentan únicamente los bordes de los muros en su estado traccionado (bordes izquierdos en derivas positivas y bordes derechos en derivas negativas), debido a que los valores de deformaciones unitarias para los bordes en su estado comprimido son demasiado bajos como para ser medidos correctamente con fotogrametría. Esto se explica por la mayor resistencia del hormigón a la compresión que a la tracción. Adicionalmente, en cada gráfico se ubica una recta indicando la deformación de fluencia del acero ($\varepsilon_y=0.0023$, mencionada anteriormente). Cabe mencionar que el eje x , asociado a las deformaciones unitarias verticales, se presenta con signo invertido para las derivas positivas, para hacer coincidir las curvas de los gráficos con el lado del borde que se está representando.

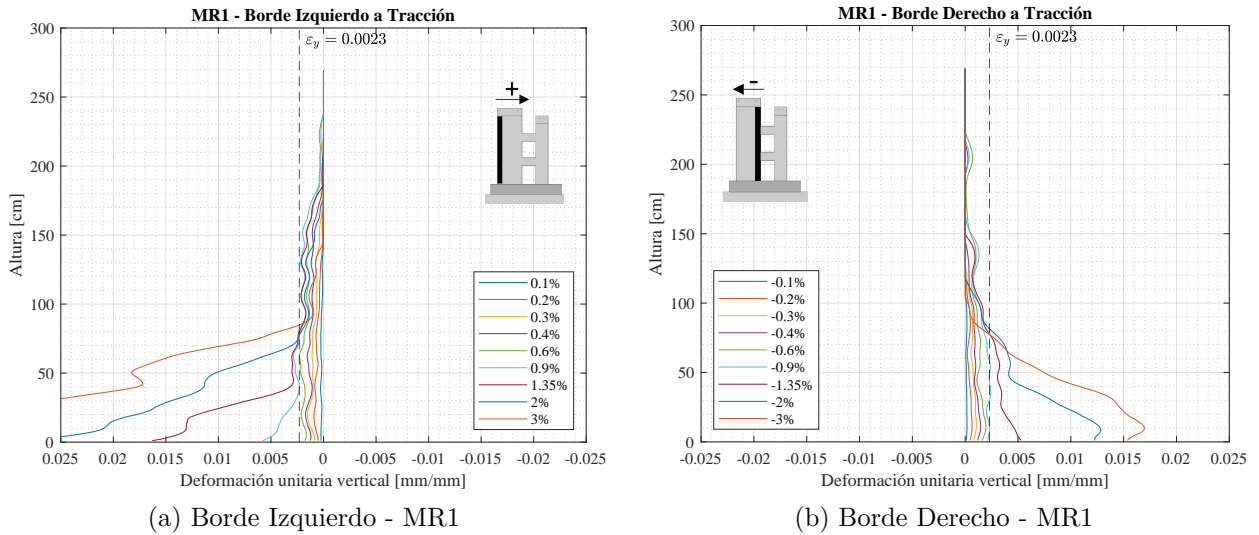


Figura 6.31: Perfiles de Deformación en Altura en Bordes a Tracción - MR1

En la Figura 6.31 se presentan las deformaciones en altura en los bordes traccionados del MR1 en función de la deriva de techo. Se observa que para drifts menores a 0.9% el borde izquierdo (Figura 6.31.a) se encuentra en el rango elástico a lo largo de toda su altura, ya que sus deformaciones unitarias verticales son menores que la deformación de fluencia ε_y . Para derivas superiores (0.9%, 1.35%, 2% y 3%) se observa que la altura de la zona que se encuentra en rango plástico crece a medida que aumenta el drift, llegando hasta una altura del orden de 85 [cm] para un drift del 3%. También se observa que el valor máximo de deformaciones unitarias para dichos drifts se encuentra en la base, y crece a medida que aumenta el desplazamiento de techo, llegando a un valor de 0.03 [mm/mm] para una deriva del 3%.

Por otro lado, en la Figura 6.31.b se observa que el borde derecho del MR1 se encuentra en el rango elástico en toda su altura para derivas de -0.1%, -0.2%, -0.3%, -0.4% y -0.6%, mientras que para un drift del -0.9% se observa que las deformaciones obtenidas son, en el primer piso, levemente mayores en relación a la deformación de fluencia e_y . Ahora bien, para derivas de mayor magnitud (-1.35%, -2% y -3%) se observa que el valor máximo de las deformaciones unitarias verticales aumenta a medida que aumenta también el desplazamiento de techo, alcanzando el valor máximo en la base del muro y teniendo un valor del orden de 0.017 [mm/mm] para un drift del -3%. Además, se observa que la zona en rango plástico aumenta en altura al aumentar el desplazamiento de techo, pero en menor medida que en lo observado para el borde izquierdo (derivadas positivas, en Figura 6.31.a). La altura máxima de la zona plástica identificada para derivadas negativas en el borde izquierdo es del orden de 75 [cm].

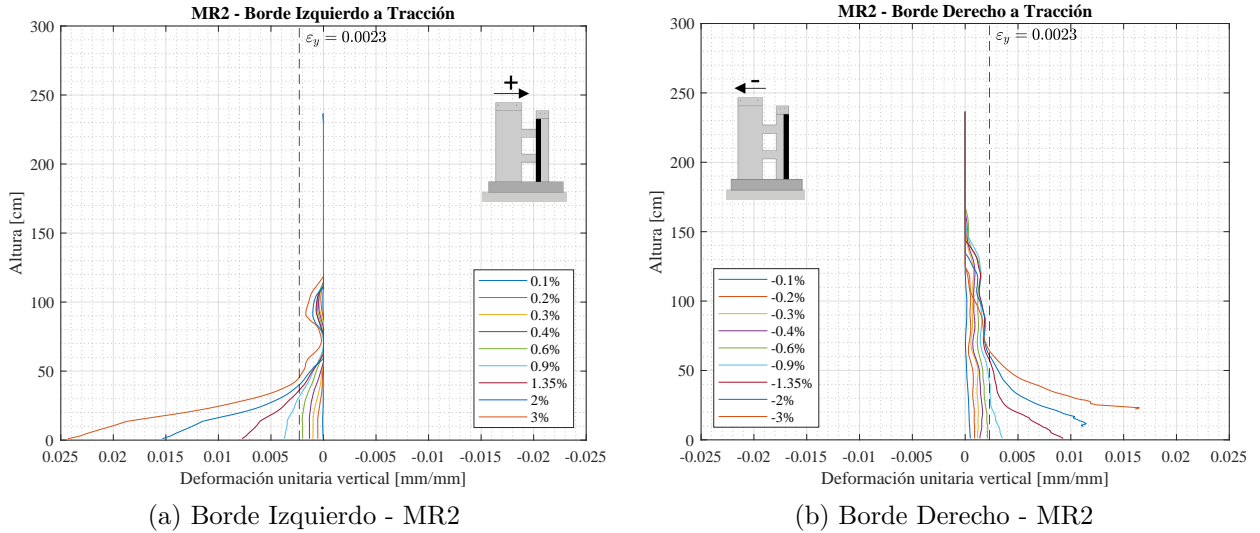


Figura 6.32: Perfiles de Deformación en Altura en Bordes a Tracción - MR2

Respecto al MR2, en la Figura 6.32 se observa la deformación unitaria en cada borde del muro en toda su extensión en función de la deriva del MR1. Para derivas positivas (Figura 6.32.a) es posible identificar que, al igual que para el MR1, el borde izquierdo del MR2 se encuentra en el rango elástico para derivas menores al 0.9 %, mientras que para derivas del 0.9 %, 1.35 %, 2 % y 3 % se observa una zona en rango plástico, cuya altura aumenta a medida que aumenta la deriva. También, se observa que los valores máximos de deformación se encuentran en la base del muro, llegando a un valor máximo de 0.025 [mm/mm] para un drift del 3 %. En particular, se observa que la zona plástica llega a una altura máxima cercana a los 45 [cm] para un drift del 3 %.

Por otro lado, para derivas negativas (Figura 6.32.b), se observa que (de forma similar a lo obtenido para el MR1), para derivas de menor magnitud que el -0.9 %, el borde derecho se encuentra en el rango elástico en toda su extensión, mientras que para derivas del -0.9 %, -1.35 %, -2 % y -3 % se identifica una zona en el rango plástico, la cual aumenta su altura en función del aumento en el desplazamiento de techo al que se somete el MR1. En particular, se observa una altura máxima de la zona plástica cercana a los 65 [cm] para una deriva del -3 %. Respecto a las deformaciones unitarias cercanas a la base, se observa que se realiza un filtro de los datos, debido al desprendimiento del hormigón en el borde derecho del MR2 para derivas del -2 % y -3 % (ver Figuras 6.23.b y 6.24.b), lo cual conlleva que no sea posible obtener mediciones en esa zona por la ausencia de puntos pintados en el hormigón.

6.7. Perfiles de Curvatura en Altura

La curvatura corresponde al ángulo formado por el perfil de deformaciones entre un par de puntos de un elemento con respecto al eje vertical [2]. Para su determinación en altura en cada uno de los muros de la probeta, se utiliza la ecuación 6.1.

$$\phi = \frac{\varepsilon_{yy,c} + \varepsilon_{yy,t}}{L} \quad (6.1)$$

Donde $\varepsilon_{yy,c}$ corresponde a la deformación unitaria vertical en compresión y $\varepsilon_{yy,t}$ corresponde a la deformación unitaria vertical en tracción, y L corresponde a la distancia horizontal

entre los puntos que se utilizan para determinar la curvatura. Lo anterior se presenta en el esquema de la Figura 6.33.

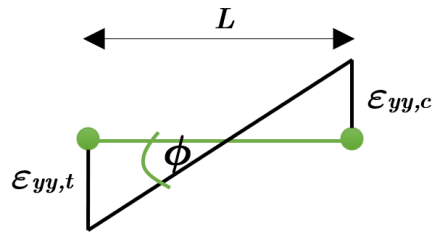


Figura 6.33: Esquema de Curvatura Muros

De esta forma, se obtienen los perfiles de curvatura en altura para derivas positivas y negativas de cada muro de la probeta a lo largo del ensayo. Cabe mencionar que la curvatura es medida entre los bordes de cada muro.

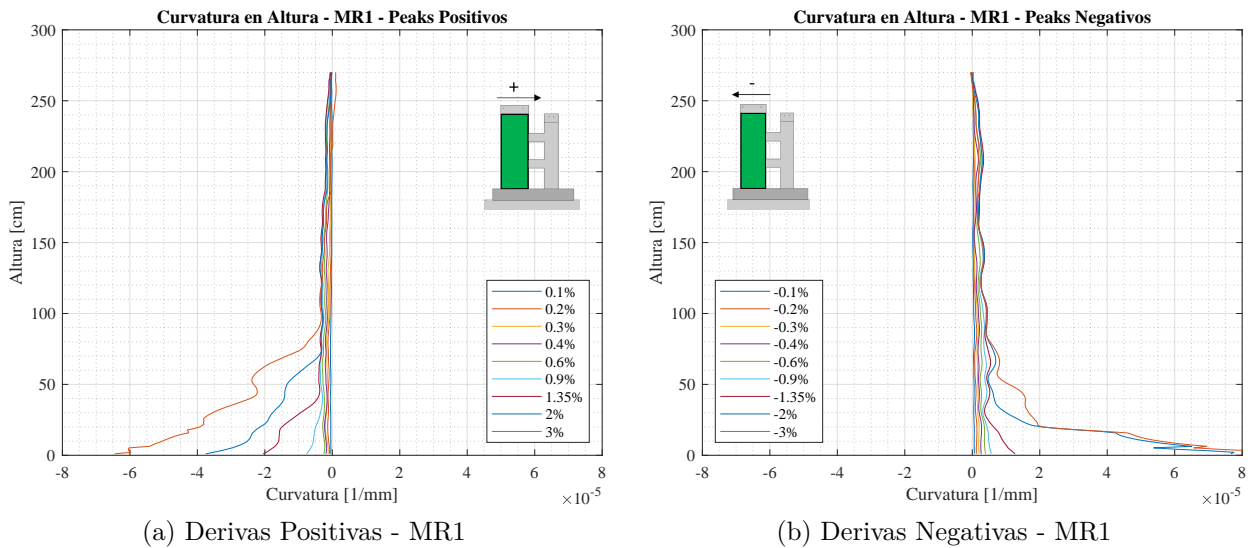


Figura 6.34: Perfiles de Curvatura en Altura - MR1

En la Figura 6.34 se observan los perfiles de curvatura en altura en función del drift de techo para el MR1. Para derivas positivas (Figura 6.34.a) y negativas (Figura 6.34.b) de magnitud menor al 0.9% y -0.9% respectivamente, se observa que la curvatura se mantiene constante y cercana a 0 a lo largo de todo el MR1, mientras que para derivas iguales o mayores en magnitud al 0.9% y -0.9%, se observan zonas cuya curvatura es máxima en la base y disminuye en altura. La altura de dicha zona en curvatura aumenta a medida que aumenta el drift de techo. De forma similar a lo observado para los perfiles de deformación en altura, se observa que para derivas positivas la altura de dicha zona es mayor que para derivas negativas. Sin perjuicio de lo anterior, se observa que la curvatura alcanza valores mayores en la base para derivas negativas.

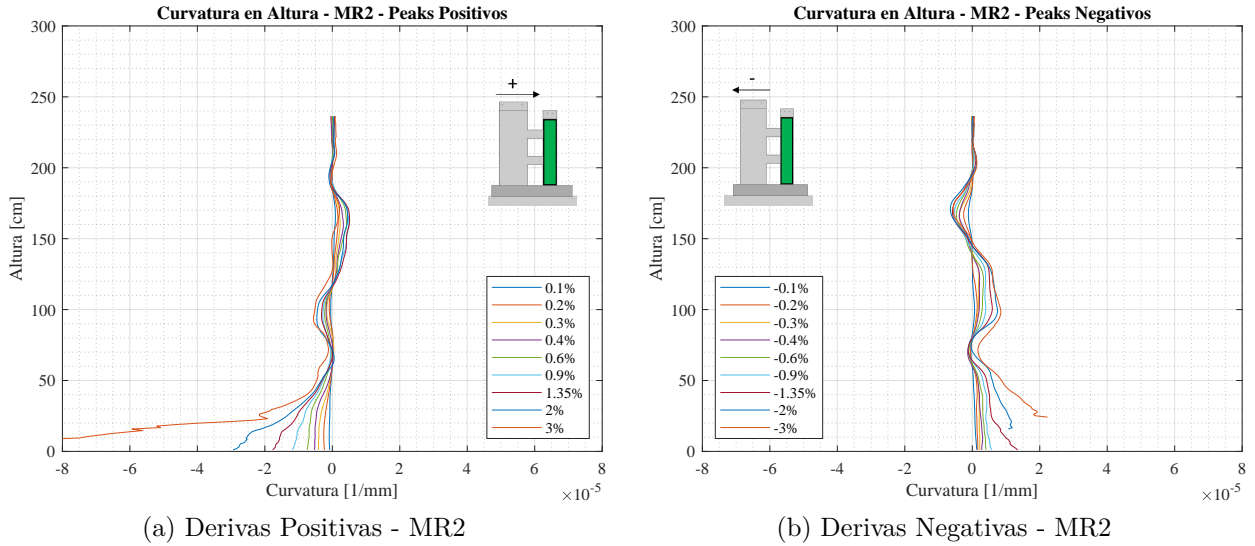


Figura 6.35: Perfiles de Curvatura en Altura - MR2

En cuanto al MR2 (Figura 6.35) se observa el mismo comportamiento descrito anteriormente para las deformaciones unitarias en los bordes de dicho muro, es decir, las mayores curvaturas se concentran en la base tanto para derivas positivas (Figura 6.35.a) como para derivas negativas (Figura 6.35.b). Sin embargo, para derivas positivas se observa que la altura hasta la que se desarrollan dichas curvaturas es mayor para derivas negativas que para derivas positivas. Adicionalmente, se observan, tanto para derivas positivas como negativas, la existencia de cambios en el signo de la curvatura, las cuales coinciden con la altura de las vigas. Esto podría explicarse por las deformaciones verticales inducidas en los muros producto de la transmisión del corte de las vigas (como carga axial) en los muros de la probeta.

6.8. Rótula Plástica

La determinación de la rótula plástica se realiza según lo señalado anteriormente en la sección 2.4 del capítulo de Antecedentes de Estudio. Así, utilizando los resultados de deformaciones unitarias verticales en los bordes de los muros, se determinó el largo de rótula plástica en el borde izquierdo y derecho de cada muro de la probeta. Para ello se identificó la altura máxima donde se alcanza la deformación de fluencia ($\varepsilon_y = 0.0023$) para cada deriva, obteniendo así el valor de L_p^* . Luego, el largo de rótula plástica queda definido como $L_p = 0.5 \cdot L_p^*$.

Adicionalmente, se considera el largo de rótula plástica determinado teóricamente a partir de la ecuación 2.4 propuesta por Massone y Alfaro [23]. Cabe mencionar que solo se consideran las derivas para las cuales existe una zona con comportamiento plástico en los muros, es decir, donde existen deformaciones unitarias mayores a la deformación de fluencia. De esta forma, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 6.36.

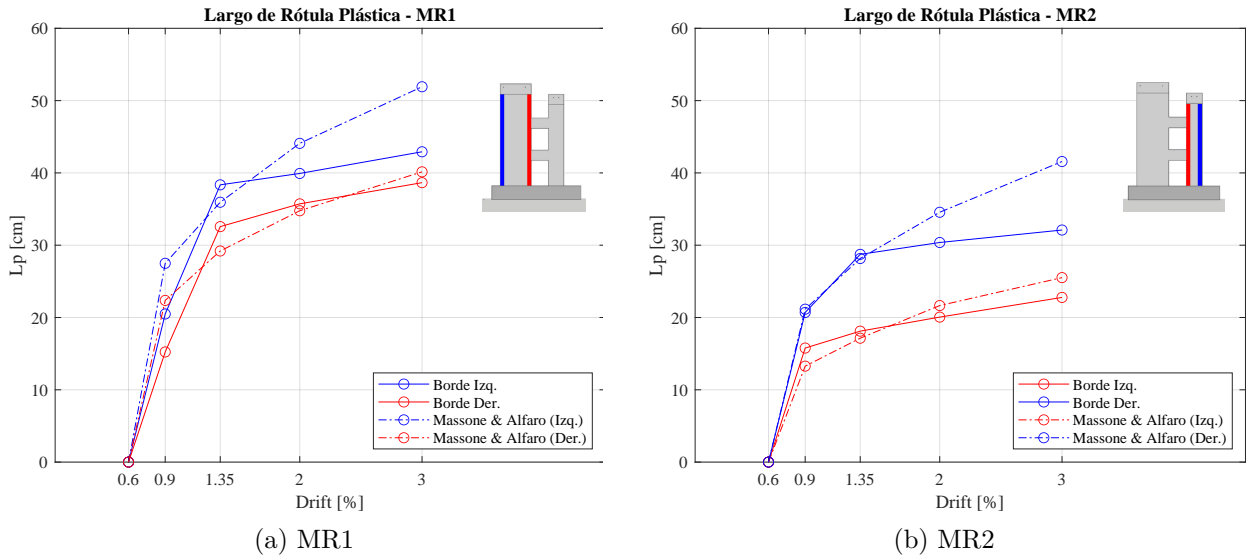


Figura 6.36: Rótula Plástica

En la Figura 6.36 se observa que en ambos bordes de ambos muros de la probeta la rótula plástica aumenta a medida que crece el desplazamiento de techo al que se somete el MR1 durante el ensayo. Sin embargo, se observa además que el largo de la rótula aumenta con una gran pendiente para derivas cercanas a la fluencia, mientras que tiende a estabilizarse para derivas mayores. En particular, se observa que el valor de la rótula plástica es mayor en el MR1 (Figura 6.36.a) que en el MR2 (Figura 6.36.b), lo cual es lógico considerando las dimensiones geométricas de ambos muros.

Por otro lado, resulta interesante notar que en los bordes a los cuales se encuentran conectadas las vigas de acople (es decir, borde derecho del MR1 y borde izquierdo del MR2, presentados en rojo en la Figura 6.36) poseen valores de rótula plástica menores que los determinados para los bordes libres o extremos de la probeta (es decir, borde izquierdo del MR1 y borde derecho del MR2, presentados en azul en la Figura 6.36) para todo nivel de deriva.

Adicionalmente, se observa que los resultados obtenidos con el modelo de Massone y Alfaro [23] predicen de forma aceptable el largo de rótula plástica. Sin perjuicio de lo anterior, se identifica que dicha predicción es más cercana a lo obtenido experimentalmente para los bordes conectados a las vigas de acople (es decir, borde derecho del MR1 y borde izquierdo del MR2) que para los bordes libres (borde izquierdo del MR1 y borde derecho del MR2), donde se observa una mayor diferencia para derivas del 3%, del orden de 10 [cm].

6.9. Desplazamiento por Corte y Flexión en Muros

Un aspecto relevante a estudiar corresponde al desplazamiento producido por esfuerzos de corte en los elementos estructurales que conforman la probeta. En particular, durante el ensayo, ésta sufre desplazamientos y deformaciones como consecuencia de los esfuerzos axiales, cortantes y a flexión a los que se somete. De esta forma, es necesario poder cuantificar el desplazamiento de muros y vigas del sistema que son producidos por corte para poder contrastar dichos valores con los desplazamientos totales y poder determinar si el compor-

tamiento de muros y vigas son predominantemente controlados por flexión o por corte, y en qué proporción.

De esta forma, la contribución por corte al desplazamiento total de una sección rectangular se puede calcular mediante la ecuación 6.2, la cual es propuesta por el estudio de Massone y Wallace (2004) [25].

$$\bar{U}_s = \frac{\sqrt{D_1^{meas^2} - h^2} - \sqrt{D_2^{meas^2} - h^2}}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(V_1 - V_2)}{l} - \alpha \cdot \frac{(V_1 - V_2)}{l} \cdot h \quad (6.2)$$

Donde D_i^{meas} corresponde al largo de la diagonal i de la zona de la probeta estudiada (porción del muro), V_i corresponden a los desplazamientos verticales en los puntos superiores de la zona estudiada, l corresponde al ancho de la zona estudiada, h es el alto de la zona estudiada y α corresponde a la distancia entre la parte superior de la zona estudiada hasta el centro de la distribución de curvatura. Lo anterior queda representado en la Figura 6.37.

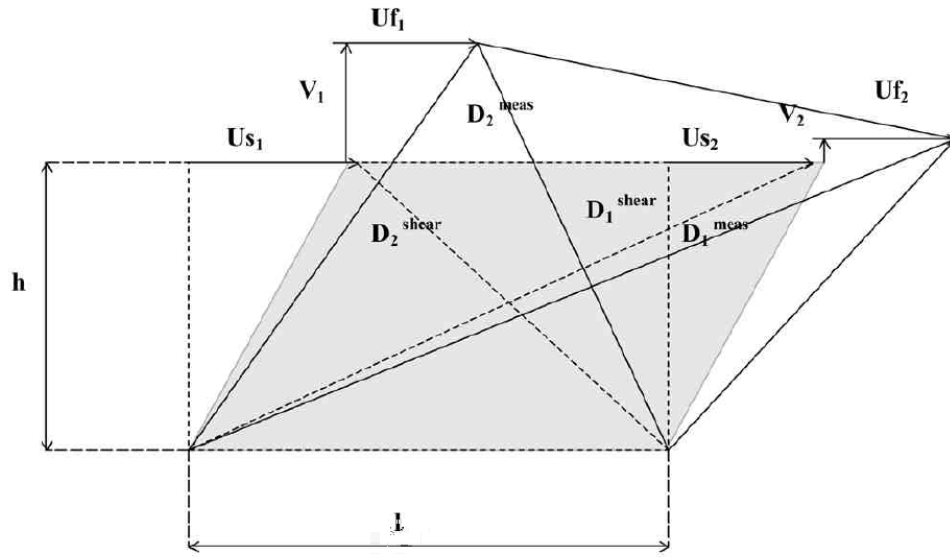


Figura 6.37: Diagrama de Desplazamientos de Modelo Flexural [25]

En la Figura 6.37, las líneas punteadas representan la sección a estudiar del sistema de muros acoplados sin deformar, mientras que la sección deformada se representa por la zona gris.

Así, para la obtención del desplazamiento producido por los esfuerzos de corte en cada uno de los pisos de los muros de la probeta, se utiliza la ecuación 6.2. De esta forma, en la Figura 6.38 se presenta el desplazamiento por corte en cada uno de los pisos de los muros de la probeta en función del drift de techo del MR1.

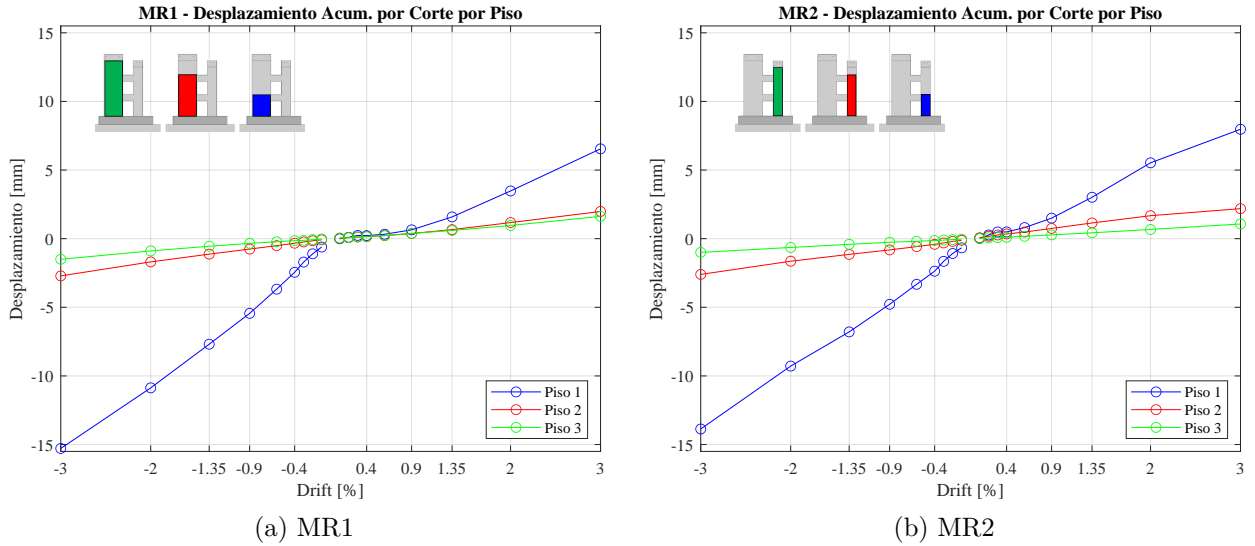


Figura 6.38: Desplazamiento por Corte por Piso

En la Figura 6.38 se observa que, tanto en el MR1 como en el MR2, los mayores desplazamientos por corte se encuentran en el primer piso. En particular, se observa que el desplazamiento por corte es 3 veces mayor en el primer piso que en el segundo, mientras que los desplazamientos por corte en el tercer piso de cada muro son menores a los 2.5 [mm].

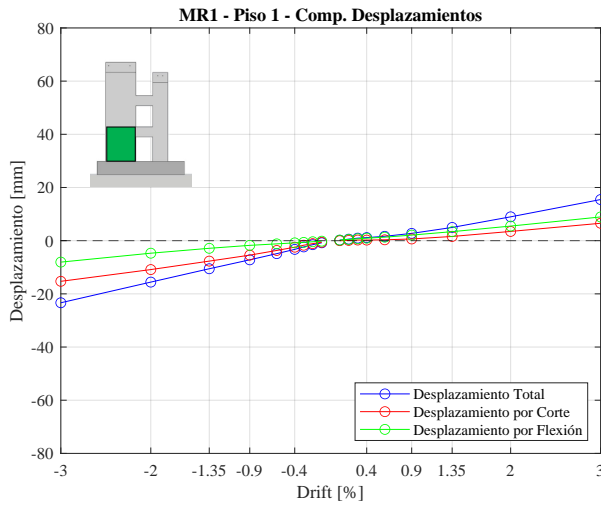
Adicionalmente, en ambos muros se observa que el desplazamiento por corte es de magnitud similar en el segundo y tercer piso para derivas positivas y negativas. Por otro lado, tanto para MR1 (Figura 6.38.a) como para MR2 (Figura 6.38.b), los desplazamientos por corte del primer piso son mayores para las derivas negativas que para las positivas.

Por otro lado, se identifica que, para derivas negativas, el desplazamiento por corte es mayor en el primer piso del MR1 que en el primer piso del MR2. Sin embargo, para derivas positivas, el desplazamiento por corte es mayor en el primer piso del MR2 que en el primer piso del MR1.

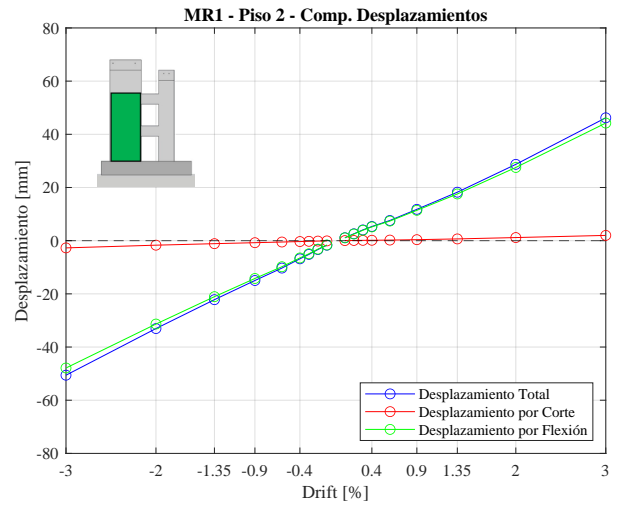
De esta forma, conociendo el desplazamiento por corte en todos los pisos de los muros de la probeta, es posible conocer el desplazamiento por flexión mediante la ecuación 6.3.

$$\delta_{flexion} = \delta_{total} - \delta_{corte} \quad (6.3)$$

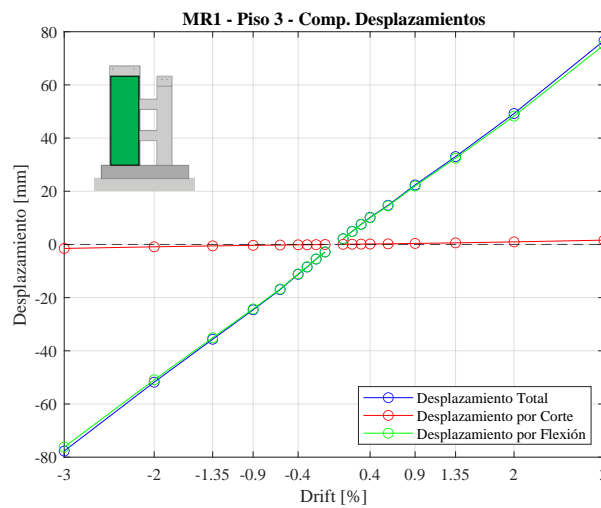
En resumen, la ecuación 6.3 señala que es posible determinar el desplazamiento por flexión de una sección ($\delta_{flexion}$) como la diferencia entre el desplazamiento total de dicha sección (δ_{total}) y su respectivo desplazamiento por corte (δ_{corte}). En este caso, el desplazamiento total de cada piso de los muros de la probeta se obtiene directamente de N_{corr} . Así, el desplazamiento total, por flexión y por corte de cada piso de los muros de la probeta durante el ensayo, en función del drift de techo del MR1, se muestran en las Figuras 6.39 y 6.40.



(a) Piso 1 - MR1



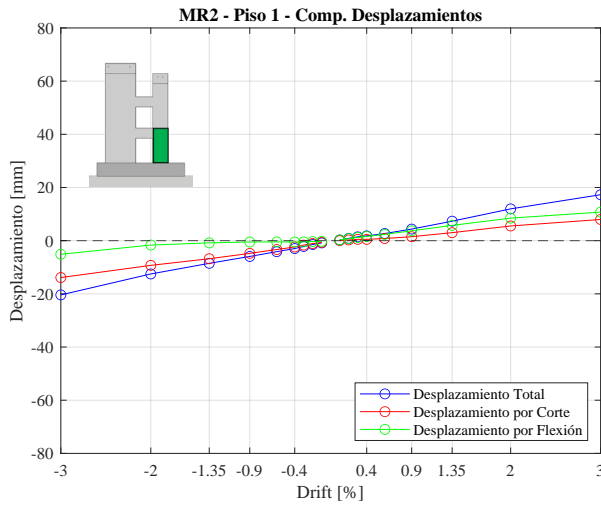
(b) Piso 2 - MR1



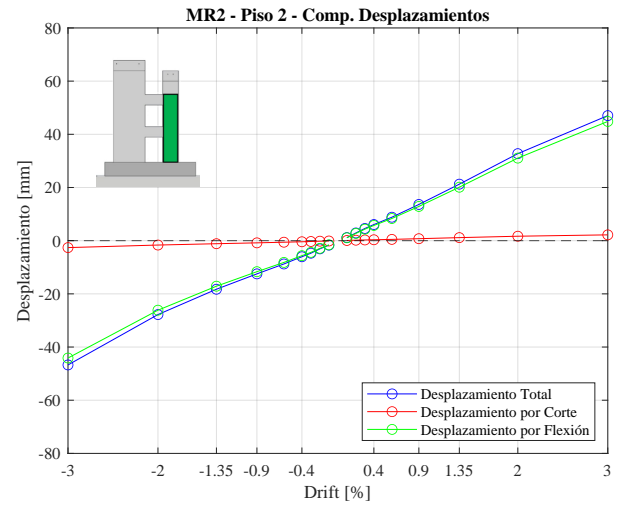
(c) Piso 3 - MR1

Figura 6.39: Comparación Desplazamiento por Corte, Flexión y Total por Piso - MR1

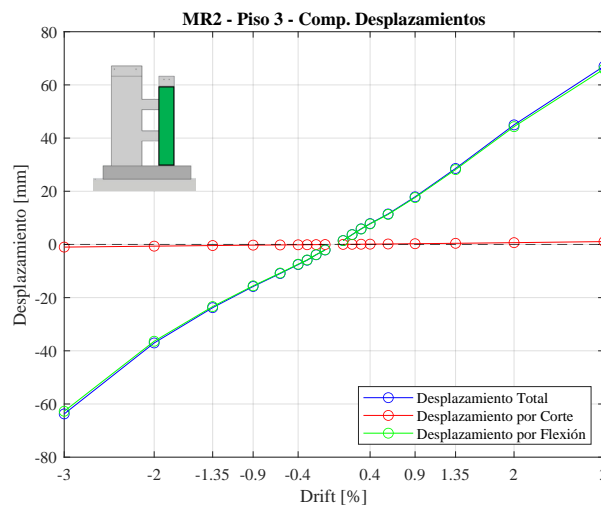
En base a lo mostrado en la Figura 6.39, se observa una predominancia clara del desplazamiento a flexión para el segundo piso (Figura 6.39.b) y tercer piso (Figura 6.39.c) del MR1. Para el primer piso, se observan valores de magnitud similares para los desplazamientos por corte y flexión, siendo éstos levemente mayores a flexión para derivas positivas y levemente mayores a corte para derivas negativas. Sin perjuicio de lo anterior, es posible identificar que el MR1 tiene un comportamiento, en cuanto a desplazamientos, controlado por los esfuerzos a flexión.



(a) Piso 1 - MR2



(b) Piso 2 - MR2



(c) Piso 3 - MR2

Figura 6.40: Comparación Desplazamiento por Corte, Flexión y Total por Piso - MR2

Para el MR2 (Figura 6.40), se observa un comportamiento similar al mencionado para el MR1, es decir, una clara predominancia del comportamiento a flexión para los desplazamientos del segundo y tercer piso, mientras que existe una mayor contribución porcentual del corte en los desplazamientos del primer piso del MR2. Sin perjuicio de lo anterior, se observa que los desplazamientos aumentan a medida que aumenta la altura del piso analizado, lo cual coincide con lo presentado en secciones anteriores de este capítulo. Así, se identifica que el comportamiento del MR2, en cuanto a desplazamientos, también se encuentra controlado por los esfuerzos a flexión.

6.10. Evolución de Grietas y Daño en Vigas de Acople

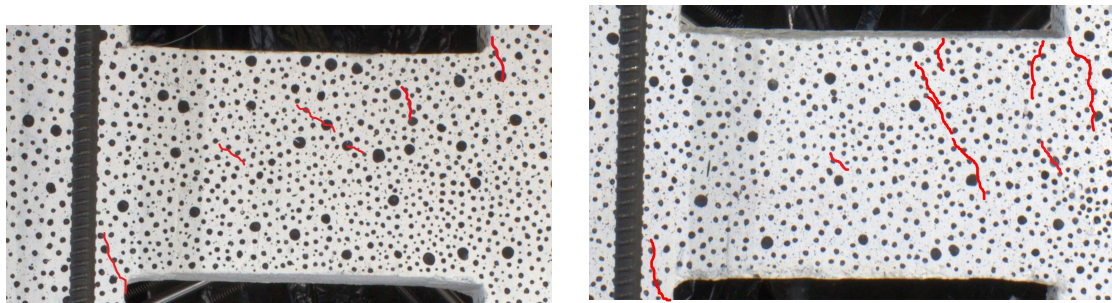
De forma similar a lo presentado anteriormente para los muros de la probeta, en esta sección se presenta la evolución de grietas y daño en las vigas de acople durante el ensayo. Las fotografías presentadas corresponden al segundo ciclo asociado a cada drift. También, se presentan los mapas de color de deformación unitaria vertical obtenidos en N_{corr} para cada nivel de drift.

Análogamente a lo presentado para muros, para las vigas de acople se consideran únicamente los peaks desde el 0.3% y -0.3% (respectivamente, para derivas positivas y negativas) dado que desde ese nivel de desplazamiento de techo se comenzó a observar la aparición de grietas en el hormigón de las vigas de acople.

Finalmente, se utiliza como convención el uso de líneas rojas para fisuras nuevas y líneas azules para indicar fisuras ya existentes desde derivas anteriores.

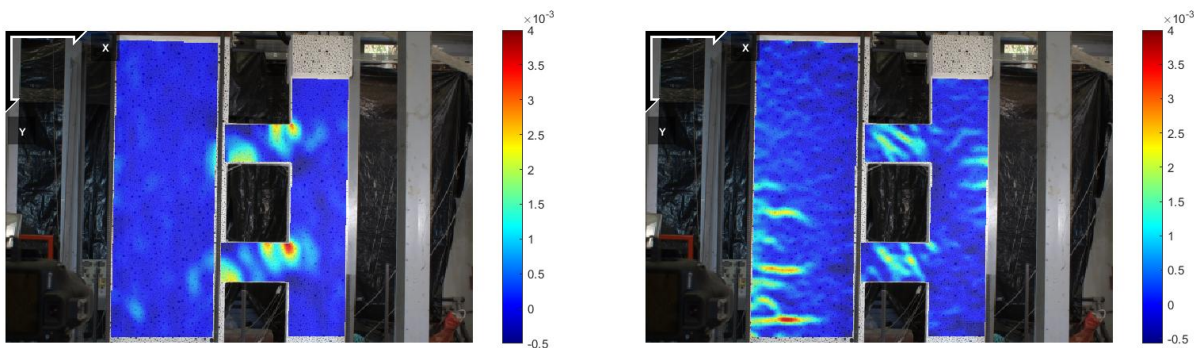
6.10.1. Derivas Positivas

- 0.3% de Drift:



(a) Viga Superior a 0.3% de Drift

(b) Viga Inferior a 0.3% de Drift



(c) ε_{xx} a 0.3% de Drift

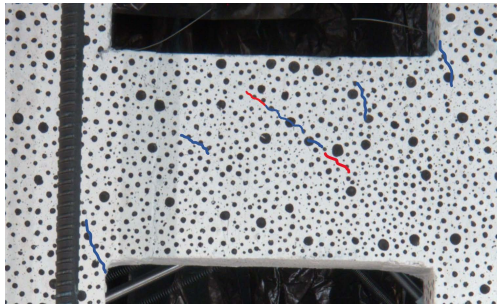
(d) ε_{yy} a 0.3% de Drift

Figura 6.41: Grietas Vigas a 0.3% Drift

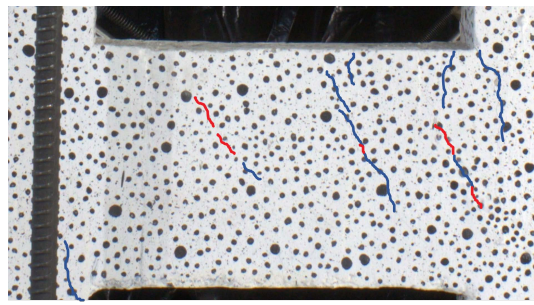
En la Figura 6.41 se observa que, para un drift del 0.3%, existen grietas en las juntas viga-muro tanto en la viga de acople superior como en la inferior. Cabe mencionar que dichas grietas fueron identificadas desde que se cargó axialmente el MR1 al comenzar el ensayo (mediante el sistema de carga axial). Adicionalmente, en ambas vigas de acople se observa la aparición de grietas diagonales en zonas cercanas al centro, las cuales son

asociadas a esfuerzos de corte. Se observa que los resultados de deformaciones unitarias obtenidos con N_{corr} también evidencian dichas diagonales características de los esfuerzos de corte.

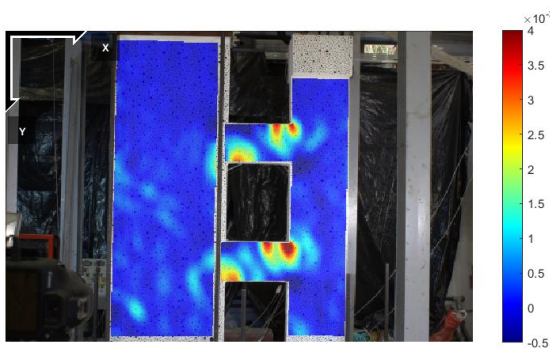
- 0.4 % de Drift:



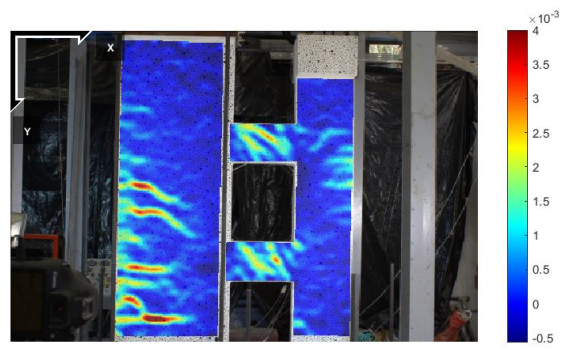
(a) Viga Superior a 0.4 % de Drift



(b) Viga Inferior a 0.4 % de Drift



(c) ϵ_{xx} a 0.4 % de Drift

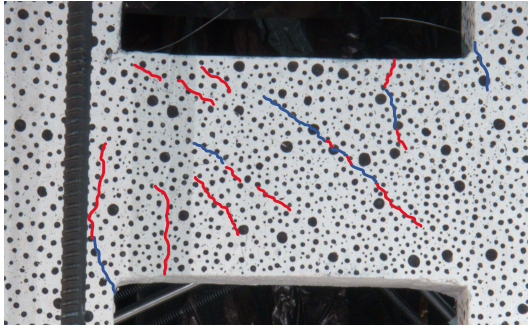


(d) ϵ_{yy} a 0.4 % de Drift

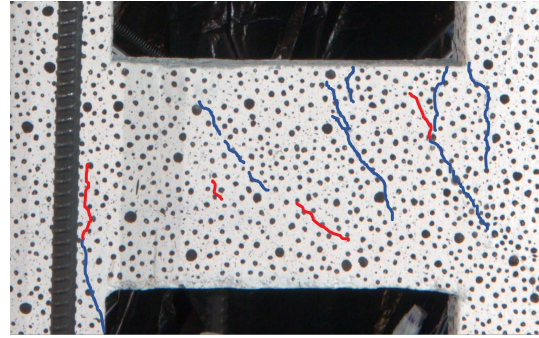
Figura 6.42: Grietas Vigas a 0.4 % Drift

Para un drift del 0.4 % (Figura 6.42) se observa que en la viga superior se extiende la grieta diagonal ya existente, mientras que en la viga inferior aparecen nuevas grietas diagonales. Esto coincide con el mapa de color de deformaciones unitarias obtenido por fotogrametría.

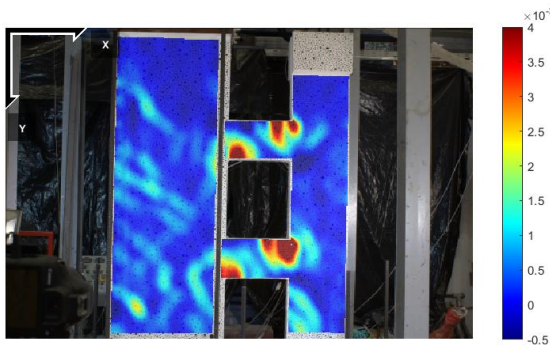
- 0.6 % de Drift:



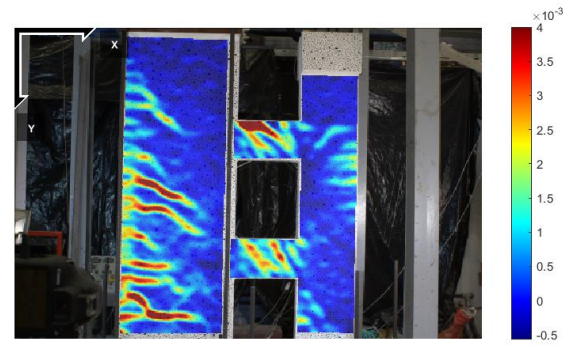
(a) Viga Superior a 0.6 % de Drift



(b) Viga Inferior a 0.6 % de Drift



(c) ε_{xx} a 0.6 % de Drift

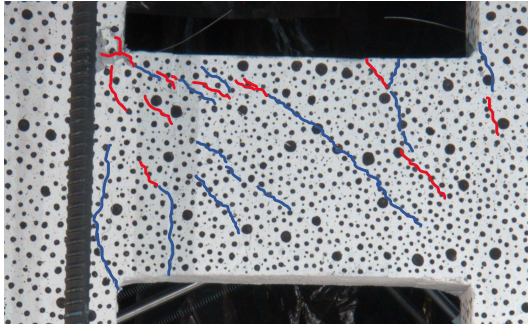


(d) ε_{yy} a 0.6 % de Drift

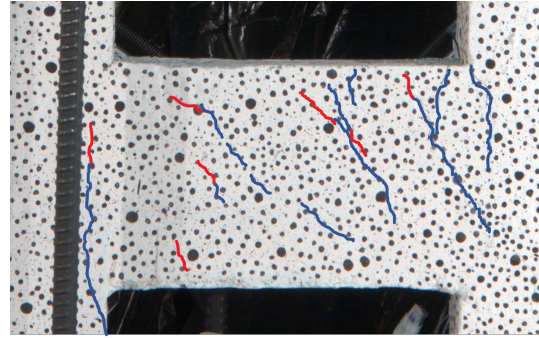
Figura 6.43: Grietas Vigas a 0.6 % Drift

En la Figura 6.43 se observa que, para una deriva del 0.6 %, en la viga de acople superior aparecen nuevas grietas en dirección diagonal al largo de la viga, mientras que también se extienden las ya existentes. En la viga de acople inferior, se observa principalmente la aparición de nuevas grietas diagonales pero en menor medida que en la viga superior. En ambas vigas de acople se observa que las grietas existentes en la junta viga-muro se extiende. Respecto a los resultados de deformaciones entregados por *Ncorr*, se observan concentraciones en dirección diagonal a las vigas de acople de mayor intensidad que para drifts anteriores. Se observa además que la viga de acople superior posee mayores deformaciones unitarias, y éstas se concentran principalmente en su fibra superior.

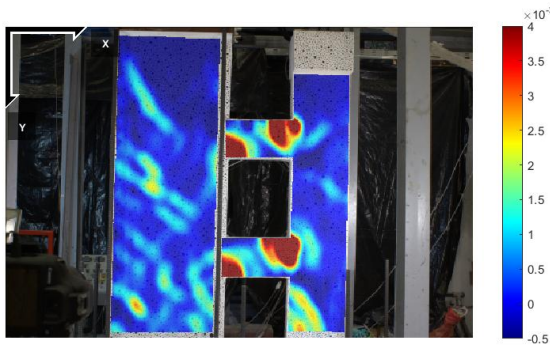
- 0.9% de Drift:



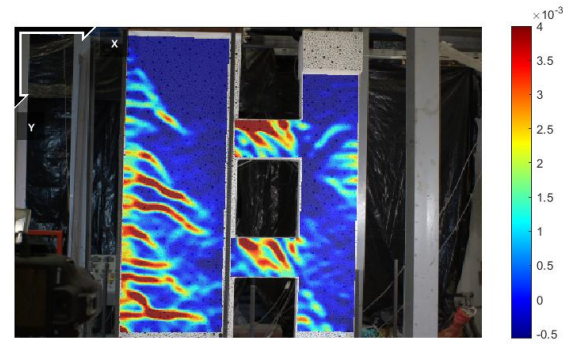
(a) Viga Superior a 0.9% de Drift



(b) Viga Inferior a 0.9% de Drift



(c) ε_{xx} a 0.9% de Drift

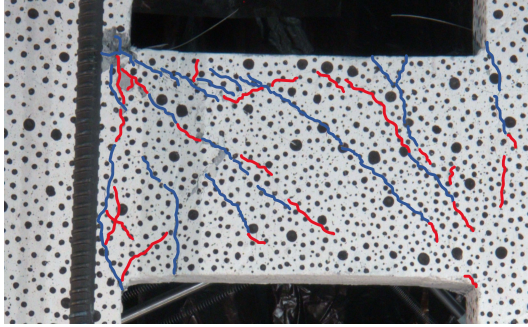


(d) ε_{yy} a 0.9% de Drift

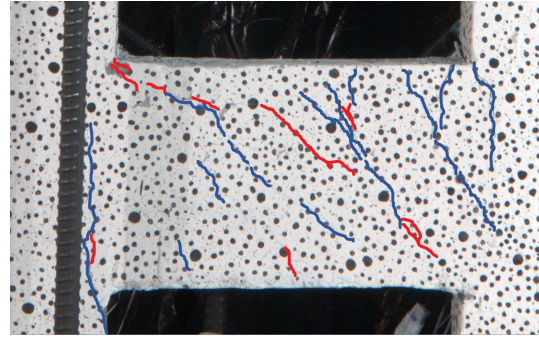
Figura 6.44: Grietas Vigas a 0.9% Drift

Al 0.9% de deriva (Figura 6.44) se observa principalmente la extensión de las grietas diagonales existentes en ambas vigas de acople. En particular, se observa que la mayor propagación de grietas aparece en la fibra superior de la viga superior, lo cual es concordante con el mapa de color obtenido con fotogrametría.

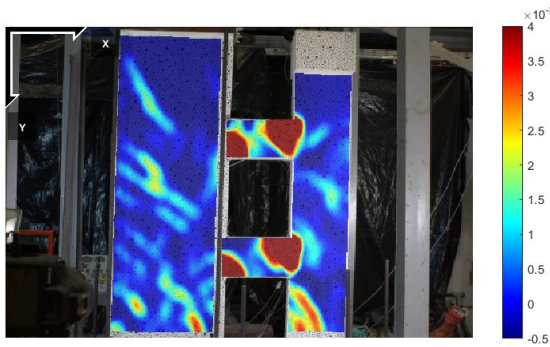
- 1.35 % de Drift:



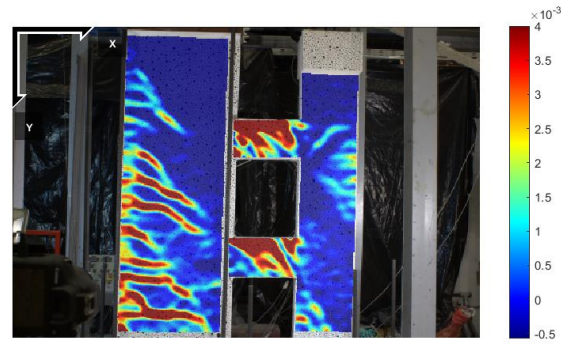
(a) Viga Superior a 1.35 % de Drift



(b) Viga Inferior a 1.35 % de Drift



(c) ε_{xx} a 1.35 % de Drift

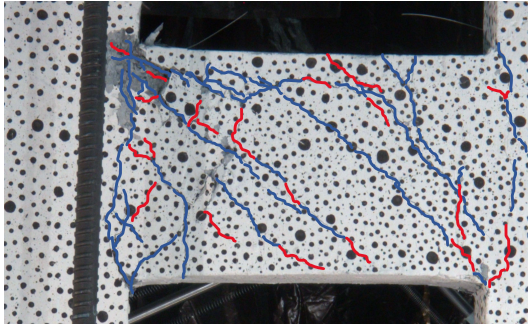


(d) ε_{yy} a 1.35 % de Drift

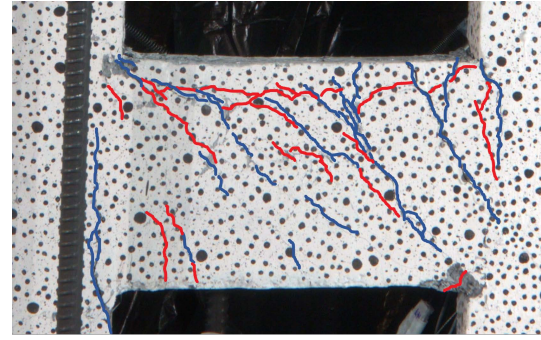
Figura 6.45: Grietas Vigas a 1.35 % Drift

Para un drift del 1.35 % (Figura 6.45) se identifica la aparición de nuevas grietas diagonales tanto en la viga de acople superior como en la inferior. Además, en la zona de junta viga-muro (MR1) de la viga superior, se observa la extensión de las grietas de esa zona, abarcando la viga en toda su extensión. En ambas vigas de acople se observa que las grietas existentes se extienden, abarcando así dichos elementos casi en toda su extensión. Respecto a los mapas de color obtenidos con *Ncorr*, se observan grandes zonas cuyas deformaciones unitarias evidencian un comportamiento plástico. En particular, en ambas vigas de acople se observa que dichas concentraciones de deformaciones se ubican en la fibra superior. En este nivel de deriva se observa descascaramiento del recubrimiento en ambas vigas, siendo éste mayor en la viga de acople superior.

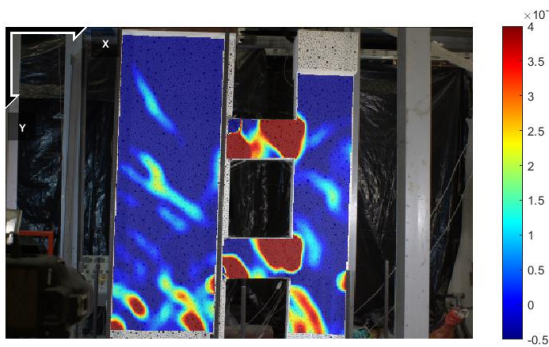
- 2 % de Drift:



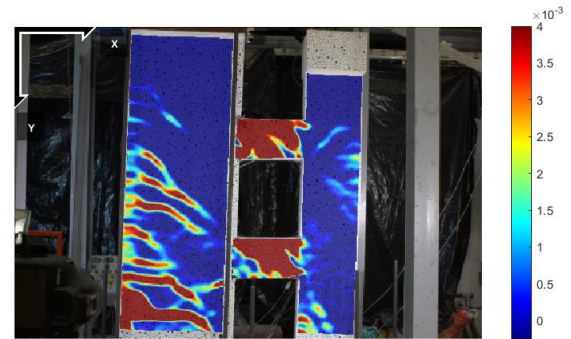
(a) Viga Superior a 2 % de Drift



(b) Viga Inferior a 2 % de Drift



(c) ε_{xx} a 2 % de Drift

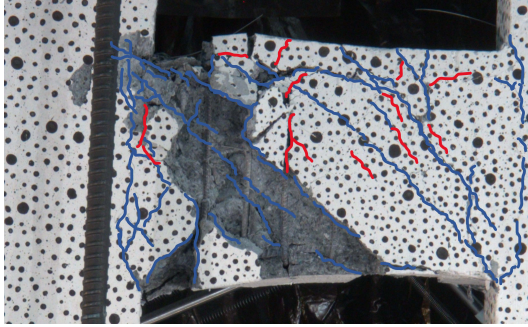


(d) ε_{yy} a 2 % de Drift

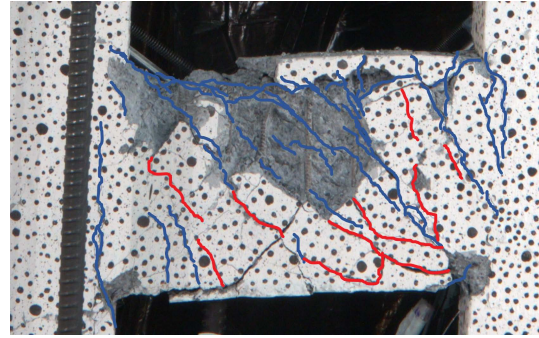
Figura 6.46: Grietas Vigas a 2 % Drift

En la Figura 6.46 se observa que, para un drift del 2 %, ambas vigas de acople presentan grietas a lo largo de la viga en la zona de la fibra superior, lo cual concuerda con las zonas donde se ha observado mayor concentración de deformaciones unitarias según fotogrametría. Adicionalmente, se observa la propagación de las grietas diagonales en ambos elementos de acople. En particular, se observa que la viga superior presenta mayor nivel de daño para este nivel de deriva, y las grietas a corte existentes se extienden en todo el elemento. Se identifica desprendimiento del hormigón en ambas vigas de acople, los cuales se concentran en las zonas de las juntas viga-muro, siendo éstos mayores en la viga de acople superior. Respecto al mapa de color asociado de deformaciones unitarias de N_{corr} , se observa que las vigas de acople se encuentran sometida deformaciones mayores a 0.004 [mm/mm] casi en su totalidad, donde la viga de acople superior posee mayor área de altas deformaciones.

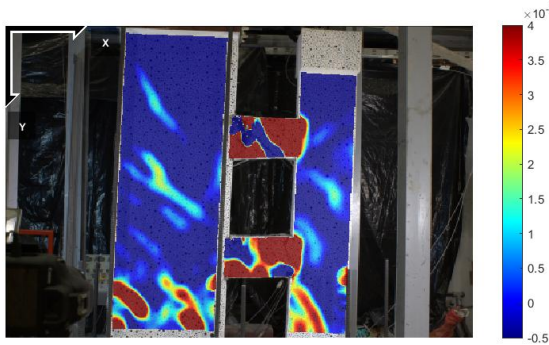
- 3 % de Drift:



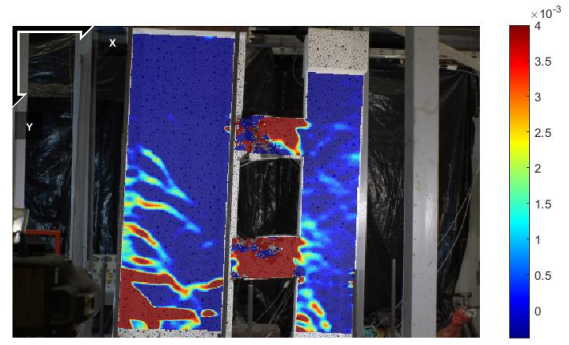
(a) Viga Superior a 3 % de Drift



(b) Viga Inferior a 3 % de Drift



(c) ε_{xx} a 3 % de Drift



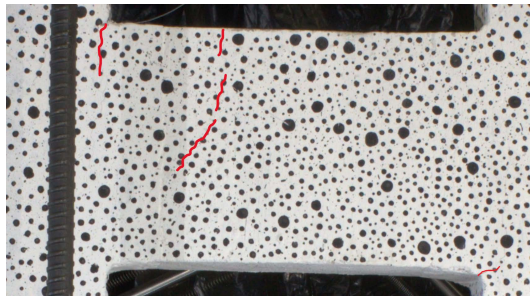
(d) ε_{yy} a 3 % de Drift

Figura 6.47: Grietas Vigas a 3 % Drift

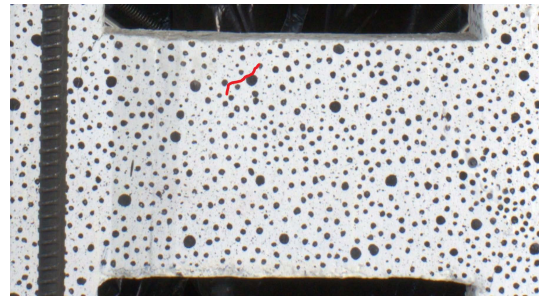
Para un drift del 3 % (Figura 6.47) se observa un alto nivel de daños en ambas vigas de acople, con desprendimiento del hormigón tal que permite ver la armadura de refuerzo a simple vista. En particular, se observa que en la viga de acople superior dicho desprendimiento es predominantemente en dirección diagonal y cubre el alto de la viga en toda su extensión. En ambas vigas de acople se observa una gran extensión de las grietas ya existentes como consecuencia de las deformaciones unitarias a las que están sometidas. Respecto al mapa de color de deformaciones unitarias obtenido con fotogrametría para este nivel de deriva de techo, se observa que los resultados son poco fiables en gran parte de los elementos de acople debido al desprendimiento del hormigón y la consecuente ausencia de puntos de referencia para utilizar en el procesamiento. Sin embargo, es posible identificar que las vigas de acople se encuentran sometidas completamente a grandes deformaciones.

6.10.2. Derivas Negativas

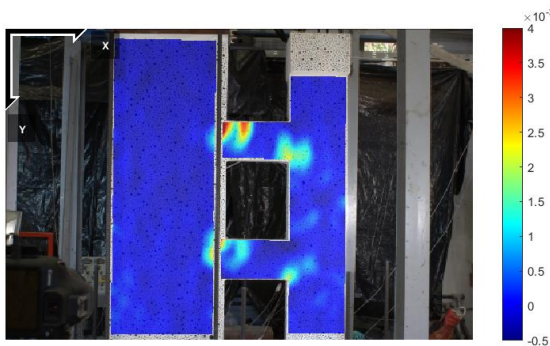
- -0.3 % de Drift:



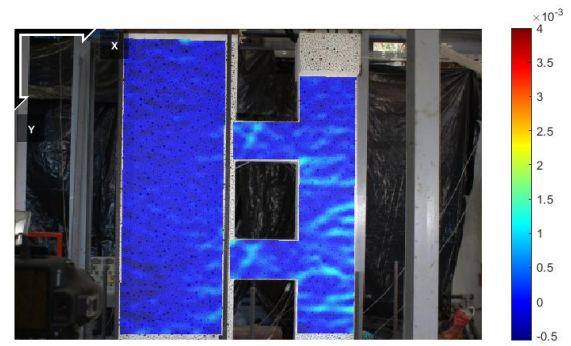
(a) Viga Superior a -0.3% de Drift



(b) Viga Inferior a -0.3% de Drift



(c) ε_{xx} a -0.3% de Drift

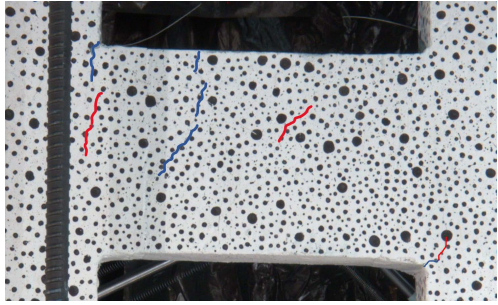


(d) ε_{yy} a -0.3% de Drift

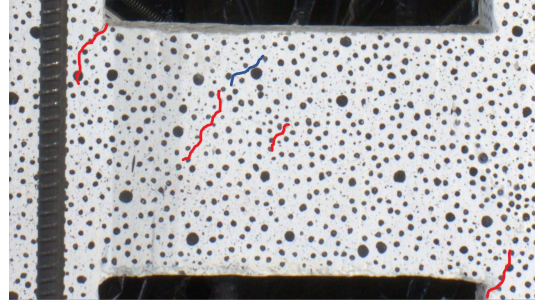
Figura 6.48: Grietas Vigas a -0.3% Drift

Para una deriva del -0.3% (Figura 6.48) se observa que en la viga inferior de acople solo existe una pequeña grieta en dirección diagonal. En la viga de acople superior, se identifica una grieta en la zona de la junta viga-muro (MR1) la cual se pudo apreciar desde que se cargó axialmente la probeta al comienzo del ensayo. Además, se observa la aparición de una grieta ubicada desde la fibra superior de la viga hasta el centro de ésta. Es interesante notar que para este nivel de deriva se observa menor cantidad de grietas en los elementos de acople que para una deriva del 0.3% (Figura 6.41). Respecto a las deformaciones unitarias obtenidas mediante fotogrametría, se observan concentraciones del orden de 0.001 [mm/mm] en dirección diagonal en ambas vigas de acople.

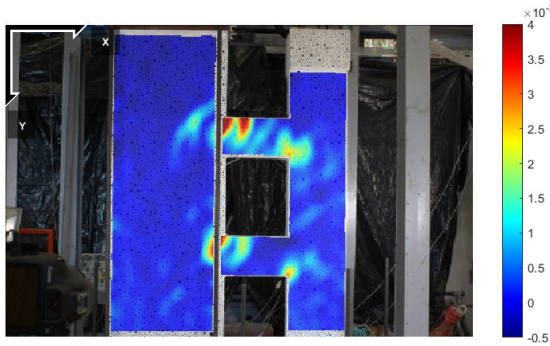
- -0.4% de Drift:



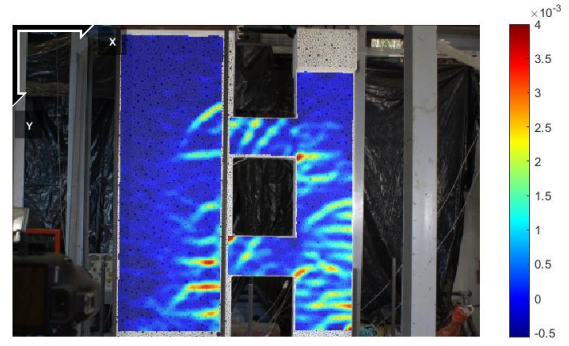
(a) Viga Superior a -0.4% de Drift



(b) Viga Inferior a -0.4% de Drift



(c) ε_{xx} a -0.4% de Drift

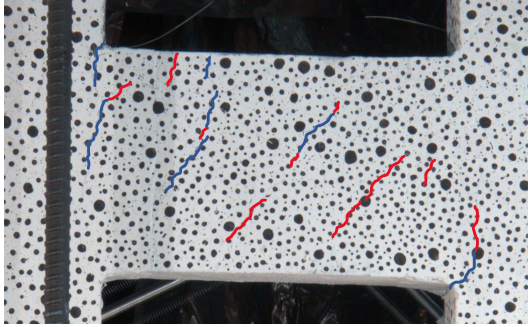


(d) ε_{yy} a -0.4% de Drift

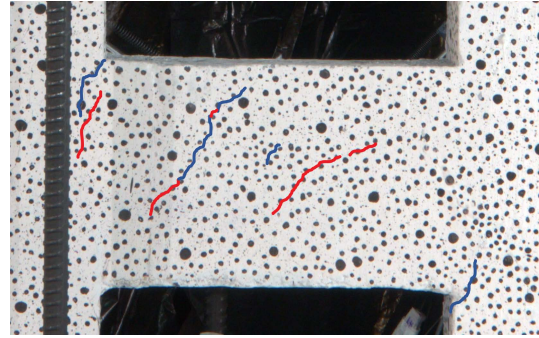
Figura 6.49: Grietas Vigas a -0.4% Drift

En la Figura 6.49 se observa que, para un drift del -0.4%, en la viga superior se extiende una grieta en la junta viga-muro (MR1) y también aparece una grieta diagonal en la zona central de la viga, más cercana a la fibra superior. Para la viga de acople inferior en tanto, se observa la aparición de dos grietas diagonales y también la aparición de grietas cercanas a la zona de conexión viga-muro. Al observar los resultados obtenidos mediante *Ncorr*, se identifican concentraciones de deformaciones en dirección diagonal en ambas vigas de acople de un orden cercano a 0.002 [mm/mm].

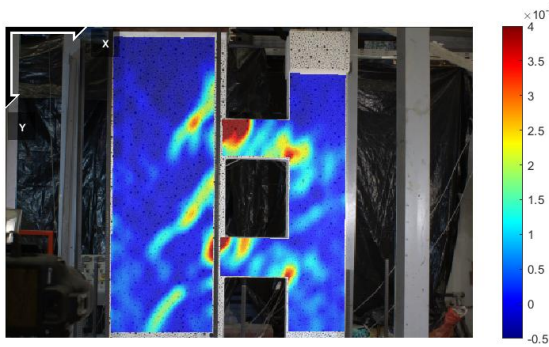
- -0.6 % de Drift:



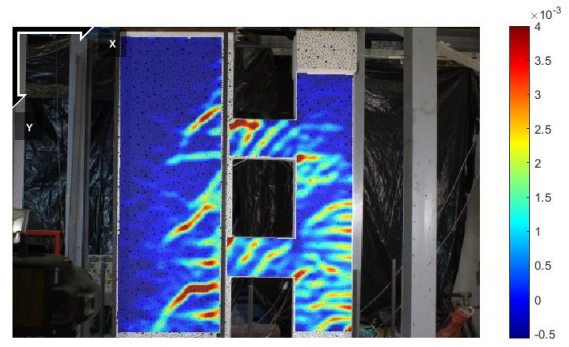
(a) Viga Superior a -0.6 % de Drift



(b) Viga Inferior a -0.6 % de Drift



(c) ε_{xx} a -0.6 % de Drift

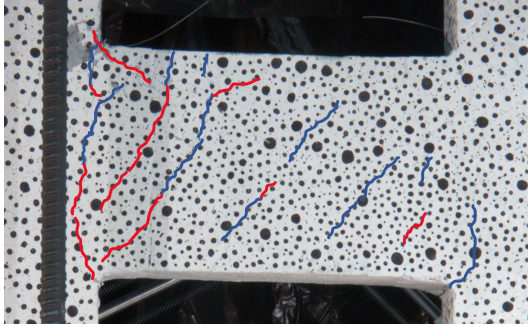


(d) ε_{yy} a -0.6 % de Drift

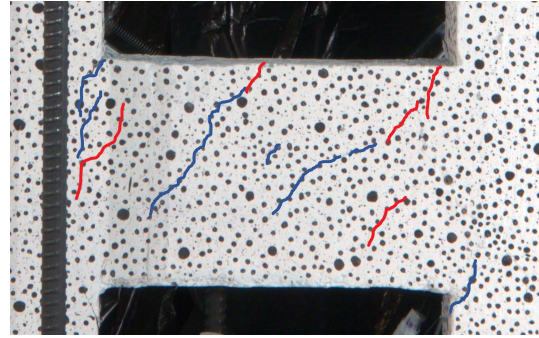
Figura 6.50: Grietas Vigas a -0.6 % Drift

Al -0.6 % de deriva (Figura 6.50) es posible identificar que las grietas diagonales, asociadas a esfuerzos de corte, se propagan en ambas vigas de acople. Adicionalmente, en ambas vigas de acople se observa la aparición de nuevas grietas en dicha dirección. A este punto se observa que la viga de acople superior concentra mayor agrietamiento en el hormigón que la viga de acople inferior. Lo anterior es concordante con el mapa de color de deformaciones unitarias obtenido con fotogrametría.

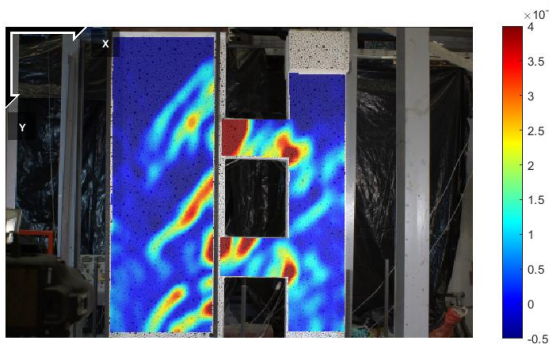
- -0.9% de Drift:



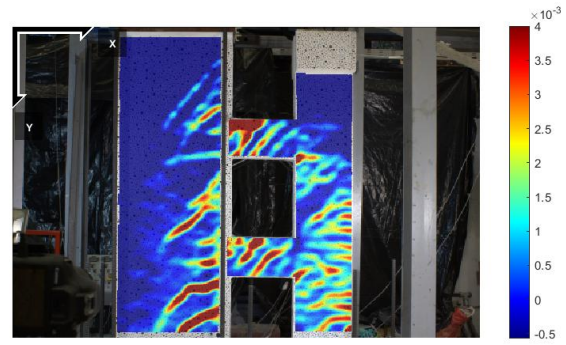
(a) Viga Superior a -0.9% de Drift



(b) Viga Inferior a -0.9% de Drift



(c) ε_{xx} a -0.9% de Drift

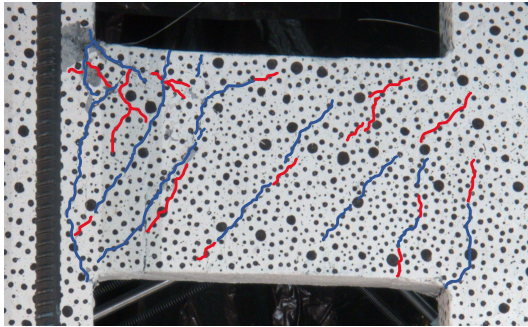


(d) ε_{yy} a -0.9% de Drift

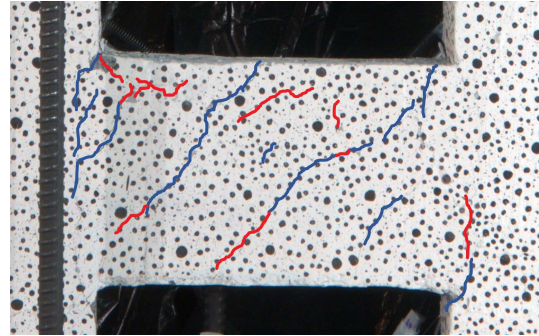
Figura 6.51: Grietas Vigas a -0.9% Drift

Para el -0.9% de drift (Figura 6.51) se observa que en la viga de acople inferior se extienden las grietas existentes, principalmente desde el centro hacia la fibra superior y también aparecen nuevas grietas en dirección diagonal. En tanto, en la viga de acople superior también se observa la propagación de las grietas a cortante ya existentes y también se observa que la grieta en la zona de la junta viga-muro (MR1) se extiende a lo largo de toda la viga. Respecto a las deformaciones unitarias obtenidas con fotogrametría, se observan concentraciones de deformaciones en dirección diagonal en ambas vigas de acople con valores mayores a 0.004 [mm/mm]. Para el caso de la viga de acople superior, esta concentración se acentúa en la fibra superior, cerca del borde de conexión con el MR1. En dicha zona se observa desprendimiento del hormigón en el recubrimiento de los elementos.

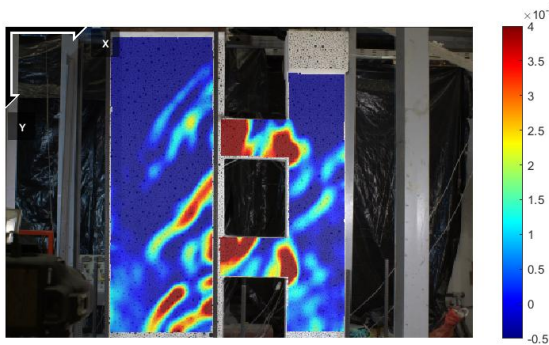
- -1.35 % de Drift:



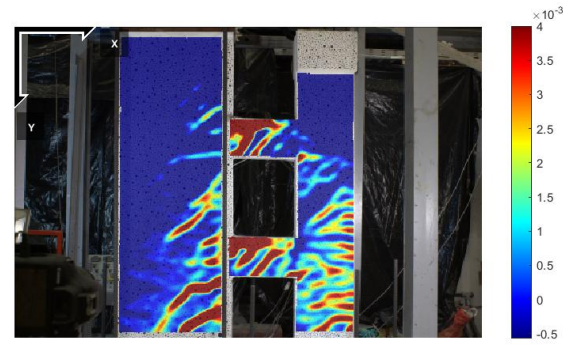
(a) Viga Superior a -1.35 % de Drift



(b) Viga Inferior a -1.35 % de Drift



(c) ε_{xx} a -1.35 % de Drift

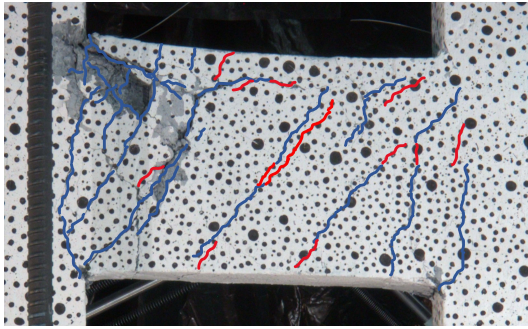


(d) ε_{yy} a -1.35 % de Drift

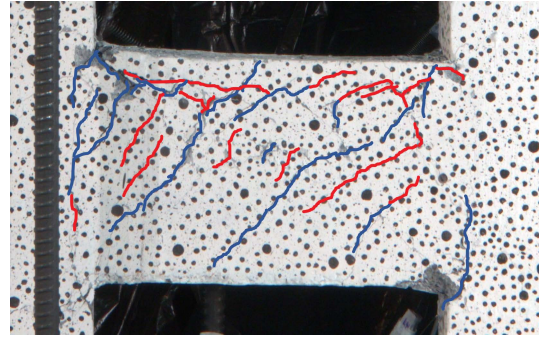
Figura 6.52: Grietas Vigas a -1.35 % Drift

En la Figura 6.52, asociada a una deriva del -1.35 %, es posible observar que en la viga de acople superior se concentra mayor cantidad de grietas que en la viga de acople inferior. Para este nivel de deriva se identifica desprendimiento del hormigón en ambas vigas de acople, tanto en las grietas diagonales a corte como en la zona de la junta viga-muro (MR1). Se aprecia que aparecen nuevas grietas diagonales en ambas vigas y también se extienden las ya existentes, abarcando así ambos elementos de acople en todo su largo. Esto es concordante con los mapas de color obtenidos con N_{corr} .

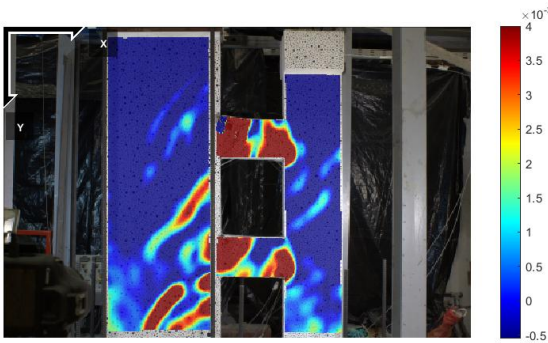
- -2% de Drift:



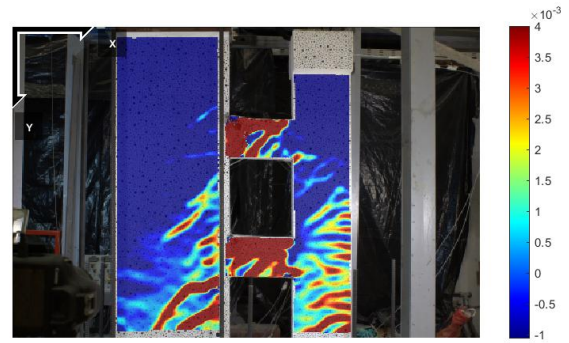
(a) Viga Superior a -2% de Drift



(b) Viga Inferior a -2% de Drift



(c) ε_{xx} a -2% de Drift

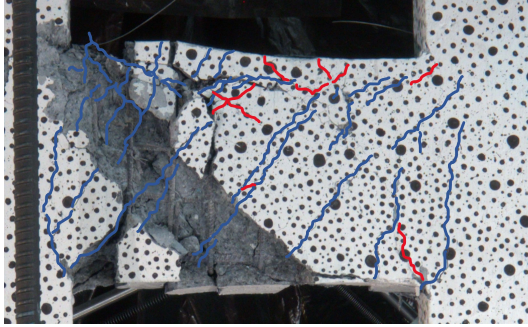


(d) ε_{yy} a -2% de Drift

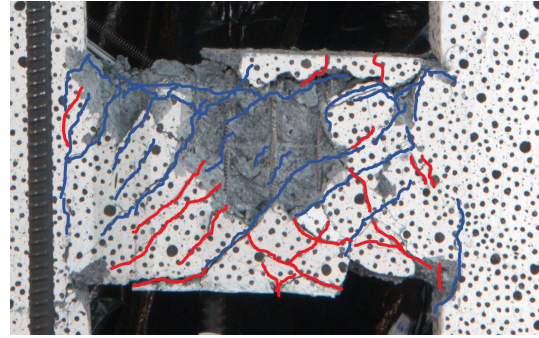
Figura 6.53: Grietas Vigas a -2% Drift

Al -2% de drift (Figura 6.53) se identifica mayor nivel de daño en ambas vigas de acople que para drifts anteriores, lo cual queda en evidencia por el mayor desprendimiento del hormigón. En particular, en ambas vigas se observan grietas a lo largo de ellas en la fibra superior, mientras que también se observa la propagación y aparición de grietas diagonales en toda su extensión. Para el caso de la viga de acople superior, dichas grietas se extienden desde la fibra superior hasta la fibra inferior de la viga. Respecto al mapa de color obtenido mediante fotogrametría, se observan zonas donde, a causa del desprendimiento del hormigón, no es posible realizar mediciones. Sin embargo, se observa que las vigas se encuentran sometidas a deformaciones mayores a 0.004 [mm/mm] casi completamente, donde la fibra superior de ambas vigas se encuentra más solicitada que la fibra inferior.

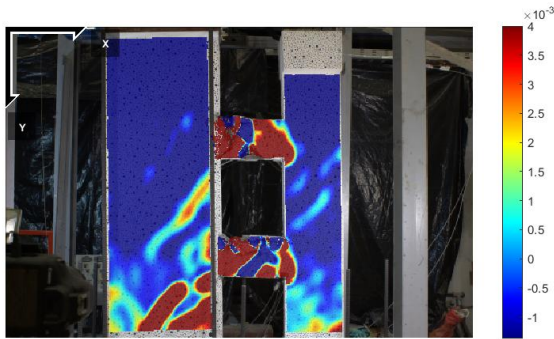
- -3% de Drift:



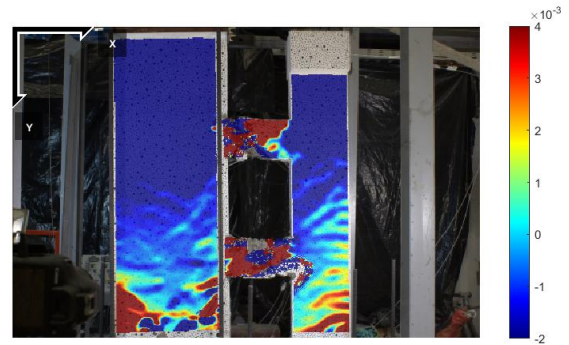
(a) Viga Superior a -3% de Drift



(b) Viga Inferior a -3% de Drift



(c) ε_{xx} a -3% de Drift



(d) ε_{yy} a -3% de Drift

Figura 6.54: Grietas Vigas a -3% Drift

En la Figura 6.48 se observa el nivel de daños para las vigas de acople para un drift del -0.3%. Es posible identificar que existe un gran nivel de daño en ambos elementos de acople como consecuencia del desprendimiento de hormigón, dejando a las barras de refuerzo a la vista. Se observa que las grietas ya existentes a cortante se extienden desde la fibra superior hasta la fibra inferior en ambas vigas de acople. Para este nivel de daño, los resultados obtenidos en el mapa de color son menos fiables debido a la ausencia de puntos en las vigas como consecuencia del desprendimiento del hormigón en ellas (Figura 6.55).



Figura 6.55: Estado Final de las Vigas de Acople al finalizar el ensayo

6.11. Deformación Axial en Vigas de Acople

En esta sección se muestran los perfiles de deformación axial (ϵ_{xx}) a lo largo de las fibras superiores e inferiores de ambas vigas de acople en función de la deriva de techo a la que se somete el MR1 durante el ensayo, obtenidos a través de fotogrametría. Cabe mencionar que para derivas altas (2 %, -2 %, 3 % y -3 %) se tienen zonas de las fibras sin datos debido a que no es posible realizar mediciones fidedignas con fotogrametría como consecuencia del desprendimiento del hormigón para dichas derivas y la consecuente ausencia de puntos en las vigas de acople en esas áreas.

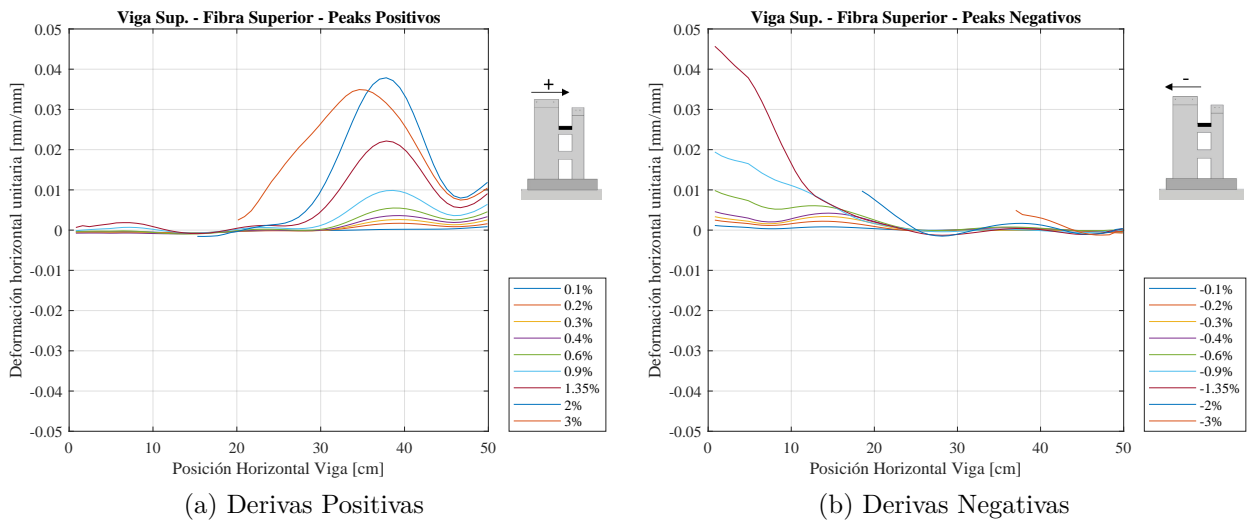


Figura 6.56: Deformación Axial de la Viga Superior de Acople en su Fibra Superior

En la Figura 6.56 se presentan los perfiles de deformación axial para la viga de acople superior en su fibra superior. Para derivas positivas (Figura 6.56.a) se observan tracciones hacia la derecha de la viga, es decir, hacia la conexión con el MR2, mientras que hacia la izquierda de ésta, se observan compresiones bajas para derivas de 0.9% o menores. De forma contraria, para derivas negativas (Figura 6.56.b) se observan tracciones hacia la zona izquierda de la fibra superior y compresiones hacia la zona de la junta entre viga y muro MR2. Como es lógico, se observa que las deformaciones en dirección axial crecen a medida que aumenta la deriva de techo. Se observa que para la fibra superior de la viga superior los valores son mayores para derivas negativas que positivas.

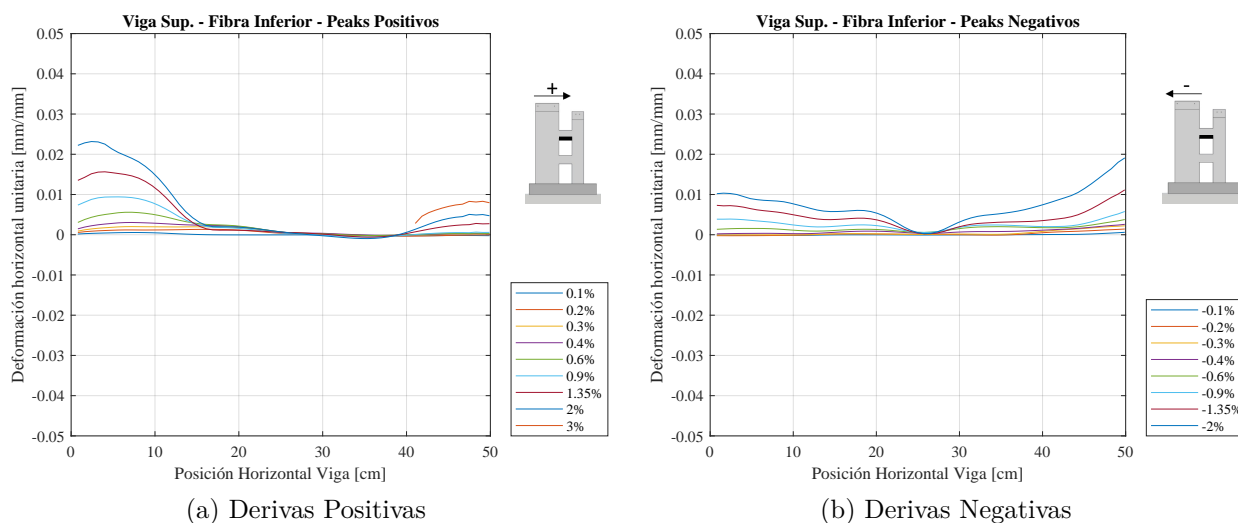


Figura 6.57: Deformación Axial de la Viga Superior de Acople en su Fibra Inferior

Para la fibra inferior de la viga de acople superior (Figura 6.57) se identifica que ésta se encuentra mayormente traccionada tanto para derivas positivas como para derivas negativas a lo largo del ensayo. Este resultado se podría explicar por dos principales factores. En primer lugar, la dificultad para la fotogrametría de medir compresiones debido a la alta resistencia del hormigón para dichos esfuerzos, y segundo, la ausencia de restricción de movimiento y/o de un sistema de carga axial a nivel de techo del MR2.

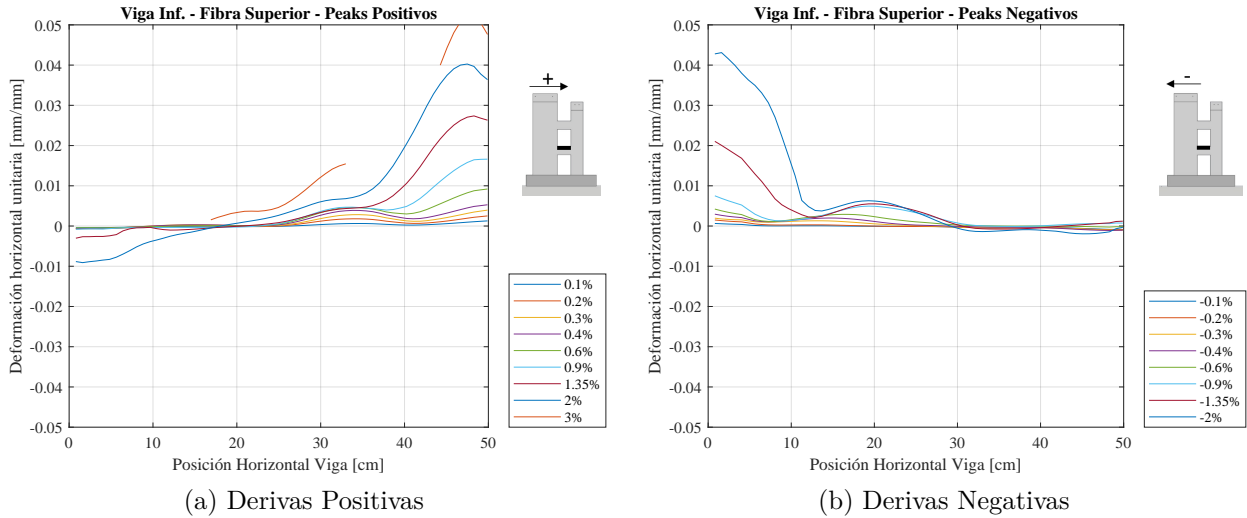


Figura 6.58: Deformación Axial de la Viga Inferior de Acople en su Fibra Superior

Por otro lado, en la Figura 6.58 se observan los perfiles de deformación axial para la fibra superior de la viga inferior de acople de la probeta durante el ensayo, para distintos niveles de deriva. A diferencia de lo observado para la viga de acople superior, en este caso se observa mayor simetría para la fibra superior para derivas positivas (Figura 6.58.a) con respecto a las derivas negativas (Figura 6.58.b), es decir, para el caso de drifts positivos se observa compresión hacia el lado de la viga conectado al MR1 y tracción hacia el lado del MR2, mientras que para derivas negativas se observa tracción para el lado conectado al MR1 y compresión hacia el lado del MR2. Se observa que, como es esperable, las compresiones son de menor magnitud que las tracciones.

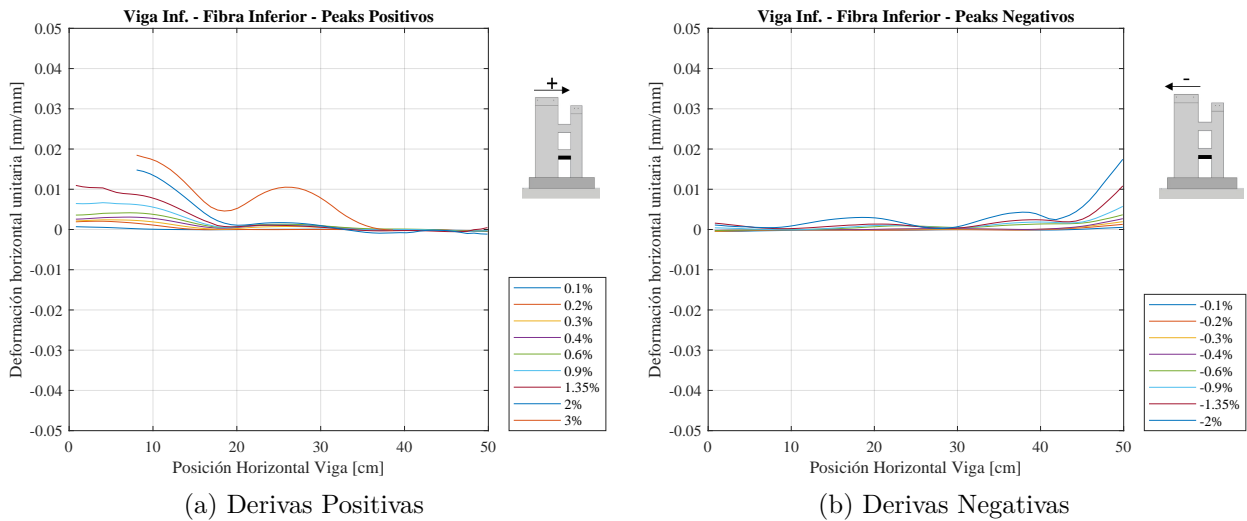


Figura 6.59: Deformación Axial de la Viga Inferior de Acople en su Fibra Inferior

Para la fibra inferior de la viga de acople inferior (Figura 6.59) se observa también simetría entre las derivas positivas y negativas (Figuras 6.59.a y 6.59.b). Se identifica que los perfiles de deformación axial son inversos respecto a la fibra superior, es decir, para derivas positivas se observa tracción hacia el lado conectado al MR1 y bajas compresiones para el

lado conectado al MR2, mientras que para derivas negativas se tiene bajas compresiones para el lado conectado al MR1 y tracción para el lado conectado al MR2.

6.12. Perfiles de Curvatura de Vigas de Acople

Basándose en los perfiles de deformación axial de las vigas, es posible obtener sus perfiles de curvatura utilizando la ecuación 6.4.

$$\phi = \frac{\varepsilon_{xx,c} + \varepsilon_{xx,t}}{L} \quad (6.4)$$

Donde $\varepsilon_{xx,c}$ corresponde a la deformación unitaria horizontal en compresión (es decir, en la dirección longitudinal de las vigas de acople) y $\varepsilon_{xx,t}$ corresponde a la deformación unitaria vertical en tracción, y L corresponde a la distancia vertical entre los puntos que se utilizan para determinar la curvatura. Lo anterior se presenta en el esquema de la Figura 6.60.

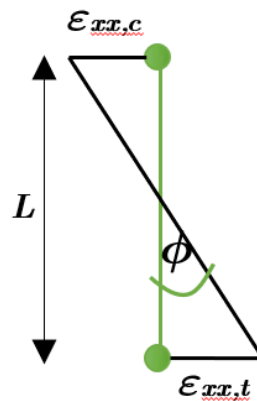


Figura 6.60: Esquema de Curvatura Vigas de Acople

En particular, es necesario identificar que, a diferencia de los muros, en este caso no se utilizan las deformaciones unitarias respecto al eje Y , sino aquellas en la dirección X , ya que ésta última representa la dirección longitudinal de las vigas de acople. De esta forma, los resultados se muestran a continuación.

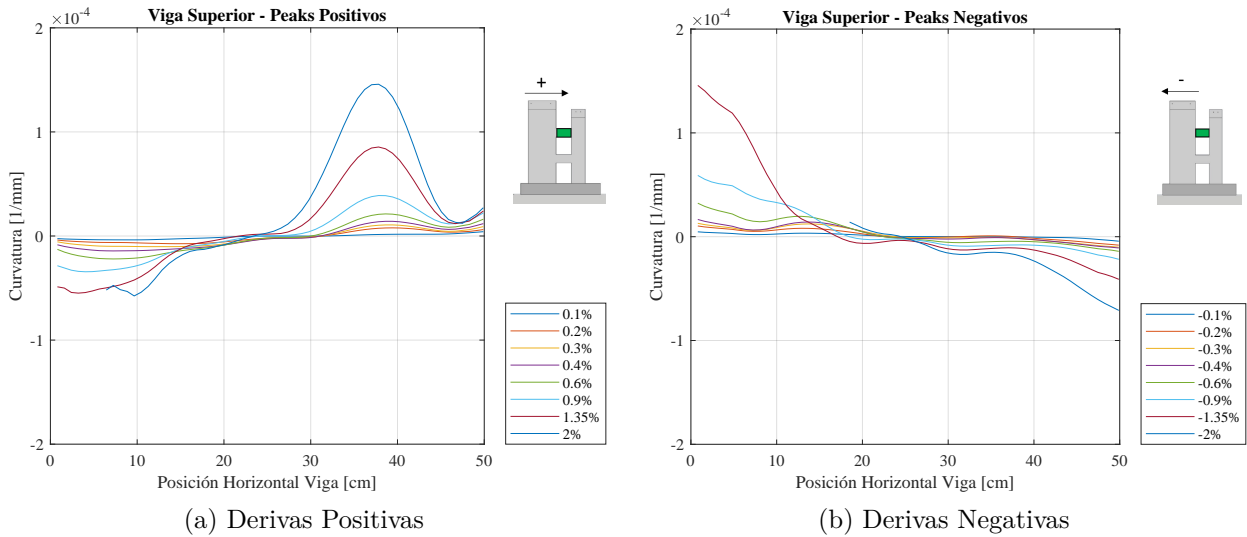


Figura 6.61: Curvatura de la Viga Superior de Acople

En la Figura 6.61 se observa que la viga de acople superior posee, para derivas positivas, curvatura negativa hacia el lado izquierdo y curvatura positiva hacia el lado derecho. Por otro lado, dicha distribución se invierte para derivas negativas. En particular, se observa que para derivas positivas y negativas se tiene una zona sin curvatura justo en la zona central de la viga, es decir, a los 25 [cm] desde su extremo. Se observa además que la curvatura aumenta considerablemente para derivas cuya magnitud es mayor o igual al 0.9% (tanto para derivas positivas como negativas), mientras que para derivas menores a dicho valor existe poca curvatura en la viga de acople superior.

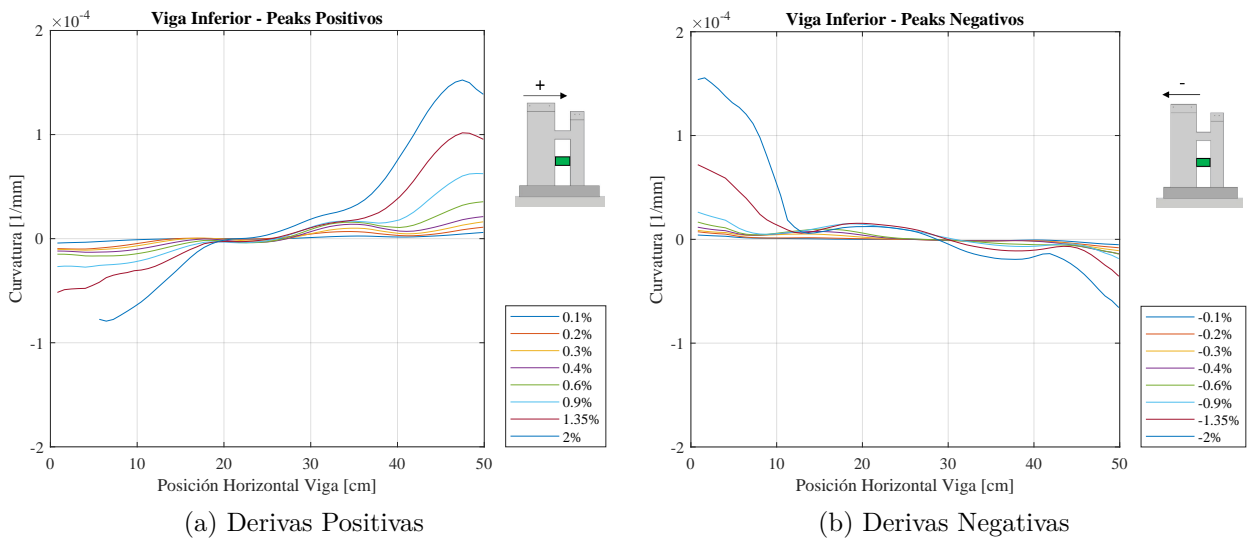


Figura 6.62: Curvatura de la Viga Inferior de Acople

Para la viga inferior, en la Figura 6.62 se presentan sus perfiles de curvatura para derivas positivas y negativas. Tal como se mencionó en la sección anterior, se observa mayor simetría en este elemento de acople, es decir, se observa que el comportamiento para derivas positivas es similar al comportamiento de derivas negativas pero con signo contrario. Sin perjuicio de lo anterior, se observa que la magnitud de la curvatura es mayor para derivas positivas en comparación a las negativas. También, se observa que existe una zona de la viga inferior de

acople sin curvatura justo en su zona central, es decir, a 25 [cm] de su extremo.

6.13. Desplazamiento por Corte y Flexión en Vigas de Acople

De forma similar a lo presentado anteriormente para los pisos de cada muro de la probeta, en esta sección se presentan los resultados de la medición de desplazamientos por corte y flexión en las vigas de acople.

Para determinar el desplazamiento por corte en las vigas de acople se utiliza una metodología análoga a la mostrada anteriormente para los muros (sección 6.9). Cabe destacar que para el caso de las vigas es necesario identificar que los esfuerzos de corte se orientan en la dirección transversal de las vigas de acople, es decir, en el eje Y . Así, para aplicar la ecuación 6.2 correctamente, el esquema presentado en la Figura 6.37 debe ser rotado en 90° con el fin de orientarlo correctamente según la posición de las vigas de acople en la probeta. De esta forma, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\bar{V}_s = \frac{\sqrt{D_1^{meas^2} - l^2} - \sqrt{D_2^{meas^2} - l^2}}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(U_1 - U_2)}{h} - \alpha \cdot \frac{(U_1 - U_2)}{h} \cdot l \quad (6.5)$$

Donde D_i^{meas} corresponde al largo de la diagonal i de la zona de la viga estudiada, U_i corresponden a los desplazamientos horizontales en los puntos superiores de la zona estudiada, h corresponde al ancho de la zona estudiada, l es el alto de la zona estudiada y α corresponde a la distancia entre la parte superior de la zona estudiada hasta el centro de la distribución de curvatura. Lo anterior queda representado en la Figura 6.63.

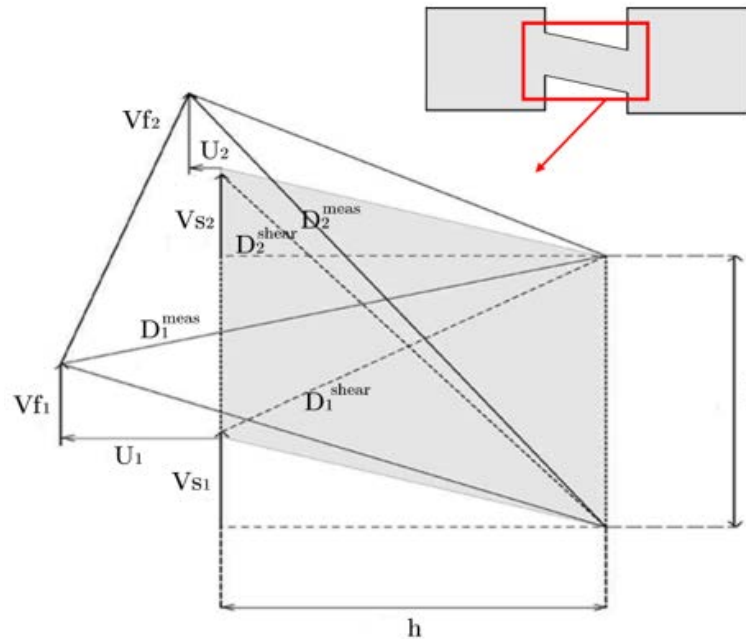


Figura 6.63: Diagrama de Desplazamientos de Modelo Flexural Modificado para Vigas

Tomando lo anterior en consideración, en la Figura 6.64 se presenta el desplazamiento por corte en cada viga de acople de la probeta en función del drift de techo aplicado sobre el MR1. En particular, no se consideran los resultados obtenidos para derivas positivas del 3% y derivas negativas del -3%, debido a que para ese nivel de desplazamiento existe gran cantidad de desprendimiento del hormigón en las vigas de acople (ver Figuras 6.47 y 6.54), lo que a su vez implica en la ausencia del recubrimiento de cal y puntos, impidiendo así poder obtener resultados fiables del comportamiento de las vigas de acople.

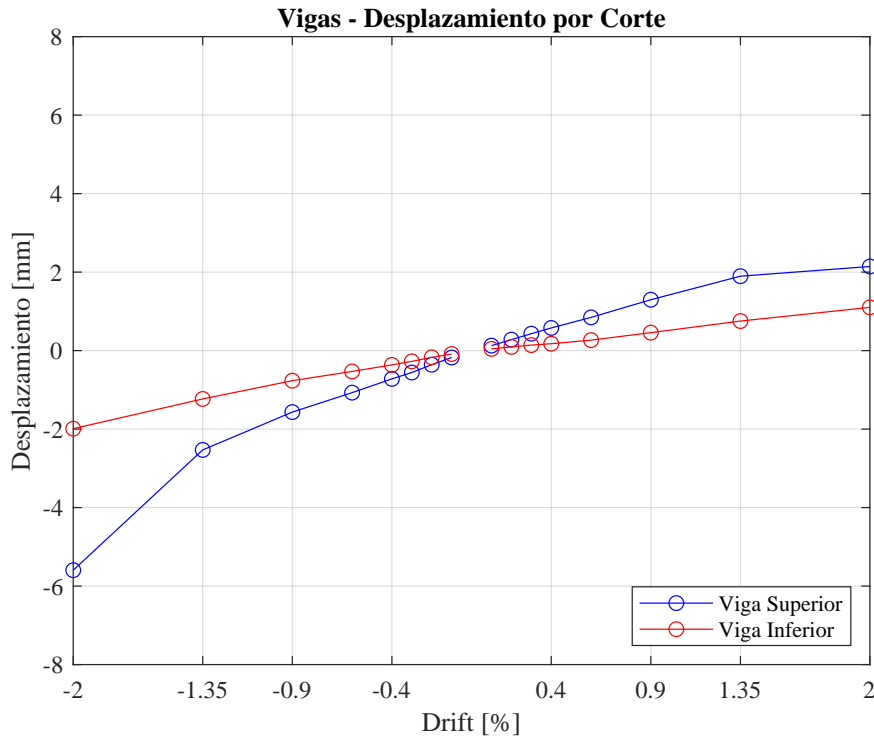


Figura 6.64: Desplazamiento por Corte en Vigas de Acople

De la Figura 6.64 es posible identificar que el desplazamiento por corte aumenta en ambas vigas de acople a medida que aumenta el drift del MR1. En ambas vigas de acople se observa que los desplazamientos por corte asociados a cada nivel de deriva son similares en magnitud, a excepción de derivas altas, del 1.35% y 2%, donde se observan mayores desplazamientos por corte en las derivas negativas que en las positivas.

También, es posible identificar que para todo nivel de deriva, el desplazamiento por corte es mayor en la viga de acople superior que en la viga de acople inferior de la probeta. Esto tiene sentido considerando que la carga lateral del actuador es aplicada a nivel de techo del MR1, es decir, se encuentra más cercana a la viga superior. Para la viga de acople superior se determinan desplazamientos por corte máximos cercanos a -6 [mm] para una deriva del -2% y de 2 [mm] para una deriva del 2%. Para la viga inferior de acople en cambio, se determinan desplazamientos por corte máximos cercanos a -2 [mm] para una deriva del -2% y de 1 [mm] para una deriva del 2%.

De forma análoga a lo explicado anteriormente en la sección 6.9 y utilizando la ecuación 6.3, es posible determinar el desplazamiento por flexión y el desplazamiento total en las vigas

de acople. Los resultados se muestran a continuación.

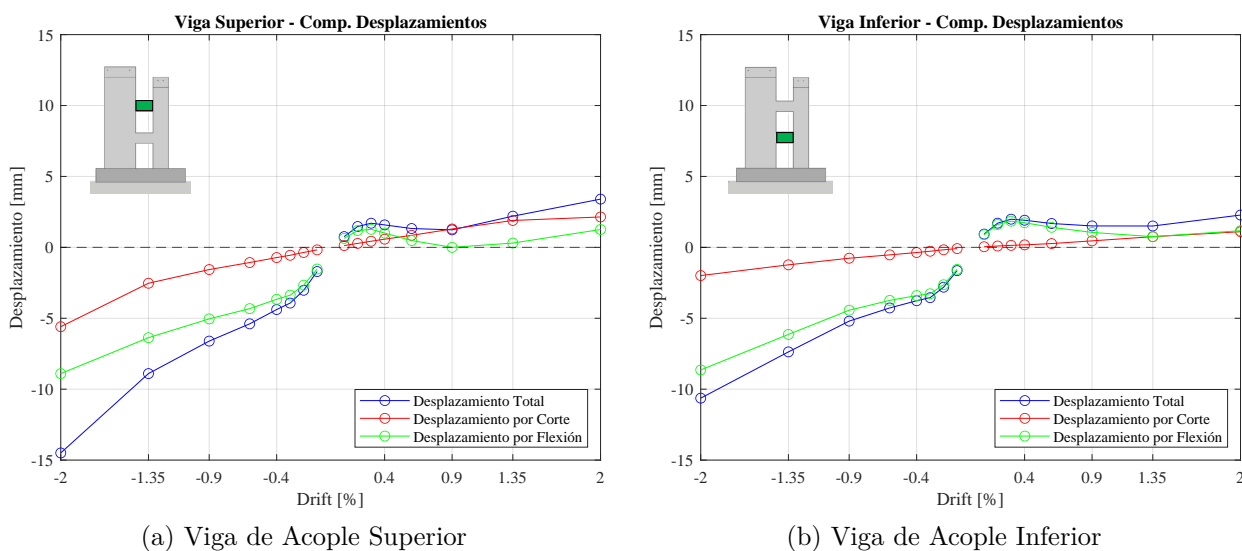


Figura 6.65: Comparación Desplazamiento por Corte, Flexión y Total en Vigas de Acople

En la Figura 6.65 se observa que los desplazamientos máximos de ambas vigas de acople son mayores para drifts negativos que para drifts positivos. En particular, dicha diferencia es más acentuada en la viga de acople superior que en la inferior. Se identifican (Figura 6.65.a) desplazamientos totales de -15 [mm] para una deriva del -2 % y de cerca de 4 [mm] para una deriva del 2 % para la viga de acople superior. En cambio, para la viga de acople inferior (Figura 6.65.a), se identifican desplazamientos totales del orden de -10 [mm] para una deriva del -2 % y de 3 [mm] para una deriva del 2 %.

Para la viga de acople superior (Figura 6.65.a) se observa que, para derivas positivas, el desplazamiento por corte es mayor al desplazamiento por flexión para drifts iguales o superiores al 0.6 %. Por otro lado, para la viga de acople inferior (Figura 6.65.a) se observa que, para derivas positivas, el desplazamiento por flexión es mayor para derivas hasta el 0.9 % y para derivas del 1.35 % y 2 % el desplazamiento por corte y flexión son de magnitudes similares. En cambio, para derivas negativas, se tiene que el desplazamiento de ambas vigas de acople es mayormente debido a esfuerzos de flexión.

6.14. Comportamiento Fuera del Plano de la Probeta

En esta sección se presentan los resultados obtenidos respecto al comportamiento fuera del plano de los muros de la probeta, basándose en las mediciones obtenidas por las cámaras ubicadas en los cantos. Cabe mencionar que para derivas altas, se eliminan los datos cercanos a la base de los muros como consecuencia del descascaramiento del hormigón que impide poder realizar mediciones con fotogrametría (Figuras 6.66 y 6.67).

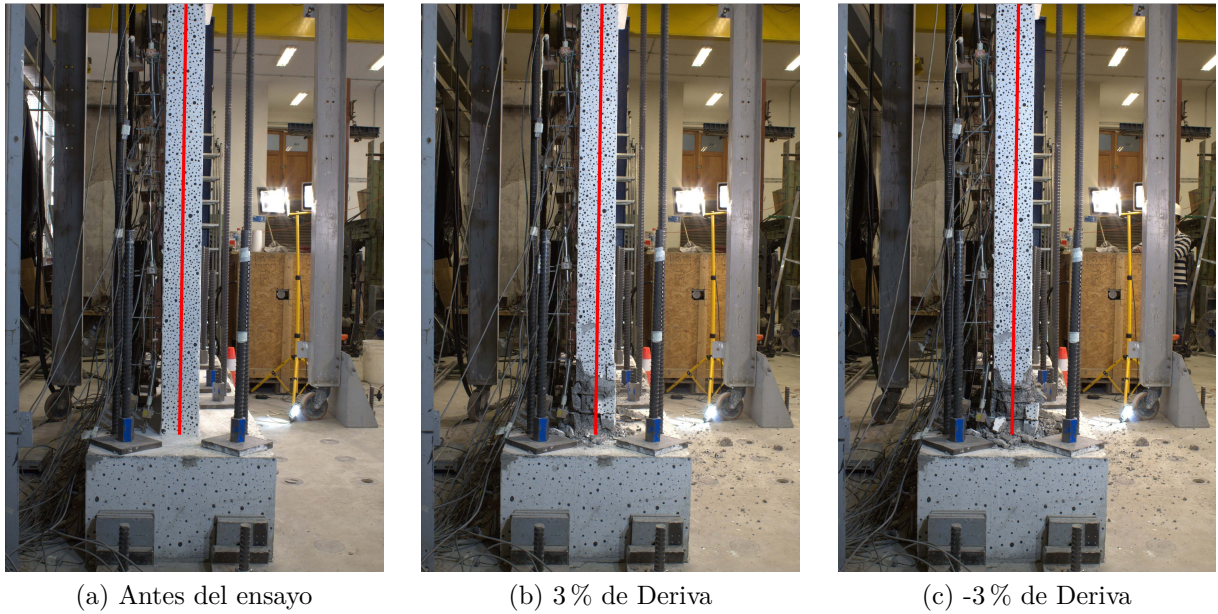


Figura 6.66: Vista canto izquierdo antes del ensayo, a 3 % y -3 % de deriva

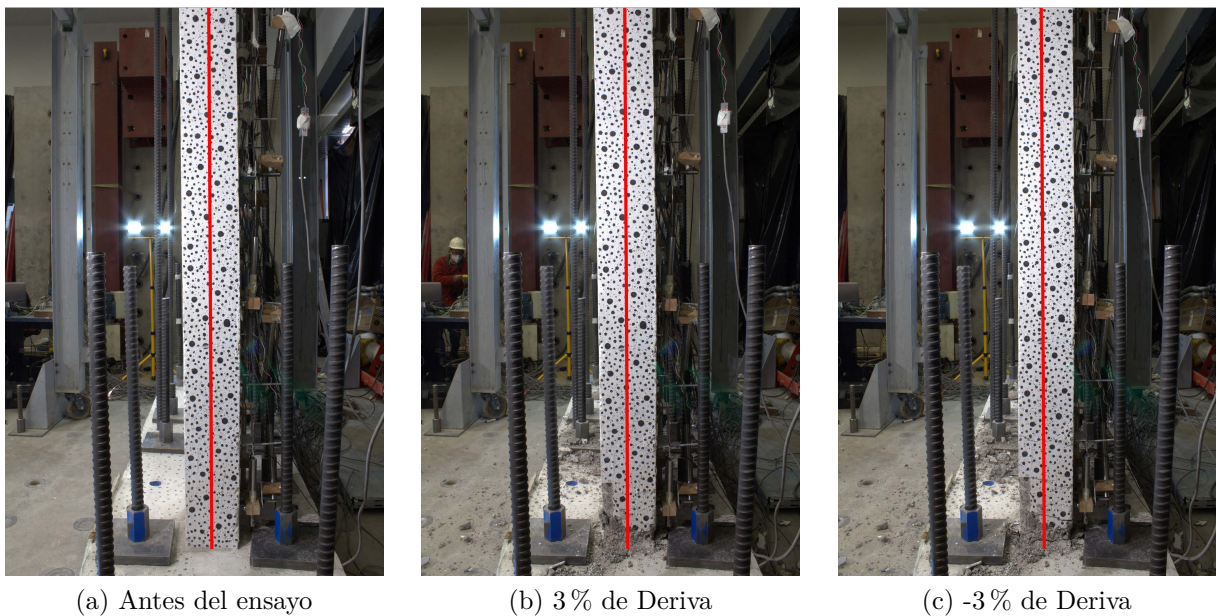


Figura 6.67: Vista canto derecho antes del ensayo, a 3 % y -3 % de deriva

En la Figura 6.68 se observa el desplazamiento horizontal fuera del plano en altura de la cara lateral izquierda del MR1, en función de su deriva de techo. Es posible identificar que para derivas de hasta el 0.9 % y -0.9 % el desplazamiento fuera del plano es del orden de 3 [mm] o menor en dirección norte. Sin embargo, para derivas superiores se observan desplazamientos fuera del plano de hasta 7 [mm] y 10 [mm] (en el 3 % y -3 % de deriva respectivamente) a una altura de 1.5 [m] desde la base del muro. Esto puede explicarse en primer lugar por la ausencia de empotramiento de las columnas del marco de acero en el lado norte (por ausencia de agujeros en la losa de reacción, lo cual ya fue explicado en la sección 4.6.4), y puede inducir a una restricción menor en dicha dirección de la probeta fuera

del plano. Adicionalmente, este comportamiento de la cara lateral izquierda del MR1 puede explicarse por efecto del pandeo local de las barras de refuerzo verticales ubicadas en la base (Figura 6.69), el cual coincide con el movimiento observado (Figura 6.66).

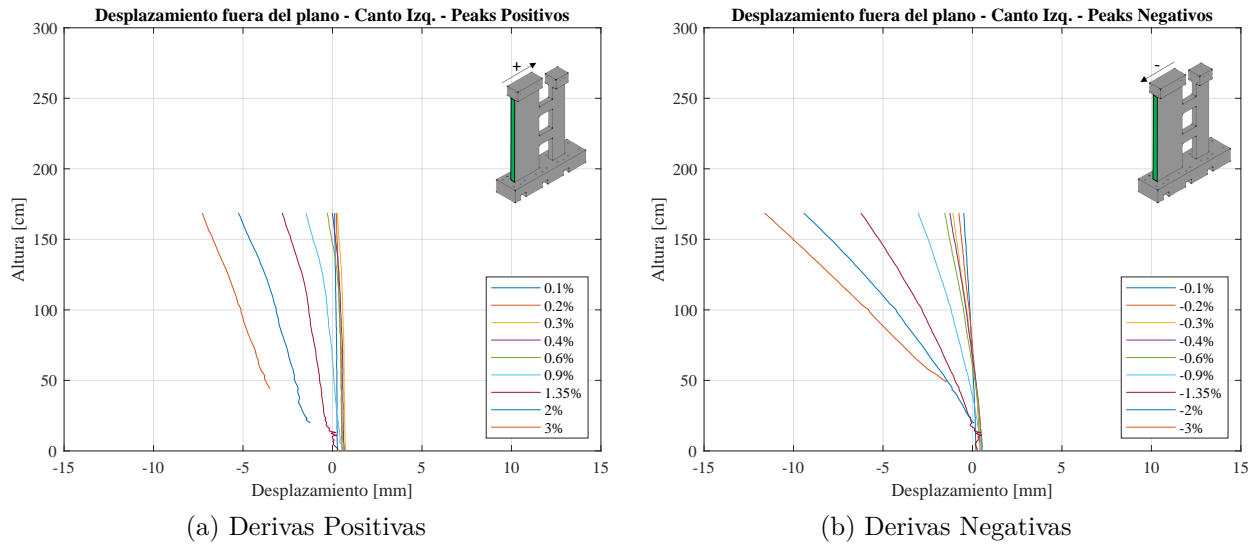


Figura 6.68: Desplazamiento Fuera del Plano - Canto Izquierdo

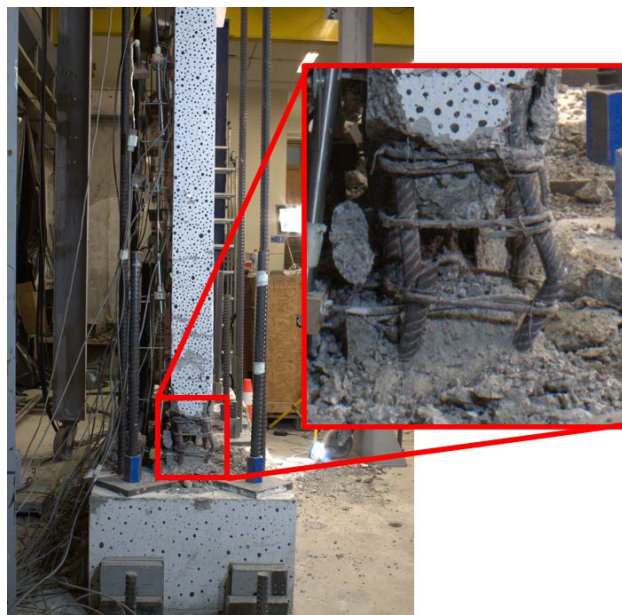


Figura 6.69: Zona Izquierda de la Base del MR1 vista desde el canto al finalizar el ensayo

Por otro lado, en la Figura 6.70 se observa el desplazamiento horizontal fuera del plano en altura de la cara lateral derecha del MR2, en función del drift del MR1. Para derivas positivas (Figura 6.70.a) se observan desplazamientos fuera del plano de baja magnitud en comparación a lo visto anteriormente para el canto izquierdo, es decir, del orden de 2 [mm]. Sin embargo, para derivas negativas (Figura 6.70.b) se tiene que para derivas del -0.9% en adelante el desplazamiento en dirección norte de la cara lateral derecha del MR2 comienza

a aumentar considerablemente hasta alcanzar un valor sobre los 10 [mm] para un drift del -3%. Esto puede explicarse por el desprendimiento de hormigón en la base del MR2 y el posterior pandeo de barras verticales de refuerzo en dicha zona (Figura 6.72), el cual si bien es menor en comparación al ocurrido en la base del MR1, coincide con la dirección de movimiento observada, ya que el borde derecho del MR2 se encuentra en tracción justamente para derivas negativas.

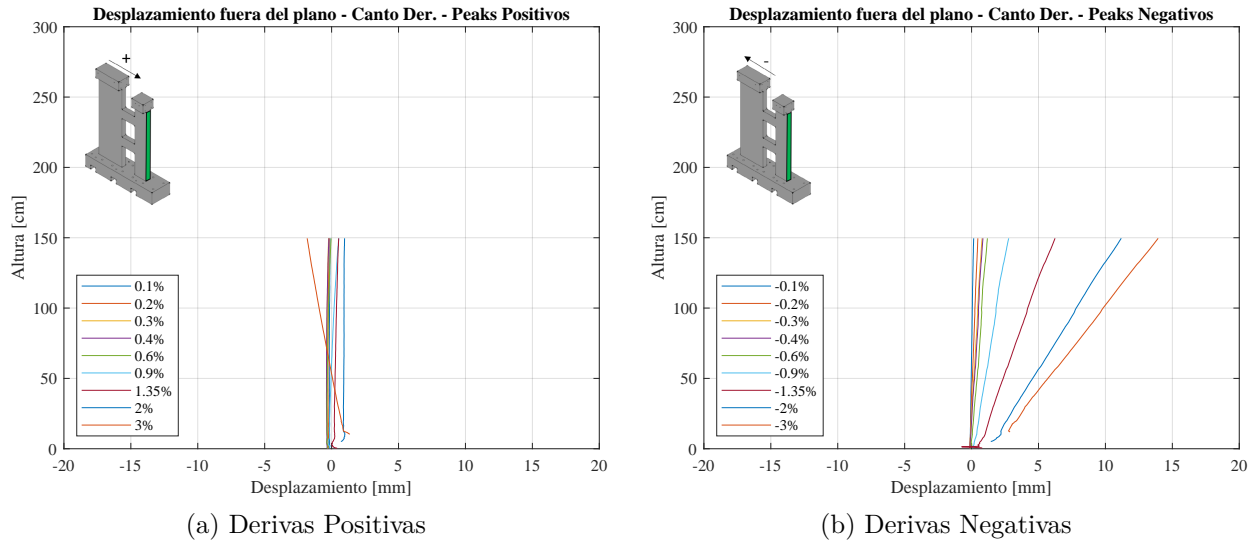


Figura 6.70: Desplazamiento Fuera del Plano - Canto Derecho

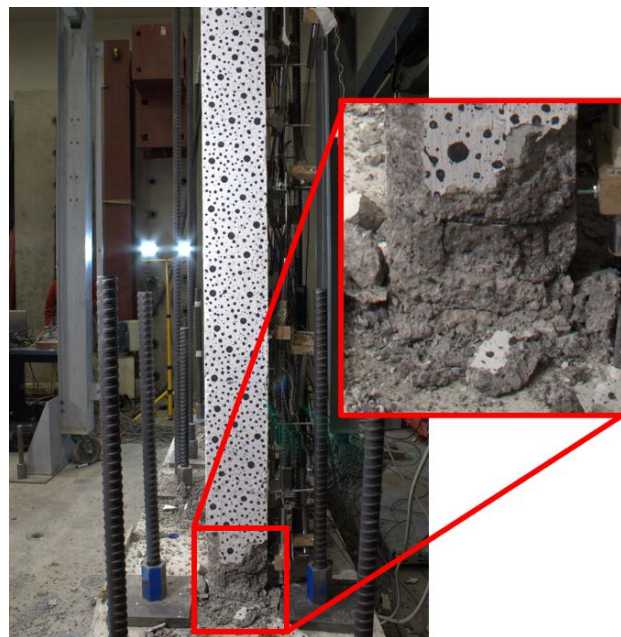


Figura 6.71: Zona Derecha de la Base del MR2 vista desde el canto al finalizar el ensayo



Figura 6.72: Barra de refuerzo en el borde inferior derecho del MR2 al finalizar el ensayo

Capítulo 7

Modelo Numérico

El modelo numérico del sistema de muros rectangulares acoplados con vigas (CWB) se realiza a través de la plataforma SAFE-Toolbox desarrollada por Rojas (2012) [37]. De esta forma, es posible validar esta herramienta para predecir el comportamiento de ensayos de muros de hormigón armado acoplados con vigas.

7.1. SAFE-Toolbox

Tal como se mencionó anteriormente, SAFE-Toolbox (Structural Analysis by Finite Elements Toolbox) es una herramienta de elementos finitos desarrollada por Rojas [37] en MATLAB [26], la cual permite modelar el comportamiento no lineal de los materiales sometidos a cargas estáticas y cíclicas.

La plataforma se basa en programación orientada en objetos, la cual es capaz de representar sistemas estructurales en el rango no lineal cuando previamente se hayan definido las leyes constitutivas de los materiales que componen a dichos sistemas. Adicionalmente, es posible utilizar métodos de resolución basados en el control por desplazamientos o por fuerza. Dadas las características del ensayo estudiado en este Trabajo de Tesis, se utiliza el control por desplazamientos en la herramienta.

Para la modelación de la probeta se utiliza el elemento *shell* rectangular con capas (Figura 7.1.a). En dicho elemento, el hormigón y el acero se entrelazan para formar un elemento de hormigón armado, el cual queda representado por un comportamiento promedio de ambos materiales en lo que respecta a sus tensiones y deformaciones, con una adherencia total. Cada nodo perteneciente a un elemento posee 6 grados de libertad y 9 puntos de cuadratura. De esta forma, cada elemento posee 24 grados de libertad (Figura 7.1.b).

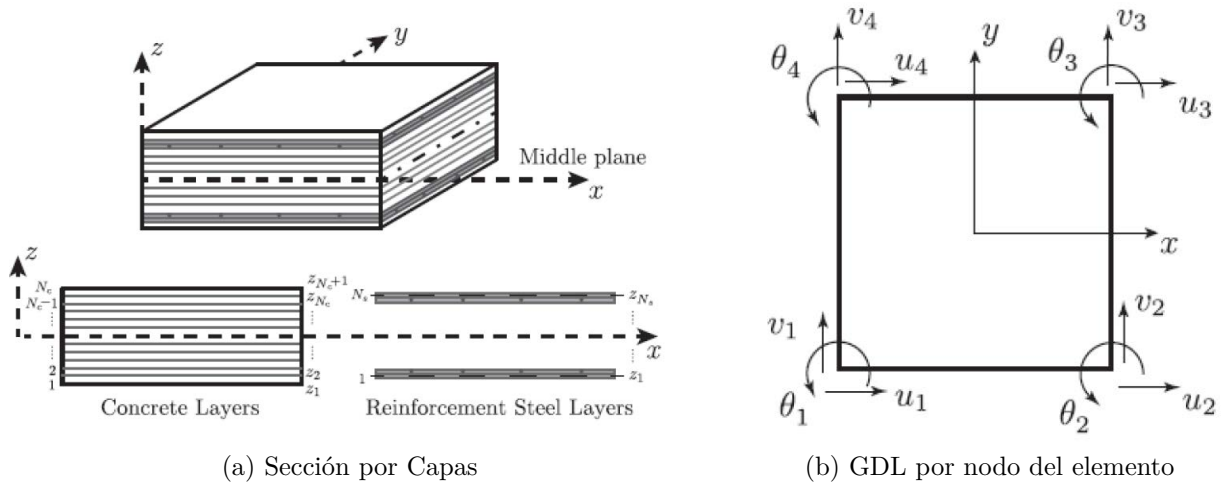


Figura 7.1: elementos finitos Tipo *Shell* [37]

7.1.1. Agrietamiento

El elemento utilizado es capaz de representar el efecto del agrietamiento del hormigón armado. Esto se obtiene gracias a que el comportamiento del acero y del hormigón quedan determinado por las leyes propuestas por Belarbi y Hsu [3]. En la Figura 7.2 se observa que en las zonas donde no existe agrietamiento el hormigón y el acero trabajan en conjunto, mientras que en las zonas agrietadas se tiene que el acero recibe toda la tensión.

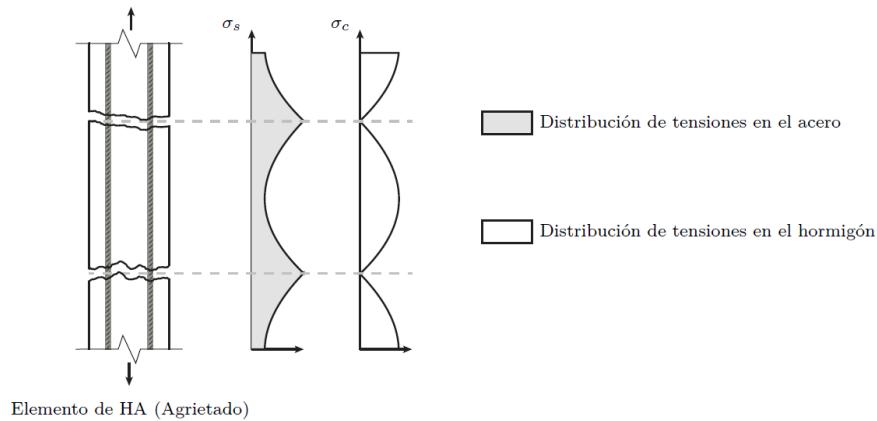


Figura 7.2: Distribución de tensiones en acero y hormigón de un elemento agrietado [33]

7.1.2. Hormigón

El modelo utilizado para la ley constitutiva uniaxial cíclica del hormigón se basa en lo desarrollado por Massone [22]. En dicho modelo, la curva de compresión del hormigón queda definida por lo propuesto por Thorenfelt [44] y por las calibraciones realizadas posteriormente por Collins y Porasz [10]. Esto queda representado en la Figura 7.3.

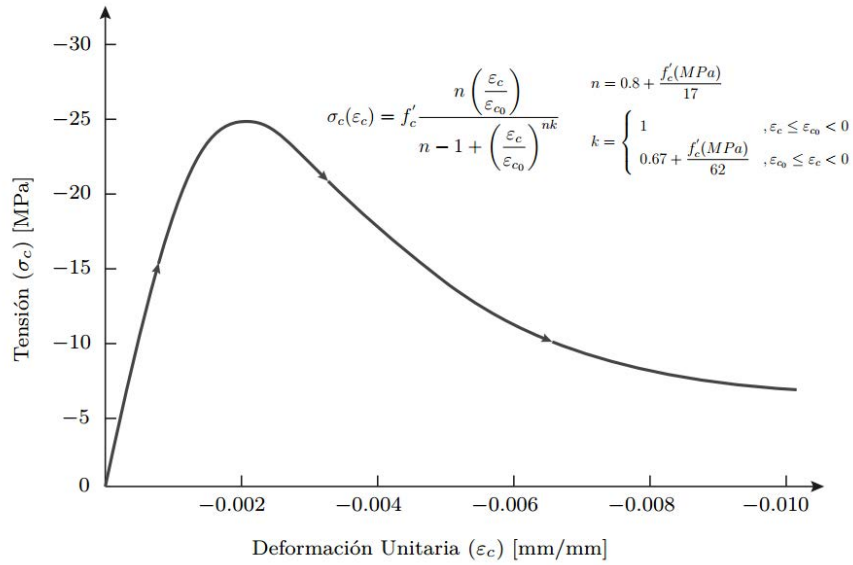


Figura 7.3: Curva de tensión deformación del hormigón a compresión propuesta por Thorenfelt [44]

Donde f'_c es la tensión máxima del hormigón en compresión y ε_{c0} corresponde a la deformación unitaria en dicho punto. Por otro lado, n y k son parámetros de ajuste de la curva, que tal como se mencionó anteriormente, fueron calibrados por Collins y Porasz [10].

Por otro lado, la curva del hormigón sometido a tracción queda definida por lo propuesto por Belarbi y Hsu [3] y se muestra en la Figura 7.4.

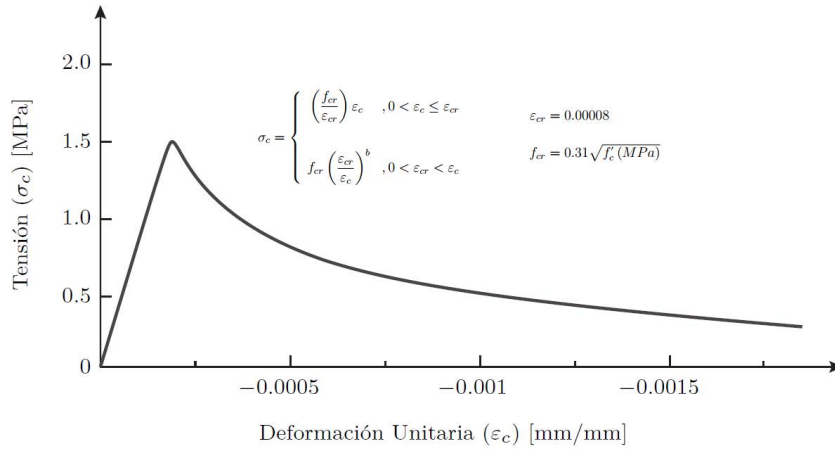


Figura 7.4: Curva de tensión deformación del hormigón a tracción propuesta por Belarbi y Hsu [3]

Donde f_{cr} es la tensión máxima del hormigón en tracción (rotura) y ε_{cr} corresponde a la deformación unitaria en dicho punto. Por su parte, b corresponde a una constante que queda determinada por el estado de confinamiento del hormigón, la cual adopta un valor de $b = 0.4$ para hormigón confinado y un valor de $b = 0.6$ para hormigón no confinado según Rojas [37].

Una vez definido el comportamiento a compresión y tracción del hormigón, es posible precisar el comportamiento cíclico de dicho material. Éste se basa en curvas de carga y descarga lineales, cuyas pendientes quedan determinadas por la rigidez inicial E_{c0} y a $0.071E_{c0}$ respectivamente según Palermo y Vecchio [32]. Las zonas de carga y descarga dependen de la deformación plástica remanente a compresión y tracción, las cuales quedan definidas por las ecuaciones 7.1 y 7.2.

$$\varepsilon_p^c = \varepsilon_m^c \left(1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon_m^c}{\varepsilon_{c0}^c}\right)\alpha_c} \right) \quad (7.1)$$

$$\varepsilon_p^t = \varepsilon_m^t \left(1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon_m^t}{\varepsilon_{c0}^t}\right)\alpha_t} \right) \quad (7.2)$$

Donde ε_m^c y ε_m^t son las máximas deformaciones unitarias en compresión y tracción en el ciclo anterior respectivamente, y α_c y α_t adoptan valores de $\alpha_c = 0.32$ y $\alpha_t = 0.08$ según Rojas [37]. Lo anterior queda representado por la Figura 7.5.

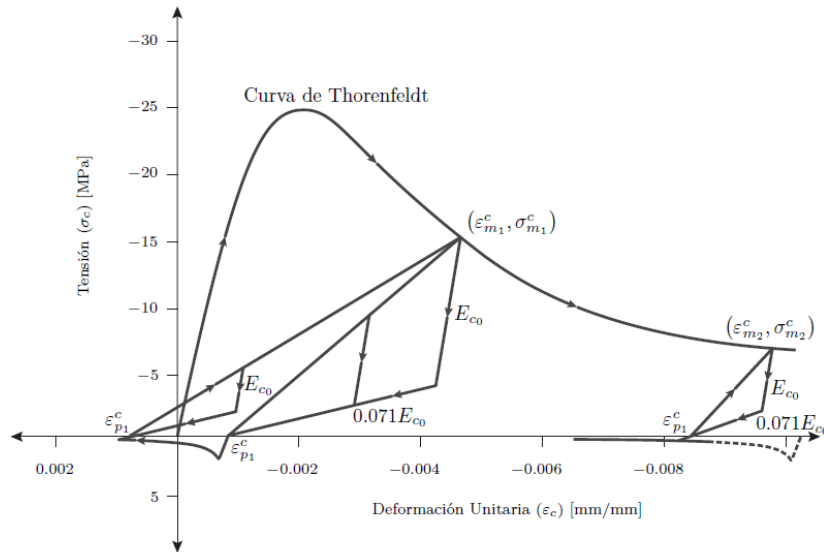


Figura 7.5: Curva del comportamiento histerético del hormigón [33]

Adicionalmente, se consideran 3 coeficientes biaxiales que ponderan a la resistencia máxima a la compresión del hormigón (f'_c), como se observa en la Figura 7.6.

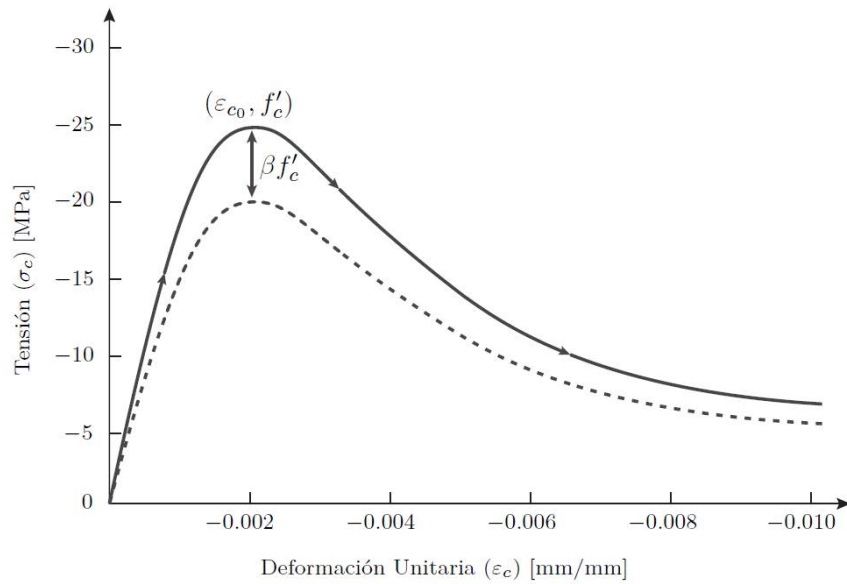


Figura 7.6: Modelo de reducción o amplificación de la capacidad del hormigón [11]

Los coeficientes considerados en el modelamiento del hormigón se describen a continuación:

- **Efecto del confinamiento β_c :** Este factor representa el aumento de la capacidad a compresión del hormigón como consecuencia del confinamiento dado por la armadura transversal (estribos). Esto queda definido por la curva propuesta por Saatcioglu y Razvi [39], presentada en la Figura 7.7

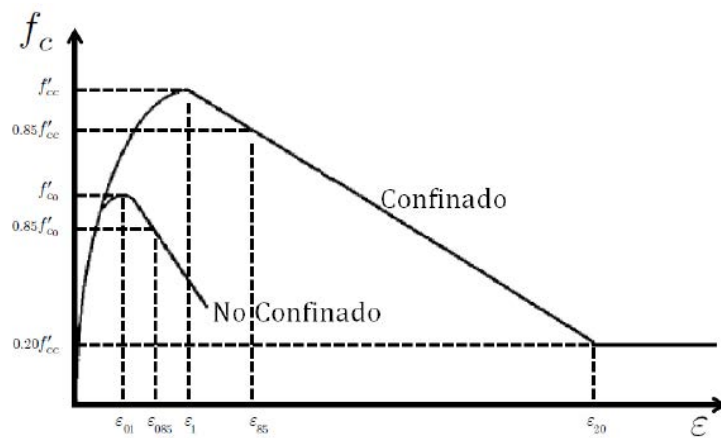


Figura 7.7: Curva del comportamiento del hormigón confinado [39]

El factor β_c queda determinado por las ecuaciones 7.3, 7.4 y 7.5.

$$\beta_c = 1 + K \quad (7.3)$$

$$K = \frac{k_1 \cdot f_{le}}{f'_c} \quad (7.4)$$

$$k_1 = 6.7 \cdot f_{le}^{-0.17} \quad (7.5)$$

Donde f_{le} representa la tensión efectiva de confinamiento y queda determinada por la geometría del elemento y por la configuración de acero de refuerzo del elemento.

- **Degradación por tracción en la sección transversal β_s :** Este factor representa la pérdida de resistencia del hormigón dado por la tracción en la sección transversal. Belarbi y Hsu [3] proponen la ecuación 7.6 para su determinación.

$$\beta_s = \frac{k}{\sqrt{1 + k_\sigma \varepsilon_t}} \quad (7.6)$$

Donde k es un coeficiente adimensional cuyo valor es de $k = 0.9$ según Belarbi y Hsu ó es de $k = 1$ según Rojas, para resultados más estables. En tanto, ε_t corresponde a la deformación unitaria de tracción en la dirección transversal y k_σ adopta valores de $k_\sigma = 250$ si la carga es secuencial ó $k_\sigma = 400$ si la carga es proporcional.

- **Degradación por carga cíclica β_d :** Este factor representa el deterioro del hormigón debido a los ciclos de carga y descarga. Su valor es determinado según la ecuación 7.7, según lo propuesto por Palermo y Vecchio [32].

$$\beta_d = \frac{1}{1 + \alpha_1 \left(\frac{\varepsilon_{rec}}{\varepsilon_{c0}} \right)^{\alpha_2}} \quad (7.7)$$

Donde ε_{c0} es la deformación unitaria en el punto de resistencia máxima del hormigón a compresión, $\alpha_1 = 0.5$ y $\alpha_2 = 0.1$ previo al agrietamiento y $\alpha_1 = 0.6$ y $\alpha_2 = 0.175$ posterior a éste. A su vez, ε_{rec} corresponde a la diferencia entre las deformaciones unitarias máxima y mínima registradas en el ciclo estudiado.

7.1.3. Acero

Para determinar el comportamiento del acero se utiliza el modelo propuesto por Menegotto y Pinto [27] y modificado por Filippou [12], el cual considera el efecto del endurecimiento y el comportamiento de barras de acero observado experimentalmente. El modelo del acero queda representado en la Figura 7.8. Se observa que la curva es compuesta por 4 rectas con 2 pares paralelos entre sí. Las pendientes de dichas rectas corresponden al módulo de elasticidad del acero E_s y a bE_s , donde b es un factor determinado por el endurecimiento del acero post-fluencia.

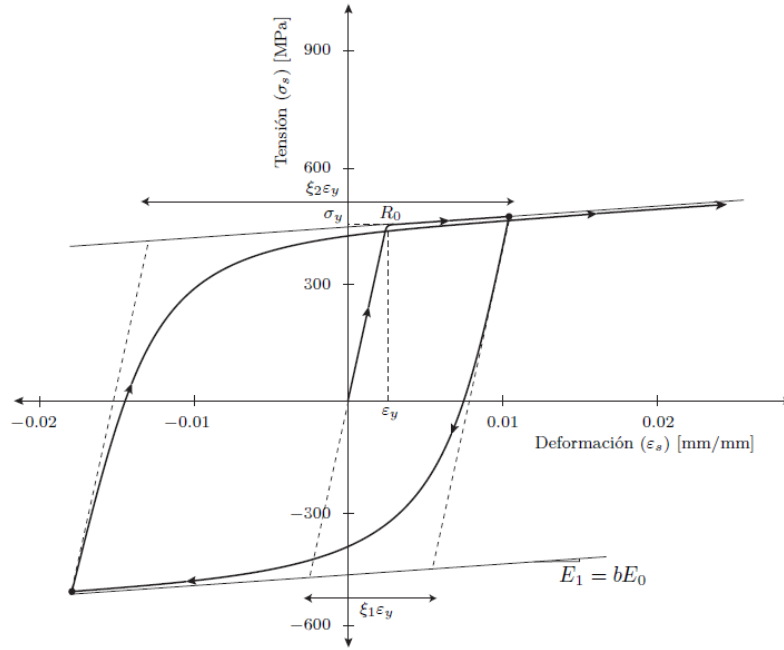


Figura 7.8: Curva de tensión deformación del acero propuesta por Menegotto y Pinto [27]

Así, el modelo del acero queda definido por las ecuaciones 7.8, 7.9 y 7.10.

$$f_s^*(\varepsilon_s^*) = b\varepsilon_s^* + \frac{(1-b)\varepsilon_s^*}{(1+(\varepsilon_s^*)^R)^{1/R}} \quad (7.8)$$

$$\varepsilon_s^* = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r} \quad (7.9)$$

$$f_s^* = \frac{f_s - f_r}{f_0 - f_r} \quad (7.10)$$

Donde f_0 y ε_0 quedan determinados por la intersección de las rectas definidas en el modelo (Figura 7.8), y f_r y ε_r corresponden a la tensión y deformación unitaria en la zona donde la curva retorna, respectivamente. A su vez, el valor de R representa el efecto de Bauschinger y queda determinado por las ecuaciones 7.11 y 7.12. En dichas ecuaciones se tiene que ε_m representa la máxima o mínima deformación unitaria del ciclo estudiado, ya sea de carga o descarga, y ε_y representa la deformación de fluencia.

$$R = R_0 - \frac{a_1 \xi}{a_2 + \xi} \quad (7.11)$$

$$\xi = \left| \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_0}{\varepsilon_y} \right| \quad (7.12)$$

Finalmente, se considera la reducción de la tensión de fluencia propuesto por Belarbi y Hsu [3], lo cual tiene como propósito representar el efecto de la fluencia aparente, aumentando también el endurecimiento. Esto queda determinado por las ecuaciones 7.13, 7.14 y 7.15.

$$\bar{f} = (0.93 - 2B)f_y \quad (7.13)$$

$$\bar{b} = 0.02 + 0.25B \quad (7.14)$$

$$B = \frac{1}{\rho_t} \left(\frac{f_{cr}}{f_y} \right)^{1.5} \quad (7.15)$$

Donde \bar{f} y \bar{b} representan la tensión de fluencia promedio y el endurecimiento promedio del acero y ρ_t corresponde a la cuantía longitudinal de refuerzo.

7.2. Modelamiento y Mallado de la Probeta

En esta sección se aborda el detallamiento del modelamiento y mallado (mesh) del modelo de elementos finitos desarrollado para la probeta.

Para definir correctamente cada una de las secciones de elementos y las condiciones de borde se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Los elementos del pedestal de la probeta tienen un comportamiento totalmente elástico, es decir, dicha sección es capaz de soportar las sollicitaciones producidas por la transmisión de esfuerzos desde la base de ambos muros sin incurrir en el rango inelástico. Por lo anterior, no se define su cuantía.
2. Los elementos de ambos muros, de las vigas de acople y de las vigas de transferencia son modelados con el propósito de incorporar la no linealidad del hormigón armado. Como se mencionó anteriormente, todos los elementos son del tipo *Shell*.
3. Los nodos de la base del pedestal se encuentran restringidos en todos sus grados de libertad, es decir, el pedestal se encuentra empotrado. De esta forma, se restringe su desplazamiento y rotación en todos los ejes.
4. Los nodos superiores de la viga de carga del muro grande (MR1) se encuentran restringidos fuera del plano, es decir, su desplazamiento es únicamente lateral.
5. La carga axial es aplicada de forma distribuida en todos los nodos de la viga de carga del MR1.
6. La carga lateral es aplicada en el nodo superior central de la viga de carga.

De esta forma, en la Tabla 7.1 se muestran los nombres de cada sección de elementos finitos, sus cuantías y el número de elementos asociado.

Tabla 7.1: Características de Secciones de Elementos Finitos del Modelo Numérico

Nº	Sección	Cuantía transversal ρ_{trans} [%]	Cuantía longitudinal ρ_{long} [%]	Cantidad de Elementos [-]
1	Pedestal	-	-	96
2	Centro No Confinado MR1	0.34	0.32	96
3	Borde Confinado MR1	0.87	3.97	72
4	Borde No Confinado MR1	0.34	3.97	24
5	Centro Viga de Carga MR1	0.59	0.84	8
6	Borde Viga de Carga MR1	0.59	1.86	8
7	Centro No Confinado MR2	0.67	0.71	42
8	Borde Confinado MR2	1.05	2.32	72
9	Borde No Confinado MR2	0.67	2.32	12
10	Centro Viga de Carga MR2	0.59	0.53	4
11	Borde Viga de Carga MR2	0.59	2.32	8
12	Vigas de Acople	1.12	1.45	30 (15 cada una)
Total				472

De esta forma, se detallan las distintas secciones de elementos finitos consideradas en el modelo numérico de la probeta:

1. **Pedestal:** Corresponde a los elementos del pedestal de la probeta, son modelados en el rango elástico.
2. **Centro No Confinado MR1:** Corresponde a los elementos del centro del MR1 con hormigón armado no confinado que representa la doble malla que posee.
3. **Borde Confinado MR1:** Corresponde a los elementos de los bordes del MR1 desde su base hasta la viga superior de acople en altura, considerando el confinamiento que existe hasta ese nivel.
4. **Borde No Confinado MR1:** Corresponde a los elementos de los bordes del MR1 desde la altura de la viga superior de acople hasta el final del MR1 en altura. Sus elementos se consideran no confinados.
5. **Centro Viga de Carga MR1:** Corresponde a los elementos del centro de la viga de transferencia del MR1, que se encuentran sin confinar.
6. **Borde Viga de Carga MR1:** Corresponde a los elementos de los bordes de la viga de transferencia del MR1, que se encuentran sin confinar.
7. **Centro No Confinado MR2:** Corresponde a los elementos del centro del MR2 con hormigón armado no confinado que representa la doble malla que posee.
8. **Borde Confinado MR2:** Corresponde a los elementos de los bordes del MR2 desde su base hasta la viga superior de acople en altura, considerando el confinamiento que existe hasta ese nivel.
9. **Borde No Confinado MR2:** Corresponde a los elementos de los bordes del MR2 desde la altura de la viga superior de acople hasta el final del MR2 en altura. Sus elementos se consideran no confinados.

10. **Centro Viga de Carga MR2:** Corresponde a los elementos del centro de la viga de transferencia del MR2, que se encuentran sin confinar.
11. **Borde Viga de Carga MR2:** Corresponde a los elementos de los bordes de la viga de transferencia del MR2, que se encuentran sin confinar.
12. **Vigas de Acople:** Corresponde a los elementos que conforman las vigas de acople entre los muros de la probeta. Sus elementos son modelados con hormigón armado confinado. Su acero queda representado por las barras longitudinales dispuestas a flexión y los estribos a corte.

El mallado (mesh) de la probeta es realizado a través del software SAP2000®. Posteriormente la información de nodos y elementos es exportada para poder ser utilizada en SAFE-Toolbox. Así, el mesh de la probeta se muestra en la Figura 7.9.

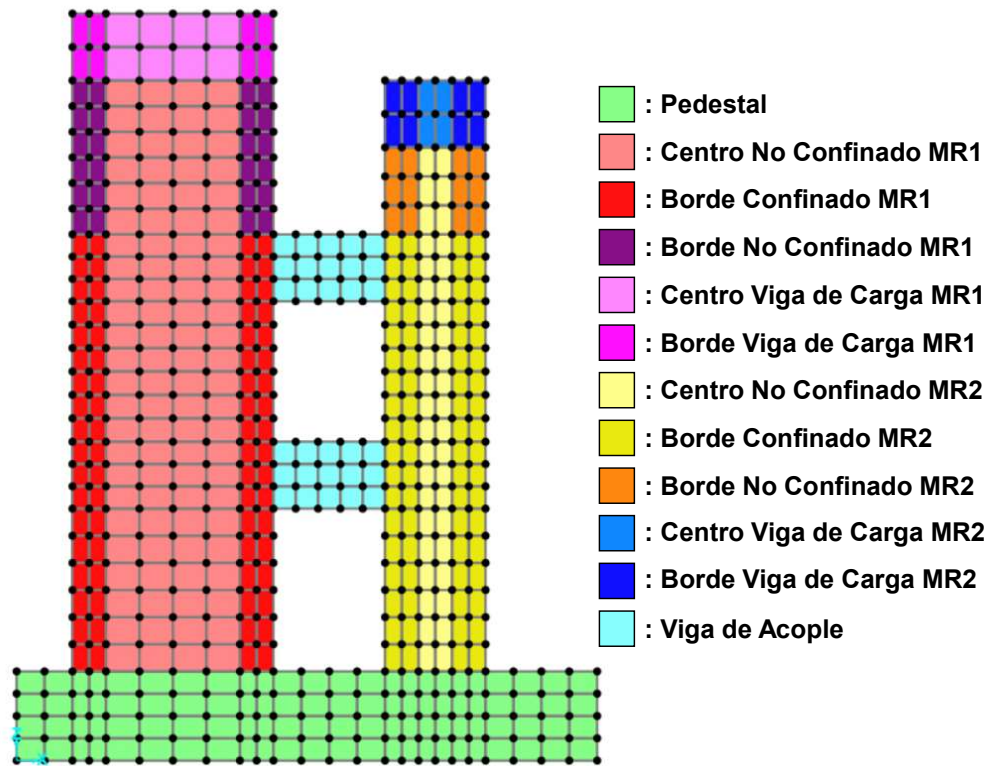


Figura 7.9: Mesh de la Probeta

Cabe mencionar que el protocolo de carga utilizado en el modelo corresponde a los desplazamientos laterales a nivel de techo obtenidos durante el ensayo de la probeta y posteriormente corregidos. Dichos valores son proporcionados por el trabajo de Raffo [36].

Capítulo 8

Resultados Numéricos

En este capítulo se presentan los resultados del modelo de elementos finitos desarrollado en SAFE-Toolbox para la probeta CWB. Al igual que para los resultados experimentales, se utiliza como convención valores positivos para las deformaciones asociadas a tracción y valores negativos para las deformaciones asociadas a compresión. Cabe mencionar que en las figuras de este capítulo se incluyen también los resultados experimentales analizados previamente en el Capítulo 6 de este Trabajo de Tesis, con el fin de que la comparación con los resultados numéricos sea más clara.

8.1. Respuesta Global

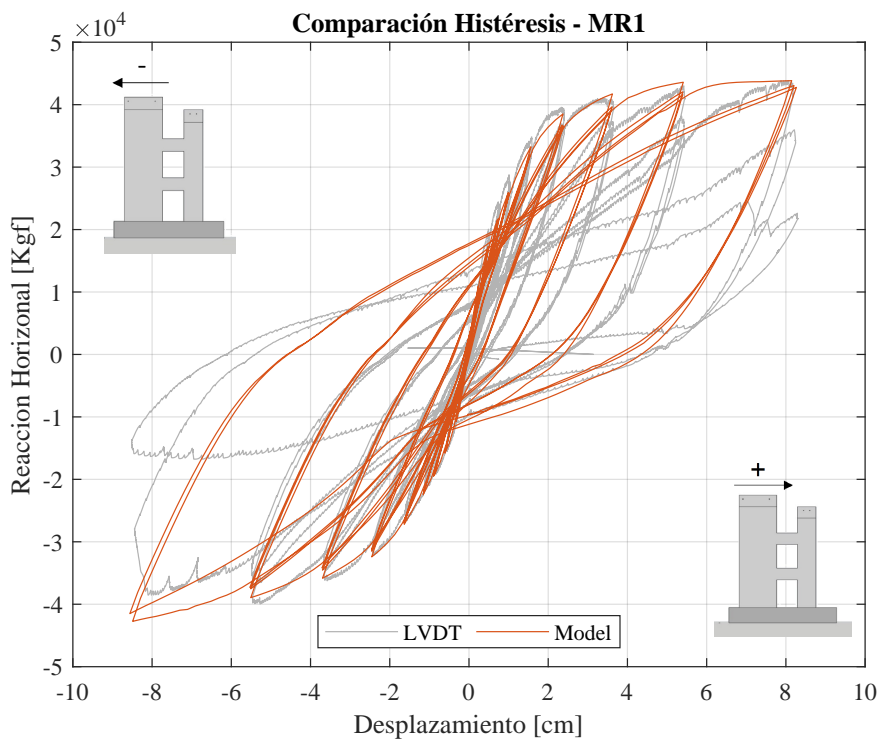


Figura 8.1: Histéresis MR1 Numérica vs Experimental

En la Figura 8.1 se presenta la comparación de las curvas de histéresis obtenidas experimentalmente con el LVDT de control corregido y mediante el modelo numérico. Se observa que en general el modelo es capaz de presentar correctamente las capacidades de la probeta para cada drift, presentando pequeñas diferencias del orden de 2 [tonf] en los peaks. Sin perjuicio de lo anterior, para una deriva del -3 % se observa la mayor diferencia entre lo obtenido experimentalmente y en el modelo. Esto se puede explicar por el pandeo de las barras de acero para ese nivel de deriva durante el ensayo el cual no es representado en el modelo numérico. Además, se observa que para el segundo ciclo al -3 % existe una diferencia significativa entre el modelo y lo medido experimentalmente, pero esto se explica porque para ese punto ya se había producido el corte de barras de refuerzo vertical en la zona de la base del MR1.

Así, considerando que para el estudio del comportamiento de la probeta se utilizan los peaks de cada ciclo de deriva, se identifica que el modelo representa correctamente el comportamiento de la probeta en términos de capacidad para cada nivel de desplazamiento lateral a nivel de techo. De forma similar a lo presentado por fotogrametría, el modelo numérico muestra que la probeta posee mayor capacidad para derivas positivas (del orden de 44 [tonf]) que para derivas negativas (41 [tonf] aproximadamente). Esto queda en evidencia al observar que la probeta posee una capacidad superior a las 40 [tonf] para derivas positivas del 1.35 %, 2 % y 3 %, mientras que para derivas negativas eso solo sucede para el -3 %.

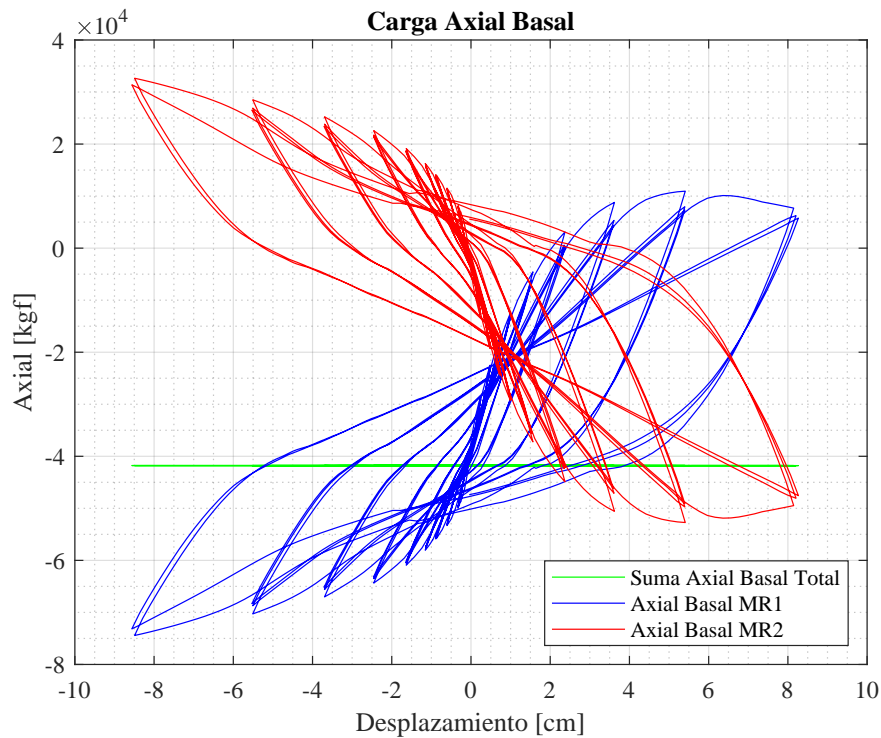


Figura 8.2: Carga Axial en la Base

En la Figura 8.2 se observa la carga axial basal en cada uno de los muros de la probeta y la suma de ellas. En particular, las cargas negativas corresponden a compresión y las cargas positivas a tracción. Se observa que la carga axial total se mantiene constante, lo cual es lógico considerando que la carga aplicada es de 40 [tonf] (más el peso propio de la probeta) en el modelo.

En particular, se observa que el MR1 posee una carga axial máxima cercana a -75 [tonf] (en compresión) en derivas negativas y de 10 [tonf] en derivas positivas (en tracción). Por otro lado, el MR2 posee una carga axial máxima en derivas negativas de 35 [tonf] (en tracción) y de -55 [tonf] (tracción) en derivas positivas. Así, se identifica que el MR1 es sometido a mayor carga axial, lo cual se debe principalmente a que el sistema de carga axial es aplicado sobre éste. También, se observa que los muros se encuentran en tracción o compresión de forma concordante a la dirección del movimiento dado por la deriva de techo impuesta sobre el MR1.

Tal como se observó anteriormente, la probeta posee mayor acoplamiento para derivas negativas. Esto también queda en evidencia en la carga axial del MR2, debido a que el corte en las vigas de acople es transmitido axialmente al MR2, y justamente se observa que este posee mayor carga axial para derivas negativas que positivas.

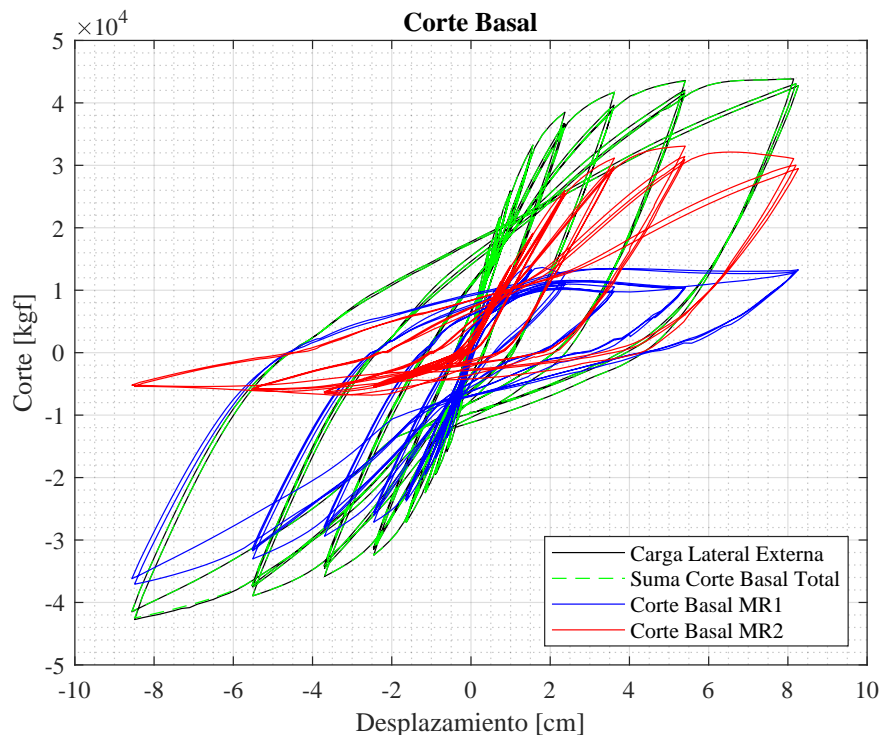


Figura 8.3: Corte en la Base

Respecto al corte basal (Figura 8.3) se observa que la carga lateral externa cumple con ser exactamente igual a la suma del corte basal de ambos muros de la probeta durante todo el protocolo de ensayo. Se observa que para derivas negativas el corte es de mayor magnitud en el MR1 y para derivas positivas es mayor en el MR2.

En particular, para el MR1 en derivas negativas se observa un corte máximo de -37 [tonf], mientras que para derivas positivas es del orden de 13 [tonf]. Por otro lado, para el MR2 se tiene un valor de corte máximo para derivas negativas cercano a -7 [tonf] y de 33 [tonf] para derivas positivas. De esta forma, se identifica que existen mayores esfuerzos de corte en el MR1 que en el MR2, lo cual se puede explicar, entre otras cosas, porque el MR1 posee mayor área en su sección transversal basal.

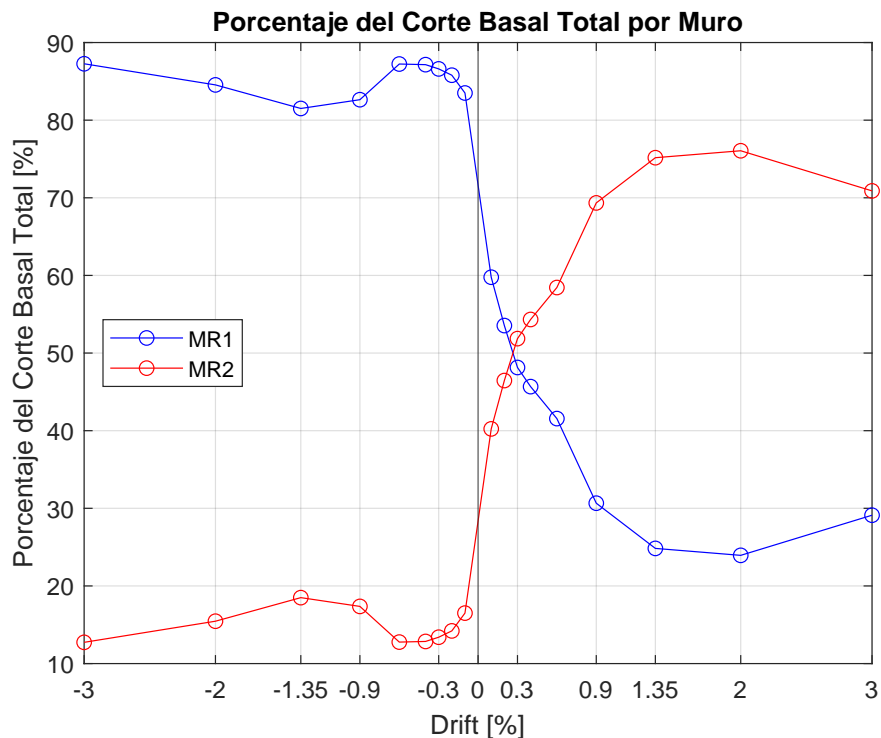


Figura 8.4: Porcentaje del Corte Basal Total en cada Muro de la Probeta

Bajo esta misma línea, en la Figura 8.4 se presenta el porcentaje del corte basal total en cada muro de la probeta en función de la deriva de techo. En particular, se observa que para derivas negativas el corte basal total se distribuye en más de un 80 % en el MR1, alcanzando más de un 95 % para un drift del -3 %, es decir, el MR2 posee una baja sollicitación a cortante para derivas negativas. Por otro lado, para derivas positivas se observa que el MR2 es más sollicitado, ya que éste posee más del 75 % del corte basal total para una deriva del 2 %. Cabe mencionar que se identifica también que para derivas positivas bajas (menores al 0.3 %) se observa que el MR1 posee mayor porcentaje de corte, lo cual podría explicarse por la asimetría de la probeta en términos geométricos que produce que, para desplazamientos de techo bajos (del MR1) los esfuerzos inducidos sobre la probeta no sean suficientemente grandes como para que el corte en la base del MR2 sea mayor que el del MR1.

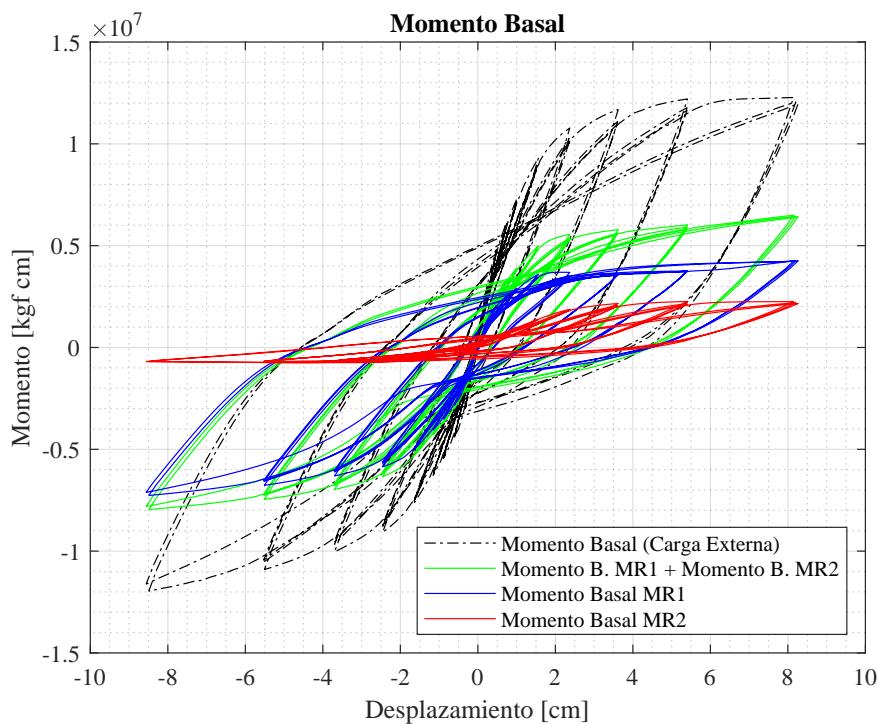


Figura 8.5: Momento en la Base

En la Figura 8.5 se presenta el momento basal debido a la carga externa lateral, el momento basal de cada uno de los muros de la probeta y la suma de ellos, en función del desplazamiento de techo del MR1. Se observa que el momento basal del MR1 es, tanto para derivas negativas como positivas, de mayor magnitud que el momento basal del MR2. Esto se puede explicar porque la altura de la carga lateral en ambos muros es distinta, ya que para el MR1 ésta se encuentra en la viga de carga, mientras que en el MR2 la carga lateral es transmitida por las vigas de acople, a una altura inferior.

A continuación, se presenta el grado de acoplamiento de los muros de la probeta en función del drift de techo del MR1. Esto se determinó en base a la ecuación 2.1 y a lo mencionado anteriormente en la sección 2.3.

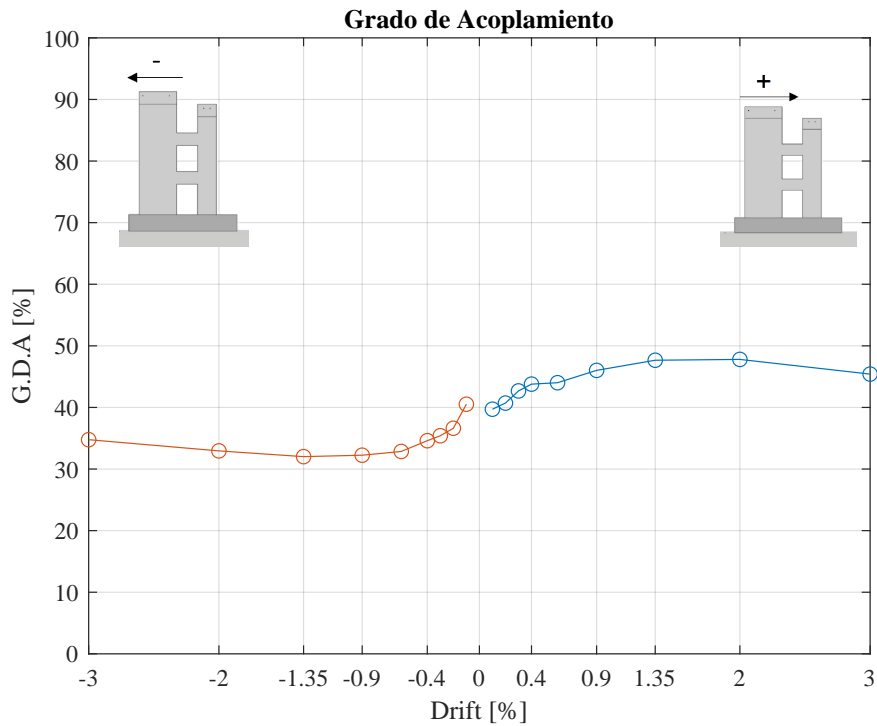


Figura 8.6: Grado de Acoplamiento

En la Figura 8.6 se observa que inicialmente el grado de acoplamiento es de magnitud similar (cercano al 40%) para derivas positivas y negativas en la probeta. Sin embargo, se identifica que para derivas positivas el grado de acoplamiento es creciente y mayor en comparación a las derivas negativas, alcanzando un 48% para una deriva del 2%, punto desde el cual decrece (lo cual podría explicarse por el daño en las vigas a ese punto). Para drifts negativos, se observa que el grado de acoplamiento decrece, alcanzando un mínimo cercano al 32% para una deriva del -1.35%. Esto podría explicarse por el aumento de la carga lateral sobre la probeta a medida que aumenta el desplazamiento de techo, que implica un aumento del momento basal del MR1, lo cual es concordante con lo observado en la Figura 8.5.

8.2. Desplazamiento Lateral en Altura

En esta sección se presentan los perfiles de desplazamiento lateral en altura de los muros en función de la deriva del MR1. Se grafica la sección central de cada muro de la probeta.

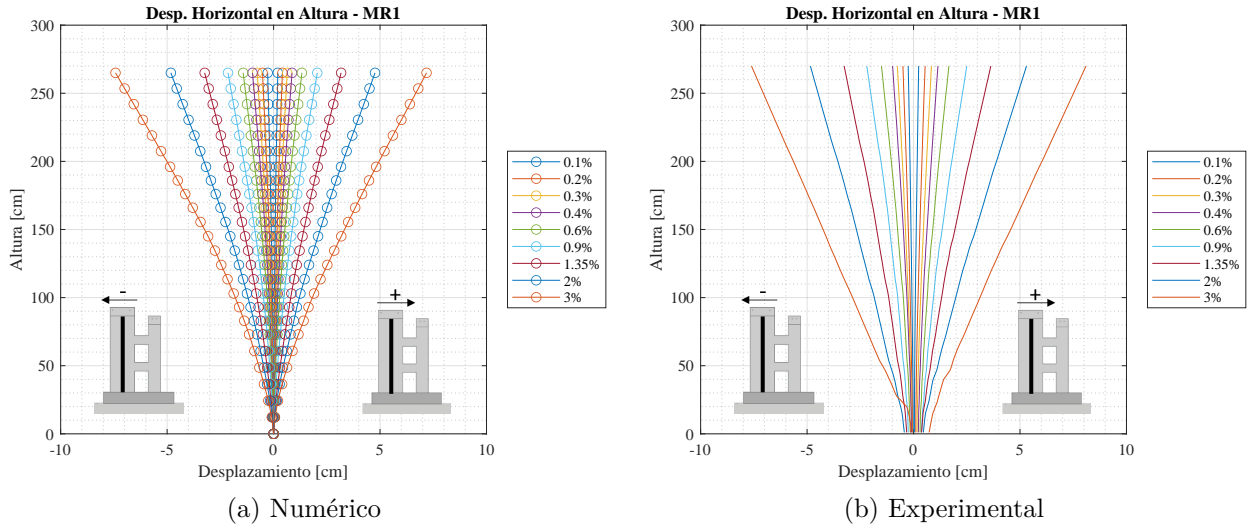


Figura 8.7: Desplazamiento Lateral en Altura - MR1

En la Figura 8.7.a se presentan los resultados del MR1. Se observa que los perfiles son simétricos para las derivas positivas respecto a las derivas negativas. Además, se observa que el desplazamiento lateral máximo alcanzado es similar para un mismo nivel de deriva positiva y negativa, lo cual es lógico considerando que el desplazamiento a nivel de techo del MR1 es controlado. Es interesante notar que, si bien para derivas de magnitud del 0.9% e inferiores se tienen perfiles lineales en altura, para los drifts del 1.35%, 2% y 3% es posible identificar cierta curvatura en el perfil, es decir, en el primer piso se observa una pendiente del perfil más elevada, mientras que la zona superior del muro presenta un perfil de desplazamientos con una pendiente de mayor inclinación.

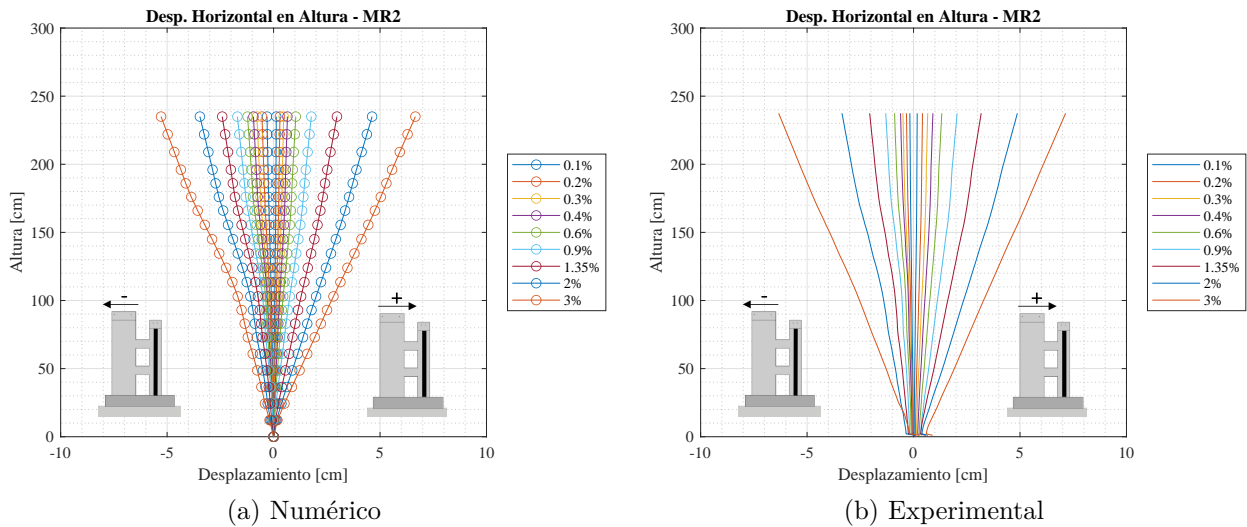


Figura 8.8: Desplazamiento Lateral en Altura - MR2

Para el MR2 (Figura 8.8.a) se observa un comportamiento asimétrico respecto a las derivas positivas y negativas, lo cual es concordante con lo obtenido experimentalmente. Es decir, se observa que para derivas positivas el desplazamiento lateral en altura es mayor que para derivas negativas. Además se observa que para derivas positivas el perfil de desplazamientos es lineal y para derivas negativas presenta cambios de pendiente, principalmente a la altura

donde se conectan las vigas de acople al MR2. Se observa que el desplazamiento de techo máximo para derivas positivas es del orden de 8 [cm] para un drift del 3 %, mientras que para derivas negativas es del orden de 5.2 [cm] para un drift del -3 %.

8.3. Deformación Basal de Muros

En esta sección se muestran los perfiles de deformación unitaria vertical obtenidos en la base de los muros de la probeta para distintos niveles de drift.

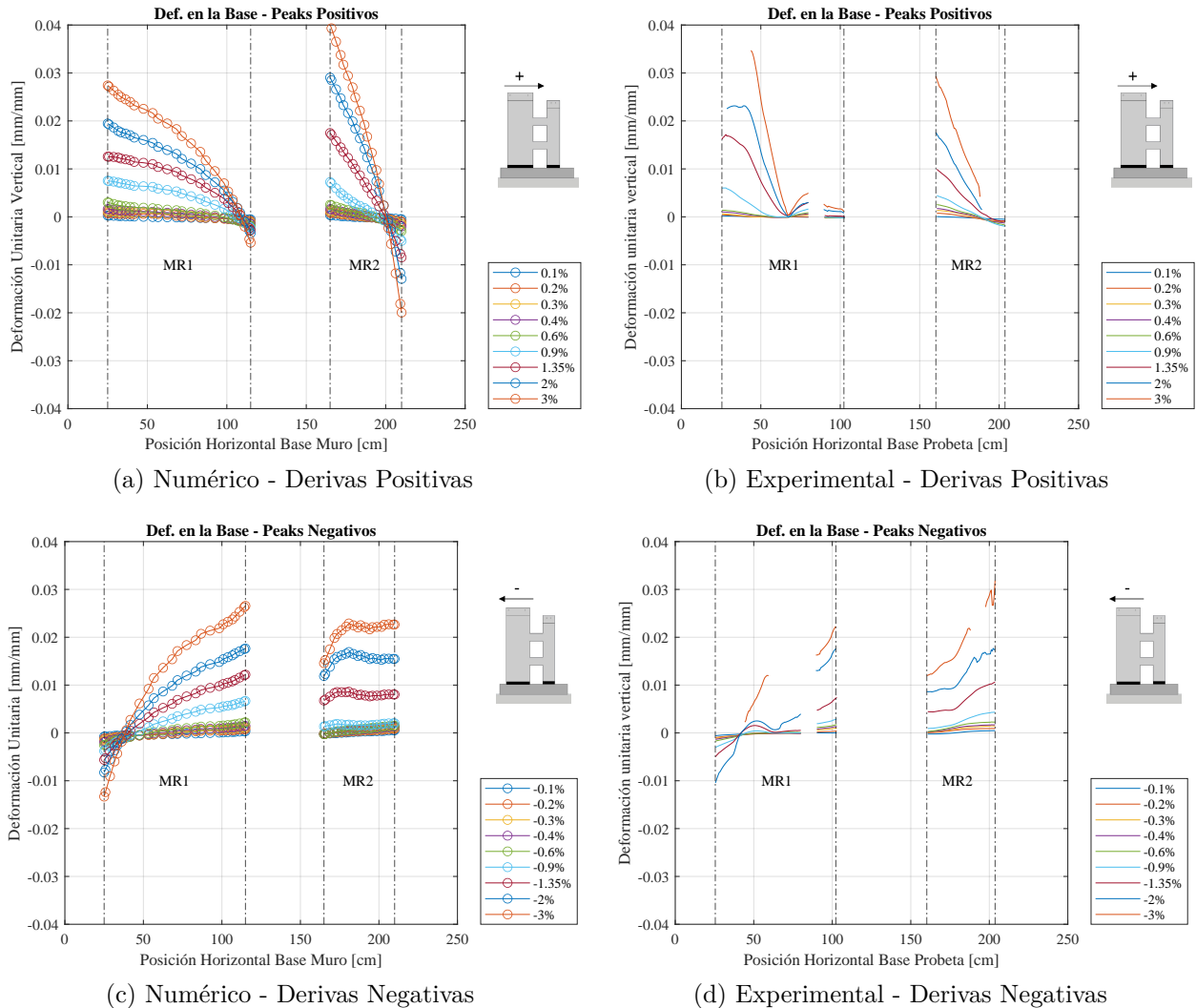


Figura 8.9: Perfiles de Deformación Basal

En la Figura 8.9 se identifica que se obtiene un comportamiento en la base de los muros similar al obtenido experimentalmente (sección 6.5), es decir, se observa que para derivas positivas (Figura 8.9.a) ambos muros poseen bordes comprimidos, mientras que para derivas negativas (Figura 8.9.c) se identifica que el MR2 se encuentra trabajando en tracción, lo cual aumenta las deformaciones por compresión en el MR1. En otras palabras, para derivas positivas se observa una distribución de deformaciones mayor que para derivas negativas, evidenciando un mayor acoplamiento.

Además, se evidencia que el modelo es capaz de representar correctamente los resultados experimentales (Figuras 8.9.b y 8.9.d), ya que los valores obtenidos de deformación unitaria a lo largo de la base de los muros son de magnitudes similares a lo obtenido mediante fotogrametría. Es posible identificar que las tracciones obtenidas en el modelo son mayores que las compresiones, tanto para derivas positivas como para derivas negativas, lo cual se explica por la alta resistencia del hormigón a la compresión en comparación a la tracción.

8.4. Perfiles de Deformación en Altura

En esta sección se presentan los perfiles de deformación unitaria vertical (ε_{yy}) a lo largo de los bordes de los muros de la probeta. Al igual que en los resultados experimentales, solo se presentan los bordes en su estado traccionado (es decir, bordes izquierdos en peaks positivos y bordes derechos en peaks negativos).

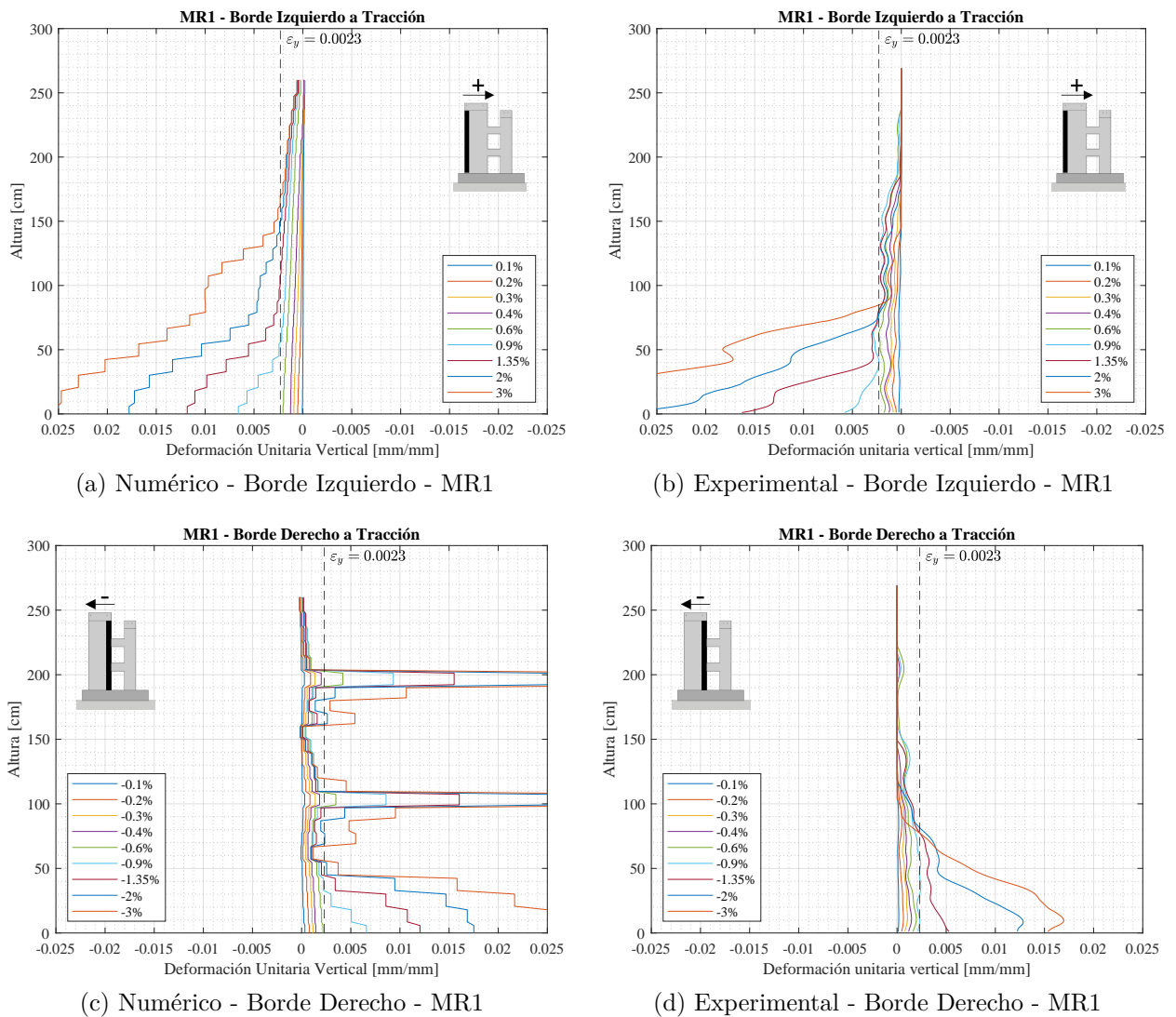


Figura 8.10: Perfiles de Deformación en Altura en Bordes a Tracción - MR1

En la Figura 8.10 se presentan los perfiles de deformación unitaria vertical en los bordes del MR1 en función de la deriva de techo, para su estado traccionado. En particular, se

observa que la deformación unitaria es mayor a la de fluencia para los mismos niveles de drift que en lo obtenido experimentalmente (Figuras 8.10.b y 8.10.d), es decir, del 0.9% ó -0.9% en adelante (respectivamente para derivas positivas y negativas).

Para el borde izquierdo (Figura 8.10.a), se identifica que el comportamiento general es similar al obtenido experimentalmente (Figura 8.10.b), aunque la zona de comportamiento plástico posee mayor altura en los resultados del modelo. Además se observa un aumento de las deformaciones unitarias a la altura de la viga de acople inferior.

Para el borde derecho (Figura 8.10.c), se identifican 2 peaks de deformaciones unitarias a la altura de las vigas de acople, lo cual se puede explicar por la penetración de esfuerzos de las vigas de acople a los muros y a las grandes deformaciones que se observaron durante el ensayo en las zonas de junta muro-viga. Además, se observa que la altura de la zona plástica presenta variaciones del orden de 10 [cm] a lo obtenido experimentalmente (Figura 8.10.d) para una deriva del -3%.

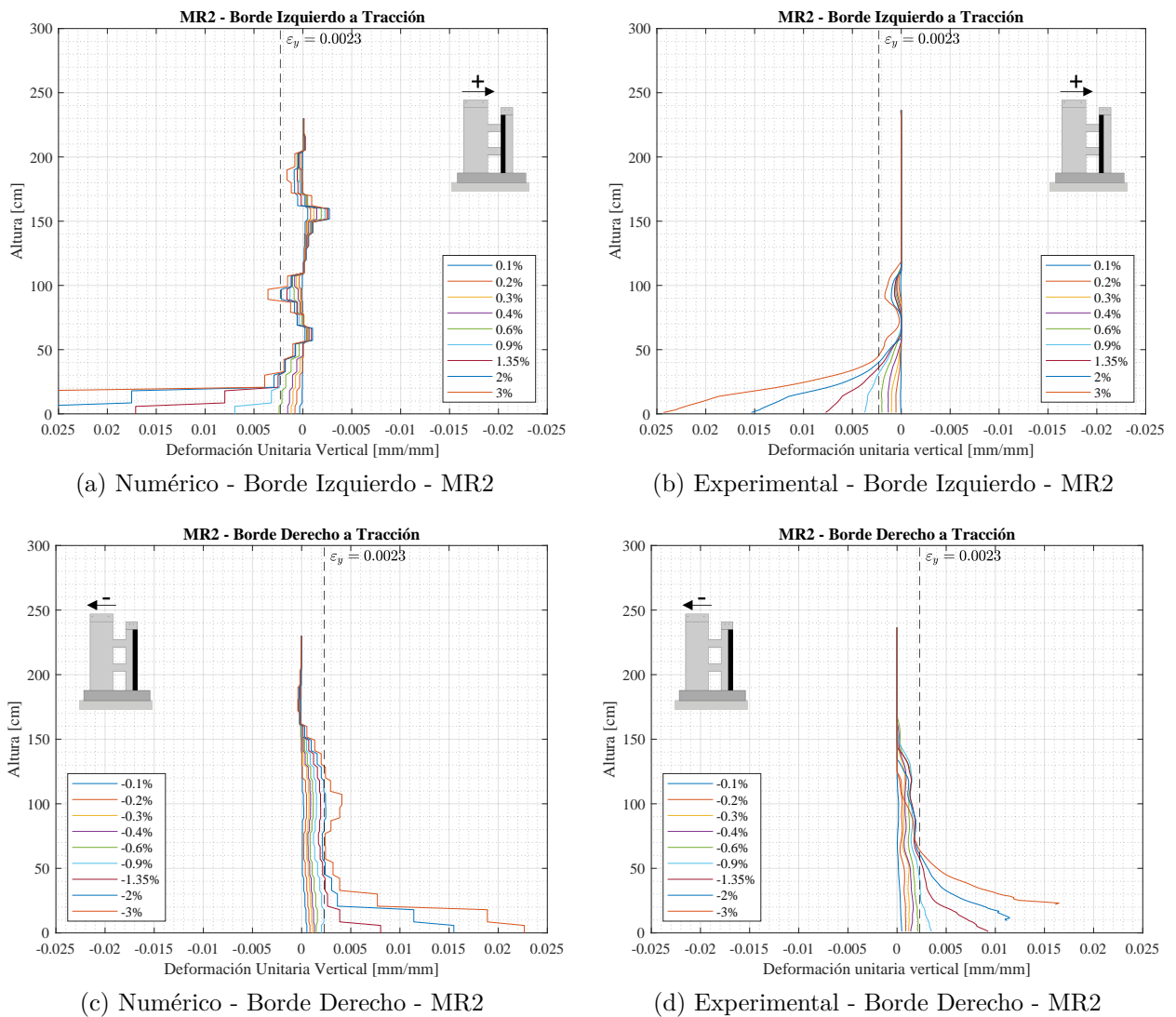


Figura 8.11: Perfiles de Deformación en Altura en Bordes a Tracción - MR2

Análogamente para el MR2, en la Figura 8.11 se presentan los perfiles obtenidos. Se observa que el modelo es capaz de representar correctamente lo obtenido experimentalmente, donde las alturas de las zonas plásticas son de magnitud similar para cada deriva. También, se obtiene que la deformación unitaria es mayor a la de fluencia para los mismos niveles de drift que en lo obtenido experimentalmente, es decir, del 0.9 % ó -0.9 % en adelante, respectivamente. Sin embargo, se observa que las deformaciones unitarias son de mayor magnitud en lo obtenido numéricamente para derivas altas (de 1.35 % en adelante) lo cual podría deberse al daño en dicha zona observado durante el ensayo que induzca a obtener mediciones erróneas con fotogrametría.

8.5. Perfiles de Curvatura en Altura

En esta sección se presentan los perfiles de curvatura obtenidos de forma numérica. La metodología utilizada para su determinación es la misma que la explicada anteriormente para los resultados experimentales (sección 6.7).

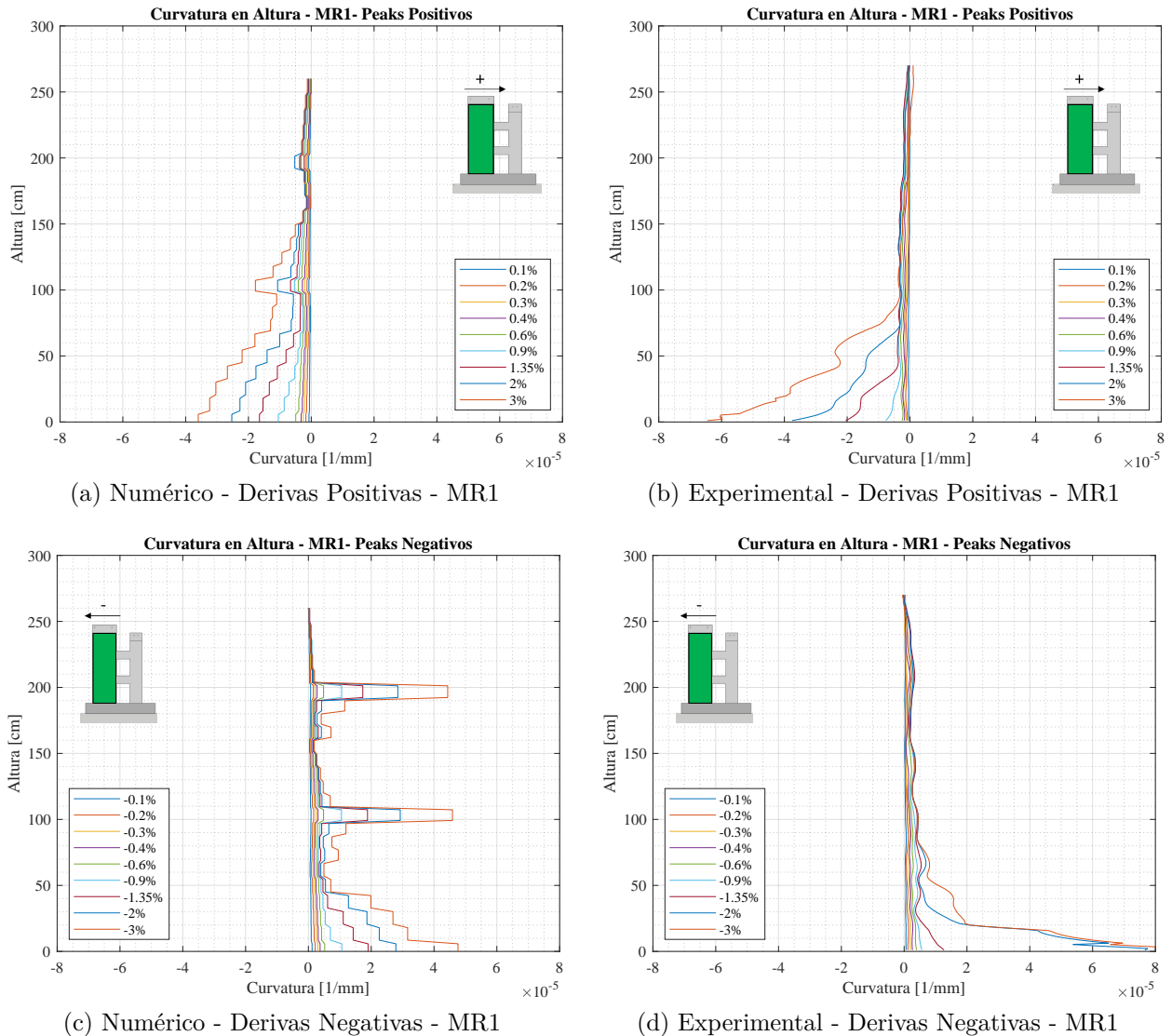


Figura 8.12: Perfiles de Curvatura en Altura - MR1

En la Figura 8.12 se observan los perfiles de curvatura en altura para derivas positivas y negativas del MR1 en función de la deriva de techo. Se observa que se identifican curvaturas cercanas a 0 para derivas de magnitud menor a 0.6%, tanto para derivas positivas como negativas, lo cual es concordante con lo obtenido experimentalmente. Sin embargo, tanto para derivas positivas como negativas se observa que la curvatura a nivel de la base del muro es menor en el modelo que en lo obtenido experimentalmente en un valor cercano a $2 \cdot 10^{-5}$ [1/mm]. Además, se observa que la altura máxima hasta donde se observa curvatura es mayor que lo obtenido experimentalmente, tal como se observó en el análisis de deformaciones unitarias en el borde.

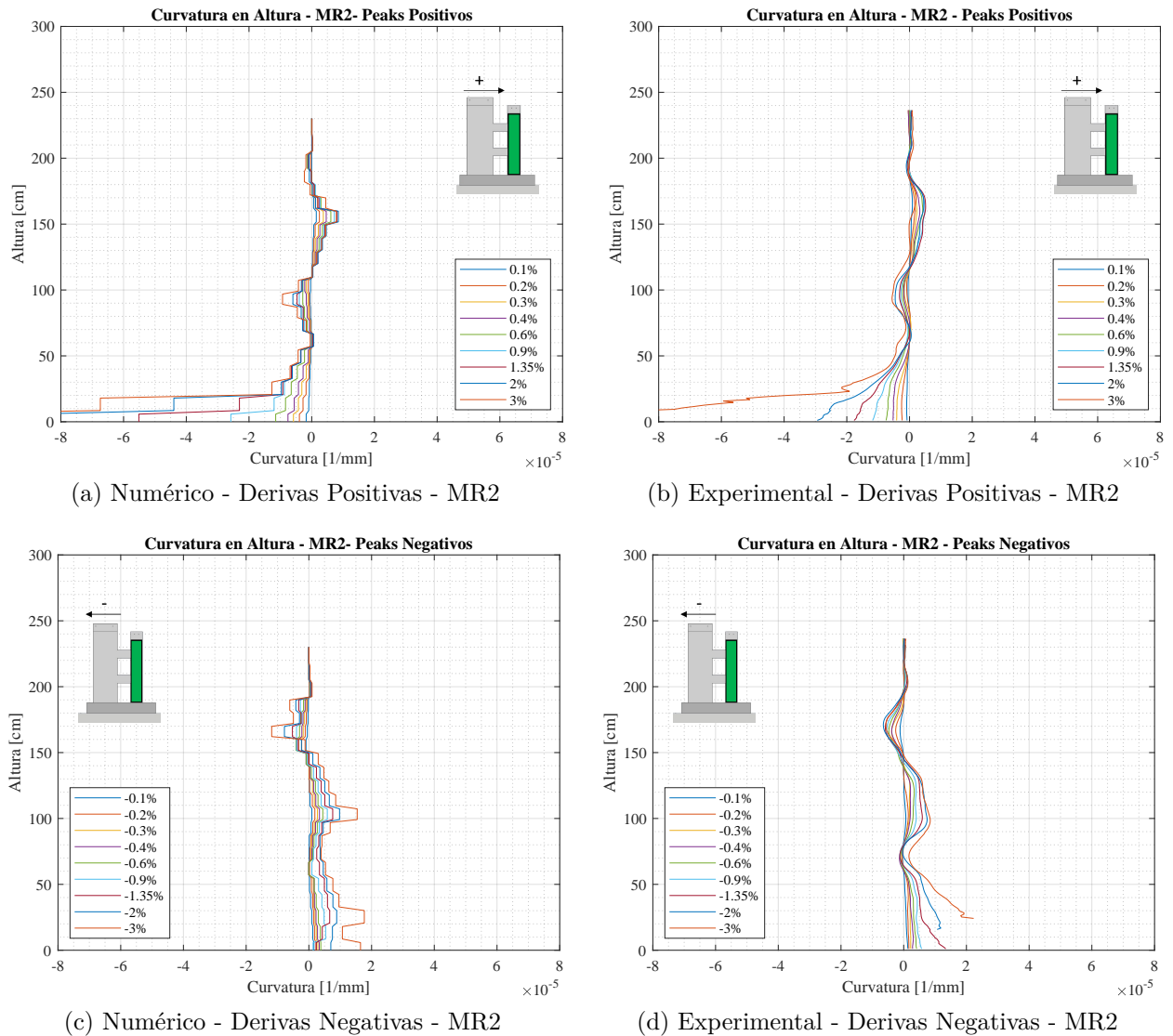


Figura 8.13: Perfiles de Curvatura en Altura - MR2

Para el MR2 (Figura 8.13) se observa que el modelo es capaz de representar correctamente lo obtenido experimentalmente, ya que se identifican magnitudes de curvatura y distribuciones en altura similares a lo medido con fotogrametría, tanto para derivas positivas como negativas.

8.6. Rótula Plástica

Para la determinación de la rótula plástica de los muros de la probeta mediante los resultados numéricos, se realiza la misma metodología mostrada anteriormente para los resultados experimentales (sección 6.8). Los resultados se muestran a continuación.

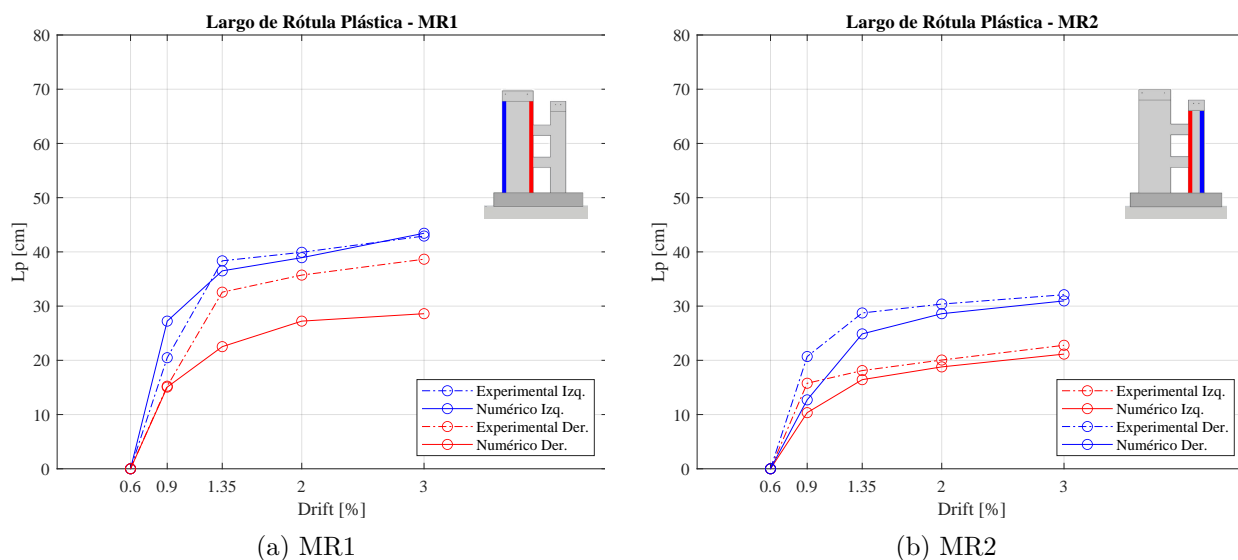


Figura 8.14: Rótula Plástica

En la Figura 8.14 se muestra la rótula plástica determinada en los bordes de cada muro de la probeta en función de la deriva de techo del MR1. Se observa un comportamiento similar a lo obtenido experimentalmente, es decir, que en ambos bordes de ambos muros de la probeta la rótula plástica aumenta a medida que crece el desplazamiento de techo. También, se observa que la rótula plástica es mayor en el MR1 que en el MR2 durante todo el protocolo de ensayo. Además, se observa que la rótula plástica es mayor en los bordes libres (color azul en la figura) en comparación a los bordes donde se encuentran conectadas las vigas de acople (color rojo en la figura).

Ahora bien, se observa que las mayores diferencias respecto a los resultados experimentales se encuentran en el borde derecho del MR1, donde la diferencia es de hasta 10 [cm] para derivas altas (2% y 3%). Para el resto de los bordes de los muros de la probeta, la rótula plástica es representada correctamente por el modelo numérico, presentando diferencias del orden de 2 a 3 [cm] con fotogrametría.

8.7. Desplazamiento por Corte y Flexión en Muros

Análogamente a lo realizado en los resultados experimentales, para obtener el desplazamiento por corte en cada piso de cada muro de la probeta se hace uso de la ecuación 6.2. Así, en la Figura 8.15 se presenta el desplazamiento por corte en cada uno de los pisos de los muros de la probeta en función de la deriva de techo a la que se somete el MR1 durante el protocolo de ensayo.

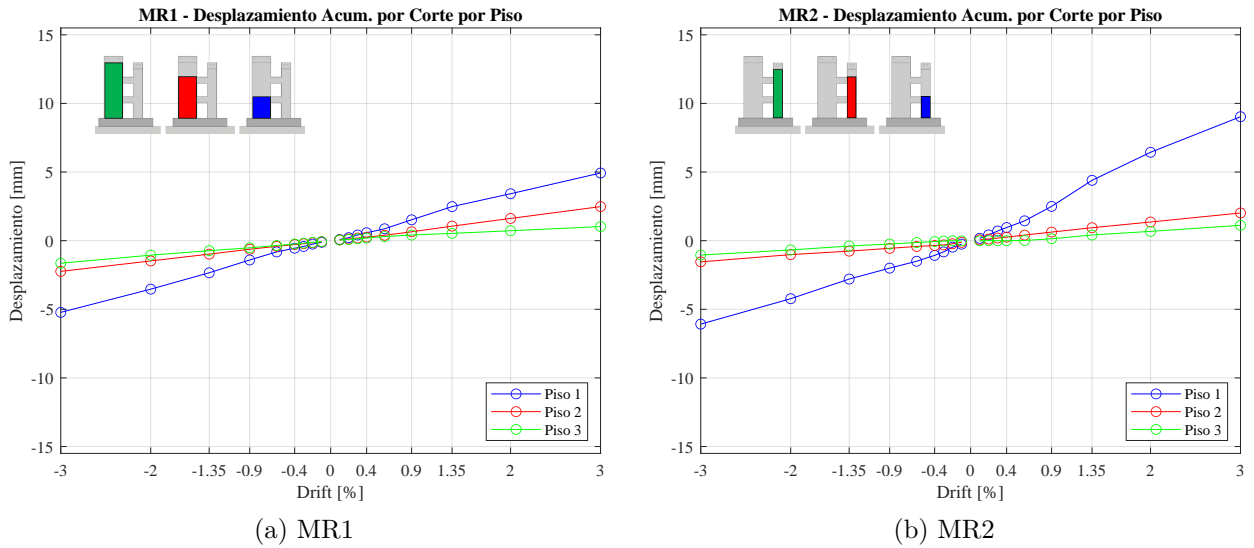
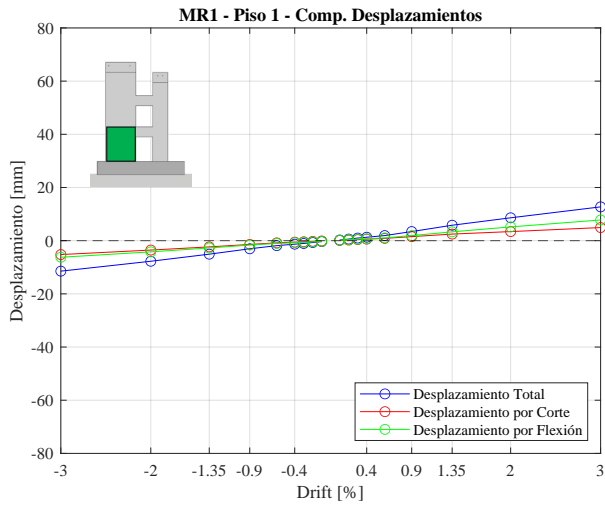


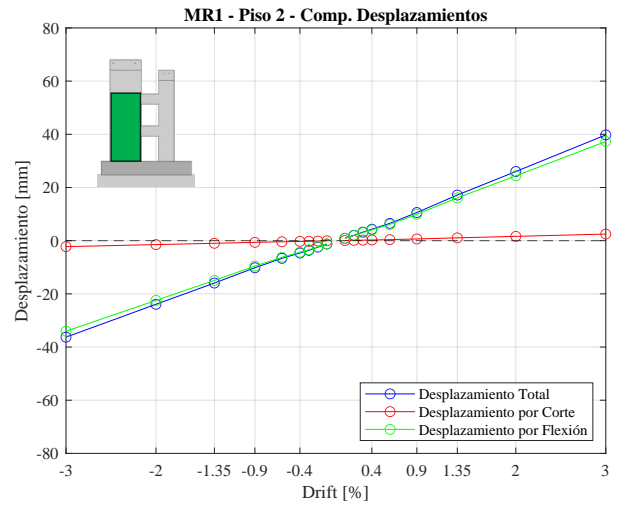
Figura 8.15: Desplazamiento por Corte por Piso

Tal como se observa en la Figura 8.15, se tiene que el desplazamiento por corte es mayor en el primer piso de cada muro y decrece para los pisos 2 y 3. Esto es concordante con lo obtenido mediante fotogrametría. Sin perjuicio de lo anterior, se identifica que el desplazamiento por corte en el primer piso de cada muro es menor al obtenido experimentalmente, con una diferencia del orden de 10 [mm]. Esta diferencia se puede deber al gran nivel de daño observado en el primer piso durante el ensayo experimental, lo cual podría inducir a errores en la medición.

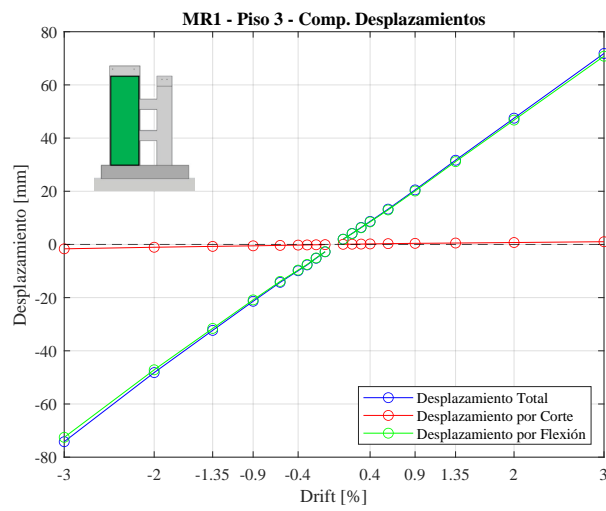
Por otro lado, a continuación se presentan los desplazamientos por corte, flexión y totales obtenidos mediante el modelo numérico por piso para cada muro de la probeta en función del drift (Figuras 8.16 y 8.17). Para obtener los desplazamientos por flexión se utilizó la ecuación 6.3.



(a) Piso 1 - MR1

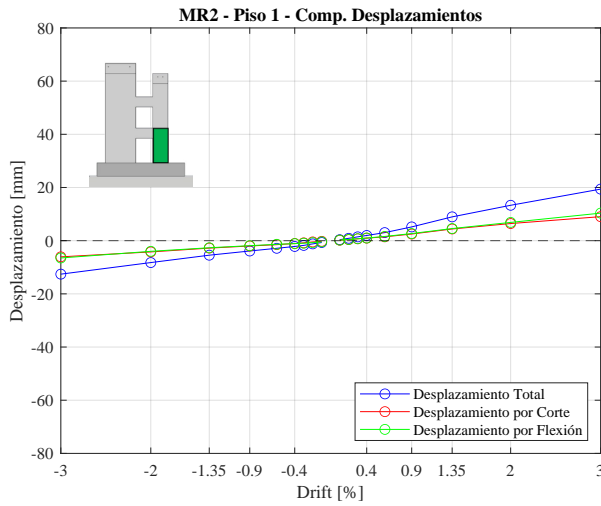


(b) Piso 2 - MR1

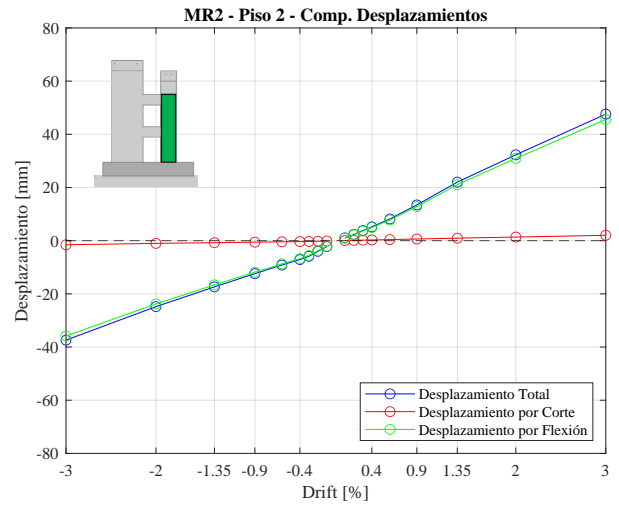


(c) Piso 3 - MR1

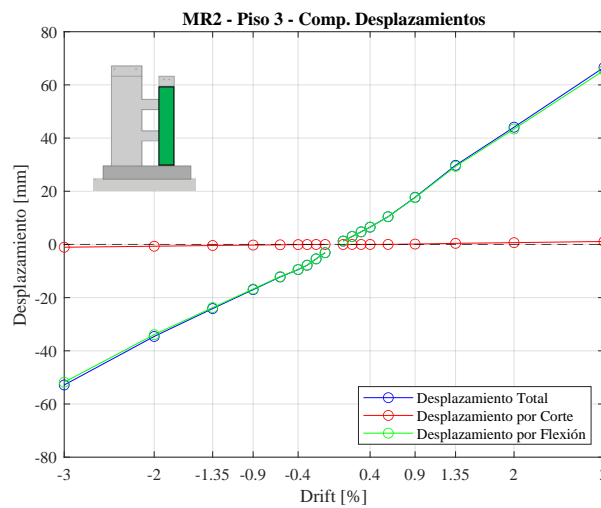
Figura 8.16: Comparación Desplazamiento por Corte, Flexión y Total por Piso - MR1



(a) Piso 1 - MR2



(b) Piso 2 - MR2



(c) Piso 3 - MR2

Figura 8.17: Comparación Desplazamiento por Corte, Flexión y Total por Piso - MR2

En términos generales, es posible afirmar que el modelo numérico representa correctamente lo obtenido experimentalmente referente a desplazamientos por corte y flexión en cada piso de los muros de la probeta estudiada. Se observa que el comportamiento de los muros queda controlado mayormente por flexión, ya que en los pisos 2 y 3 de ambos muros representa casi la totalidad del desplazamiento asociado. Tal como se determinó experimentalmente, para el modelo numérico también se observa que en el primer piso de cada muro se concentran los mayores desplazamientos por corte.

8.8. Deformación Axial en Vigas de Acople

En esta sección se muestran los perfiles de deformación axial (ε_{xx}) a lo largo de las fibras superiores e inferiores de ambas vigas de acople en función de la deriva de techo, obtenidos directamente del modelo numérico desarrollado.

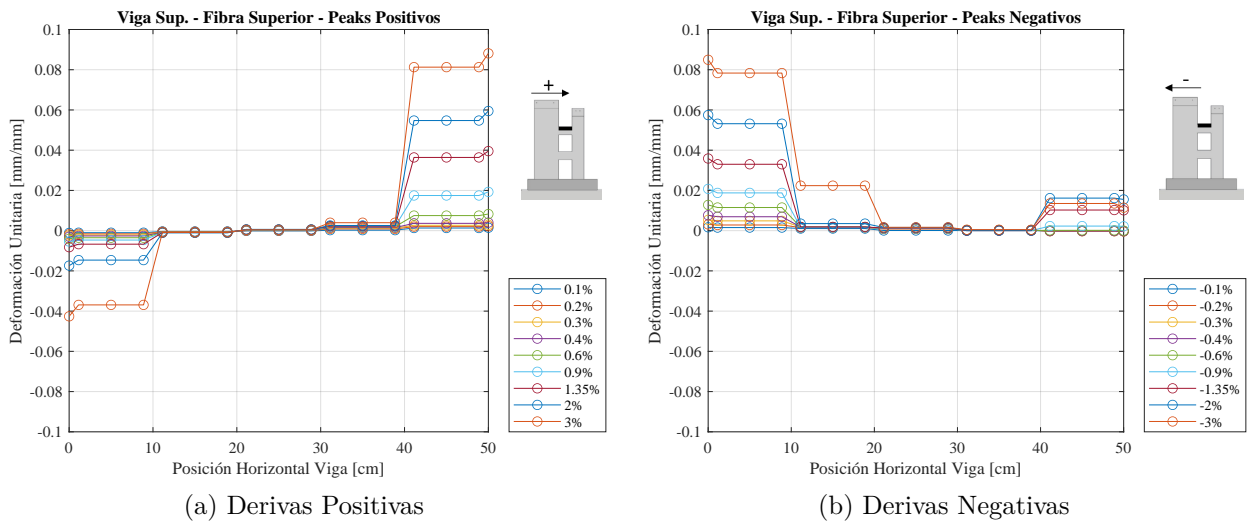


Figura 8.18: Deformación Axial de la Viga Superior de Acople en su Fibra Superior

Para la fibra superior de la viga de acople superior (Figura 8.18) se observa que para derivas hasta el 0.9% y -0.9% (en drifts positivos y negativos respectivamente) el comportamiento obtenido a través del modelo numérico es concordante con lo observado experimentalmente, es decir, para derivas positivas (Figura 8.18.a) se tienen bajas compresiones hacia el extremo conectado con el MR1 y tracciones hacia el extremo conectado con el MR2. Se observa que para derivas negativas (Figura 8.18.b) la fibra superior se encuentra en tracción para toda deriva, lo cual también se observó en los resultados experimentales. Además, se observa que la magnitud de las deformaciones unitarias axiales es similar a lo obtenido con fotogrametría. Para derivas mayores al 1.35% (o -1.35% respectivamente) se observan mayores diferencias con lo obtenido experimentalmente, lo cual podría deberse al daño en las vigas durante el ensayo que no permiten obtener los perfiles completos con fotogrametría.

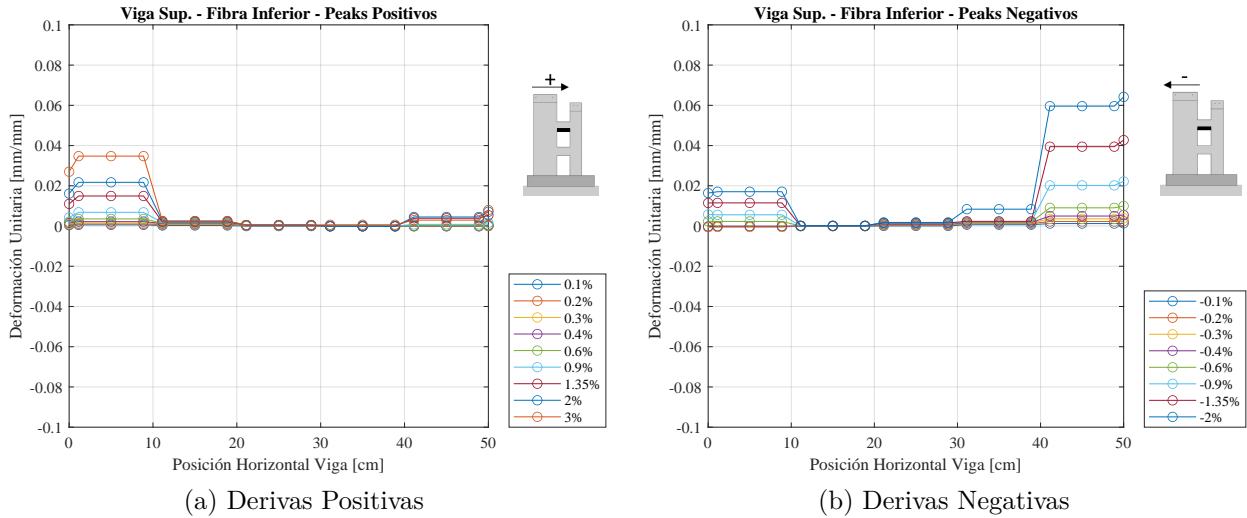
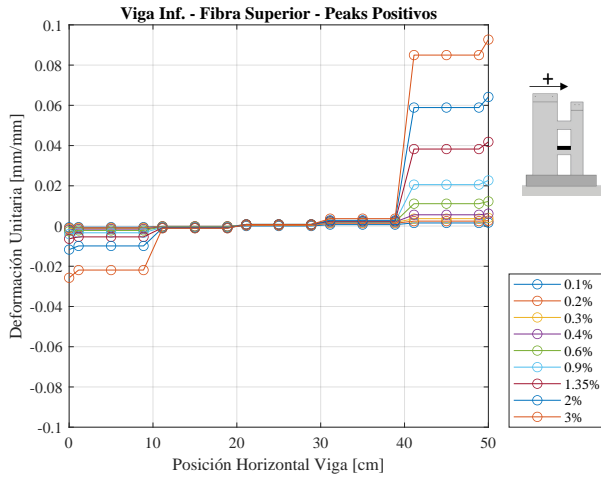


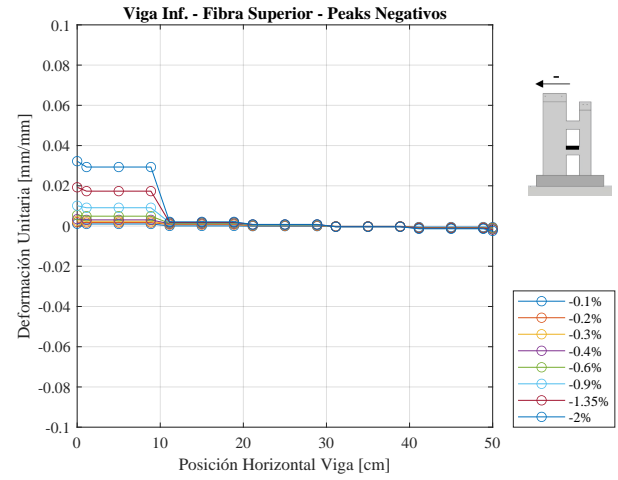
Figura 8.19: Deformación Axial de la Viga Superior de Acople en su Fibra Inferior

Para la fibra inferior de la viga de acople superior (Figura 8.19) se observa que tanto para derivas positivas como negativas dicha fibra se encuentra traccionada, lo cual es concordante con lo obtenido experimentalmente (Figura 6.57).

Por otro lado, para la viga de acople inferior en sus fibras superior (Figura 8.20) e inferior (Figura 8.21) se identifica que el modelo es capaz de representar correctamente el comportamiento de la dicho elemento según lo obtenido experimentalmente (Figuras 6.58 y 6.59). Esto se sustenta en que, tal como se obtuvo con fotogrametría, en la fibra superior para derivas positivas se identifican compresiones hacia el extremo conectado con el MR1 y tracciones para el extremo conectado con el MR2. De forma contraria, para derivas negativas se identifican tracciones hacia el extremo conectado con el MR1 y compresiones bajas para el extremo conectado con el MR2. Por otro lado, para la fibra inferior se observa que para derivas positivas se observa tracción para el extremo conectado con el MR1 y compresión para el extremo conectado al MR2, mientras que para derivas negativas se tiene compresión para el extremo conectado al MR1 y tracción para el extremo conectado con el MR2. Este comportamiento simétrico también fue identificado en los resultados experimentales. Se observa que la magnitud de las deformaciones entre lo obtenido con fotogrametría y con el modelo son concordantes.

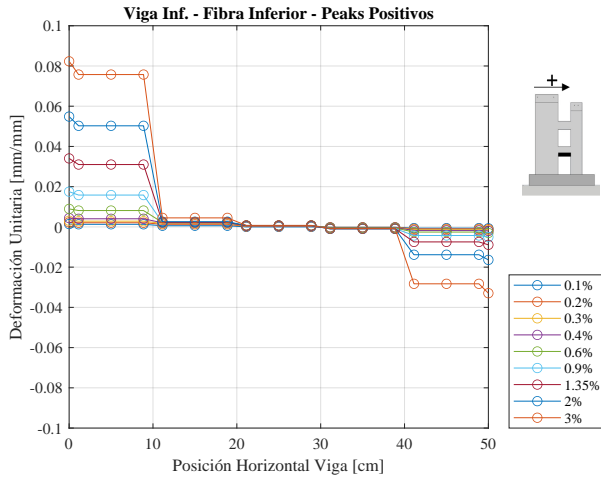


(a) Derivas Positivas

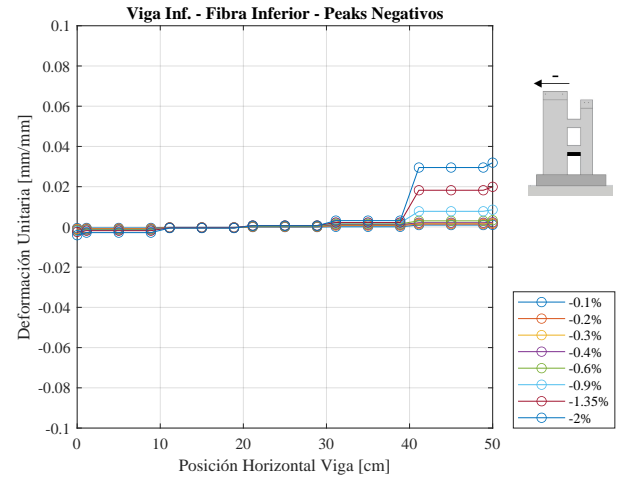


(b) Derivas Negativas

Figura 8.20: Deformación Axial de la Viga Inferior de Acople en su Fibra Superior



(a) Derivas Positivas



(b) Derivas Negativas

Figura 8.21: Deformación Axial de la Viga Inferior de Acople en su Fibra Inferior

8.9. Perfiles de Curvatura de Vigas de Acople

Para la determinación de los perfiles de curvatura en las vigas de acople se utilizan las deformaciones unitarias en la dirección axial obtenidas mediante el modelo numérico. En particular, se sigue la misma metodología anteriormente descrita en la sección 6.12.

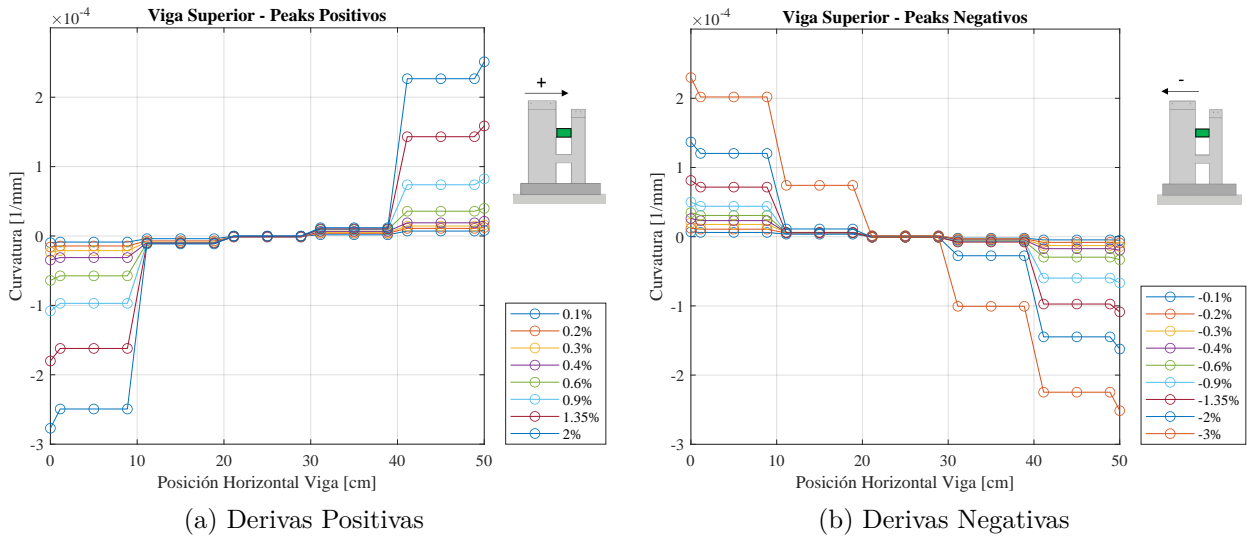


Figura 8.22: Curvatura de la Viga Superior de Acople

En la Figura 8.22 se observa que, tanto para derivas positivas como negativas, la curvatura en la viga de acople superior es baja para derivas menores al 0.9 % o -0.9 % respectivamente. Al igual que en lo obtenido mediante fotogrametría, se identifica, para derivas positivas, curvatura negativa hacia el lado izquierdo y curvatura positiva hacia el lado derecho. Dicha distribución se invierte para derivas negativas. También, se observa que en el centro de la viga de acople superior no existe curvatura para ningún nivel de deriva. Sin perjuicio de lo anterior, se observa que la magnitud de los valores de los perfiles de curvatura obtenidos en el modelo son mayores que los obtenidos en fotogrametría para derivas altas (1.35 %, -1.35 %, 2 %, -2 %, 3 % y -3 %). Esto se puede deber a la falta de precisión en las mediciones experimentales en dichas derivas a causa del desprendimiento del hormigón.

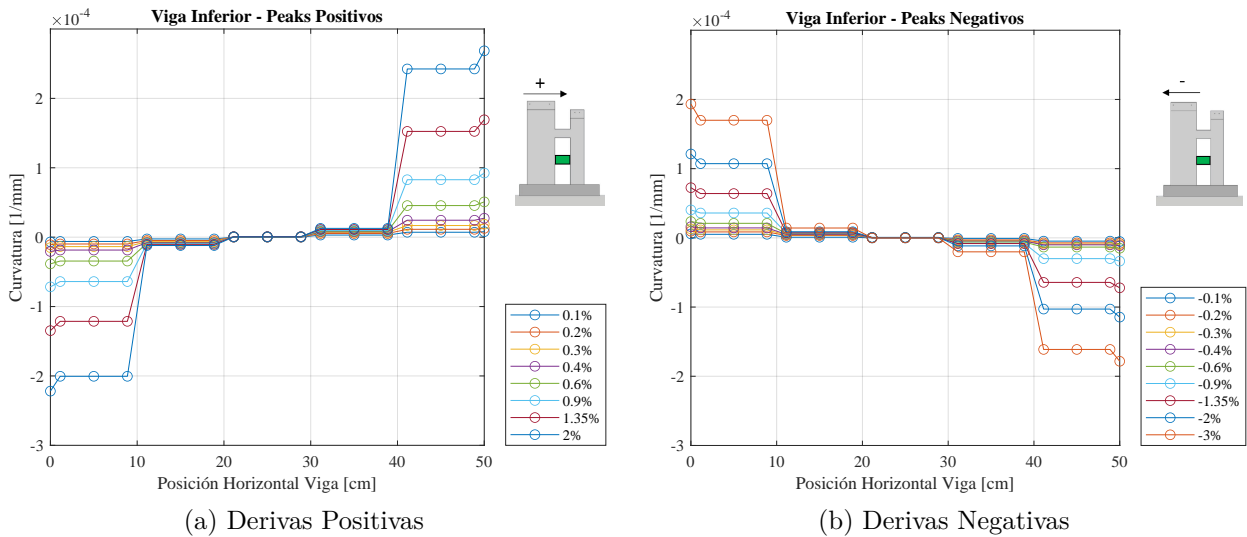


Figura 8.23: Curvatura de la Viga Inferior de Acople

Para la viga de acople inferior (Figura 8.23) se observa un comportamiento similar al obtenido experimentalmente, es decir, se observa que el comportamiento para derivas positivas es similar al comportamiento de derivas negativas pero con signo contrario. Ahora bien, al igual que con fotogrametría, se obtiene del modelo numérico que para derivas positivas la

curvatura es mayor que para derivas negativas en la viga de acople inferior.

8.10. Desplazamiento por Corte y Flexión en Vigas de Acople

Para la determinación del desplazamiento por corte y flexión en las vigas de acople, basándose en los resultados del modelo numérico de elementos finitos desarrollado, se utilizan las mismas ecuaciones y metodología descritas anteriormente en la sección 6.13. Los resultados se presentan a continuación.

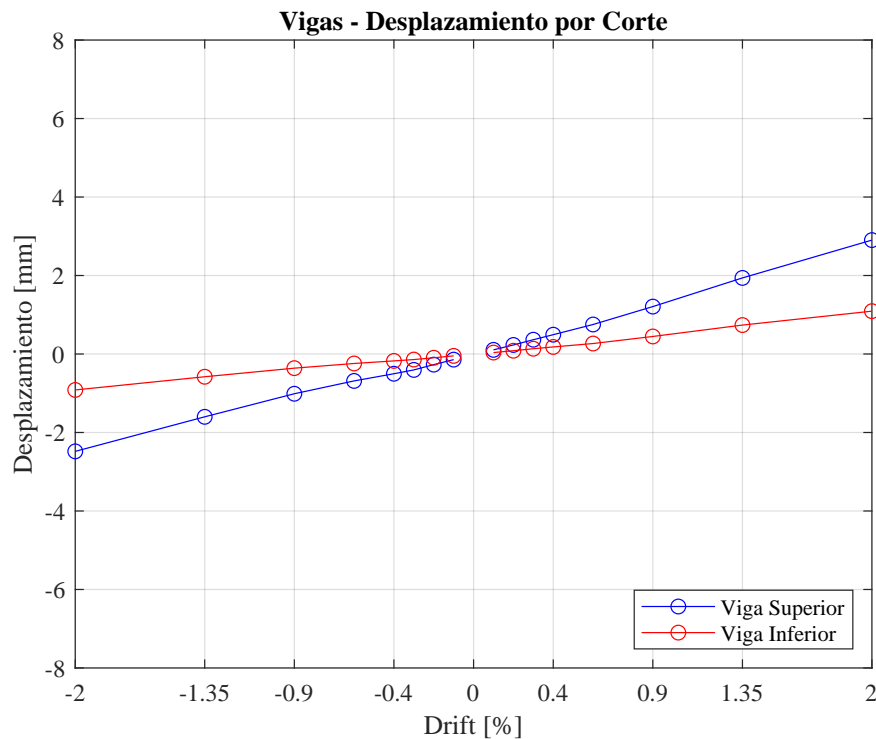
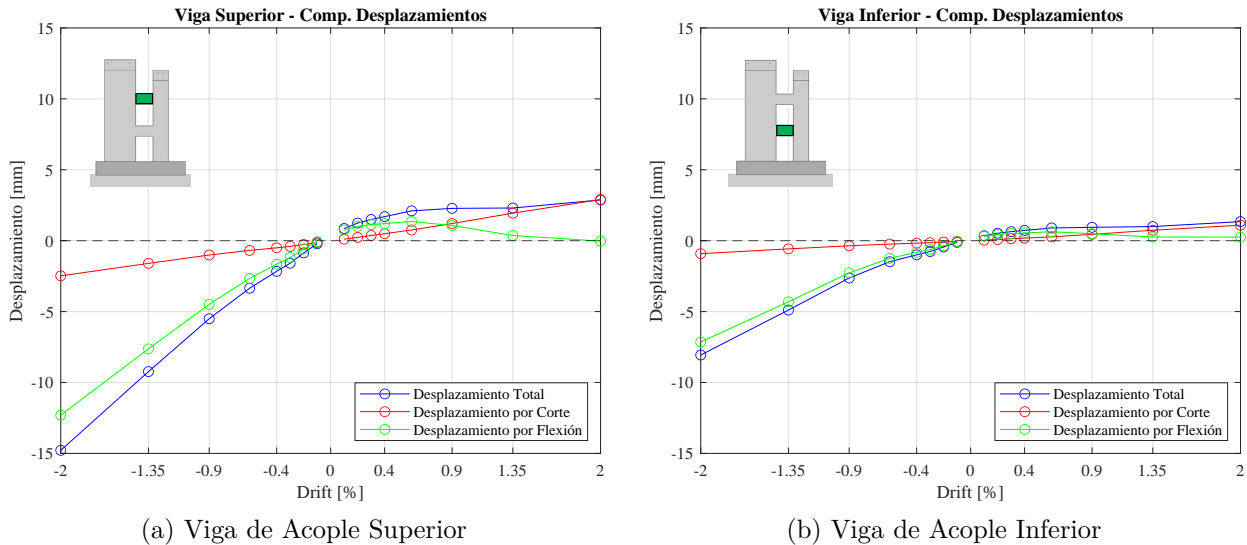


Figura 8.24: Desplazamiento por Corte en Vigas de Acople

En la Figura 8.24 se presenta el desplazamiento por corte en las vigas de acople en función del drift, obtenido del modelo numérico. Tal como se obtuvo experimentalmente, se identifica que el desplazamiento por corte es mayor en la viga de acople superior que en la inferior, para todo nivel de deriva positiva o negativa.

Por otro lado, observa que los valores obtenidos para derivas menores o iguales (en magnitud) al 1.35 % o -1.35 % (respectivamente para derivas positivas o negativas) calza con lo obtenido mediante fotogrametría. Sin embargo, para derivas del 2 % y 3 % se tienen diferencias de 1 [mm] a 3 [mm]. Esto se puede explicar por el nivel de daño en las vigas durante el ensayo para ese nivel de deriva, lo cual podría inducir en menor precisión en lo obtenido experimentalmente. Sin perjuicio de lo anterior, el comportamiento general de los desplazamientos por corte obtenido en el modelo representa correctamente a lo obtenido con fotogrametría.

Respecto al desplazamiento total y por flexión en las vigas de acople calculado en base a los resultados del modelo numérico, los resultados se presentan en la Figura 8.25.



(a) Viga de Acople Superior (b) Viga de Acople Inferior

Figura 8.25: Comparación Desplazamiento por Corte, Flexión y Total en Vigas de Acople

Basándose en los resultados de la Figura 8.25, es posible afirmar que a través del modelo numérico es posible representar correctamente lo obtenido experimentalmente en lo referente a desplazamientos por corte y flexión. Al comparar con los resultados obtenidos con fotogrametría (Figura 6.65) se observa que en ambas vigas de acople el desplazamiento total es mayor para derivas negativas en comparación a derivas positivas. Se observa que los valores de desplazamiento total obtenidos con el modelo son similares a los obtenidos con fotogrametría, presentando variaciones máximas del orden de 3 [mm]. Por otro lado, se identifica que los desplazamientos máximos son mayores en la viga de acople superior que en la viga de acople inferior, para todo nivel de drift. También, al igual que en los resultados experimentales, se observa que ambas vigas quedan mayormente controladas por flexión para derivas negativas en lo referente a desplazamiento, mientras que la contribución del corte al desplazamiento es más significativa para derivas positivas.

8.11. Análisis Paramétrico

En esta sección se realiza un análisis de los resultados obtenidos luego de realizar distintas variaciones paramétricas al modelo de elementos finitos desarrollado para la probeta en SAFE-Toolbox, el cual queda validado por las secciones anteriores de este capítulo. Con esto se busca estudiar los cambios en el comportamiento de la probeta al incorporar dichas variaciones. Las modificaciones realizadas se presentan a continuación.

VP1: Variación de Armadura Transversal en Vigas de Acople

Considerando el análisis de los resultados obtenidos experimentalmente y mediante el modelo numérico, queda en evidencia que las vigas de acople fallan principalmente por esfuerzos de corte durante el ensayo. De esta forma, en esta sección se estudia la variación de la armadura de refuerzo transversal de las vigas de acople, mediante un aumento de la cantidad de barras dispuesta en ella.

Tal como se mencionó anteriormente en el Capítulo 3: Probeta de Ensayo (ver Tabla

3.2), la armadura transversal (a cortante) dispuesta en las vigas de acople corresponde a barras de diámetro 8 [mm] espaciadas cada 60 [mm] ($\phi 8@60$). De esta forma, se propone una distribución de armadura con una separación de estribos menor, de 40 [mm]. Esto queda descrito en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1: Variación de armadura transversal propuesta para vigas de acople

	Dirección	Barras de Refuerzo	Cuantía [%]
Armadura dispuesta durante el ensayo	Longitudinal	$4\phi 12 + 4\phi 8$	1.45
	Transversal	$\phi 8@60[\text{mm}]$	1.12
Nueva armadura propuesta	Longitudinal	$4\phi 12 + 4\phi 8$	1.45
	Transversal	$\phi 8@40[\text{mm}]$	1.68

VP2: Incorporación de Armadura Diagonal en Vigas de Acople

Otro caso que resulta interesante estudiar corresponde a la incorporación de armadura diagonal en las vigas de acople de la probeta. Tal como se mencionó en la sección 2.2 del Capítulo 2: Antecedentes de Estudio, el refuerzo diagonal es recomendado para vigas con relación de aspecto (L/h) menores a 4 y se hace obligatorio para vigas de acople con relación de aspecto menor a 2, según lo establecido en el acápite 21.9.7 del ACI 318-08 [1] (en particular, $L/h = 1.67$ para las vigas de acople de la probeta estudiada). Siguiendo lo dispuesto por dicha normativa, se propone la incorporación de 2 grupos de barras diagonales, intersectadas diagonalmente y colocadas en forma simétrica respecto al centro de la luz de las vigas de acople de la probeta. Cada grupo de barras consiste en cuatro barras de diámetro 10 [mm], confinadas por refuerzo transversal de estribos de diámetro 8 [mm] separados entre sí a 60 [mm]. Cabe mencionar que, siguiendo las disposiciones del ACI 318-08, la armadura a cortante existente en las vigas de acople es disminuida a la mitad como consecuencia del aumento de cuantía por el refuerzo diagonal, en otras palabras, se pasa de estribos $\phi 8@60[\text{mm}]$ a $\phi 8@120[\text{mm}]$ en la armadura convencional existente. El refuerzo diagonal dispuesto se resume en la Tabla 8.2.

Tabla 8.2: Barras y Cuantías de Armadura de Refuerzo Diagonal Propuesta

	Barras	Cuantía [%]	Ángulo α [rad]	Cuantía longitudinal proyectada [%]	Cuantía transversal proyectada [%]
Armadura de cada grupo de barras diagonales	$2+2\phi 10$	0.7	0.54	0.60	0.36
Armadura de confinamiento transversal	$\phi 8@60 [\text{mm}]$	1.12	0.54	0.57	0.96

Así, lo anterior se esquematiza en la Figura 8.26.

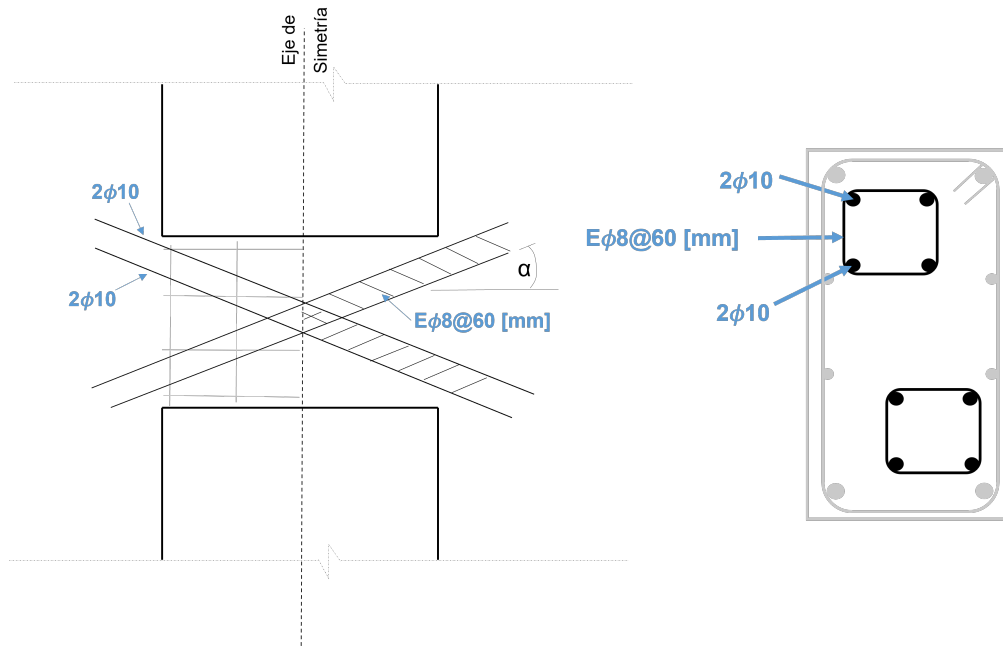


Figura 8.26: Esquema de conjuntos de barras diagonales propuestos

Para incorporar la armadura de refuerzo diagonal al modelo, se generan nuevas secciones cuyo acero posea las propiedades mostradas en la Tabla 8.2. Dichas secciones son asignadas a los elementos del mesh que se encuentran a la altura de los conjuntos de barras de refuerzo diagonal. Esto se esquematiza en la Figura 8.27

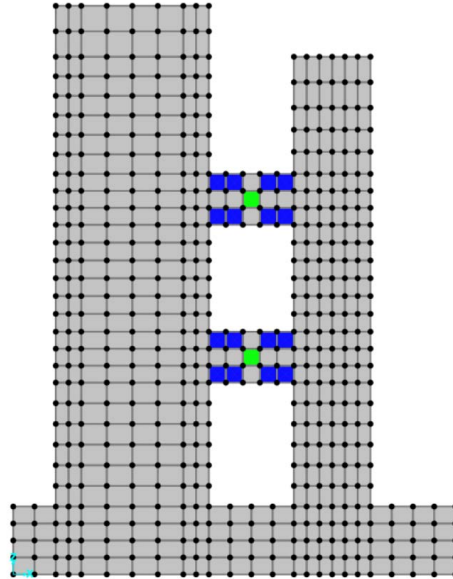


Figura 8.27: Elementos modificados (verde y azul) para incorporar la armadura diagonal en vigas de acople

En la Figura 8.27 se observan, con color verde y azul, los elementos del mallado del modelo numérico de la probeta en los que se considera un aumento en su cuantía debido a la disposición de armadura diagonal. En particular, se tienen que los elementos indicados con color azul poseen únicamente un conjunto de barras a través de ellos, mientras que el elemento

central de cada viga, indicado con color verde, posee dos conjuntos de barras pasando a través de él debido a que la intersección se ubica en esa zona. A su vez, en el resto de los elementos de las vigas de acople (gris) se disminuye la cuantía en dirección transversal producto del aumento en la separación de los estribos comentado anteriormente.

VP3: Incorporación de Carga Axial sobre MR2

Como tercera variación paramétrica, se estudia el cambio en la respuesta y capacidad de la probeta al incorporar carga axial sobre el MR2. Como se mencionó anteriormente, el sistema de carga axial se ubica únicamente sobre la viga de carga del MR1 durante el ensayo. Si bien el MR2 cuenta con una viga de carga en su diseño, ésta no es utilizada por limitaciones experimentales. De esta forma, la carga a aplicar sobre el MR2 se determina como el 10% de la capacidad a compresión de dicho muro, es decir, $0.1A_g f'_c = 20$ [tonf] (cálculo análogo al realizado para el MR1). Dado que el MR1 también se encuentra cargado axialmente (con 40 [tonf]) la carga axial total aplicada sobre la probeta es de 60 [tonf].

Cabe mencionar que, de forma análoga a lo realizado para la viga de carga del MR1, para esta variación paramétrica también se restringe el movimiento fuera del plano de la viga de carga del MR2.

8.11.1. Resultados del Análisis Paramétrico

A continuación se presentan los resultados de las variaciones paramétricas realizadas al modelo, comparadas entre sí. Cabe mencionar que para cada modelo analizado se adopta una sigla de dos letras para identificar fácilmente el caso analizado. Dichas siglas se muestran a continuación:

Tabla 8.3: Siglas de cada caso estudiado en las variaciones paramétricas

Sigla	Caso
MB	Modelo Base (Sin Variaciones Paramétricas)
VP1	Vigas de Acople con Armadura Transversal Aumentada
VP2	Vigas de Acople Reforzadas Diagonalmente
VP3	MR2 Cargado Axialmente

Capacidad Máxima a Carga Lateral de la Probeta

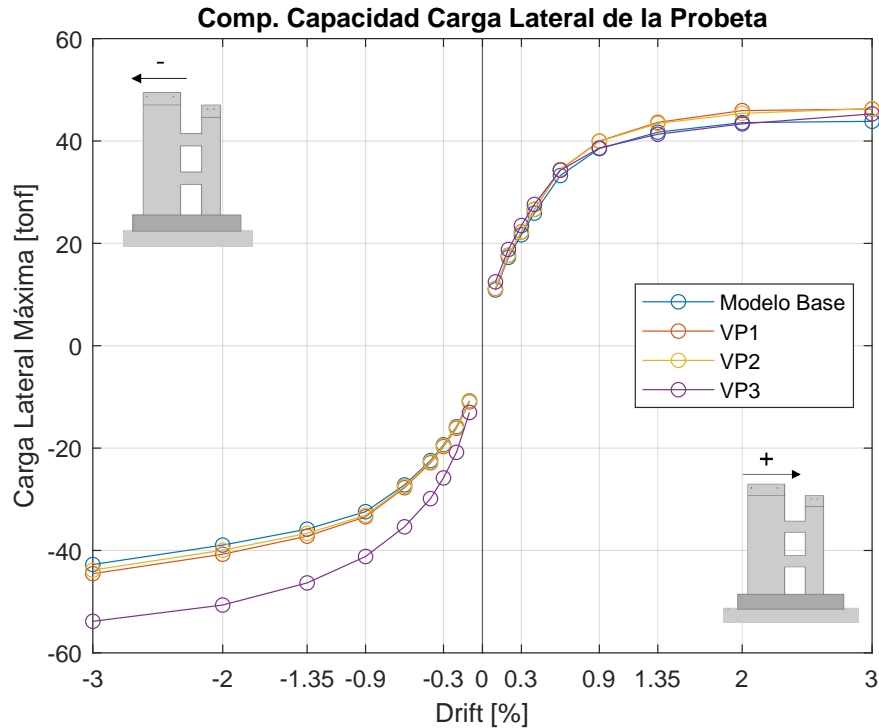


Figura 8.28: Comparación de Capacidad a Carga Lateral de la Probeta por Caso, hasta 3 % de deriva

En la Figura 8.28 se presenta la capacidad a carga lateral (envolvente histerética) de la probeta en los distintos casos de estudio. Se observa que el Modelo Base presenta las menores capacidades tanto para derivas positivas como negativas. Por otro lado, se observa que el incremento de armadura a cortante en las vigas de acople y la incorporación de grupos de barras diagonales en ellas implica un aumento de la capacidad de la probeta, el cual es mayor para derivas positivas que negativas. Sin embargo, se observa que dicho aumento de la capacidad es notorio para derivas mayores al 0.9 % o -0.9 % respectivamente, mientras que para derivas más bajas la capacidad de la probeta es similar.

Ahora bien, se observa que la mayor diferencia se observa en el caso de cargar axialmente el MR2 (VP3), en derivas negativas. Es interesante notar que para derivas positivas la capacidad de la probeta es muy similar al caso base, mientras que para derivas negativas se identifica que la probeta aumenta su capacidad para todo nivel de deriva, alcanzando una capacidad de -54 [tonf] para una deriva del -3 %, lo cual es 28 % mayor que el caso base.

Degradación y Pérdida de Capacidad de la Probeta

Para estudiar a qué nivel de desplazamiento de techo se genera degradación del hormigón y pérdida de capacidad de la probeta, se realizaron modelos de pushover monotónico creciente para cada caso de estudio, considerando niveles de desplazamiento de techo mayores a los que se realizaron experimentalmente. Los resultados se muestran a continuación.

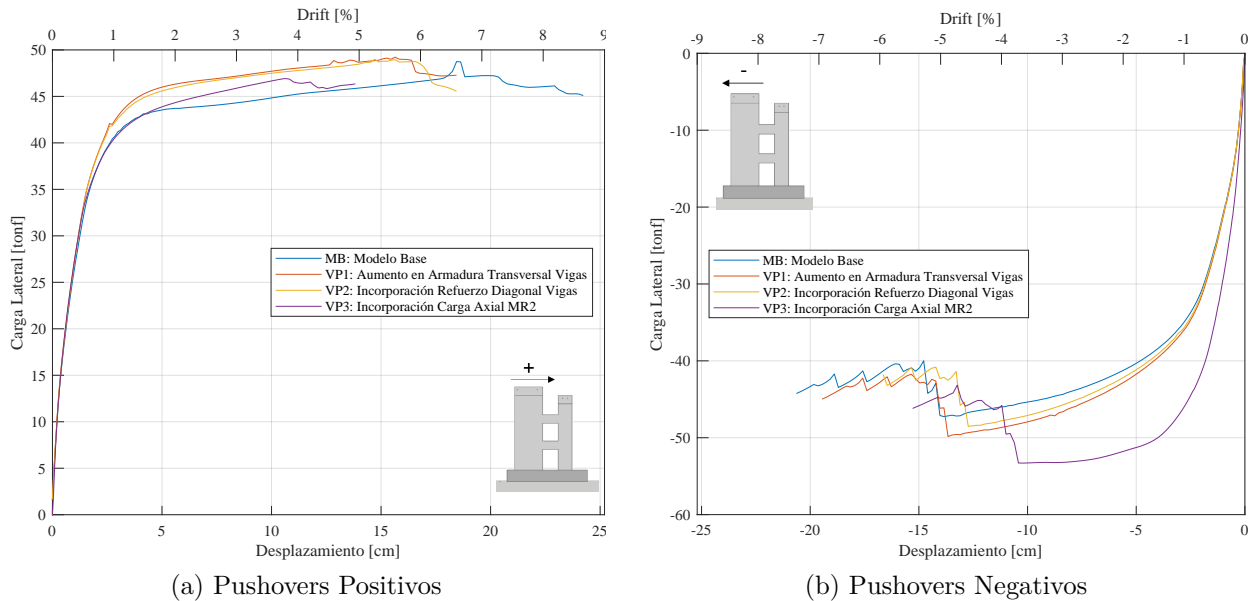


Figura 8.29: Comparación Pushovers Monotónicos por Caso

En la Figura 8.29 se observa que, tanto para derivas positivas como negativas, la pérdida de capacidad de la probeta ocurre primero para el modelo con carga axial sobre el MR2, lo cual se puede explicar por el aumento de rigidez del sistema al incorporar carga sobre dicho muro. Ahora bien, al observar las distintas variaciones de refuerzo en las vigas de acople (MB, VP1 y VP2) se observa que el sistema del modelo base es más dúctil que al aumentar la armadura a corte en las vigas de acople o al incorporar refuerzo diagonal en ellas, lo cual se explica por la menor rigidez del sistema. Para la VP1 (aumento de armadura transversal de vigas de acople), la pérdida de capacidad se identifica para derivas del 5.8% y -5% respectivamente, mientras que para la VP2 (incorporación de armadura diagonal en vigas de acople) se observa para derivas del 6% y -4.5% respectivamente.

Porcentaje del Corte Basal Total en Cada Muro de la Probeta

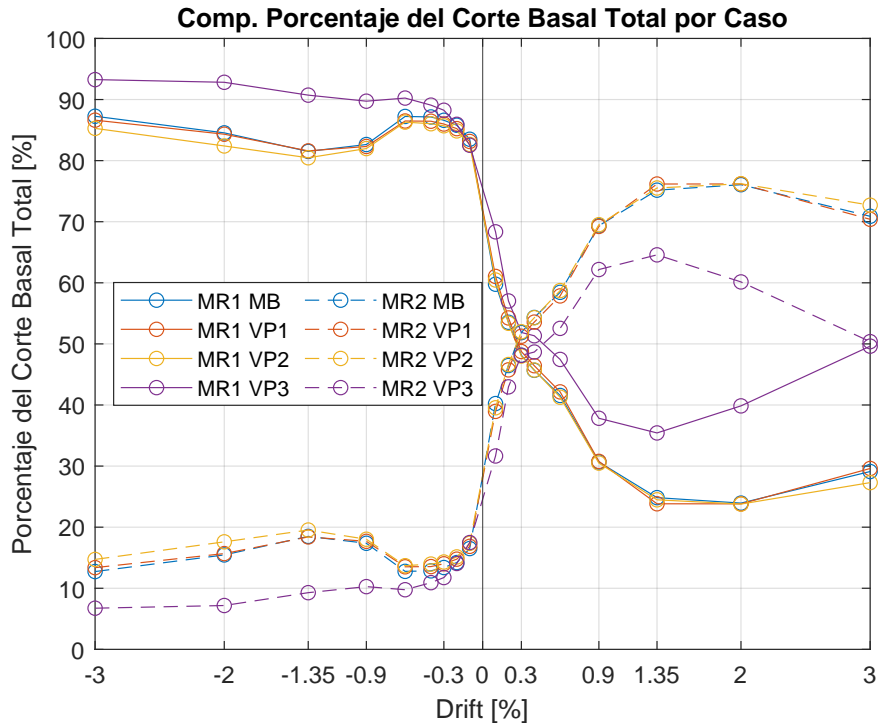


Figura 8.30: Comparación de Porcentaje del Corte Basal Total en Cada Muro por Caso

En la Figura 8.30 se presenta la comparación del porcentaje del corte basal total presente en cada uno de los muros de la probeta, para los casos estudiados.

Se observa que el porcentaje del corte basal total en el MR1 y MR2 es similar para el Modelo Base y al aumentar la armadura transversal de las vigas de acople (VP1). Por otro lado, al incorporar armadura diagonal en las vigas de acople (VP2), se observa que para derivas positivas y negativas altas (2%, 3%) el porcentaje de corte en el MR2 es levemente mayor.

Ahora bien, se identifica que al cargar axialmente el MR2, en derivas negativas mayores o iguales a -0.3% se tiene que el porcentaje del corte basal total presente en el MR1 es mayor en comparación al Modelo Base (y por ende el del MR2 es menor). En particular, para el -3% de deriva se observa un aumento cercano al 7% del corte basal total en el MR1 respecto al caso base. De forma contraria, para derivas negativas se observa que el porcentaje de corte basal total en cada uno de los muros de la probeta es más similar entre sí respecto a lo observado en el caso base. Resulta interesante observar que para una deriva del 3% en el Modelo Base y en las variaciones a las vigas de acople (VP1 y VP2) el corte en el MR1 es cercano al 70% y en el MR2 es cercano al 30%, mientras que al cargar axialmente el MR2, se tiene que el porcentaje del corte basal total en cada muro es cercano al 50%.

Grado de Acoplamiento

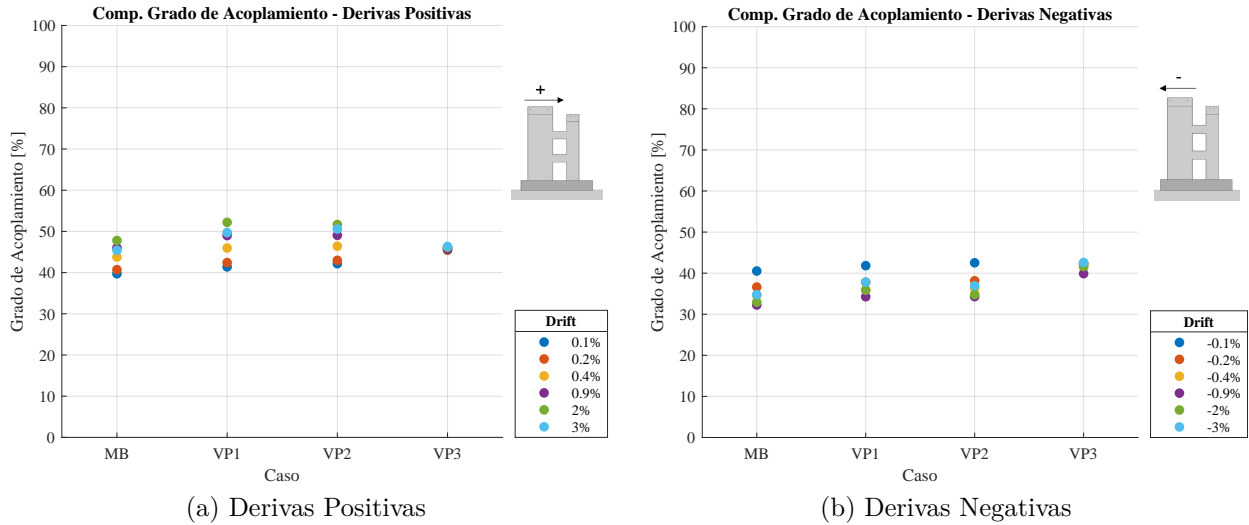


Figura 8.31: Comparación del Grado de Acoplamiento por Caso

En la Figura 8.31 se presenta el grado de acoplamiento entre los muros de la probeta para derivas positivas y negativas, determinado por la ecuación 2.1.

Se observa que en VP1, VP2 y VP3 se obtiene un grado de acoplamiento mayor para derivas positivas (Figura 8.31.a). En particular, al comparar las variaciones realizadas en las vigas de acople (VP1 y VP2), se observa que implican un aumento del grado de acoplamiento en comparación al modelo base (MB), cercano al 4% para derivas positivas y negativas, lo cual se podría explicar por el aumento de la resistencia de las vigas de acople debido al incremento de su armadura de refuerzo. Ahora bien, es interesante notar que tanto para derivas positivas (Figura 8.31.a) como negativas (Figura 8.31.b) el aumento del grado de acoplamiento respecto al modelo base es similar para ambas variaciones de refuerzo de las vigas de acople (VP2 y VP3).

Por otro lado, se identifica que, al incorporar carga axial sobre el MR2 (VP3), el grado de acoplamiento presenta un valor con menor dispersión (constante) al compararlo al modelo base, tanto para derivas positivas como negativas. Es decir, se observa que el grado de acoplamiento se ve menos afectado por el aumento del desplazamiento de techo al que se somete la probeta, para ambas direcciones de movimiento.

Largo de Rótula Plástica

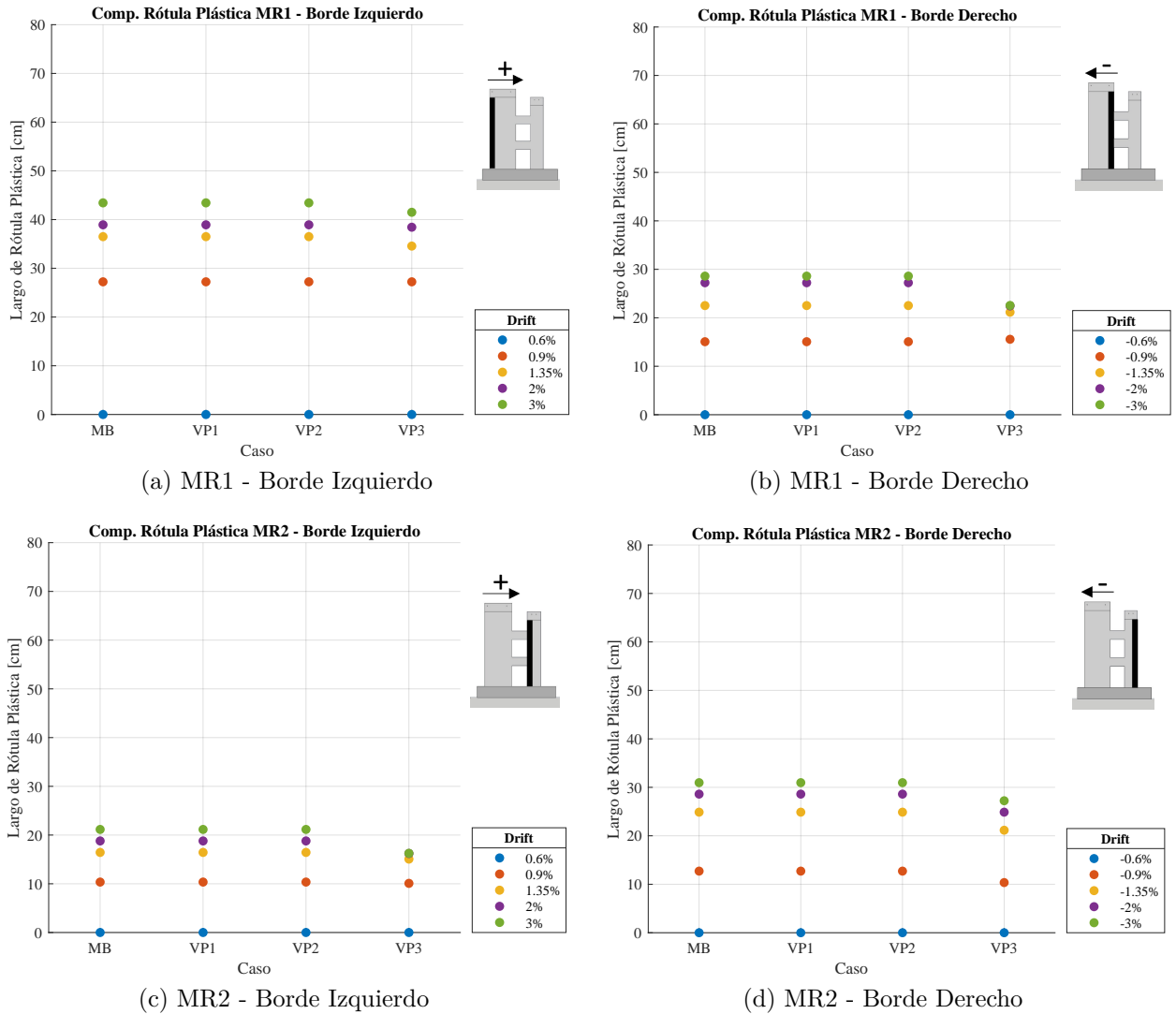


Figura 8.32: Comparación del Largo de Rótula Plástica por Caso

En la Figura 8.32 se presenta la comparación del largo de rótula plástica en cada borde de los muros de la probeta para cada caso estudiado.

En general, se observa que las modificaciones a la armadura de las vigas de acople (VP1: aumento de armadura transversal y VP2: incorporación de refuerzo diagonal) no suponen cambios en el largo de rótula plástica en los muros con respecto al caso base en ninguno de los bordes. Sin embargo, al incorporar carga axial sobre el MR2 (VP3), se observa que el largo de rótula plástica decrece en ambos muros en sus bordes traccionados para derivas iguales o mayores al 1.35%. En particular, se observa que la mayor disminución del largo de rótula plástica, respecto al caso base, se encuentra en los bordes internos de los muros de la probeta, es decir, en el borde derecho del MR1 y el borde izquierdo del MR2.

Capítulo 9

Conclusiones

En el primer capítulo de esta investigación se estableció que el objetivo principal era llevar a cabo un estudio sobre la respuesta de un sistema de muros rectangulares acoplados con vigas, teniendo en cuenta las características geométricas y cuantías de acero en los elementos estructurales de acoplamiento. Para lograr esto, se realizó un ensayo en una probeta a escala de los muros acoplados, así como modelos analíticos de elementos finitos del sistema completo. Se puede concluir que se logró el objetivo principal, ya que se realizó el ensayo de forma satisfactoria y se analizaron los resultados, incluyendo la respuesta de la probeta ensayada en términos de desplazamientos, deformaciones y perfiles de curvatura tanto en los muros como en las vigas de acople. Se utilizó dos metodologías de monitoreo distintas: LVDTs y fotogrametría, siendo esta última la abordada en este trabajo.

En relación con la respuesta de la probeta durante el ensayo, se determinó que la carga axial aplicada sobre el MR1 fue constante, con un valor de 40 [tonf]. Considerando los ensayos de probetas cilíndricas de hormigón realizado, se tiene que la carga axial real corresponde a $0.08A_g f'_c$. Respecto al desplazamiento a nivel de techo del MR1, se obtuvo mediante fotogrametría, después de realizadas correcciones, que su valor máximo para una deriva nominal del 3% fue de 83.7 [mm] y de -81.8 [mm] para una deriva nominal del -3%, asociados a cargas laterales de 42.82 [tonf] y -38.08 [tonf] respectivamente. Para los mismos niveles de deriva nominal y carga lateral, el desplazamiento de techo del MR2 fue de 78.2 [mm] en el sentido positivo de desplazamiento lateral y de -68.56 [mm] para el sentido negativo de desplazamiento lateral. De esta forma, se observa un comportamiento asimétrico en la probeta, obteniendo que ésta posee mayor capacidad para derivas positivas. Basándose principalmente en los perfiles obtenidos experimentalmente de deformación unitaria vertical a nivel basal de los muros, se identifica que la probeta posee mayor grado de acoplamiento para derivas positivas que para derivas negativas. Esto se debe a que para la dirección negativa de movimiento, el momento basal se concentra en el MR1, mientras que para derivas positivas el momento basal se distribuye entre los dos muros, implicando mayor contribución a resistir el momento volcante por parte de las vigas de acople.

Al observar la evolución de daños, se identificó fisuramiento del hormigón a partir del 0.3% de deriva tanto en los muros como en las vigas de acople. Para el caso particular de los muros, se observó mayor concentración de daños en el MR1 que en el MR2, lo cual es lógico considerando que tanto el sistema de carga axial como el actuador se encuentran conectados a éste. Además, en el MR1 se observaron grietas tanto en el primer piso como en el segundo,

mientras que en el MR2 se concentraron solo en el primer piso. Respecto a las vigas de acople, se identificó mayor nivel de daño en la viga superior que en la inferior. Por otro lado, se observó el comienzo de la pérdida de recubrimiento del hormigón en la base de los muros para un drift del 0.9 %, y comienzo del desprendimiento de éste para un drift del 1.35 %.

Bajo esta misma línea, analizando los mapas de color de deformaciones unitarias obtenidos a través de N_{corr} , a la orientación de grietas observada, a la propagación de éstas y a los desplazamientos por corte y flexión calculados, se pudo identificar que los muros de la probeta estuvieron controlados principalmente por flexión, mientras que las vigas de acople estuvieron controladas para derivas bajas por flexión y para derivas mayores (sobre el 0.6 %) por esfuerzos de corte. Para los muros, esto queda en evidencia por las grietas que aparecen en los bordes traccionados para cada nivel de deriva característicos del comportamiento a flexión, mientras que para el caso de las vigas de acople, se observan inicialmente grietas verticales en las zonas de las juntas viga-muro y posteriormente grietas diagonales desde el centro de los elementos que se propagan y aumentan en cantidad al aumentar el drift, lo cual evidencia un comportamiento controlado por corte. Los valores máximos de deformación unitaria medidos experimentalmente en los muros fueron de $\varepsilon_{yy} = 0.03$ [mm/mm] a nivel basal del MR1, asociada a un drift del 3 %, y de $\varepsilon_{yy} = 0.025$ [mm/mm] a nivel basal del MR2, asociada a un drift del -3 %. En las vigas de acople, las máximas deformaciones medidas fueron de $\varepsilon_{xx} = 0.05$ [mm/mm] para la viga superior, asociada a un drift del -1.35 % (cabe mencionar que para derivas más altas no se pudo medir por el desprendimiento del hormigón), y de $\varepsilon_{xx} = 0.05$ [mm/mm] para la inferior, asociada a un drift del 3 %. En general, se identifica que durante el primer ciclo del 3 % de deriva (cerca del 2.50 %) ocurre pandeo global en el MR1, y en el segundo ciclo del 3 % ocurre fractura como modo de falla de las barras de refuerzo del borde izquierdo del MR1 en su nivel basal, como consecuencia del ciclado a grandes deformaciones.

Los largos de rótula plástica determinados experimentalmente se ubican en el primer piso de cada uno de los muros, es decir, bajo el nivel de la viga de acople inferior. Para una deriva del 3 %, en el MR1 el largo de rótula plástica es de 42 [cm] en su borde izquierdo y de 39 [cm] en su borde derecho, mientras que en el MR2 es de 22 [cm] en su borde izquierdo y de 31 [cm] en su borde derecho. Se identifica además que los valores obtenidos experimentalmente son similares a lo calculado a través de la teoría, donde las mayores diferencias se presentan en el borde izquierdo del MR1. Es interesante notar que en los bordes interiores de los muros (borde derecho MR1 y borde izquierdo MR2) el largo de rótula plástica es menor al de los bordes exteriores. Esto último no es considerado en la estimación de L_p del DS N°60 en nuestro país, por lo que este estudio sugiere la necesidad de profundizar en el estudio de rótula plástica de sistemas de muros acoplados en Chile, con el propósito de incorporar aspectos como este en la normativa.

Por otro lado, respecto al modelo numérico de la probeta CWB desarrollado en SAFE-Toolbox, se concluye que es capaz de representar de forma satisfactoria el comportamiento de la probeta obtenido de forma experimental, ya que se obtienen valores casi idénticos, con variaciones del orden de ± 1 [tonf], para la capacidad de la probeta para derivas positivas y negativas. La mayor diferencia se observa para un drift del -3 %, lo cual se debe a que el modelo numérico no considera la degradación asociada al pandeo de barras como consecuencia del ciclado. Además, se identifica que las mayores diferencias en cuanto a las deformaciones

unitarias verticales se tienen a nivel basal en los bordes del MR1 para derivas iguales o mayores a 0.9% con respecto a lo obtenido experimentalmente, lo cual se explica por la imprecisión de la fotogrametría para dichos niveles de deriva considerando el agrietamiento y desprendimiento del hormigón que afectan a las mediciones a través de fotografías.

Al realizar variaciones paramétricas al modelo numérico, se observó que al aumentar el refuerzo transversal de las vigas de acople (VP1) y al incorporar refuerzo diagonal en ellas (VP2), la capacidad de la probeta para derivas positivas aumentó cerca de un 7%, mientras que, para derivas menores al 2%, no varió al cargar axialmente el MR2 (VP3). Ahora bien, para derivas negativas, la incorporación de carga axial sobre el MR2 implicó un aumento de la capacidad de la probeta de 12 [tonf] (para el 3% de drift), lo que representa un incremento del 28%. Sin embargo, se identificó que dichos aumentos de la capacidad y resistencia del sistema implicaron también una pérdida de la capacidad dúctil de la probeta. En particular, la incorporación de carga axial sobre el MR2 implicó una pérdida de ductilidad cercana al 30%, mientras que al variar la armadura de las vigas de acople dicha pérdida de ductilidad es menor. Bajo esta misma línea, se identificó que el porcentaje del corte basal total de la probeta se distribuye de forma más homogénea entre los muros al cargar axialmente el MR2 para derivas positivas (en comparación al caso base), mientras que para derivas negativas el corte basal del MR1 aumenta con respecto con el del MR2 cerca de un 7% al incorporar carga axial en el MR2. Por otro lado, se observó que el mayor grado de acoplamiento se obtuvo al cargar axialmente el MR2, tanto para derivas positivas como negativas. Por su parte, el largo de rótula plástica se mantuvo igual en ambos muros de la probeta al hacer modificaciones en la armadura de las vigas de acople, mientras que al cargar axialmente el MR2, se observó que ésta disminuye en ambos muros, principalmente en el borde izquierdo del MR1.

Comparando los resultados numéricos obtenidos al aumentar el refuerzo transversal de las vigas de acople e incorporar refuerzo diagonal en éstas (según las disposiciones del ACI318-08), se pudo evidenciar que dichas variaciones implican un aumento en la capacidad de la probeta en comparación al modelo base para derivas mayores al 1%, pero ambas variaciones son similares en términos de la ductilidad de la probeta, sugiriendo así que para el caso particular de la probeta estudiada, se puede obtener un desempeño satisfactorio únicamente con refuerzo convencional. La comparación entre ambas soluciones de refuerzo de vigas de acople puede ser estudiada en mayor profundidad en futuras investigaciones.

Finalmente, se puede concluir que este Trabajo de Tesis posee una gran importancia dentro del estudio del comportamiento de sistemas de muros acoplados basados en la tipología constructiva chilena, debido a la presencia dichos sistemas en las estructuras en altura de nuestro país, tanto habitacionales como industriales. El ensayo realizado en este estudio sirve como precedente para la realización de estudios experimentales y/o analíticos futuros acerca de sistemas de muros acoplados de hormigón armado, enfocándose en las variaciones de geometría y distribuciones de armadura que permitan apuntar a mejorar la ductilidad de los elementos en el diseño estructural, considerando las grandes demandas sísmicas en el país.

Bibliografía

- [1] ACI 318-08. “Building Code Requirements for Structural Plain Concrete”. Detroit, MI, USA, American Concrete Institute, 2008.
- [2] Bastías Zamora, K., “Estudio experimental de la formación de rótula plástica y análisis de daño de muros acoplados de hormigón armado usando fotogrametría”. Universidad de Chile, 2018.
- [3] Belarbi H. & Hsu T., “Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened By Concrete”. ACI Structural Journal Vol. 91, N°4, p. 465-474, 1994.
- [4] Blaber, J., Adair A. & Antoniou A., “Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software.” Exp. Mech., Vol. 55, 2015.
- [5] Bohl, A., “Plastic hinge length in high-rise concrete shear walls”, University of British Columbia, 2006.
- [6] Bohl, A. & Adebar, P., “Plastic hinge lengths in high-rise concrete shear walls”, ACI Structural Journal, Vol. 108, p. 148–157, 2011.
- [7] Centro Sismológico Nacional, “Resumen de Sismicidad del 2021 en Chile”, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2022. Disponible en csn.uchile.cl/7436-sismos-localizo-el-csn-en-chile-durante-el-2021/
- [8] Chaallal, O., Gauthier, D., Malefant, P., “Classification methodology for coupled shear walls”, Journal of Structural Engineering, Vol. 122, N° 12, 1996.
- [9] Chaperon Gamboa, M., “Estudio de la respuesta numérica de losas acopladas con muros T de hormigón armado”. Universidad de Chile, 2018.
- [10] Collins, M. & Porasz, A., “Shear Strength for High Strength Concrete”. In Design Aspects of High Strength Concrete. Bulletin No. 193. Comité Euro-International du Béton (CEN): 75-83, 1989.
- [11] Díaz Olivares, S., “Estudio experimental y modelamiento en elementos finitos de muros esbeltos de hormigón armado con discontinuidades tipo bandera”. Universidad de Chile, 2016.
- [12] Filippou, F., Popov, E. & Bertero, V., “Effects of Bond Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Joints”. EERC Report No. UCB/EERC-83/19, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley. 184p. CA-USA, 1983.
- [13] Galano, L. y Vignoli, A., “Seismic behavior of short coupling beams with different reinforcement layouts”, ACI Structural Journal, Vol. 97, p. 876–885, 2000.
- [14] Harries, K., “Ductility and Deformability of coupling beams in reinforced concrete coupled walls”, Earthquake Spectra, Vol. 17, N° 13, 2001.

- [15] Honarparast S., Chaallal O., “Seismic Upgrading of RC coupled shear walls: state of the art and research needs”. *Global Journal of Advanced Engineering Technologies and Sciences*, Vol. 2, N° 12. p. 1-19. 2015.
- [16] INN, “NCh 171 Of. 2008. Hormigón - Extracción de muestras del hormigón fresco”. Chile, 2008.
- [17] INN, “NCh 1017 Of. 2009. Hormigón - Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción”. Chile, 2009.
- [18] Kwan, A. K. H. & Zhao Z. Z., “Cyclic behavior of deep reinforced concrete coupling beams. *Structures & Buildings*, Vol. 152, N°3, p. 283–293, 2002.
- [19] Lagos, R., Kupfer, M., Lindenberg, J., Bonelli, P., Saragoni, R., Guendelman, T., Massone, L., Boroschek R. and Yañez F., “Seismic performance of high-rise concrete buildings in Chile”. *International Journal of High-Rise Buildings*, vol. 1, no 3, p. 181-194, 2012.
- [20] Li G., Feifei S., et al., “Structural Shear Wall Systems with Metal Energy Dissipation Mechanism”. *International Journal of High-Rise Buildings*, Vol. 5, N° 3, p. 195-203, 2016.
- [21] Manríquez Rojas, I. “Ensayo de muros bandera de hormigón armado con carga lateral cíclica medido por fotogrametría y comparado con modelo Puntal-Tensor”. Universidad de Chile, 2016.
- [22] Massone Sánchez, L., “RC Wall Shear - Flexure Interaction: Analytical and Experimental Responses”. Ph.D. dissertation, University of California, LA-USA, 2006.
- [23] Massone, L. & Alfaro, J., “Displacement and curvature estimation for the design of reinforced concrete slender walls”, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 25, N° 16, p. 823-841, 2016.
- [24] Massone L., Rojas, F. et al., “Analytical considerations for the design of reinforced concrete walls in Chile”, *16WCEE*, 2017.
- [25] Massone, L. & Wallace, J., “Load-deformation responses of slender reinforced concrete walls”, *ACI Structural Journal*, Vol. 101, p. 103–113, 2004.
- [26] MATLAB. Version 9.8.0 (R2020a). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc, 2020.
- [27] Menegotto, M. & Pinto E., “Method of Analysis for Cyclically Loaded Reinforced Concrete Plane Frames Including Changes in Geometry and Non Elastic Behavior of Elements Under Combined Normal Force and Bending”. *Proceedings, IABSE Symposium, Lisboa, Portugal, 1973*.
- [28] MINVU, “Requisitos de Diseño y Cálculo para el Hormigón Armado”. *Diario Oficial No. 40133, Decreto Supremo N° 60. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Chile, 2011*.
- [29] Mohr, D. S., “Nonlinear analysis and performance based design methods for reinforced concrete coupled shear walls”, *Master of Science in Civil Engineering. University of Washington, 2007*.
- [30] Muñoz Benavides, F., “Estudio experimental y analítico de muros T de hormigón armado ante cargas cíclicas”. Universidad de Chile, 2018.
- [31] Nasr E. et al., “Evaluation of response modification factor for shear wall with openings in multi-story buildings”. *Al-Azhar University Civil Engineering Research Magazine (CERM)*, Vol. 43 N°3, 2021.

- [32] Palermo, D. & Vecchio, F., “Compression field modeling of reinforced concrete subjected to reversed loading: Formulation”. *ACI Structural Journal*, 2012.
- [33] Peña Albornoz, E., “Implementación del programa de elementos finitos SafePy para análisis no lineal dinámico con factor de convergencia de carga”. Universidad de Chile, 2016.
- [34] Pinto Reveco, M., “Estudio de la respuesta numérica de losas acopladas de hormigón armado reforzado con fibras de PVA”. Universidad de Chile, 2021.
- [35] Priestley, M.J.N, Calvi, G.M., Kowalsky, M.J., “Displacement-Based seismic design of structures”. IUSS Press. pp. 1-34, 372-382. 2007.
- [36] Raffo Paniagua, J., “Estudio experimental de muros rectangulares acoplados con viga de hormigón armado mediante LVDT”. Universidad de Chile, 2023.
- [37] Rojas Barrales, F., “Development of a nonlinear quadrilateral layered membrane element with drilling degree of freedom and a nonlinear quadrilateral thin flat layered shell element for the modeling of reinforced concrete walls”. Ph.D. dissertation, University of Southern California, LA-USA, 2012.
- [38] Ruiz Cubillos, M., “Estudio experimental de muros T de hormigón armado mediante fotogrametría”. Universidad de Chile, 2019.
- [39] Saatgioglu, M. & Razvi, S., “Strength and Ductility of Confined Concrete”. In *ASCE Journal of Structural Engineering* 118(6), p. 1590-1607, 1992.
- [40] Santos Guzmán, H., “Estudio numérico de la respuesta de sistemas de muros de hormigón armado acoplados y diseño experimental para su validación”. Universidad de Chile, 2018.
- [41] Segura, N., “Estudio experimental y numérico de la respuesta de sistemas de muros rectangulares acoplados con losas de hormigón armado”. Universidad de Chile, 2023.
- [42] Seo, SY., Yun, HD. & Chun, YS., “Hysteretic Behavior of Conventionally Reinforced Concrete Coupling Beams in Reinforced Concrete Coupled Shear Wall. *Int J Conc Struct Mater* Vol. 11, p. 599–616, 2017.
- [43] Subedi, N. K., “Rc coupled shear wall structures. II: Ultimate strength calculations”. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 117, N° 3, pp. 681–698, 1991.
- [44] Thorenfeldt, E., Tomaszewicz, A. & Jensen, J., “Properties of High-Strength Concrete and Application in Design”. In *Symposium Utilization of High Strength Concrete*, Stavanger, Norway, 1987.
- [45] Valdivia Aguayo, M., “Análisis no lineal del sistema de muros rectangulares acoplados frente a cargas cíclicas y diseño de su montaje experimental”. Universidad de Chile, 2023.

Anexos

Anexo A. Planimetría

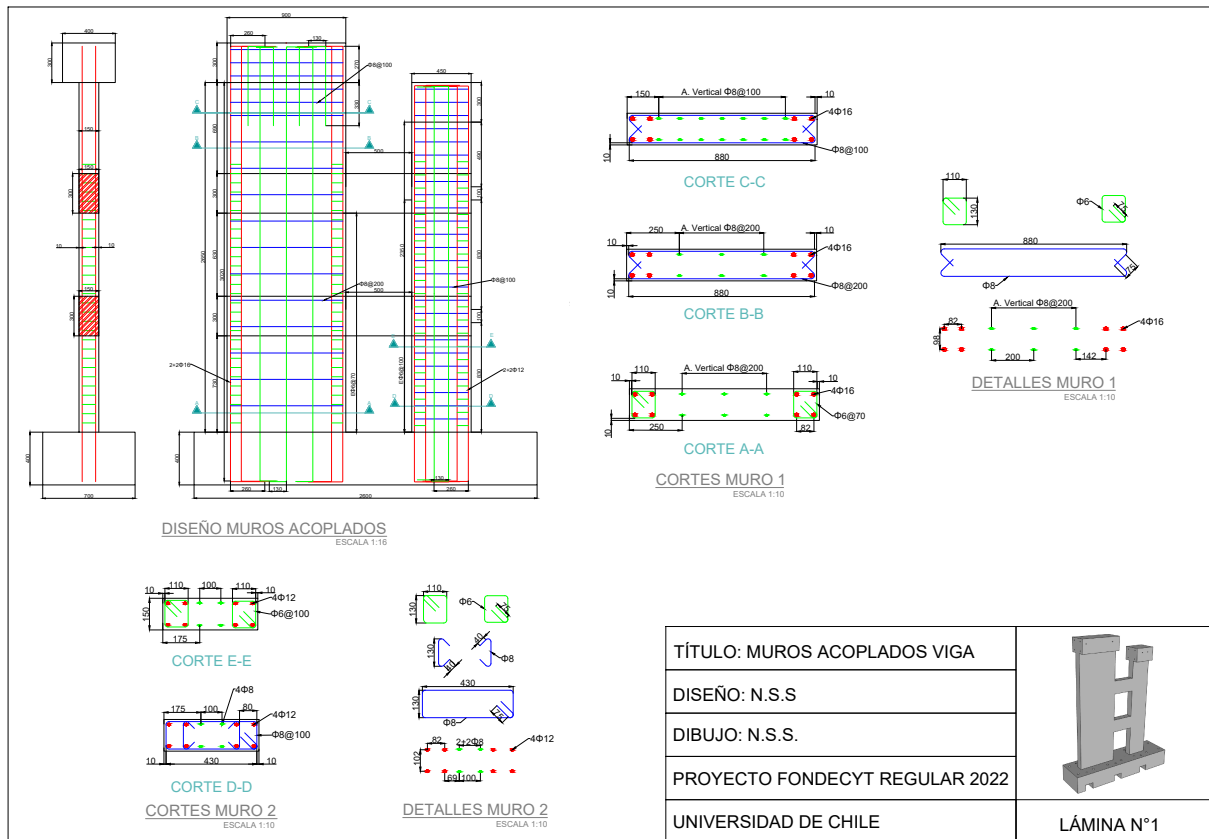


Figura A.1: Plano Muros de la Probeta CWB

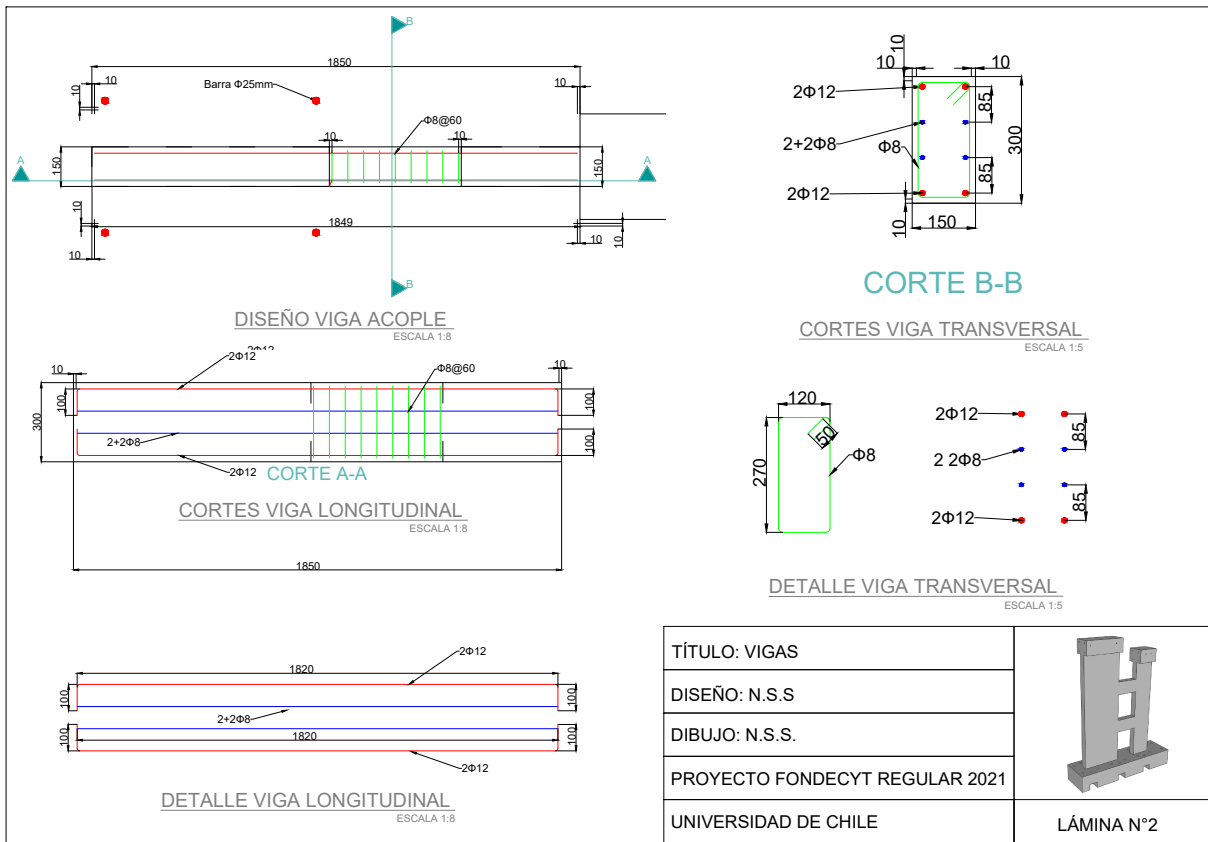


Figura A.2: Plano Vigas de Acople de la Probeta CWB

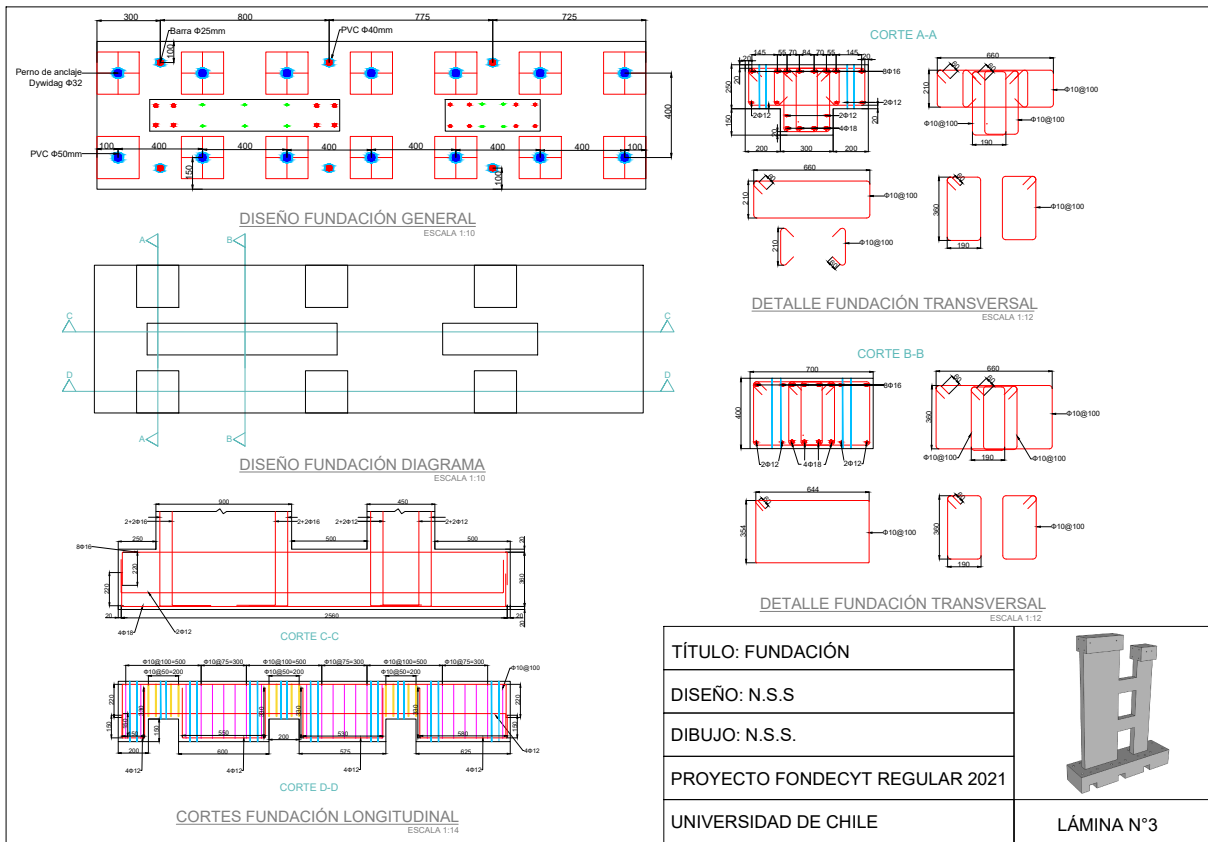


Figura A.3: Plano Pedestal de la Probeta CWB

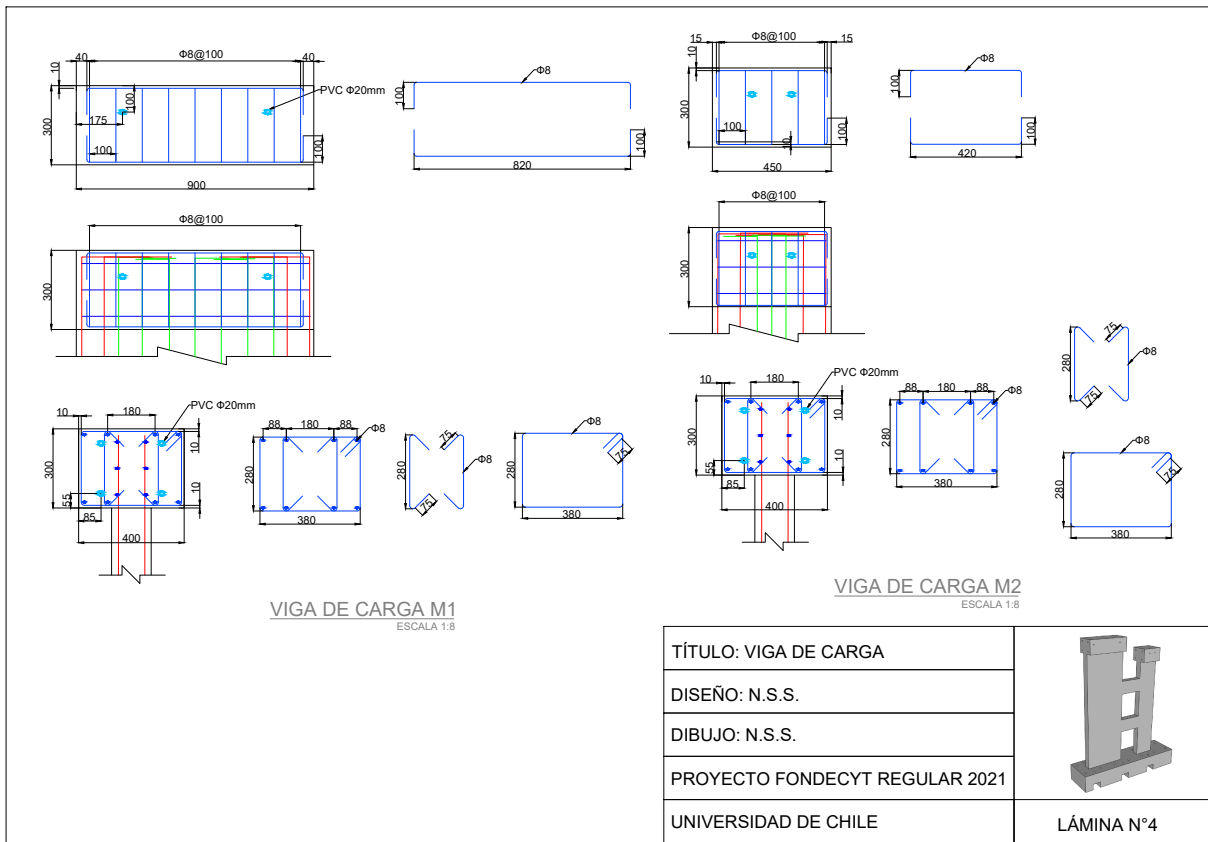


Figura A.4: Plano Vigas de Carga de la Probeta CWB

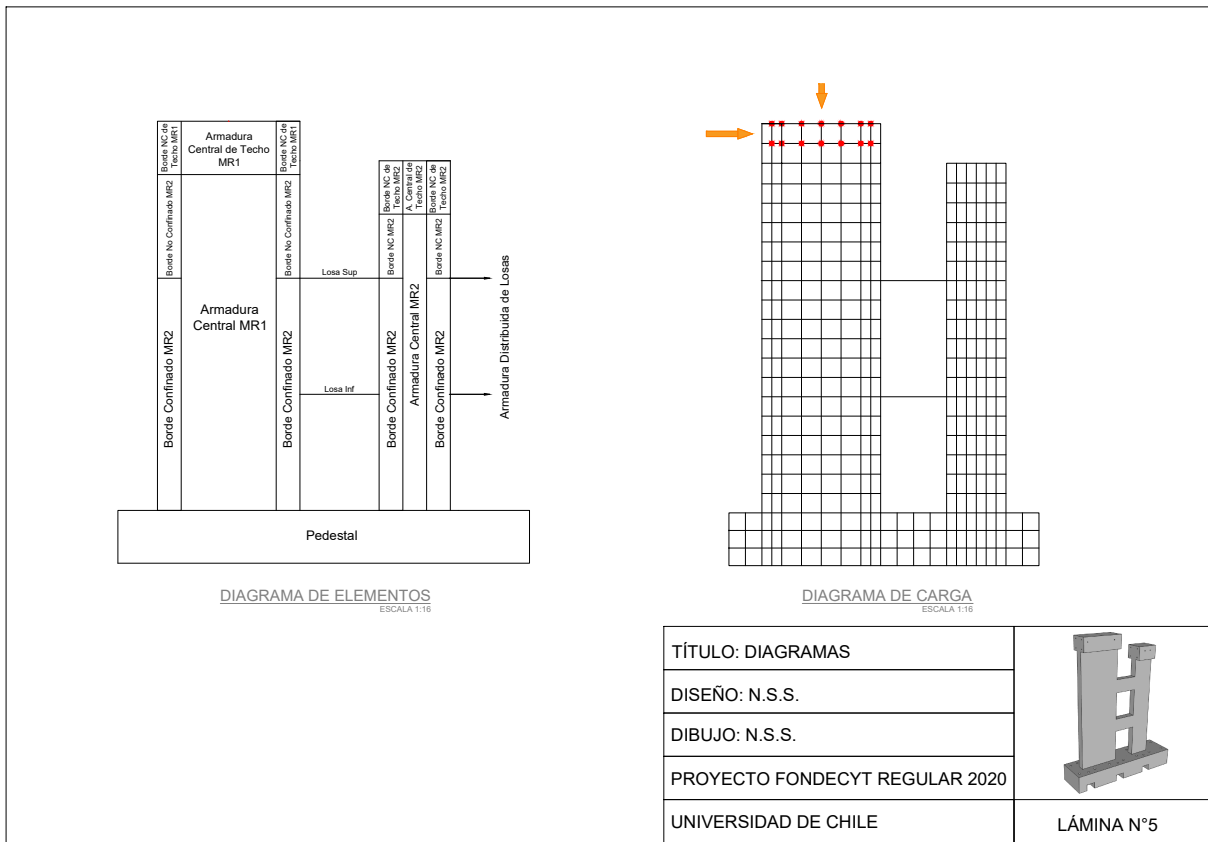


Figura A.5: Plano de Diagrama de Elementos y Diagrama de Carga de la Probeta CWB

Anexo B. Ensayos a Tracción de Barras de Acero

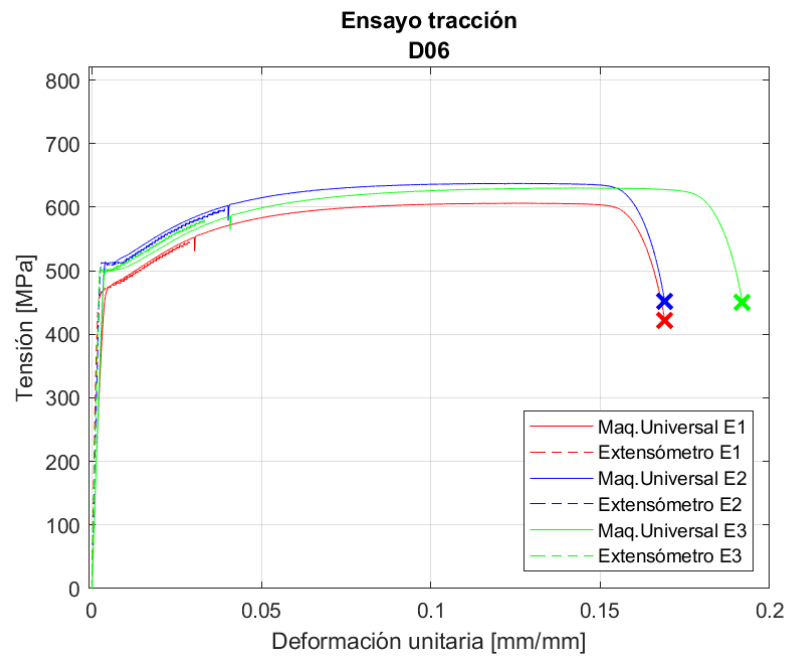


Figura B.1: Ensayo a Tracción - Barras $\phi 6$

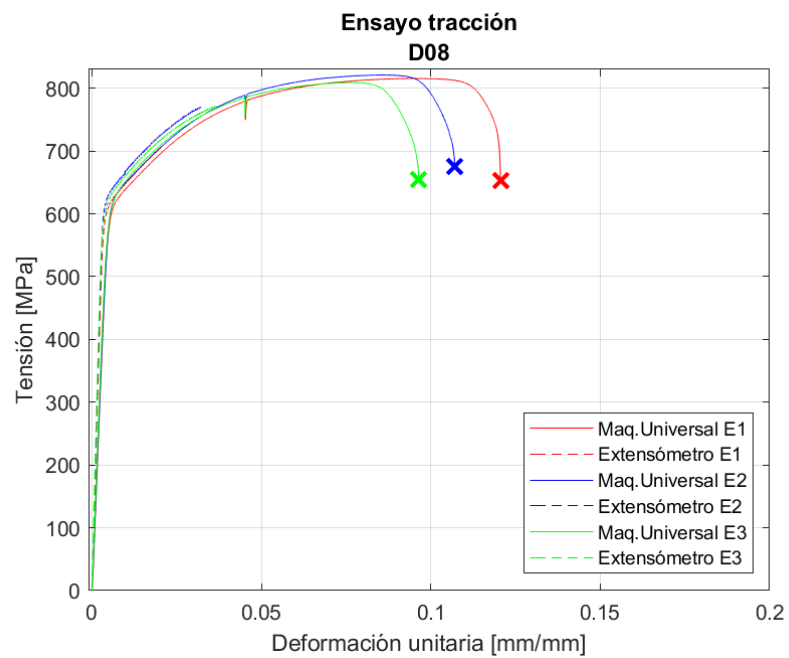


Figura B.2: Ensayo a Tracción - Barras $\phi 8$

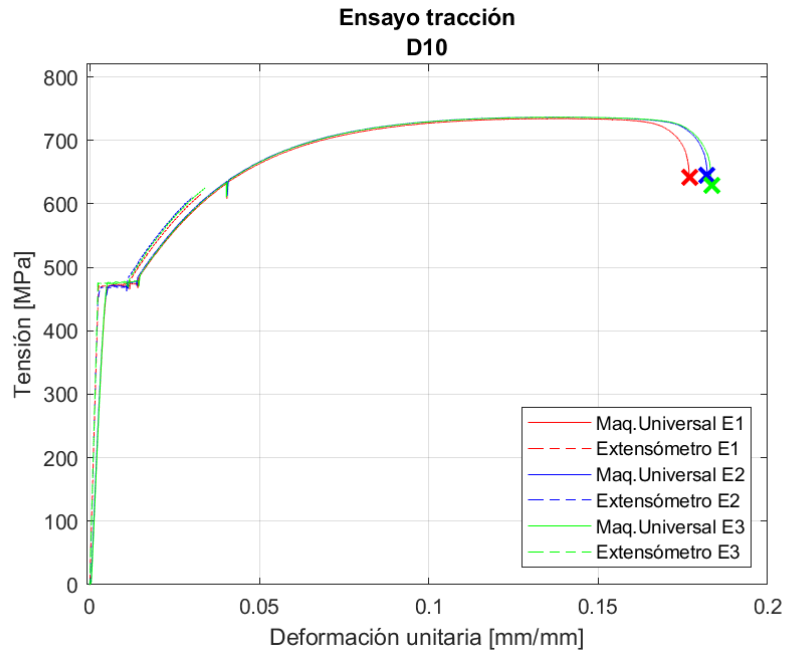


Figura B.3: Ensayo a Tracción - Barras $\phi 10$

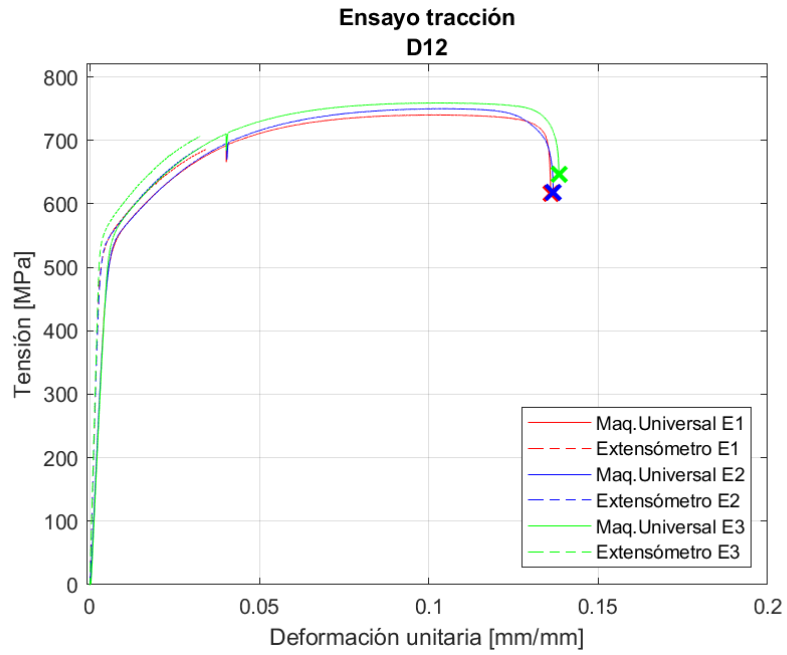


Figura B.4: Ensayo a Tracción - Barras $\phi 12$

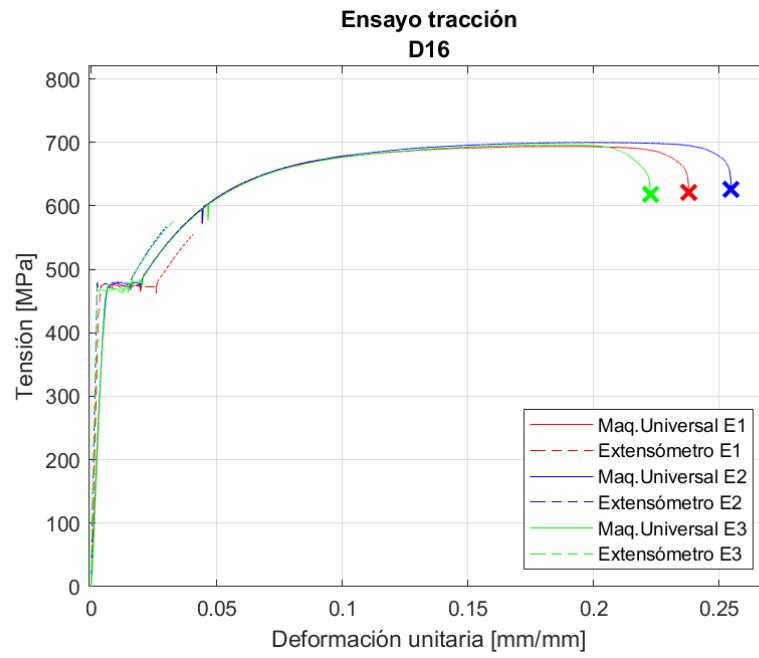


Figura B.5: Ensayo a Tracción - Barras $\phi 16$

Anexo C. Resultados Adicionales Fotogrametría

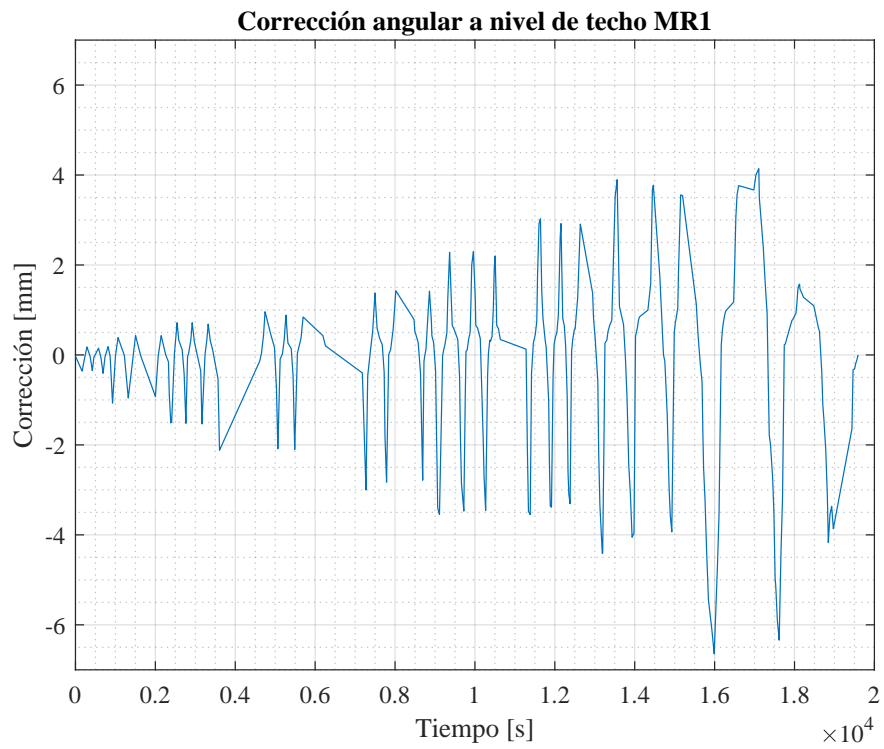


Figura C.1: Corrección Angular a Nivel de Techo - MR1

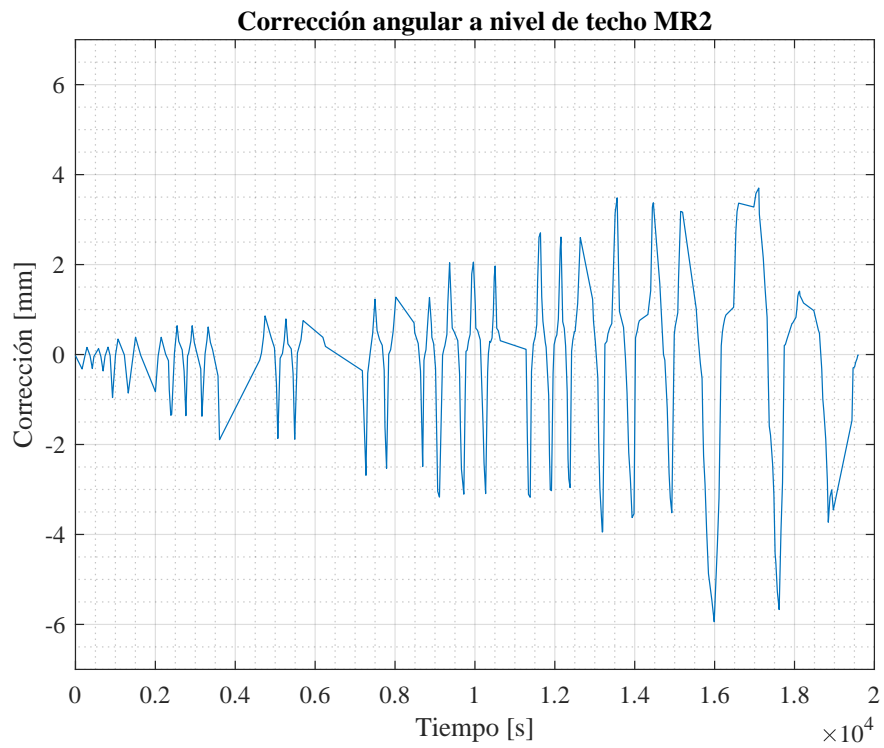


Figura C.2: Corrección Angular a Nivel de Techo - MR2

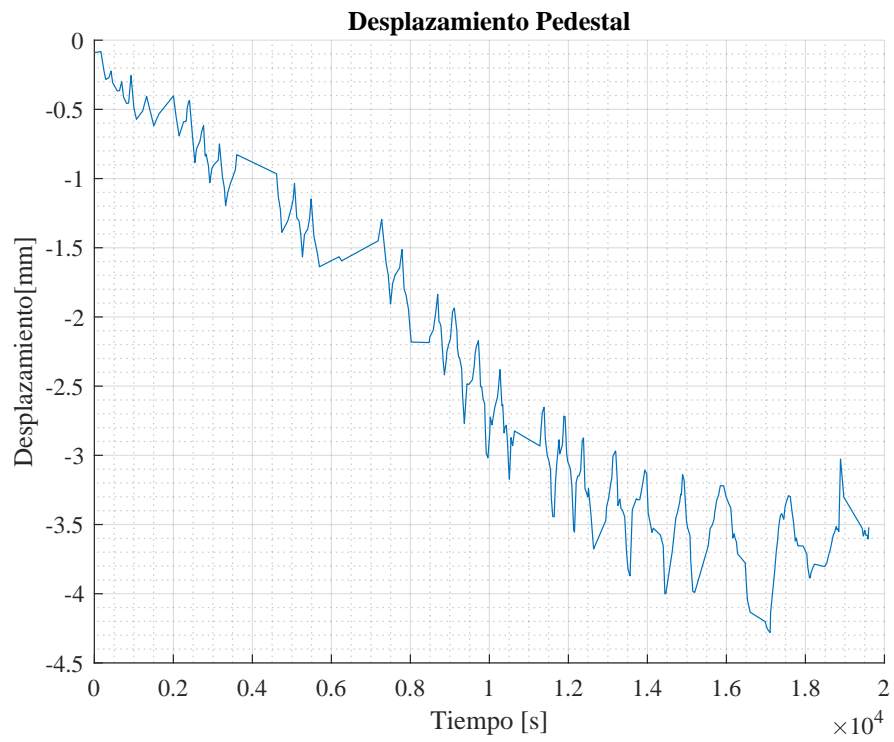
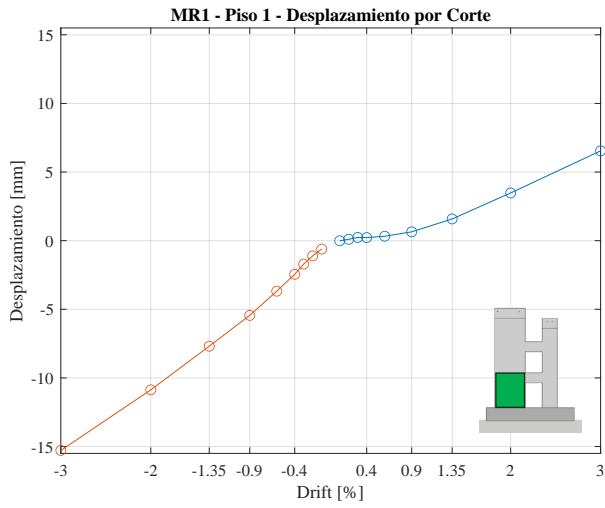
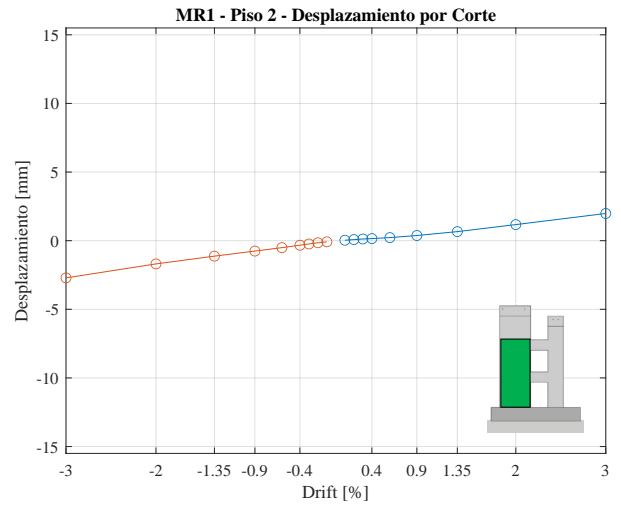


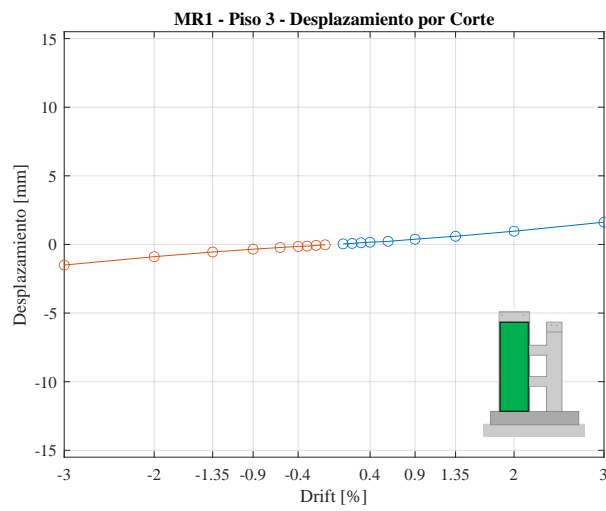
Figura C.3: Desplazamiento Lateral del Pedestal



(a) Piso 1

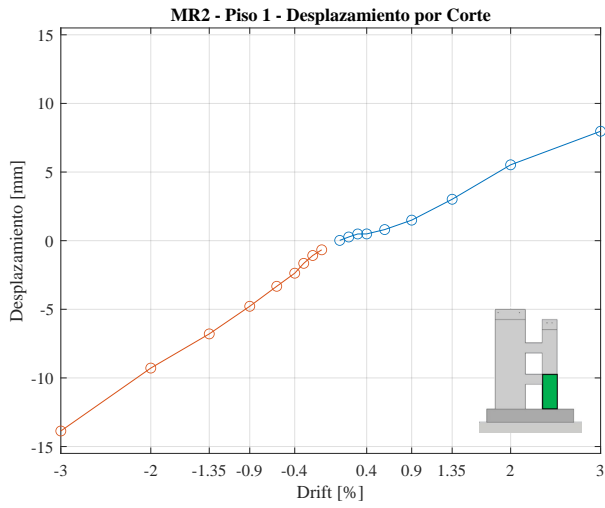


(b) Piso 2

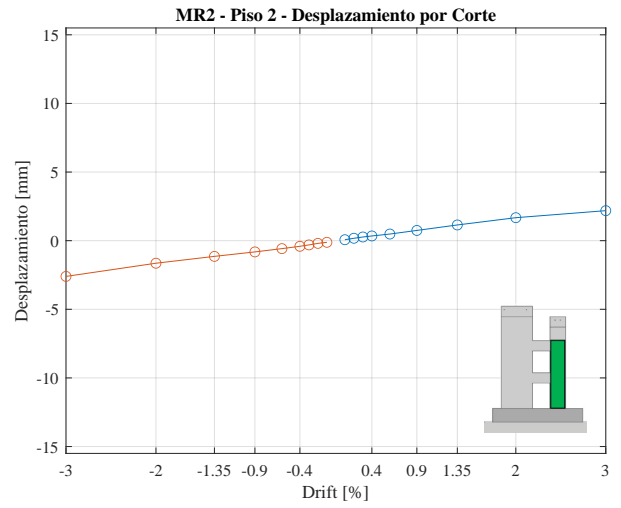


(c) Piso 3

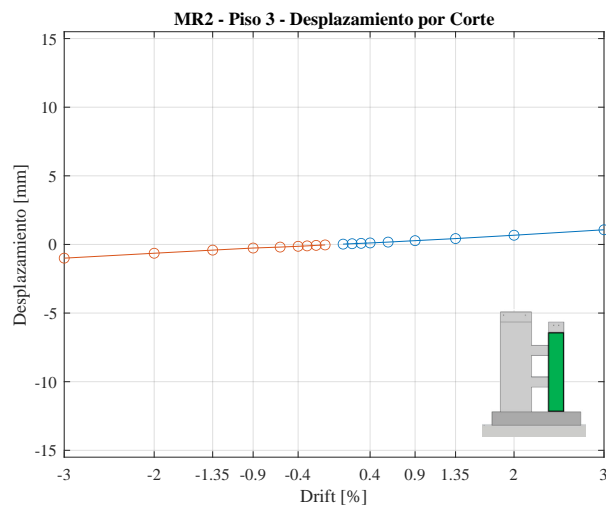
Figura C.4: Desplazamientos por Corte Pisos MR1



(a) Piso 1

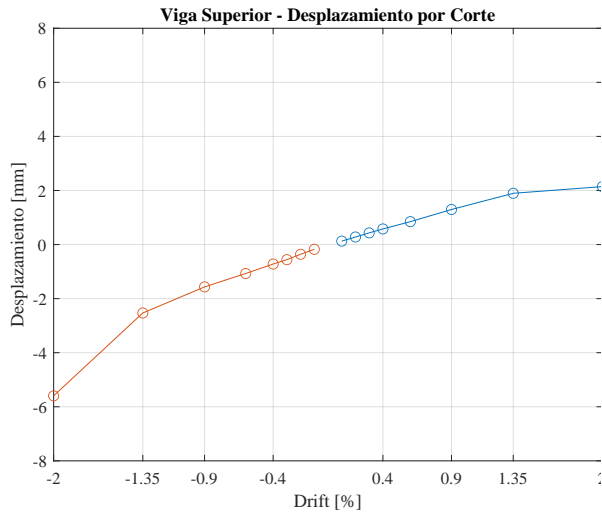


(b) Piso 2

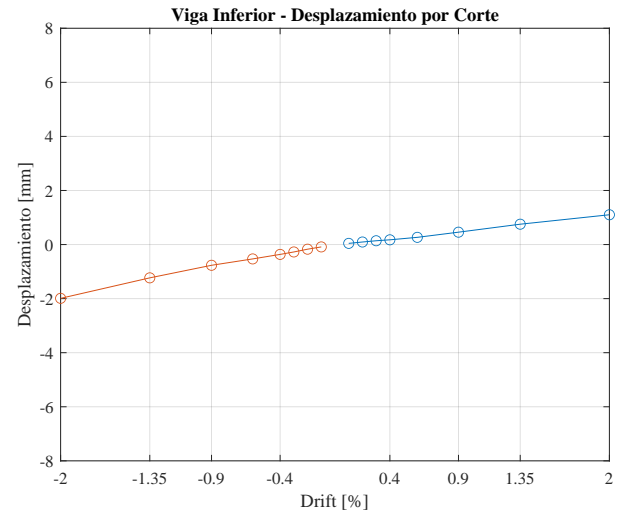


(c) Piso 3

Figura C.5: Desplazamientos por Corte Pisos MR2



(a) Viga Superior



(b) Viga Inferior

Figura C.6: Desplazamientos por Corte Vigas

Anexo D. Resultados Adicionales Modelo Numérico

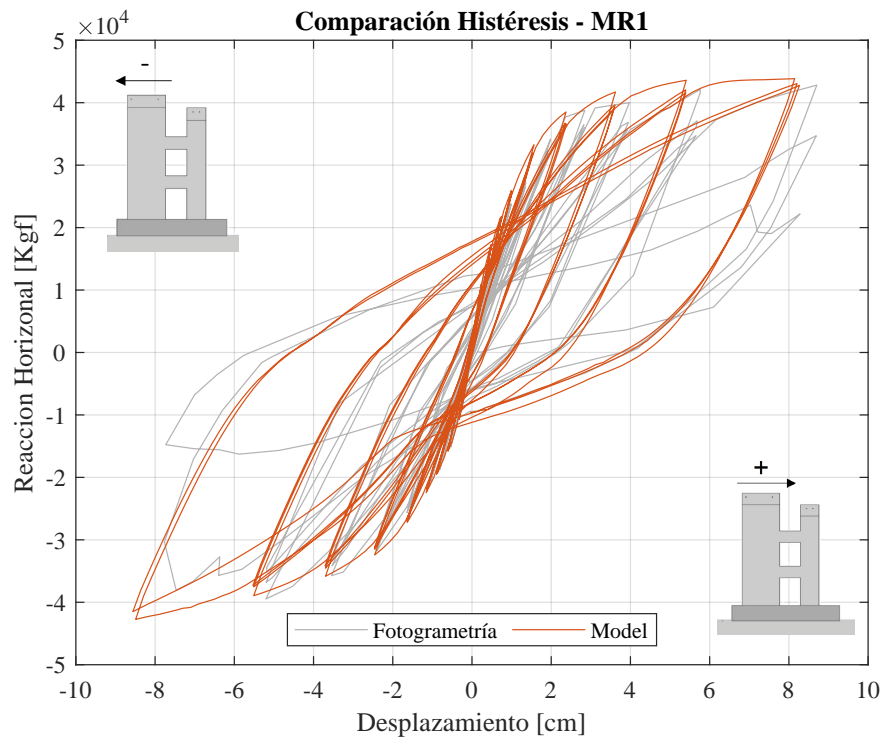
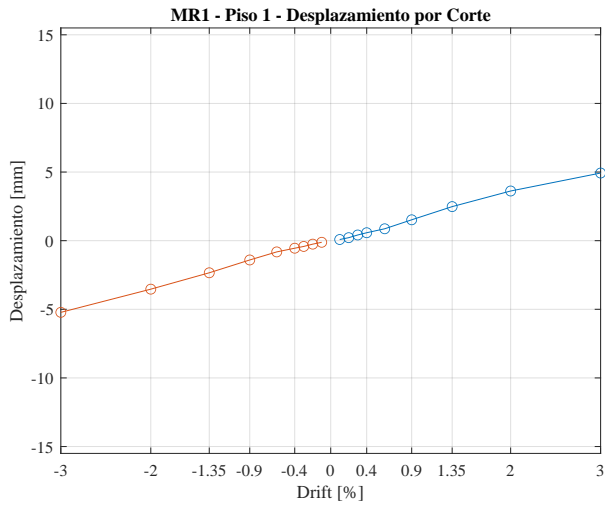
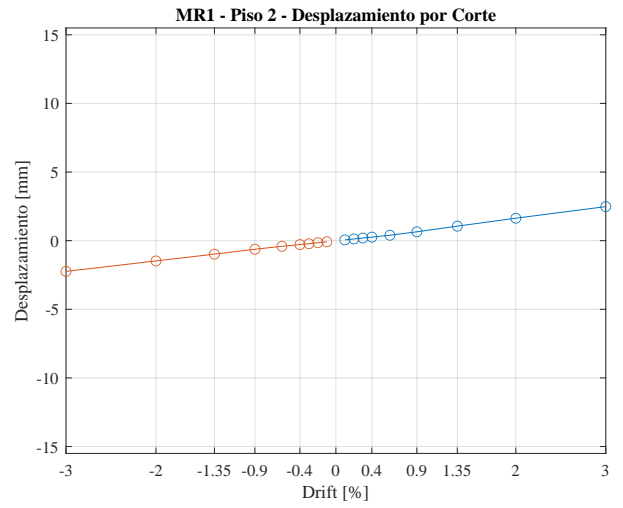


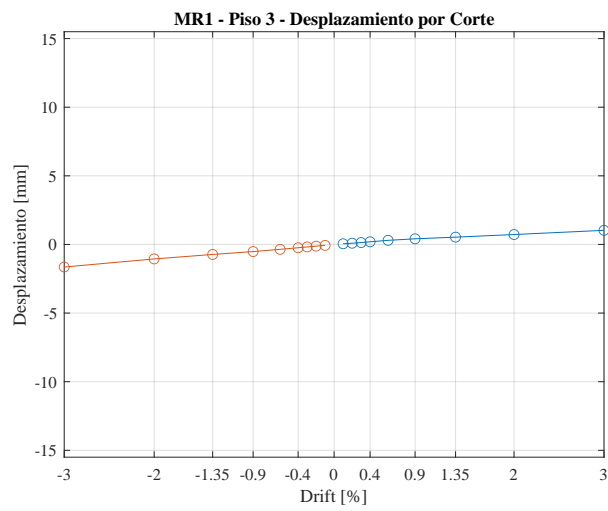
Figura D.1: Histéresis Model vs Fotogrametría



(a) Piso 1

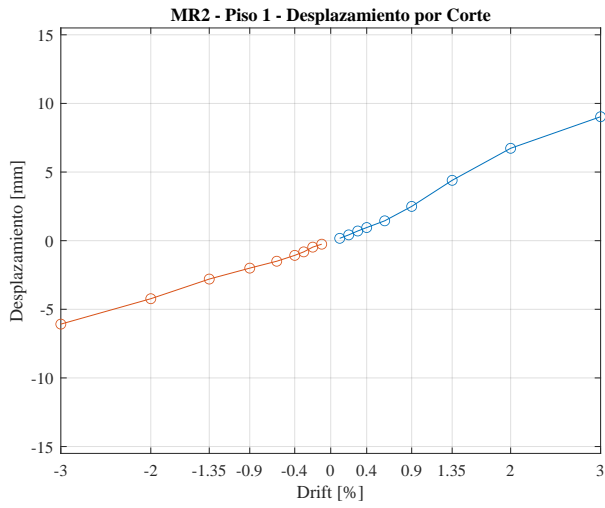


(b) Piso 2

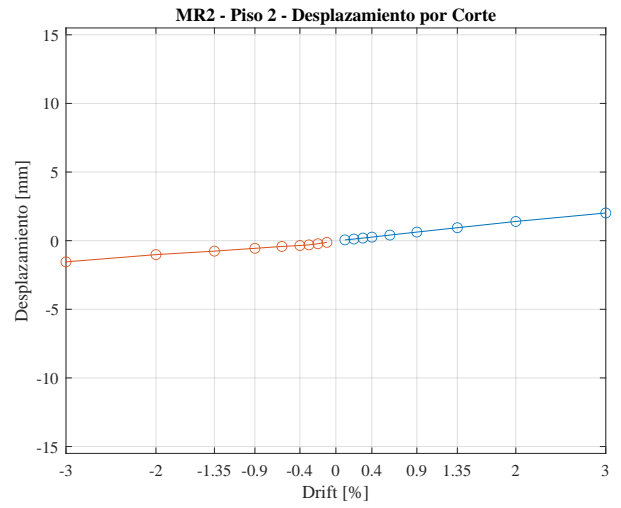


(c) Piso 3

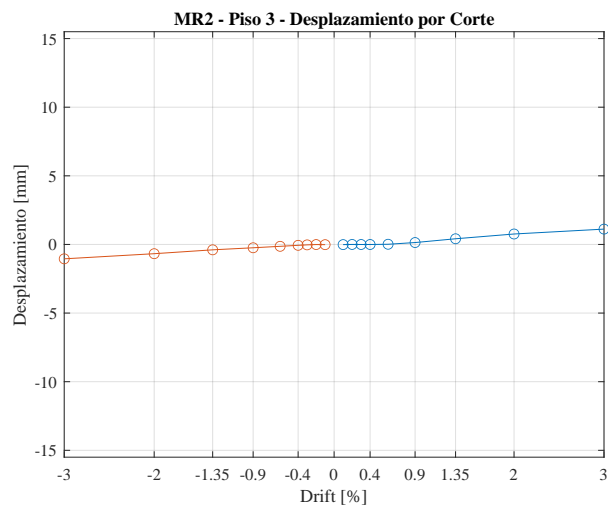
Figura D.2: Desplazamientos por Corte Pisos MR1



(a) Piso 1

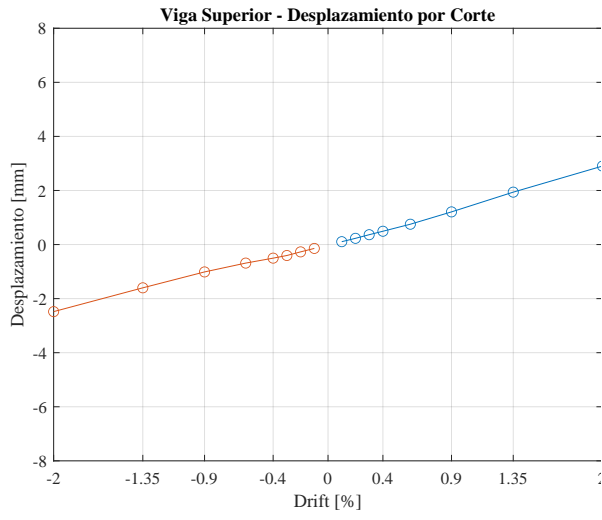


(b) Piso 2

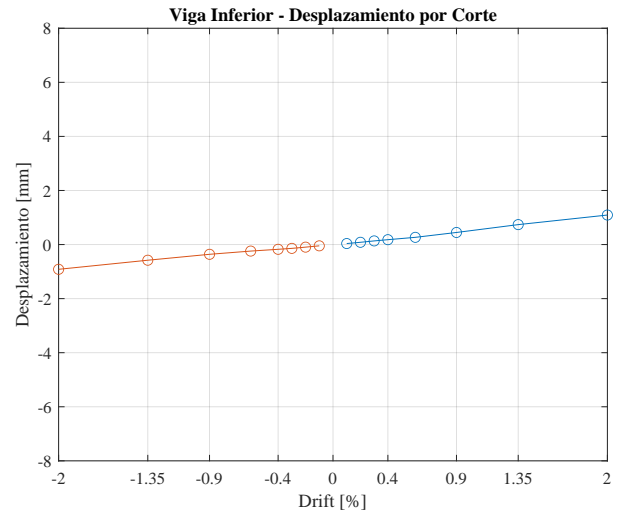


(c) Piso 3

Figura D.3: Desplazamientos por Corte Pisos MR2



(a) Viga Superior



(b) Viga Inferior

Figura D.4: Desplazamientos por Corte Vigas

Anexo E. Resultados Adicionales Variaciones Paramétricas del Modelo Numérico

E.1. Variación en Armadura Transversal en Vigas de Acople

Histéresis

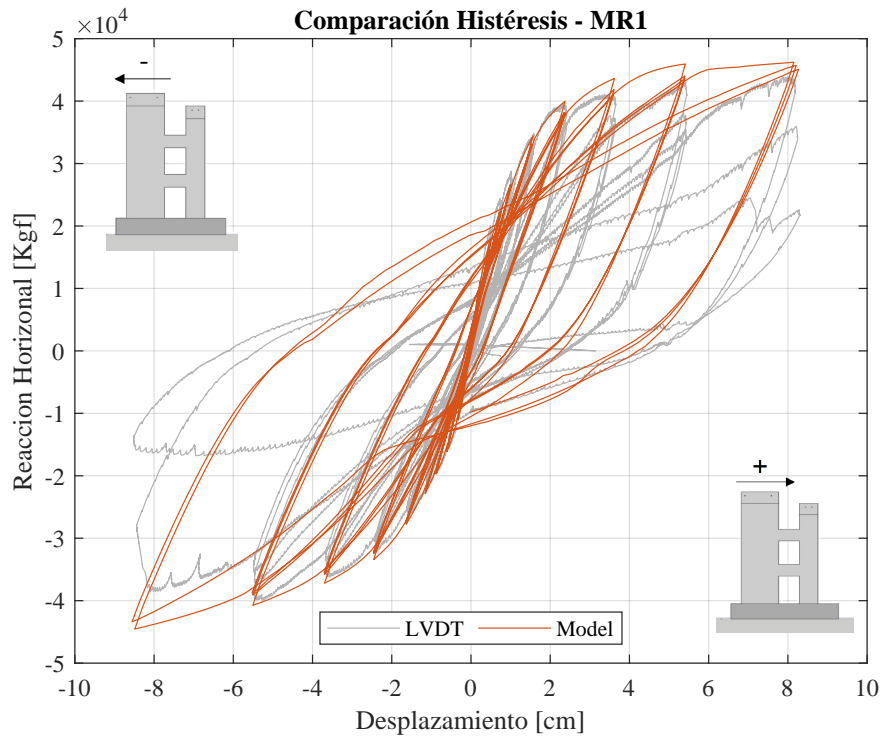


Figura E.1: Histéresis MR1 con Variación en Armadura Transversal en Vigas de Acople

Grado de Acoplamiento

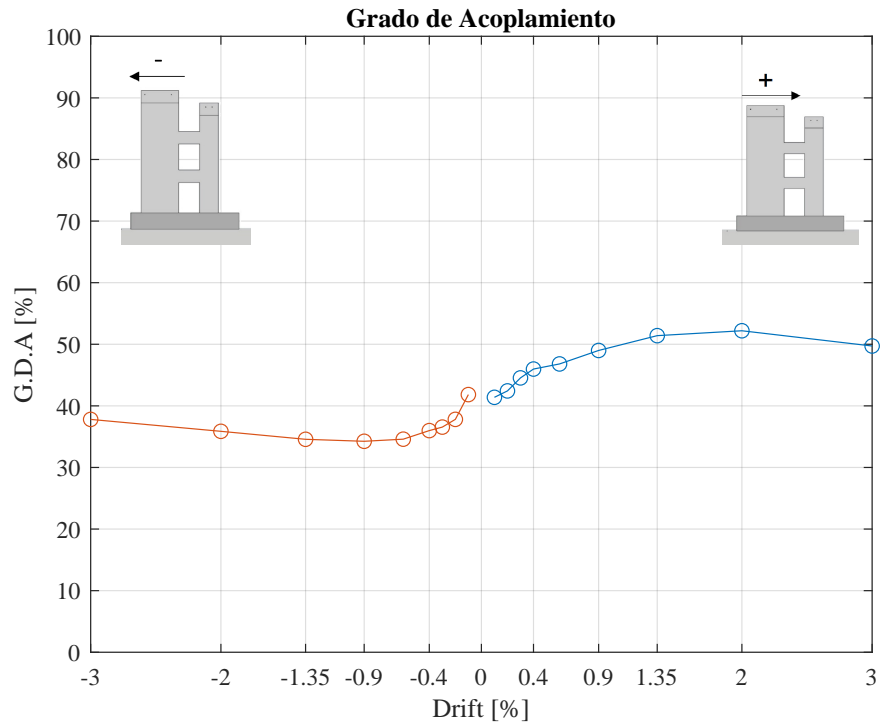
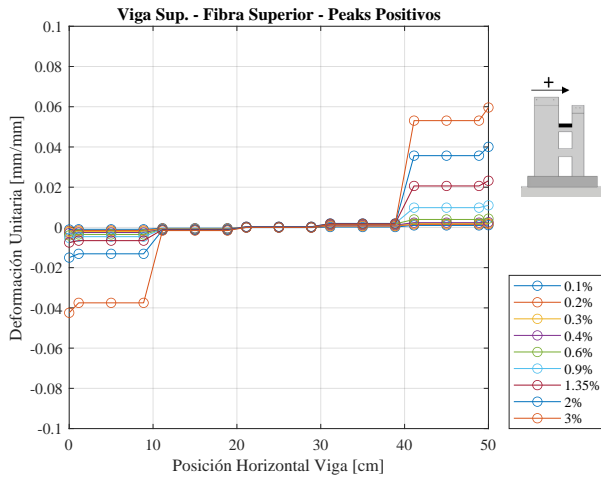
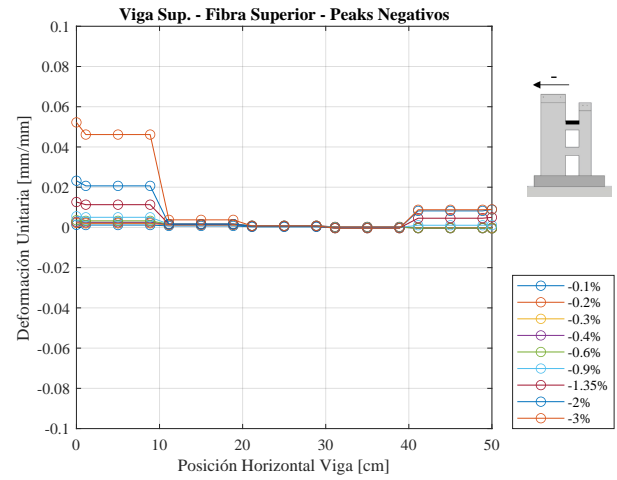


Figura E.2: Grado de Acoplamiento con Variación en Armadura Transversal en Vigas de Acople

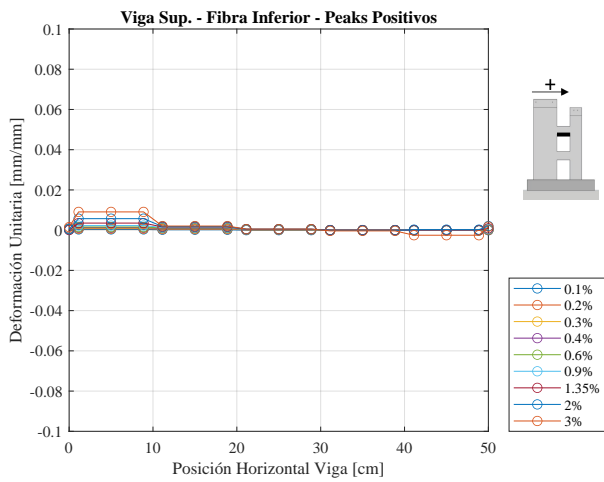
Deformación Axial en Vigas de Acople



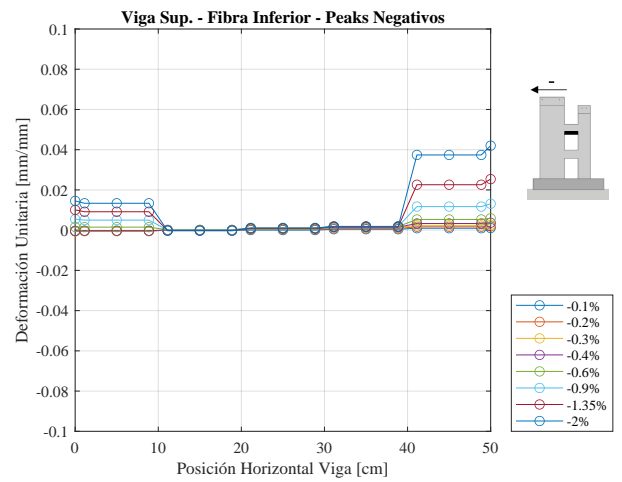
(a) Fibra Superior - Derivas Positivas



(b) Fibra Superior - Derivas Negativas

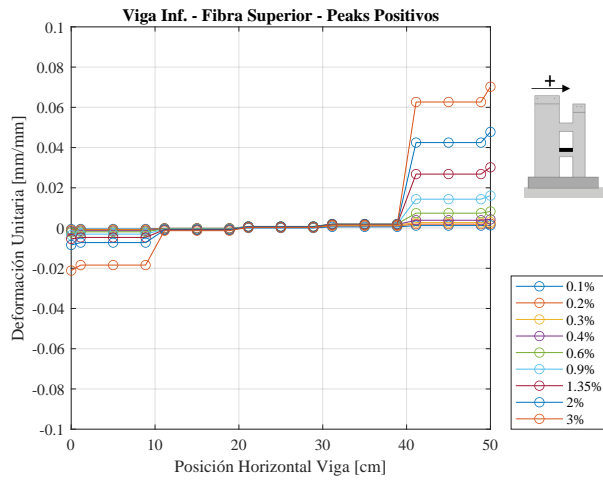


(c) Fibra Inferior - Derivas Positivas

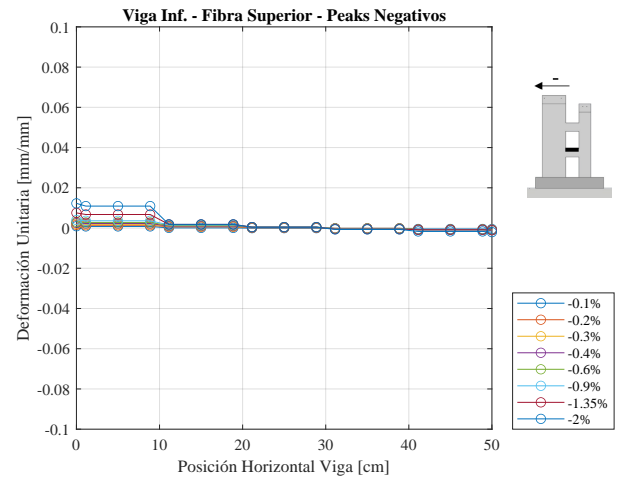


(d) Fibra Inferior - Derivas Negativas

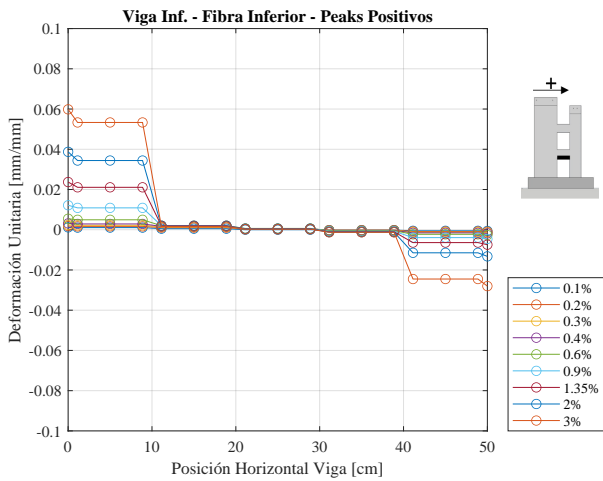
Figura E.3: Deformación Axial en Viga de Acople Superior con Variación en Armadura Transversal



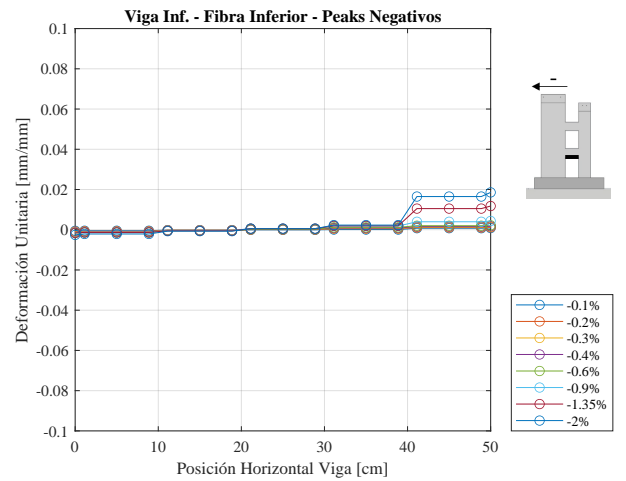
(a) Fibra Superior - Derivas Positivas



(b) Fibra Superior - Derivas Negativas



(c) Fibra Inferior - Derivas Positivas



(d) Fibra Inferior - Derivas Negativas

Figura E.4: Deformación Axial en Viga de Acople Inferior con Variación en Armadura Transversal

Desp. Total, por Corte y Flexión en Vigas de Acople

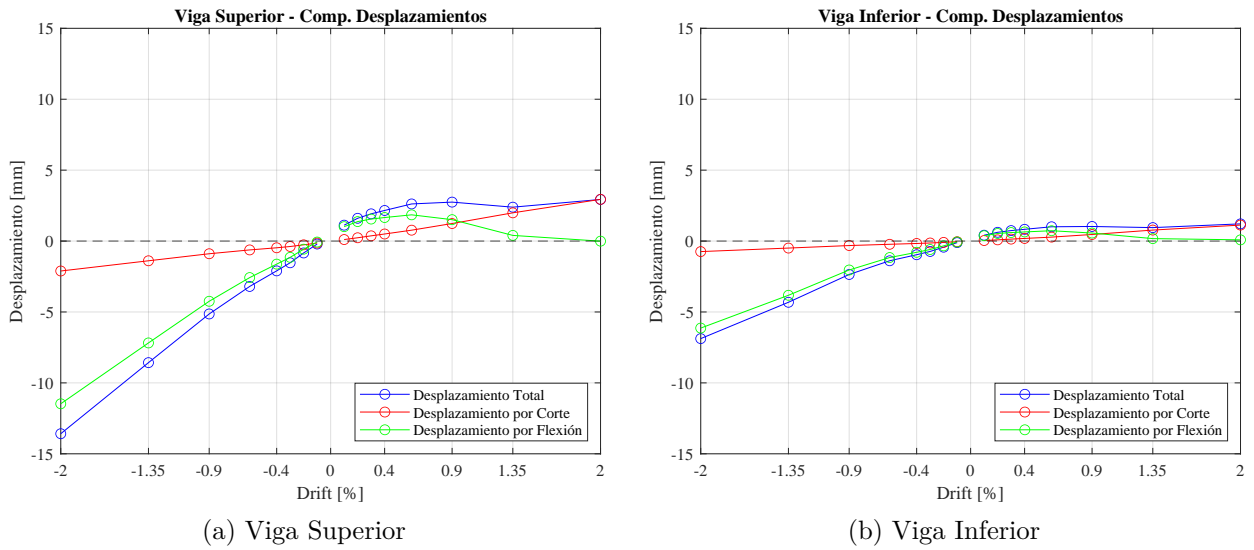


Figura E.5: Desp. Total, por Corte y Flexión en Vigas de Acople con Variación en Armadura Transversal

E.2. Incorporación de Armadura Diagonal en Vigas de Acople

Histéresis

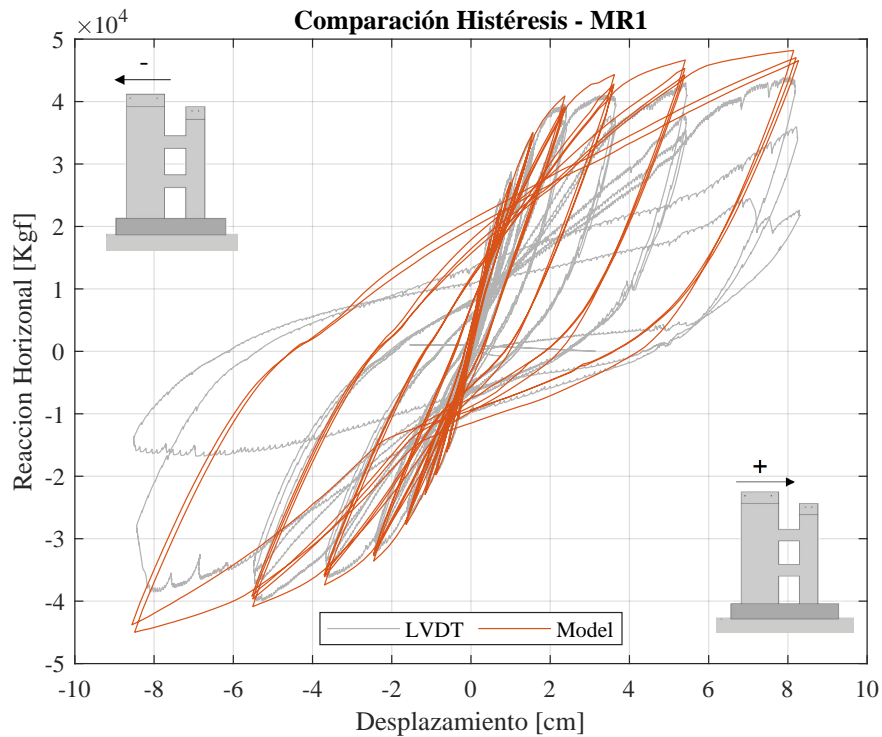


Figura E.6: Histéresis MR1 con Incorporación de Armadura Diagonal en Vigas de Acople

Grado de Acoplamiento

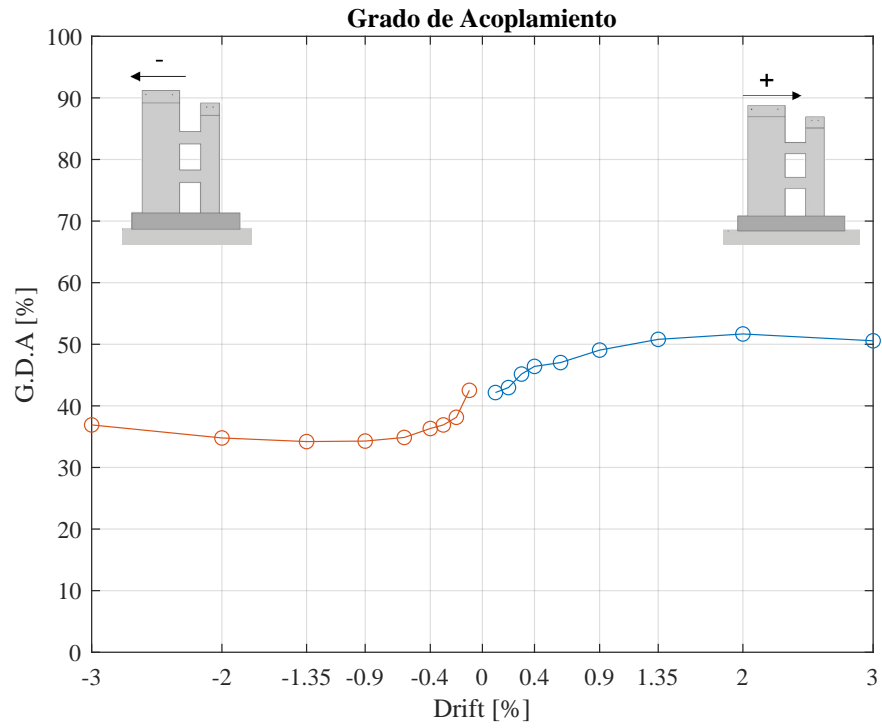
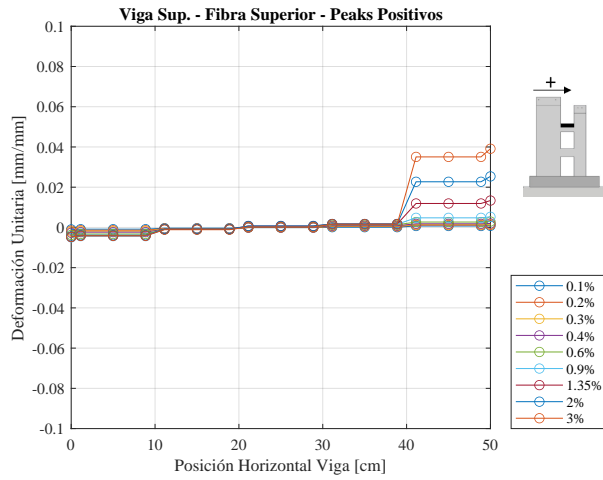
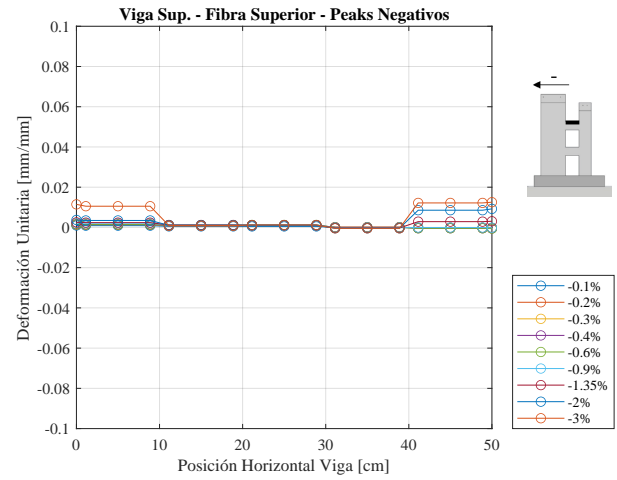


Figura E.7: Grado de Acoplamiento con Incorporación de Armadura Diagonal en Vigas de Acople

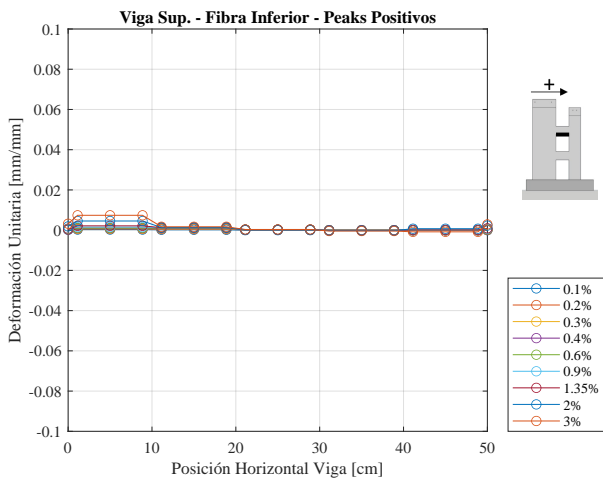
Deformación Axial en Vigas de Acople



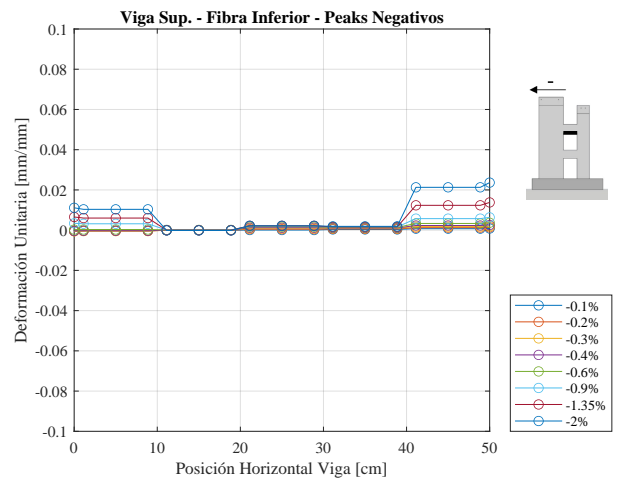
(a) Fibra Superior - Derivas Positivas



(b) Fibra Superior - Derivas Negativas

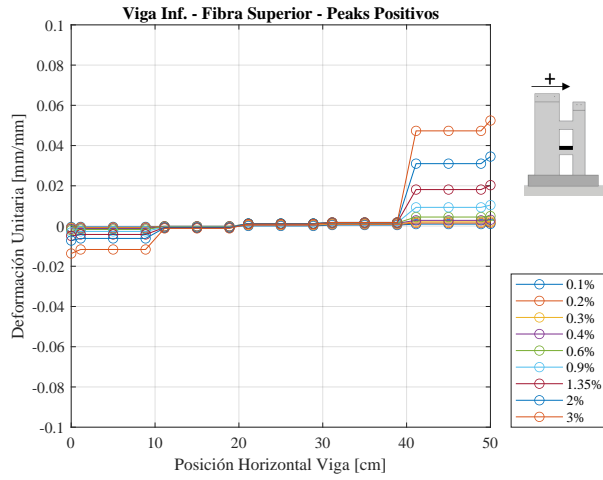


(c) Fibra Inferior - Derivas Positivas

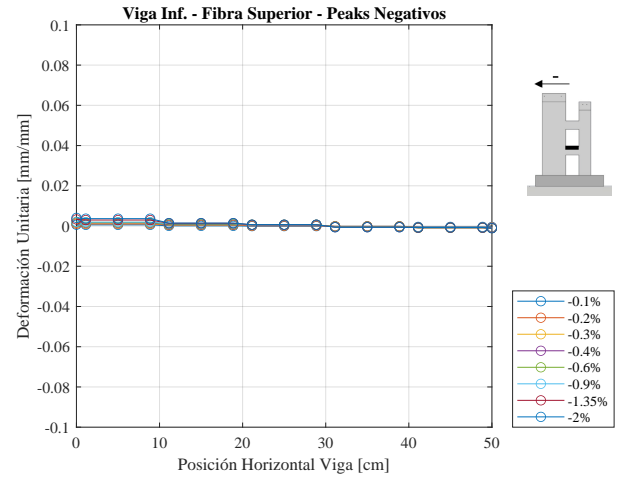


(d) Fibra Inferior - Derivas Negativas

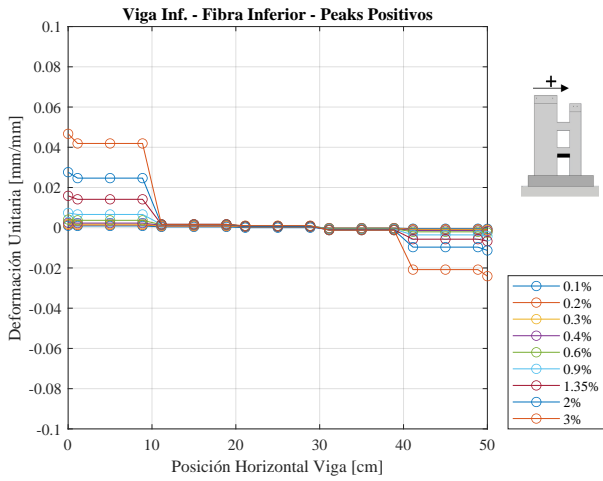
Figura E.8: Deformação Axial em Viga de Acople Superior com Incorporação de Armadura Diagonal



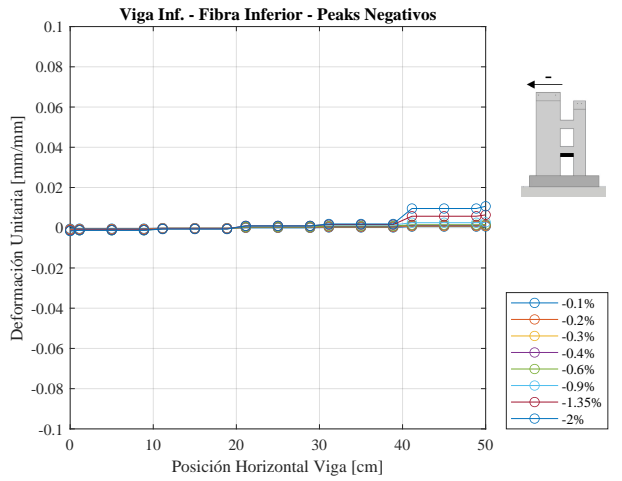
(a) Fibra Superior - Derivas Positivas



(b) Fibra Superior - Derivas Negativas



(c) Fibra Inferior - Derivas Positivas



(d) Fibra Inferior - Derivas Negativas

Figura E.9: Deformación Axial en Viga de Acople Inferior con Incorporación de Armadura Diagonal

Desp. Total, por Corte y Flexión en Vigas de Acople

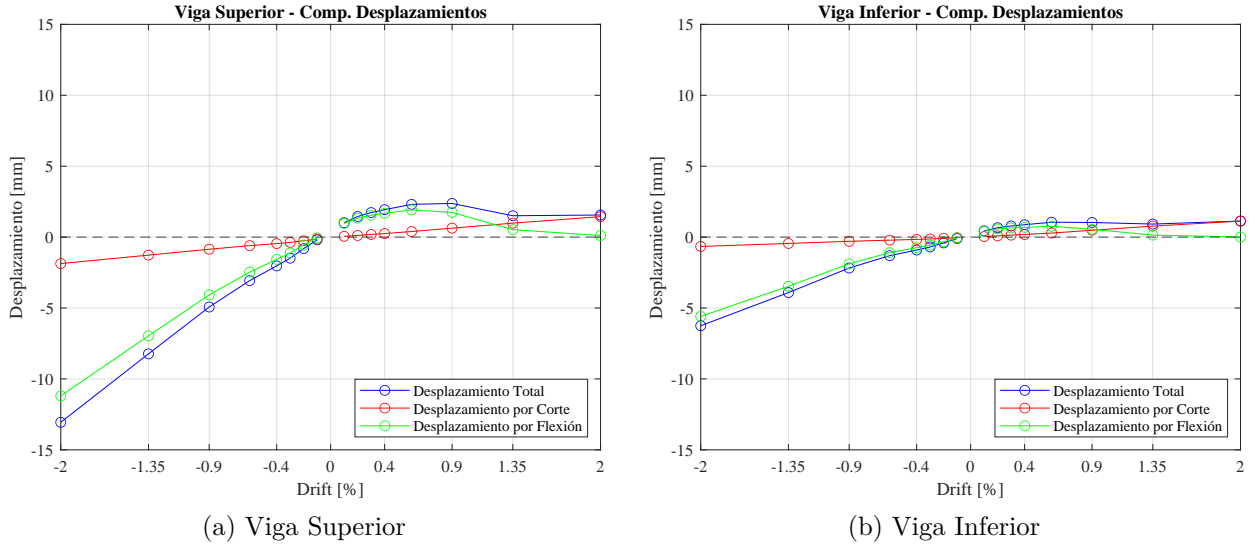


Figura E.10: Desp. Total, por Corte y Flexión en Vigas de Acople con Incorporación de Armadura Diagonal

E.3. Incorporación de Carga Axial sobre MR2

Histéresis

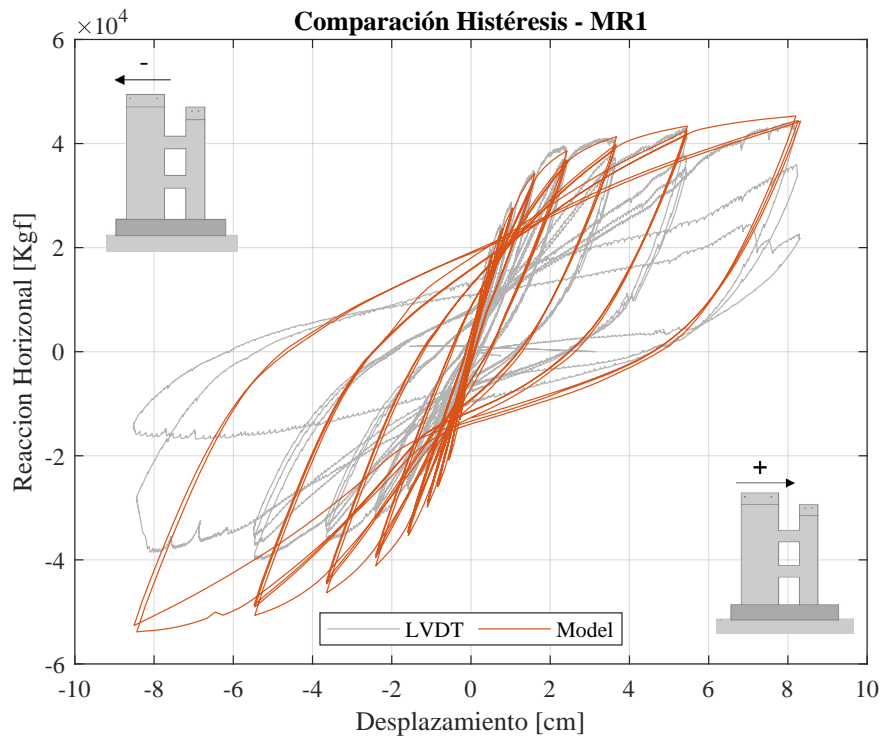


Figura E.11: Histéresis MR1 con Incorporación de Carga Axial sobre MR2

Esfuerzos Basales

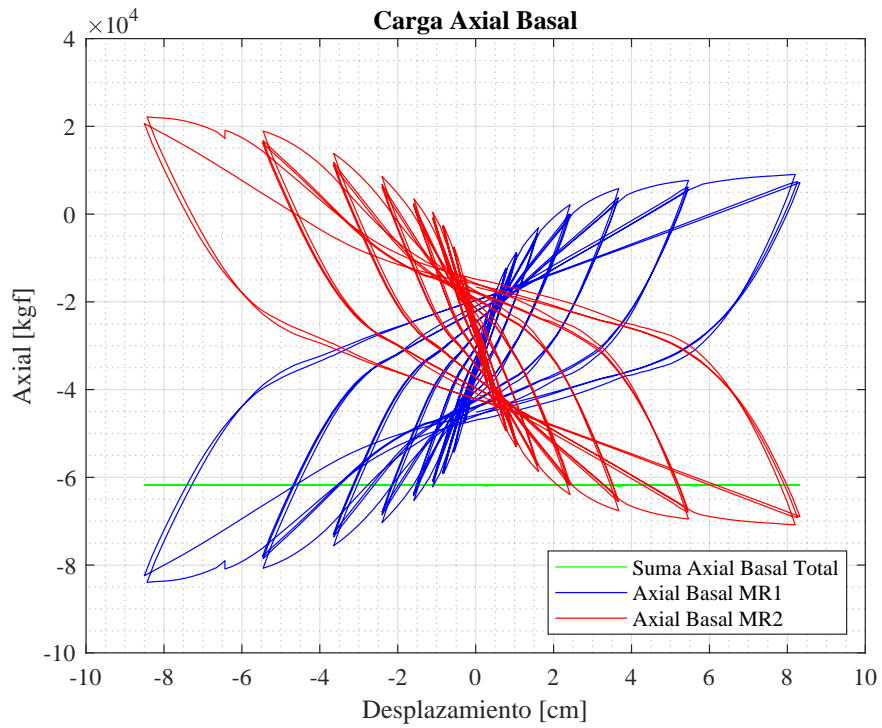


Figura E.12: Carga Axial Basal con Incorporación de Carga Axial sobre MR2

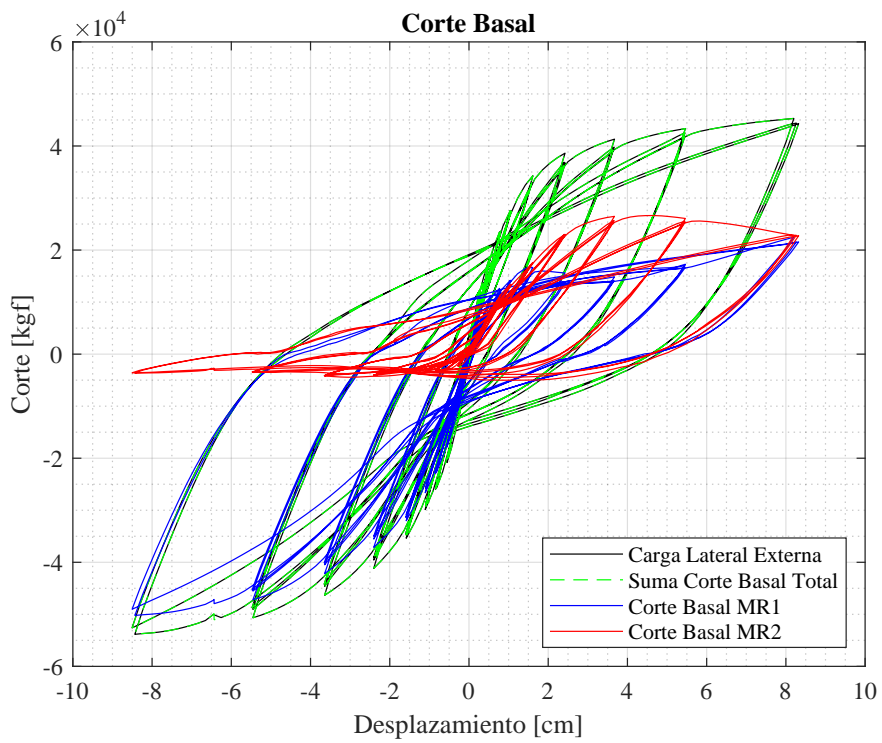


Figura E.13: Corte Basal con Incorporación de Carga Axial sobre MR2

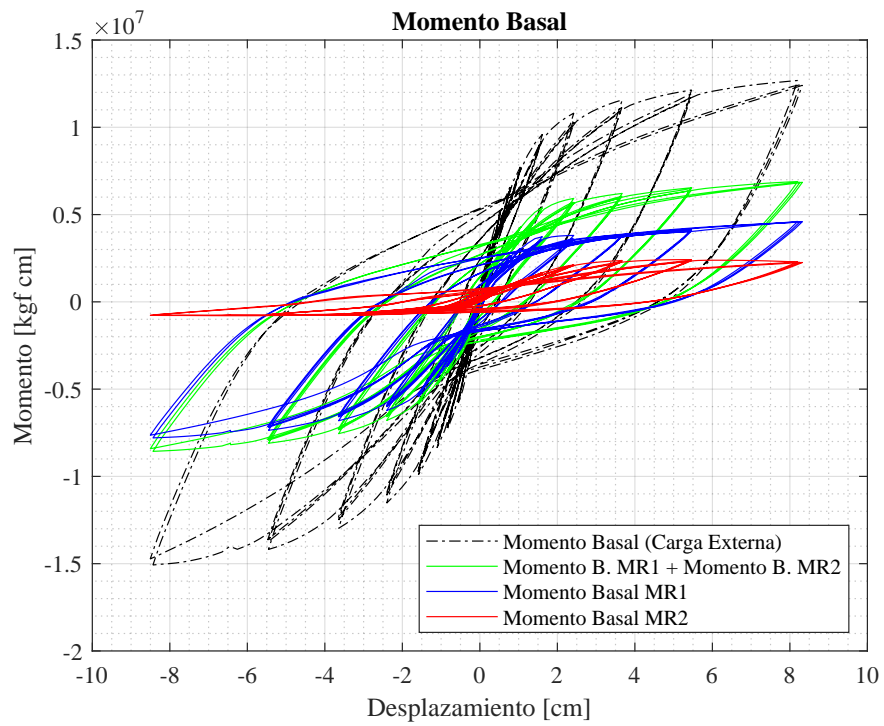


Figura E.14: Momento Basal con Incorporación de Carga Axial sobre MR2

Grado de Acoplamiento

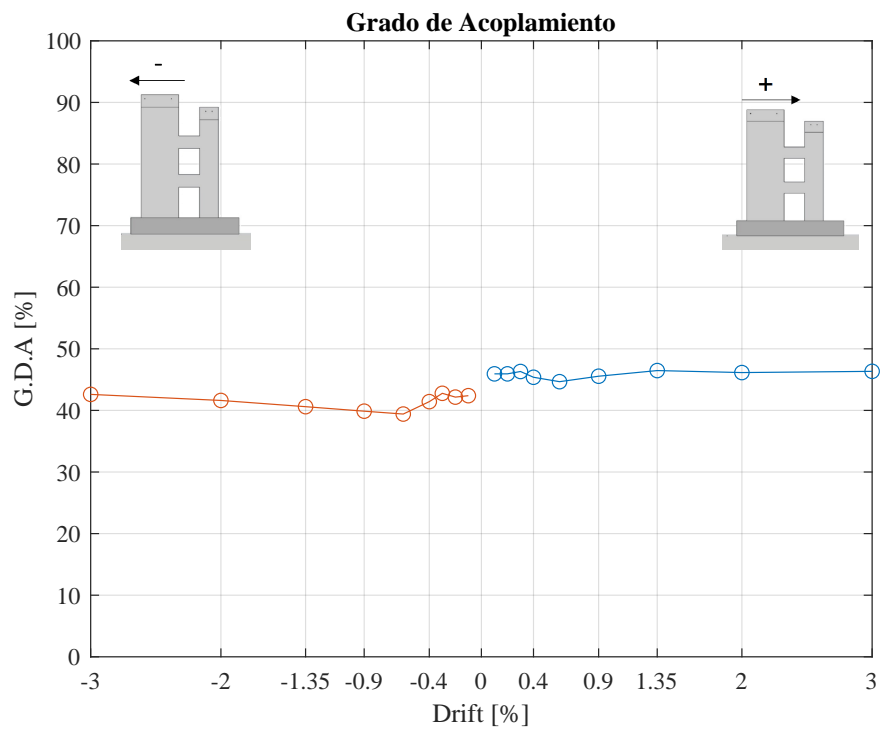
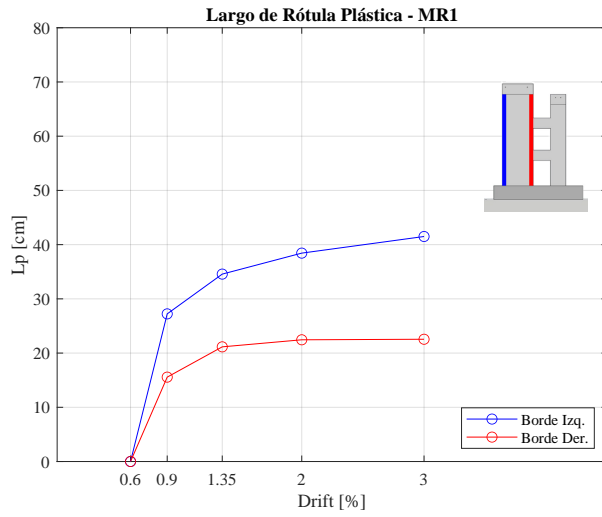
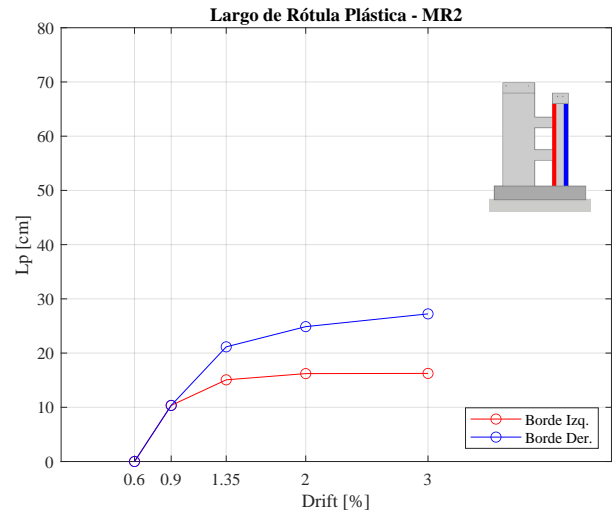


Figura E.15: Grado de Acoplamiento con Incorporación de Carga Axial sobre MR2

Rótula Plástica



(a) MR1



(b) MR2

Figura E.16: Rótula Plástica con Incorporación de Carga Axial sobre MR2