



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FORMACIÓN DE RÓTULA PLÁSTICA Y
ANÁLISIS DE DAÑO DE MUROS ACOPLADOS DE HORMIGÓN ARMADO
USANDO FOTOGRAMETRÍA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

KIMBERLIN ALEXANDRA BASTIAS ZAMORA

PROFESOR GUÍA
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
FABIÁN ROJAS BARRALES
AUGUSTO HOLMBERG FUENZALIDA

SANTIAGO DE CHILE
2018

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: KIMBERLIN ALEXANDRA BASTIAS
ZAMORA
FECHA: ABRIL DE 2018
PROFESOR GUÍA: LEONARDO MASSONE
SANCHEZ**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FORMACIÓN DE RÓTULA PLÁSTICA Y ANÁLISIS
DE DAÑO DE MUROS ACOPLADOS DE HORMIGÓN ARMADO USANDO
FOTOGRAMETRÍA**

En edificios altos de hormigón armado en regiones de moderada y alta sismicidad, los muros están interconectados por losas o vigas a nivel de piso que imponen compatibilidad de desplazamiento y afectan el comportamiento del sistema. Una de las principales ventajas de los muros acoplados es que éstos conforman un eficiente mecanismo estructural para resistir acciones sísmicas, y proporcionan mayor disipación de energía.

La compleja interacción entre vigas y muros no se considera en los métodos actuales de diseño. Se requiere establecer la real distribución de curvatura del sistema, longitud de rótula plástica y la capacidad de desplazamiento total, para poseer una mejor herramienta de detallamiento sísmico.

Existe una carencia de estudios experimentales sobre el efecto del acoplamiento. Este trabajo busca verificar las hipótesis de estudios analíticos de ciertos autores, a partir de cuatro ensayos *pushover* cíclicos cuasi-estáticos con desplazamiento controlado. Las probetas estudiadas corresponden a dos muros de distinto largo conectados mediante vigas, las cuales representan un eje estructural de pasillo de edificios de 16 y 25 pisos, con un factor de escala 35.

La adquisición de datos se realiza mediante fotogrametría, sensores de desplazamiento (LVDT) y una celda de carga. El montaje experimental contempla el uso de 5 cámaras réflex enfocando diferentes zonas de la probeta. Los resultados entregados en los perfiles de deformación vertical y curvatura en la altura del muro, muestran que se producen zonas plásticas en la base y a la altura de la ubicación de las vigas del primer y segundo piso, en el caso del muro corto. Además se obtiene que la longitud de rótula plástica aumenta con el desplazamiento de techo. Se propone un modelo de rótula plástica tradicional para la probeta de menor acoplamiento con $l_p^{eq} = 0.55l_w$. Para la probeta de mayor acoplamiento, se sugiere un modelo que diferencia el comportamiento entre los muros de distinto largo y se obtiene para el nivel 3,2% un $l_{p,base}^{equivalente} = 0,39l_w$ para el muro corto y $l_{p,base}^{equivalente} = 0,21l_w$ para el muro largo.

Al comparar las probetas, para un mayor grado de acoplamiento se obtiene que el muro más corto se ve mayormente afectado por la acción de las vigas.

El análisis de las deformaciones sufridas por las vigas de acople indica que la contribución del corte en el desplazamiento total de sus extremos, es mayor en las vigas inferiores, pero no supera el 11% para la probeta de mayor acoplamiento. Por lo tanto, el comportamiento es predominantemente a flexión y es aplicable el modelo convencional de rótula plástica. Se obtiene en promedio $l_p = 0,36h_{viga}$ para el nivel de deriva del 3,2%.

A mis padres por su apoyo incondicional,
y para impulsar el futuro de mi amado hijo.

Tabla de Contenido

Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivos específicos.....	2
1.3. Alcance y metodología.....	3
1.4. Estructura del informe	3
Capítulo 2 Revisión Bibliográfica.....	5
2.1. Muros acoplados de hormigón armado	5
2.1.1. Grado de Acoplamiento (DOC)	6
2.1.2. Vigas de acoplamiento	9
2.1.3. Efecto del acoplamiento en la respuesta del sistema.....	11
2.2. Curvatura última nominal.....	14
2.2.1. Componente elástica	17
2.2.2. Componente inelástica	19
2.3. Desplazamiento nominal de techo.....	19
2.4. Longitud de rótula plástica	22
2.5. Fotogrametría	23
2.6. Inestabilidad lateral de muros esbeltos.....	25
Capítulo 3 Programa experimental.....	30
3.1. Diseño y fabricación de probetas	30
3.2. Equipos utilizados	35
3.3. Instrumentación.....	41
3.3.1. Registro por fotogrametría	41
3.4. Esquema final del montaje experimental	47
3.5. Protocolo de carga.....	50
Capítulo 4 Resultados	52
4.1. Grado de acoplamiento de las probetas.....	52
4.2. Respuesta general de las probetas	52
4.3. Resultados por fotogrametría	64
4.3.1. Descripción del Software	64
4.3.2. Medidas de precisión.....	66
4.3.3. Comparación de desplazamientos entre fotogrametría y LVDT	71
4.4. Corrección del desplazamiento de techo	72
4.5. Perfiles de deformación vertical unitaria.....	74

4.5.1.	Inicio de fluencia en la base de los muros.....	75
4.5.2.	Zona plástica en la altura de los muros	82
4.6.	Perfiles de curvatura.....	94
4.7.	Comparación de $\Phi y \delta y$ con expresiones analíticas de la literatura.....	100
4.8.	Comparación de $\Phi y \delta y$ con modelo de fibras: Inga (2018).....	102
4.9.	Longitud de rótula plástica de los muros.....	103
4.10.	Comportamiento de vigas de acople	106
4.10.1.	Deformaciones de corte.....	118
4.10.2.	Longitud de rótula plástica de vigas.....	122
4.11.	Inestabilidad fuera del plano	127
Capítulo 5 Comentarios y Conclusiones		139
Capítulo 6 Bibliografía.....		143

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Valores de la constante k y exponentes a, b y c (Chaallal y otros 1996)	8
Tabla 3.1. Características del eje estructural real modelado	30
Tabla 3.2. Características geométricas de los especímenes	30
Tabla 3.3. Cuantía y armadura de las probetas.....	33
Tabla 3.4. Carga axial lograda para cada ensayo	40
Tabla 3.5. Parámetros considerados en el registro de imágenes	43
Tabla 3.6. Distancia focal [mm] considerada para los ensayos.....	43
Tabla 3.7. Desplazamiento nominal del protocolo de ensayo	50
Tabla 4.1. Grado de acoplamiento de las probetas analizadas	52
Tabla 4.2. Fecha de ensayo de cada probeta	53
Tabla 4.3. Carga máxima y mínima registrada por la celda, para cada probeta.....	53
Tabla 4.4. <i>DIC parameters</i> : Tamaño del subconjunto, espaciamiento y radio de deformaciones	64
Tabla 4.5. DIC parameters constantes para todos los ensayos	65
Tabla 4.6. Escala [mm/pixel] para cada configuración y probeta ensayada	67
Tabla 4.7. Datos estadísticos de error por montaje y procesamiento del software – Probeta 1	68
Tabla 4.8. Datos estadísticos de error por montaje y procesamiento del software – Probeta 2	69
Tabla 4.9. Datos estadísticos de error por montaje y procesamiento del software – Probeta 3	69
Tabla 4.10. Datos estadísticos de error por montaje y procesamiento del software – Probeta 4	70
Tabla 4.11. Máximo coeficiente de correlación para el análisis de error intrínseco (dos fotos en reposo)..	70
Tabla 4.12. Factor de correlación para desplazamiento de techo obtenido por LVDT y fotogrametría	71
Tabla 4.13. Desplazamiento de techo corregido para la Probeta 1 (Fotogrametría)	73
Tabla 4.14. Desplazamiento de techo corregido para la Probeta 1 (Fotogrametría)	73
Tabla 4.15. Distancia entre las fibras extremas de cada muro en estado de tracción y compresión teóricos	94
Tabla 4.16. Valores obtenidos de los ensayos de materiales.....	100
Tabla 4.17. Curvatura y desplazamiento de fluencia	100
Tabla 4.18. Error relativo promedio del cálculo de desplazamiento de techo experimental.....	106
Tabla 4.19. Relación de aspecto de las vigas de cada probeta analizada.	106
Tabla 4.20. Contribución del desplazamiento de corte en el desplazamiento total para cada nivel de la deriva [%], en sentido positivo – Probeta 3	119
Tabla 4.21. Contribución del desplazamiento de corte en el desplazamiento total para cada nivel de la deriva [%], en sentido positivo – Probeta 4	121
Tabla 4.22. Desplazamiento fuera-del-plano límite para la estabilidad lateral de muros (criterio P&P)...	127
Tabla 5.1. Resumen del modelo de longitud plástica de muros	141

Índice de Figuras

Figura 2.1. Mecanismo esperado en el diseño.....	5
Figura 2.2. Sistema de fuerzas en un muro acoplado	6
Figura 2.3. Perfil de momento de flexión para muros acoplados a) Momento volcante; b) Momento en las vigas de acople; c) Momento en los muros (Priestley y otros, 2007).....	6
Figura 2.4. Pushover de estructura de muros acoplados (Harries, 2001)	8
Figura 2.5. Grado de acoplamiento en función de las propiedades geométricas del sistema. a) según la altura de la viga; b) según la longitud del muro; c) según el largo de la viga (Chaallal y otros, 1996)	9
Figura 2.6. Modos de falla de vigas en sistema acoplado	10
Figura 2.7. Deformación y fuerzas dadas por comportamiento a flexión de vigas (Subedi,1991)	10
Figura 2.8. Demanda de ductilidad en las vigas versus el grado de acoplamiento (Harries, 2001)	11
Figura 2.9. Perfil de deformación para diferentes grados de acoplamiento (Chaallal y otros, 1996)	12
Figura 2.10. Modos de falla del sistema acoplado (Subedi, 1991).....	13
Figura 2.11. Modelo de rótula plástica de un muro (Massone y Alfaro, 2016)	14
Figura 2.12. Modelo del perfil de curvatura usado para predecir Φ_{max} del muro más esbelto W2 conectado al muro más largo W1 (Bohl y Adebar, 2011)	15
Figura 2.13. Aproximación bilineal del diagrama Momento-Curvatura. (Alfaro, 2013).....	17
Figura 2.14. Esquema explicativo de cálculo de curvatura de fluencia (Massone y Alfaro, 2016)	18
Figura 2.15. Modelo simplificado de muro completamente agrietado (Alfaro, 2013).....	19
Figura 2.16. Distribución de momento y rigidez a flexión en la altura para muros acoplados (Massone y Alfaro, 2016)	21
Figura 2.17. Principio de trabajo de la fotogrametría.....	23
Figura 2.18. Inestabilidad lateral de muros. (Tellen y otros, 2012)	26
Figura 2.19. Deriva impuesta en el plano versus el desplazamiento fuera-del-plano normalizado a la altura donde se alcanza el mayor desplazamiento fuera-del-plano, 755 [mm] (Rosso et al, 2016)	27
Figura 2.20. Perfil de desplazamiento fuera-del-plano normalizado del borde del alma, a lo largo de la altura del muro y entre ciclos de carga (Rosso et al, 2016).....	27
Figura 2.21. Perfil de máximo desplazamiento fuera-del-plano a lo largo de la longitud del muro (a 755[mm] de la fundación), entre ciclos de carga (Rosso et al, 2016)	28
Figura 2.22. Desplazamiento fuera-del-plano versus la deformación axial local calculada entre el par de marcadores indicados. (Rosso et al, 2016)	29
Figura 3.1. Probetas 1, 2, 3 y 4, respectivamente.....	31
Figura 3.2. Elevación de probeta.....	32
Figura 3.3. Sección transversal de viga y muros.....	33
Figura 3.4. Curva de esfuerzo-deformación de los tipos de acero utilizados.....	34
Figura 3.5. Curva de esfuerzo-deformación de probetas de hormigón.	34
Figura 3.6. Izq) Moldaje y armadura de probeta 3; Der) Probeta 3 hormigonada (Santos, 2018)	35
Figura 3.7. Mesa vibratoria unidireccional del laboratorio LEE.....	36
Figura 3.8. Estructura de soporte lateral. a) Vista lateral; b) Vista frontal; c) Vista en planta.....	37
Figura 3.9. Restricción lateral instalada	38
Figura 3.10. Bomba hidráulica.....	38
Figura 3.11. Celda de carga marca Revere Transducers	39
Figura 3.12. Vista en planta y elevación de estructura de soporte de pesos (Santos, 2018)	39
Figura 3.13. Detalle de soportes y pesos instalados	40
Figura 3.14. Distribución de pesos adicionales en la altura para la probeta 3	40
Figura 3.15. Esquema de sensores LVDT's utilizados para corregir el desplazamiento de techo.	41
Figura 3.16. Patrón de manchas utilizado para el timbre 10x5 [cm].....	42

Figura 3.17. Implementos utilizados para estampar sobre la superficie de hormigón	42
Figura 3.18. Cámara Canon EOS T6.....	43
Figura 3.19. Sistema de iluminación.....	44
Figura 3.20. Esquema en planta de la configuración de cámaras y focos LED	44
Figura 3.21. Configuración de focos y cámaras.....	45
Figura 3.22. Enfoque de cada una de las cámaras utilizadas en el ensayo del Muro 4	46
Figura 3.23. Equipos utilizados para transporte y montaje del muro.....	47
Figura 3.24. Esquema del funcionamiento del ensayo (Inga, 2018)	48
Figura 3.25. Montaje final del marco de restricción lateral y pesos sobre el muro.....	49
Figura 3.26. Conexión entre bomba hidráulica y actuador de la mesa vibratoria	49
Figura 3.27. Detalle de conexión entre celda-muro mediante sistema de pernos y placas de acero	50
Figura 3.28. Protocolo de desplazamiento para las probetas 2, 3 y 4.....	51
Figura 4.1. Curva de histéresis para la Probeta 1.	54
Figura 4.2. Imagen global de la probeta 1 al alcanzar el peak del desplazamiento de techo correspondiente al 6,0% nominal	55
Figura 4.3. Detalle de fisuras en la parte superior del muro y falla de dos vigas – Probeta 1.....	55
Figura 4.4. Curva de histéresis para la Probeta 2.	56
Figura 4.5. Imagen global de la probeta 2 al alcanzar el peak del desplazamiento de techo correspondiente al 8,0% nominal.	57
Figura 4.6. Detalle de fisuras – Probeta 2	58
Figura 4.7. Curva de histéresis para la Probeta 3	59
Figura 4.8. Imagen global de la probeta 3 al alcanzar el peak del desplazamiento de techo correspondiente al 8,0% nominal.	60
Figura 4.9. Detalle de fisuras – Probeta 3	60
Figura 4.10. Curva de histéresis para la Probeta 4.	61
Figura 4.11 Imagen global de la probeta 4 al alcanzar el peak del desplazamiento de techo correspondiente al 8,0% nominal.	62
Figura 4.12. Detalle de fisuras – Probeta 3	63
Figura 4.13. Flujo general de cómo se utiliza el programa.	65
Figura 4.14. Procedimiento para obtener la escala en Ncorr.....	66
Figura 4.15. Detección de imprecisiones debido a montaje y formulación para probeta 2.....	68
Figura 4.16. Detección de imprecisiones debido a montaje y formulación del software para probeta 2	68
Figura 4.17. Comparación de desplazamiento de techo entre LVDT y fotogrametría.....	71
Figura 4.18. Esquema explicativo de corrección del $\delta_{techo_corregido}$	72
Figura 4.19. Dos factores que producen pérdida de información.....	74
Figura 4.20. Deformación vertical unitaria de un punto traccionado en la base en función del desplazamiento de techo y según el sentido del movimiento – Probeta 1.	75
Figura 4.21. Evolución de la deformación vertical unitaria para la sección basal - Probeta 1.....	76
Figura 4.22. Deformación vertical unitaria de un punto traccionado en la base en función del desplazamiento de techo y según el sentido del movimiento – Probeta 2.	77
Figura 4.23. Evolución de la deformación vertical unitaria para la sección basal nominal - Probeta 2.....	78
Figura 4.24. Deformación vertical unitaria de un punto traccionado en la base en función del desplazamiento de techo y según el sentido del movimiento – Probeta 3.	79
Figura 4.25. Evolución de la deformación vertical unitaria para la sección basal nominal - Probeta 3.....	80
Figura 4.26. Deformación vertical unitaria de un punto traccionado en la base en función del desplazamiento de techo y según el sentido del movimiento – Probeta 4.	81
Figura 4.27. Evolución de la deformación vertical unitaria para la sección basal nominal - Probeta 4.....	81
Figura 4.28. Evolución de la deformación vertical unitaria (Probeta 1) en el sentido positivo del movimiento	83

Figura 4.29. Perfil de deformación vertical unitaria para el peak positivo - Probeta 1	83
Figura 4.30. Evolución de la deformación vertical unitaria (Probeta 1) en el sentido negativo del movimiento	84
Figura 4.31. Perfil de deformación vertical unitaria para el peak negativo - Probeta 1	84
Figura 4.32. Evolución de la deformación vertical unitaria (Probeta 2) en el sentido positivo del movimiento	86
Figura 4.33. Perfil de deformación vertical unitaria para el peak positivo - Probeta 2	86
Figura 4.34. Evolución de la deformación vertical unitaria (Probeta 2) en el sentido negativo del movimiento	87
Figura 4.35. Perfil de deformación vertical unitaria para el peak negativo - Probeta 2	87
Figura 4.36. Evolución de la deformación vertical unitaria (Probeta 3) en el sentido positivo del movimiento	89
Figura 4.37. Perfil de deformación vertical unitaria para el peak positivo - Probeta 3	89
Figura 4.38. Evolución de la deformación vertical unitaria (Probeta 3) en el sentido negativo del movimiento	90
Figura 4.39. Perfil de deformación vertical unitaria para el peak negativo - Probeta 3	90
Figura 4.40. Evolución de la deformación vertical unitaria (Probeta 4) en el sentido positivo del movimiento	92
Figura 4.41. Perfil de deformación vertical unitaria para el peak positivo - Probeta 4	92
Figura 4.42. Evolución de la deformación vertical unitaria (Probeta 4) en el sentido negativo del movimiento	93
Figura 4.43. Perfil de deformación vertical unitaria para el peak negativo - Probeta 4	93
Figura 4.44. Esquema explicativo de cálculo de curvatura	94
Figura 4.45. Perfil de curvatura en altura de la Probeta 1	95
Figura 4.46. Perfil de curvatura en altura de la Probeta 2	96
Figura 4.47. Perfil de curvatura en altura de la Probeta 3	97
Figura 4.48. Perfil de curvatura en altura de la Probeta 4	98
Figura 4.49. Perfil de curvatura registrada por cámara de enfoque global (Modificado de Manriquez, 2016)	99
Figura 4.50. Patrón de grietas de dos probetas tras la falla (Modificado de Dazio y otros, 2009).....	99
Figura 4.51. Curvatura de fluencia experimental y analítico.	101
Figura 4.52. Desplazamiento de fluencia experimental y analítico.....	102
Figura 4.53. Comparación de la curvatura y desplazamiento de fluencia con el modelo de fibras.	102
Figura 4.54. Modelo convencional de rótula plástica para la Probeta 1.....	103
Figura 4.55. Comparación del desplazamiento de techo real y calculado con modelo de rótula plástica – Probeta 1.....	104
Figura 4.56. a) Modelo de rótula plástica propuesto para Probeta 4; b) Calculo de desplazamiento de techo para el Modelo N°1.	105
Figura 4.57. Comparación del desplazamiento de techo real y calculado con modelo de rótula plástica – Probeta 4.....	105
Figura 4.58. Deformación por flexión según el sentido del movimiento.	106
Figura 4.59. Numeración de vigas analizadas. Izquierda) Probeta 3; Derecha) Probeta 4	107
Figura 4.60. Deformación axial de las vigas para el 1.6% nominal en sentido positivo - Probeta 3	108
Figura 4.61. Deformación axial de las vigas para el 1.6% nominal en sentido negativo - Probeta 3	109
Figura 4.62. Deformación axial de las fibras superior e inferior de la viga del 6to en sentido positivo – Probeta 3.....	110
Figura 4.63. Deformación axial de las fibras superior e inferior de la viga del 6to en sentido negativo – Probeta 3.....	111

Figura 4.64. Deformación axial de las fibras superior e inferior de las vigas del 6to, 4to y 2do piso en el sentido positivo – Probeta 3	112
Figura 4.65. Deformación axial de las fibras superior e inferior de las vigas del 6to, 4to y 2do piso en el sentido negativo – Probeta 3	112
Figura 4.66. Deformación axial en las vigas para la deriva de techo del 1,0% nominal, en sentido positivo del movimiento - Probeta 4	114
Figura 4.67. Deformación axial en las vigas para la deriva de techo del 1,0% nominal, en sentido negativo del movimiento - Probeta 4	115
Figura 4.68 Evolución de las deformaciones axiales de las fibras superior e inferior de la viga del 4to piso, en el sentido positivo del movimiento– Probeta 4	116
Figura 4.69. Evolución de las deformaciones axiales de las fibras superior e inferior de la viga del 4to piso, en el sentido negativo del movimiento– Probeta 4.....	116
Figura 4.70. Deformación axial de las fibras superior e inferior de las vigas del 6to, 4to y 2do piso en el sentido positivo – Probeta 4.....	116
Figura 4.71. Deformación axial de las fibras superior e inferior de las vigas del 6to, 4to y 2do piso en el sentido negativo – Probeta 4	117
Figura 4.72. Medición del desplazamiento entre los extremos de la viga.....	118
Figura 4.73. Deformaciones de corte promedio (ϵ_{xy}) a lo largo de la longitud de las vigas del 9°, 5° y 2° piso – Probeta 3.....	118
Figura 4.74. Deformaciones de corte promedio (ϵ_{xy}) a lo largo de la longitud de las vigas del 9°, 5° y 2° piso –en el sentido positivo del movimiento - Probeta 4	120
Figura 4.75. Deformaciones de corte promedio (ϵ_{xy}) a lo largo de la longitud de las vigas del 9°, 5° y 2° piso – en el sentido negativo del movimiento - Probeta 4.....	120
Figura 4.76. Modelo de rótula plástica para vigas con comportamiento dominado por flexión.	122
Figura 4.77. Perfil de curvatura a lo largo de la longitud de la viga del 6to piso – Probeta 3	123
Figura 4.78. Variación de la longitud plástica de la viga del 4to piso– Probeta 3	124
Figura 4.79. Perfil de curvatura a lo largo de la longitud del 4to piso– Probeta 4.....	125
Figura 4.80. Variación de la longitud plástica - Viga izquierda 4to piso – Probeta 4.....	126
Figura 4.81. Variación de la longitud plástica - Viga derecha 4to piso – Probeta 4	126
Figura 4.82. Registro de fotografías de la cara lateral del muro derecho - Probeta 1	128
Figura 4.83. Evolución del desplazamiento fuera del plano.– Probeta 1	128
Figura 4.84. Deformación axial y transversal promedio medido en la cara lateral del muro derecho (de mayor longitud) en función del desplazamiento de techo – Probeta 1	129
Figura 4.85. Desplazamiento fuera del plano en función de la deriva de techo [%]– Probeta 1	129
Figura 4.86. Registro de fotografías de la cara lateral del muro derecho - Probeta 2	130
Figura 4.87. Evolución del desplazamiento fuera del plano.– Probeta 2	131
Figura 4.88. Deformación axial y transversal promedio medido en la cara lateral – Probeta 2.....	131
Figura 4.89. Desplazamiento fuera del plano en función de la deriva de techo [%]– Probeta 2.....	132
Figura 4.90. Registro de fotografías de la cara lateral del muro derecho - Probeta 3	133
Figura 4.91. Evolución del desplazamiento fuera del plano– Probeta 3	133
Figura 4.92. Deformación axial y transversal promedio medido en la cara lateral – Probeta 3.....	134
Figura 4.93. Desplazamiento fuera del plano en función de la deriva de techo [%]– Probeta 3.....	134
Figura 4.94. Registro de fotografías de la cara lateral del muro derecho - Probeta 4	136
Figura 4.95. Evolución del desplazamiento fuera del plano.– Probeta 4	137
Figura 4.96. Deformación axial y transversal promedio medido en la cara lateral– Probeta 4.....	137
Figura 4.97. Desplazamiento fuera del plano en función de la deriva de techo [%]– Probeta 4.....	138

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Edificios altos de hormigón armado en regiones de moderada y alta sismicidad son frecuentemente soportados por muros esbeltos. Estos son detallados en base al diseño sísmico por fuerzas (o capacidad), y por tanto en base a aceleraciones, y sólo se verifican los desplazamientos máximos o derivas límites. Más aún, éstas fuerzas se determinan a partir de un análisis elástico y se distribuyen en función de la rigidez elástica inicial de los muros. Sólo se introduce la ductilidad por tipo de estructura a partir de los factores de reducción de la respuesta. De esta forma, la principal característica de una estructura bajo este método, está dada por la resistencia.

Sin embargo, son los desplazamientos o deformaciones los que se relacionan directamente con el daño potencial que sufre una estructura bajo una acción sísmica. Nace entonces el procedimiento llamado “Direct Displacement Based Design” (DDBD) cuya principal filosofía es que las estructuras deben ser diseñadas para alcanzar un nivel de desempeño específico, definido por deformaciones o derivas de techo límites, bajo un nivel específico de intensidad sísmica (Priestley y otros, 2007) Dicho en otras palabras, la capacidad de desplazamiento de la estructura debe ser mayor a la demanda.

En el caso de los muros esbeltos, éstos son comúnmente controlados por deformaciones por flexión, la cual tiene dos componentes: elástica e inelástica. Es importante establecer un modelo simple y preciso para la estimación de esta capacidad de desplazamiento que considere en lo posible todas las variables, y pueda utilizarse en el diseño.

Para estimar la porción plástica de la capacidad de desplazamiento, se utiliza el modelo simple de rótula plástica. En este se considera que la concentración de curvatura inelástica en la base del muro es uniforme a lo largo de una altura llamada longitud de rótula plástica (l_p). Entonces es necesario el cálculo de estas dos variables: Φ_u y l_p .

Dentro de los parámetros considerados en diversos estudios analíticos se pueden mencionar, por ejemplo, el diámetro de la armadura, la resistencia a la fluencia del acero, el *shear span* (distancia entre el máximo y nulo momento de flexión) y la altura útil para el caso de una viga; mientras que para muros de hormigón armado se consideran la altura y longitud del muro (Bohl y Adebar, 2011), cuantía de refuerzo de borde y carga axial (Massone y Alfaro, 2016) y últimamente de gran importancia, el acoplamiento de muros.

En edificios altos, los muros están interconectados o acoplados por losas o vigas a nivel de piso que imponen compatibilidad de desplazamientos. El comportamiento de este sistema estructural depende del grado de acoplamiento y el funcionamiento en la falla de los elementos de acople.

Esta compleja interacción afecta la distribución de curvatura del sistema, y por tanto la longitud de rótula plástica y el desplazamiento total. Sin embargo, esto no se considera en los métodos actuales de diseño. Generalmente los muros se modelan como cantiléver, y la fuerza lateral se distribuye a los muros en proporción a su rigidez elástica según la hipótesis de que todos los muros están sujetos a la misma demanda de ductilidad de desplazamiento. Es decir, se asume que los muros más cortos son capaces de fluir al mismo nivel de desplazamiento que el muro más largo (Priestley y otros, pp. 23)

Una de las principales ventajas de los muros acoplados de hormigón armado, es que éstos conforman un eficiente mecanismo estructural para resistir acciones sísmicas. Dado que se prevé que las rótulas plásticas se formen no sólo en la base del muro sino también en los extremos de las vigas, la disipación de energía se distribuye en una región mayor. Por tanto, se tendrá un mayor amortiguamiento histérico equivalente que el de un sistema convencional (Priestley y otros, 2007, pp. 372)

La importancia de establecer la real variación de la curvatura plástica en la altura, considerando la interacción de muros de diferente largo conectados mediante losas o vigas de acople, radica en poseer una mejor herramienta que permita decidir donde proveer especial detallamiento sísmico.

Existen estudios numéricos basados en elementos finitos que incluyen el efecto del acoplamiento en el cálculo del desplazamiento máximo y curvatura última, pero muy pocos son de carácter experimental y ninguno en Chile. Por lo tanto, existe una carencia en la investigación de la respuesta de este sistema para incluir su efecto en las normas de diseño.

Este trabajo representa una parte de un proyecto que busca caracterizar el comportamiento de muros acoplados de hormigón armado. Más específicamente, se pretende estimar las deformaciones a tracción, la distribución de curvatura y longitud de rótula plástica, con el objetivo de desarrollar herramientas de diseño que optimicen el detallamiento estructural.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de título es estimar de forma experimental utilizando correlación digital de imágenes, el efecto del acoplamiento de muros de hormigón armado en la distribución de curvatura, longitud de rótula plástica y patrón de daño. Los modelos son sometidos a ensayos *pushover* con desplazamientos cíclicos controlados.

1.2.1. Objetivos específicos

- Proponer un montaje experimental para realizar ensayos “*pushover* cíclico” con desplazamiento controlado, utilizando la mesa vibratoria unidireccional.
- Ejecutar ensayos experimentales bajo la metodología de “*pushover* cíclico”, con registro de fotogrametría, a 4 probetas que modelan muros de distinto largo conectados por vigas de acople.

Los puntos anteriores se realizan en conjunto con Inga (2018)

- Utilizando Correlación Digital de Imágenes (DIC), identificar la tendencia del campo de deformaciones de las diferentes probetas analizadas.
- Identificar el inicio de rótula plástica, es decir, determinar la curvatura de fluencia y el desplazamiento de techo asociado de cada probeta.
- Evaluar el efecto del acoplamiento en la distribución de curvatura de los muros de distinto largo.
- Comparar resultados experimentales con expresiones numéricas de otros autores, y modelo de fibras desarrollado por Inga (2018).

1.3. Alcance y metodología

El trabajo se agrupa en tres núcleos principales. En primer lugar, se prepara el montaje experimental para realizar los ensayos *pushover* cíclicos (cuasi-estáticos) con desplazamiento controlado. Las probetas fueron escaladas para ser probadas en la mesa unidireccional del departamento de Ingeniería Civil. De esta forma, el movimiento se efectúa en la base del muro y se fija la estructura a 2/3 de la altura mediante la instalación de un puntal de acero, lo que resulta en un *pushover* “al revés” o “inverso” del tradicional. Además, se propone una configuración para el registro de fotogrametría.

Las 4 probetas estudiadas corresponden a un modelo escala de un eje longitudinal de planta típico de la construcción chilena. Una de ellas corresponde al caso base, y con las demás se pretende examinar modificaciones específicas. La probeta base corresponde a la Probeta 2 y modela un eje de muros de distinto largo de un edificio de 26 pisos; la probeta 1 representa el mismo eje pero de un edificio de 15 pisos; con la probeta 3 se busca analizar el efecto de acoplar un muro más esbelto; y la probeta 4 presenta una columna central en los pisos superiores que no llega a la fundación.

Sin embargo, las limitaciones del montaje imponen un gran factor de escala (35) y no permiten instalar los suficientes pesos adicionales para reproducir grandes cargas, alcanzando una carga axial promedio de $2\% f'_c A_g$. Cabe mencionar además que, se escalaron las propiedades principales de los muros, a excepción del espesor, resultando en una baja esbeltez de la sección transversal.

Se obtienen grados de acoplamiento de las estructuras desde el 48-68 [%], altos valores no esperados en la práctica chilena.

El segundo foco de estudio es el procesamiento de las imágenes obtenidas en los ensayos. La correlación se realiza con el software Ncorr, el cual han utilizado previos memoristas en el estudio de hormigón armado y presenta resultados con adecuada precisión. En esta etapa se seleccionan los parámetros adecuados para cada configuración de las cámaras y se obtienen las escalas correspondientes que permiten la entrega de resultados en términos de campo de desplazamientos y deformaciones.

Finalmente, el trabajo se enfoca en la comparación de los resultados experimentales con los analíticos, obtenidos tanto de expresiones propuestas por distintos autores como del modelo de fibras realizado por Inga (2018).

1.4. Estructura del informe

Capítulo 2: Revisión bibliográfica

En esta sección se introduce la teoría que delimita el estudio de muros acoplados de hormigón armado. Se expone el aporte de varios autores en la definición de expresiones de cálculo que luego se comparan con los resultados obtenidos en este trabajo.

Capítulo 3: Construcción, montaje y ensayos

Se presentan las características finales de las probetas ensayadas, diseño del montaje experimental y equipos utilizados. Además, se explica la metodología para el registro de fotogrametría.

Capítulo 4: Resultados

En primer lugar, se comenta el comportamiento que tuvo cada probeta durante el ensayo. Seguidamente, se presenta el nivel de precisión obtenido por fotogrametría y se compara con los registros de LVDT's para grandes desplazamientos. Luego se presentan los resultados de perfiles de deformación vertical unitaria para las fibras extremas y para distintas secciones en la altura del muro, además de los perfiles de curvatura. A continuación, se entregan los perfiles de deformación axial de las fibras superior e inferior de las vigas de acople. Posteriormente, se comparan los resultados experimentales con las expresiones propuestas por la literatura. Finalmente, se verifica la estabilidad fuera del plano para los ensayos.

Capítulo 5: Comentarios y conclusiones

Se resumen y analizan los resultados obtenidos y se presentan las conclusiones finales del trabajo realizado.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

En esta sección se entrega la información reunida de la literatura, necesaria para comprender el comportamiento del sistema acoplado.

Primeramente, se exponen los conceptos de muro acoplado, vigas de acople y grado de acoplamiento.

Seguidamente, se presentan diferentes estudios sobre el efecto del acoplamiento en las variables del diseño sísmico de edificios, específicamente, en la curvatura última nominal, desplazamiento de techo y el modelo de rótula plástica.

Luego, con el objetivo de comprender el método de adquisición de datos experimentales utilizado en este trabajo, se define la correlación digital de imágenes o fotogrametría y se explica el método utilizado por el software escogido.

Debido a que se estudia experimentalmente el movimiento unidireccional de las probetas, se debe restringir el movimiento fuera de su plano. Para evaluar la efectividad del marco de acero instalado, se introduce el concepto de inestabilidad lateral de muros.

2.1. Muros acoplados de hormigón armado

En edificios altos de hormigón armado, los muros están interconectados por losas de piso que imponen compatibilidad de desplazamiento en ese nivel.

Los muros acoplados de hormigón armado forman un eficiente mecanismo estructural para resistir las fuerzas laterales producidas por sismos. Debido a que se prevé la formación de rótulas plásticas no sólo en la base de los muros, sino también en ambos extremos de las vigas de acople, la disipación de energía es distribuida sobre una mayor región de la estructura. Lo anterior resulta en un amortiguamiento viscoso equivalente mayor que en el caso de muros aislados en cantiléver. (Priestley y otros, 2007)

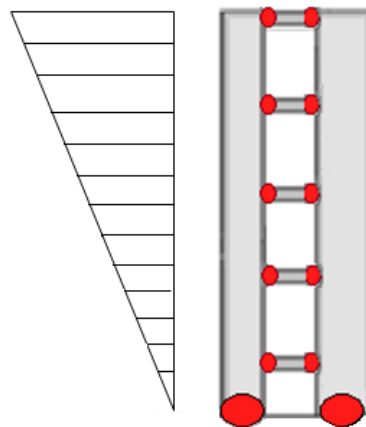


Figura 2.1. Mecanismo esperado en el diseño

El desempeño del sistema depende del grado de interacción y el comportamiento de las vigas de acople. Para comprender el comportamiento del sistema, es necesario estudiar primeramente el funcionamiento de sus componentes, los cuales tendrán diferentes demandas de ductilidad.

2.1.1. Grado de Acoplamiento (DOC)

Las fuerzas laterales impuestas al sistema acoplado serán resistidas por dos mecanismos. En el primero, se desarrollan momentos de flexión en las vigas de acople que inducen fuerzas axiales en los muros, que se transformarán en un par de fuerzas en los ejes centroidales de estos, cuya función es resistir parte del momento volcante. En el segundo, los muros individualmente resisten parte del momento basal por flexión.

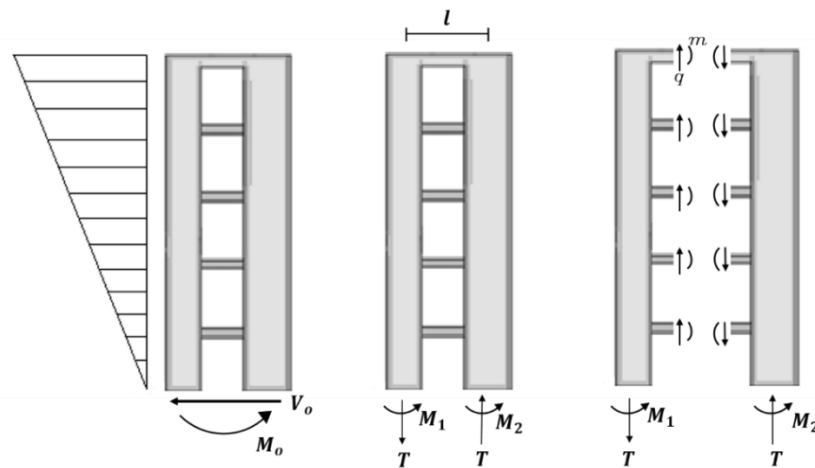


Figura 2.2. Sistema de fuerzas en un muro acoplado

En la Figura 2.3 se muestran las componentes del momento ante una excitación sísmica. En a) se presenta el momento volcante total (M_{OTM}); en b) se muestra el perfil del momento resistente aportado por las vigas (M_{CB}); y en c) la suma de los momentos resistidos por los dos muros (M_W).

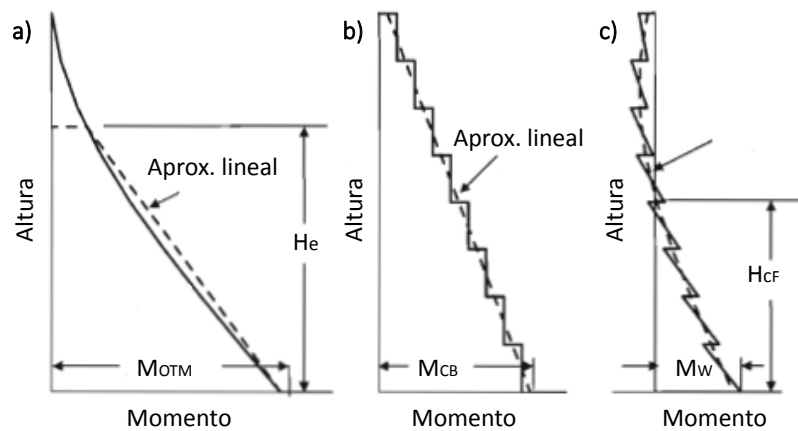


Figura 2.3. Perfil de momento de flexión para muros acoplados

a) Momento volcante; b) Momento en las vigas de acople; c) Momento en los muros (Priestley y otros, 2007)

Ambos mecanismos quedan expresados en la ecuación I

$$M_o = M_1 + M_2 + l \cdot T \quad (I)$$

El grado de acoplamiento se define como el porcentaje del momento total basal transferido a través del par tracción-compresión, o también llamado momento de acoplamiento. Se obtiene según la siguiente expresión (Paulay, 2002)

$$\beta = \frac{l \cdot T}{M_o} \quad (II)$$

La carga axial T es la suma de las fuerzas de corte transferidas por las vigas de acople. La distancia entre los ejes centroidales de los dos muros se considera como el brazo palanca.

Al aumentar el grado de acoplamiento, es decir, mientras más rígidas sean las vigas, el sistema se comportará como un muro cantiléver con perforaciones, limitando de esta manera la disipación de energía solo a la rótula plástica en la base del muro. Si al contrario estas son más flexibles, el sistema se comportará como dos muros aislados.

Alfaro (2013) determinó a partir de su estudio paramétrico que al aumentar la carga axial se genera una mayor rigidez en los muros, lo que se traduce en una disminución del acoplamiento del sistema; el aumento en la longitud de los muros (manteniendo un sistema simétrico) lleva un incremento en su rigidez, por lo tanto, disminuye el grado de acoplamiento. Lo mismo ocurre al aumentar la cuantía de borde. Los sistemas de muros con mayor altura (mayor cantidad de pisos) son más flexibles de modo que aumenta el grado de acoplamiento del sistema

Harries (2001) explica que el grado de acoplamiento inelástico real observado en estructuras será típicamente menor que el valor teórico. Esto debido a que se ve afectado por inelasticidades locales en la interfaz viga-muro, redistribución de fuerzas entre las vigas de acople y del muro a tracción al muro en compresión, además del endurecimiento del acero.

El autor además señala que el DOC varía según el instante de tiempo en que se evalúan las fuerzas resistentes. En la Figura 2.4 se presenta la curva *pushover* de una estructura de muros acoplados y la variación del DOC en función de la deflexión. Inicialmente, se tendrá el mayor grado de acoplamiento para la estructura no cargada. A medida que aumenta la carga, la estructura se fisurará y se reducirá en mayor medida la rigidez de las vigas que de los muros, por tanto, se tendrá un menor grado de acoplamiento. Asumiendo que tanto los muros como las vigas pueden mantener su capacidad de resistir la carga, el DOC final se obtendrá cuando ambos muros fluyan.

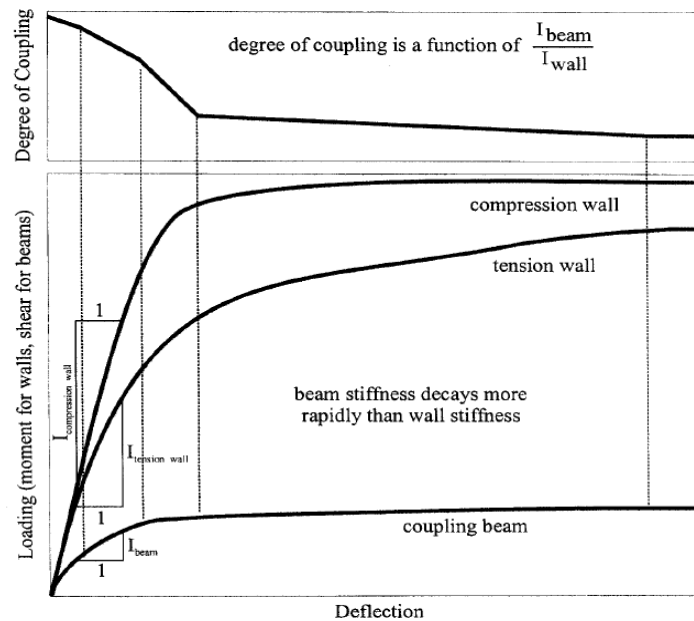


Figura 2.4. Pushover de estructura de muros acoplados (Harries, 2001)

Sin embargo, postula además que este parámetro por sí solo no es siempre un buen predictor del comportamiento del sistema acoplado. Establece la necesidad de incluir la esbeltez del muro y la rigidez relativa entre muros y vigas para calificar adecuadamente la respuesta.

Por otro lado, Chaallal y otros (1996) proponen una ecuación simplificada para determinar el grado de acoplamiento del sistema sin la necesidad de realizar el análisis estructural para calcular M_1 , M_2 y T . El estudio se basa en una correlación de regresión estadística entre el grado de acoplamiento t las propiedades geométricas de los muros acoplados:

$$DOC = k \cdot \frac{d^a}{l_w^b \cdot l^c} \quad (\text{III})$$

Donde d y l son la altura y largo de la viga de acople, respectivamente y l_w es la longitud del muro.

 Tabla 2.1. Valores de la constante k y exponentes a , b y c (Chaallal y otros 1996)

Number of stories n (1)	k (2)	a (3)	b (4)	c (5)
6	2.976	0.706	0.615	0.698
10	2.342	0.512	0.462	0.509
15	1.697	0.352	0.345	0.279
20	1.463	0.265	0.281	0.190
30	1.295	0.193	0.223	0.106
40	1.190	0.145	0.188	0.059

La ecuación III puede usarse de dos formas: para evaluar rápidamente el grado de acoplamiento de un sistema sin realizar el análisis estructural, o para encontrar una o más propiedades geométricas para un anhelado DOC. Además, la expresión puede modificarse para utilizar los momentos de inercia de la sección fisurada $I_e = \gamma_{b,w} \cdot I_g$, donde el subíndice w indica muro y b corresponde a viga. Como los autores utilizaron $\gamma_{b,w} = 0,6$, la ecuación III queda:

$$DOC = \frac{(\gamma_b/0,6)^{a/3}}{(\gamma_w/0,6)^{b/3}} \cdot k \cdot \frac{d^a}{l_w^b \cdot l^c} \quad (IV)$$

Para propiedades geométricas fijas de la viga de acople, y para determinado número de pisos, el grado de acoplamiento disminuye al aumentar la longitud de los muros; y para un largo de muro fijo, el grado de acoplamiento aumenta con la cantidad de pisos.

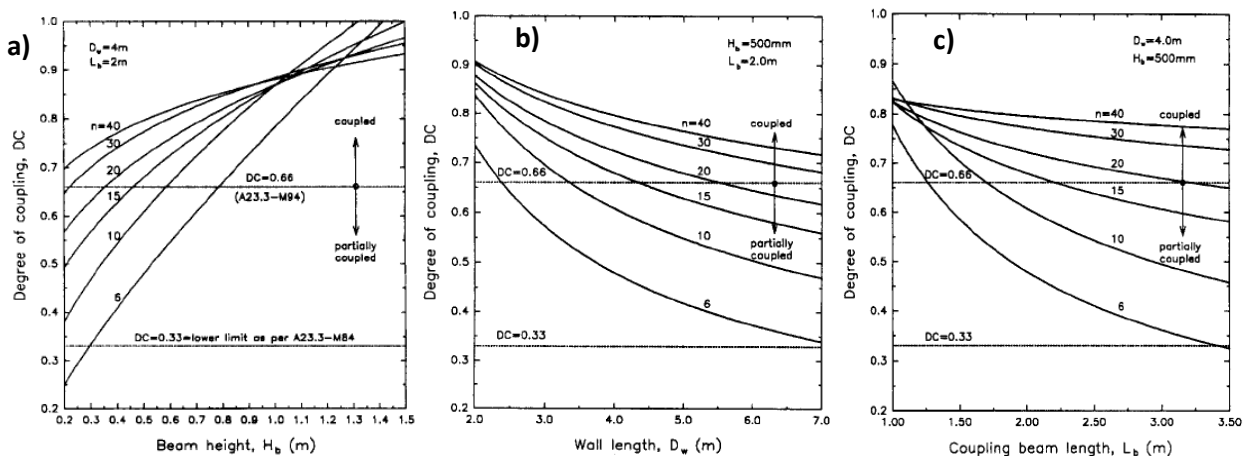


Figura 2.5. Grado de acoplamiento en función de las propiedades geométricas del sistema.
a) según la altura de la viga; b) según la longitud del muro; c) según el largo de la viga (Chaallal y otros, 1996)

Sin embargo, la ecuación propuesta no es aplicable a las probetas analizadas en este trabajo porque el autor se basa en un estudio estadístico de edificios reales. Debido a limitaciones de construcción y montaje, no todas las dimensiones del modelo están escaladas de igual manera.

2.1.2. Vigas de acoplamiento

Las vigas de acoplamiento (*coupling beams*) modifican la respuesta estructural del sistema. Por un lado, permiten una transferencia de fuerzas horizontales y verticales entre los muros, y por otro, reducen los desplazamientos de la estructura.

El comportamiento de las vigas depende de su geometría (L/h) y de la resistencia aportada por sus materiales (acero y hormigón).

Al solicitar al sistema mediante una fuerza lateral, cada viga sufrirá un movimiento diferencial entre sus extremos, provocando una combinación de deformaciones por flexión y corte. La deformación por flexión se caracteriza por una doble curvatura, cuyo punto de inflexión se ubica en el centro de la luz, y por la formación de grietas en los extremos. Por otro lado, la deformación por corte puro se identifica por la extensión de una grieta diagonal que se origina en el centro del vano.

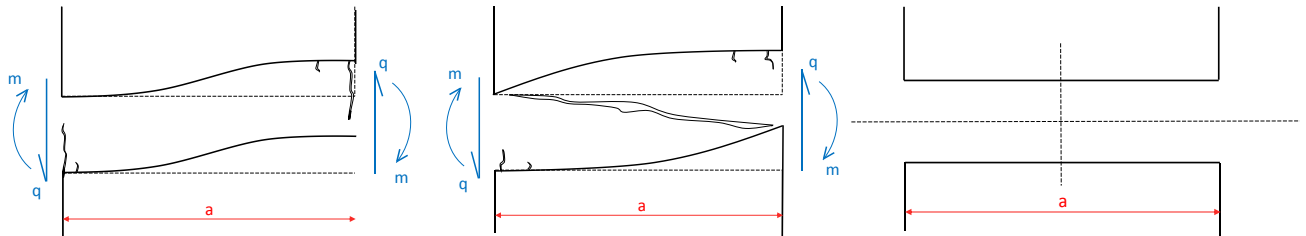


Figura 2.6. Modos de falla de vigas en sistema acoplado
a) falla a flexión; b) falla a corte; c) comportamiento rígido

Las fuerzas de corte en las vigas de acople se transferirán a los muros como una variación de carga axial. Esta fuerza de corte puede calcularse con la ecuación propuesta por Subedi (1991) que supone un comportamiento dominado por flexión:

$$P_u = \frac{2h'}{a} A_{st} f_y \quad (V)$$

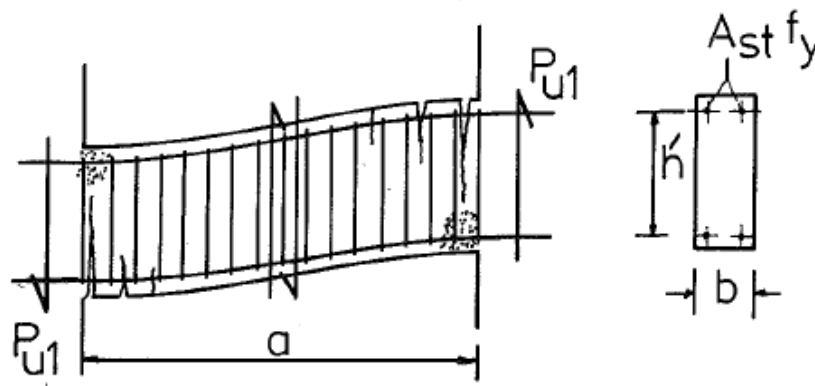
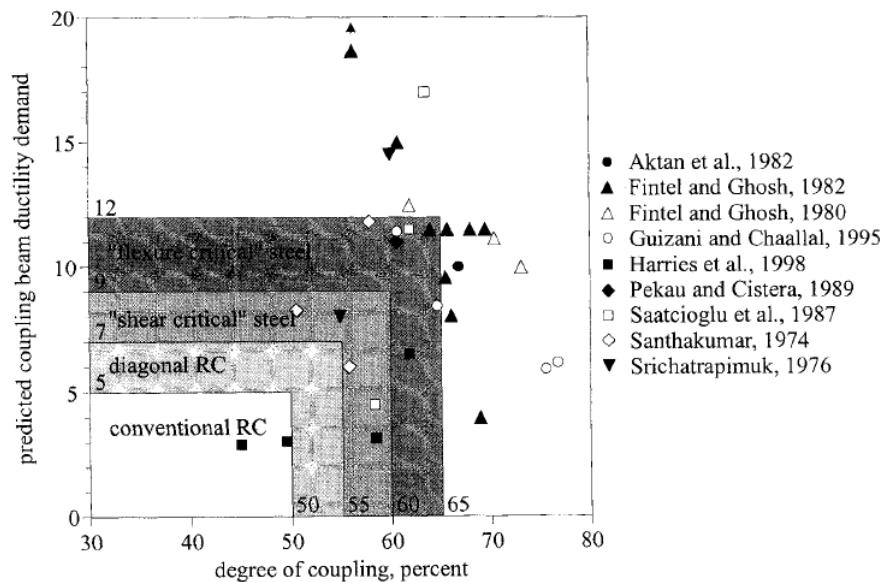


Figura 2.7. Deformación y fuerzas dadas por comportamiento a flexión de vigas (Subedi, 1991)

Harries (2001) establece que para que el sistema acoplado desarrolle el comportamiento óptimo mostrado en la Figura 2.1, las vigas deben ser lo suficientemente resistentes y rígidas. Además, deben fluir antes que los muros, tener un comportamiento dúctil y poseer características de absorción de energía adecuadas.

El autor resume varios estudios experimentales sobre vigas de acople, y concluye que los niveles de ductilidad alcanzados por vigas con refuerzo convencional son proporcionales a la relación de aspecto (“span to depth”), L/h . Así, vigas más largas son más capaces de desarrollar rótulas plásticas dúctiles porque el corte transmitido a través de éstas es proporcionalmente menor. Sin embargo, los niveles de ductilidad más altos se alcanzan con vigas con refuerzo diagonal, y que no depende del radio de aspecto.

Finalmente, propone límites prácticos para el grado de acoplamiento dependiendo del tipo de refuerzo suministrado en las vigas (ver Figura 2.8).



2.1.3. Efecto del acoplamiento en la respuesta del sistema

El desempeño del sistema depende de la interacción y comportamiento de las vigas de acople, por lo tanto, su clasificación depende del grado de acoplamiento. Por ejemplo, el National Building Code of Canada (NRCC) de 1995 diferencia entre muros parcialmente acoplados, a aquellos con un grado de acoplamiento menor a 66%, y muros totalmente acoplados con DOC mayor al 66%. Además, les asigna un factor de reducción de la respuesta (nivel de ductilidad) (Harries, 2001)

Por otro lado, Chaallal y otros (1996) clasifican este tipo de estructuras en tres categorías: una serie de muros aislados conectados (bajo acoplamiento), muros de corte con acoplamiento efectivo (acoplamiento intermedio), y muros con aberturas (paredes perforadas, alto acoplamiento), dependiendo del periodo fundamental del sistema.

En la siguiente figura se presenta el perfil de deformaciones en la base de los muros conectados, dependiendo del grado de acople.

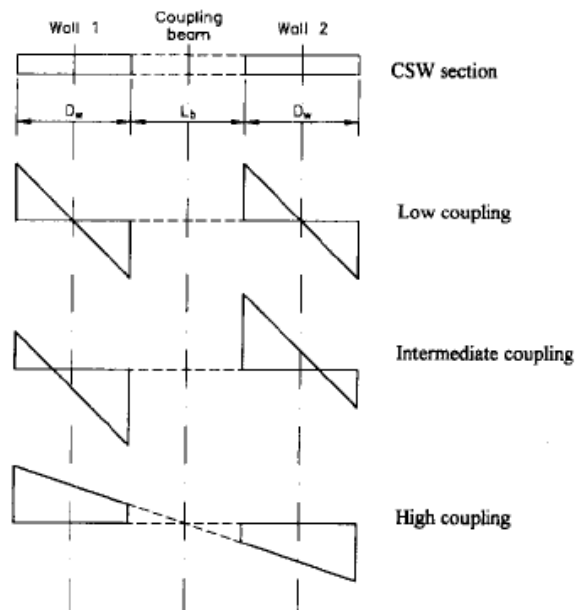


Figura 2.9. Perfil de deformación para diferentes grados de acoplamiento (Chaallal y otros, 1996)

Con respecto a las deformaciones que sufren los muros al estar conectados por losas o vigas de acople, Bohl y Adebar (2011) establecen que cuando un muro más largo se conecta a otro de menor longitud, el primero tiene generalmente mayores deformaciones de corte cerca de la base debido a que resiste una mayor parte del corte basal al tener mayor rigidez y resistencia a flexión. Mientras que el muro más esbelto sufre mayores deformaciones por flexión cerca de la base para mantener la compatibilidad total a nivel de piso.

La norma chilena no incluye el efecto del acoplamiento en la respuesta del sistema. El en diseño se asume comúnmente que las componentes estructurales entran simultáneamente en el rango inelástico. Sin embargo, se ha demostrado que (Paulay, 2002) cuando el elemento crítico alcance su desplazamiento de fluencia nominal, se producirá una redistribución de fuerzas de corte y momentos en el sistema.

La importancia de incluir el acoplamiento en el diseño de edificios radica en hacer uso de las ventajas que éstos conllevan al sistema (Paulay, 2002): i) gran control del desplazamiento, ii) un gran acoplamiento permite el uso de muros más esbeltos sin comprometer la deriva límite, iii) los límites de desplazamiento durante la respuesta dúctil no se ven afectados por los efectos dinámicos de los modos superiores, iv) con un apropiado detallamiento, pueden desarrollar mayores amortiguamientos histeréticos que un sistema de hormigón armado convencional.

Por otro lado, Subedi y otros (1999) identifican tres modos de falla del sistema estructural para una sollicitación lateral monotónica, que depende del grado de acoplamiento y comportamiento de las vigas:

1. Modo de falla uno: las vigas fallan a flexión. Este modo de falla ocurre en muros con vigas de acople bajas que contienen poca armadura longitudinal. En este caso, el acoplamiento se considera flexible. Las vigas alcanzan su capacidad antes de la falla final de la estructura, la que se produce por aplastamiento del hormigón en la esquina más comprimida.
2. Modo de falla dos: las vigas fallan por corte. Este modo ocurre en muros con vigas relativamente altas y armadas. El proceso se inicia con la formación de grietas por flexión en la unión con los muros. Al aumentar la carga, se forma una fisura diagonal en el centro de la viga y se extiende a través de la diagonal en compresión. La falla del sistema se produce con el aplastamiento del hormigón en compresión y la formación casi simultánea de grietas de corte en la mayoría de las vigas.
3. Modo de falla tres: las vigas permanecen rígidas. Esto sucede cuando el acoplamiento es relativamente grande y se considera rígido. El muro más comprimido falla por aplastamiento, mientras las vigas se encuentran parcialmente dañadas y el muro a tracción presenta grietas a gran altura. El comportamiento es similar al de un muro cantiléver. En este caso, las vigas no alcanzan a desarrollar toda su capacidad.

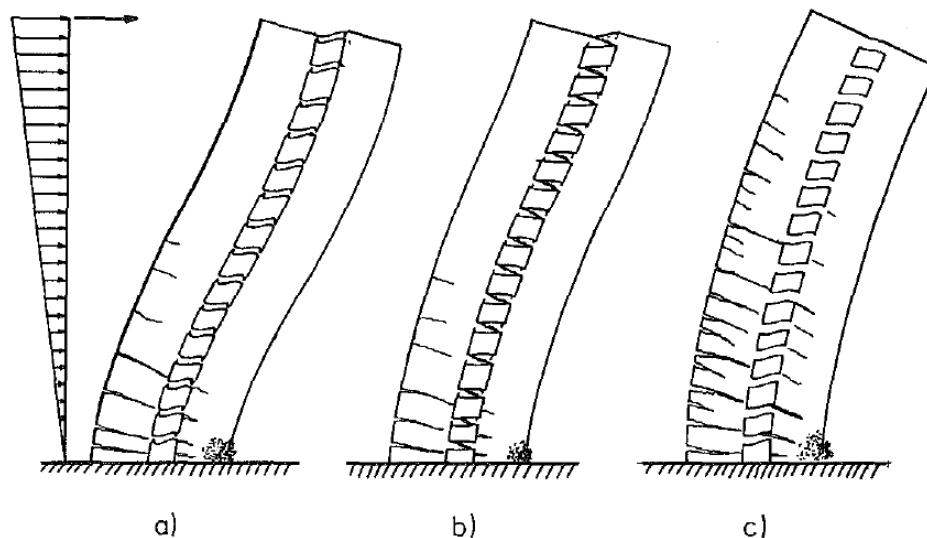


Figura 2.10. Modos de falla del sistema acoplado a) Vigas de acople fallan por flexión; b) vigas de acople fallan por corte; c) vigas de acople rígidas (Subedi, 1991)

2.2. Curvatura última nominal

En el decreto DS 60 se establecen dos requerimientos para limitar el daño en muros bajo una determinada demanda sísmica. El primero establece una carga axial máxima del 35% de la capacidad a compresión de la sección de hormigón; mientras que la segunda impone como deformación máxima del hormigón a compresión un valor de 0.008 cuando se alcanza el desplazamiento de diseño, y se relaciona con la necesidad de confinamiento.

El segundo requerimiento queda determinado por una curvatura última máxima de la sección transversal. Ésta puede calcularse de dos formas: mediante un modelo simplificado de rótula plástica (ecuación VI) o con una aproximación más precisa que considera tanto la componente elástica e inelástica (ecuación VII)

$$\Phi_u = \frac{2\delta_u}{H_t l_w} = \frac{\varepsilon_c}{c} \leq \frac{0.008}{c} \quad (\text{VI})$$

$$\Phi_u = \Phi_y + \frac{(\delta_u - \delta_y)}{l_p \left(H_t - \frac{l_p}{2}\right)} = \frac{\varepsilon_c}{c} \leq \frac{0.008}{c} \quad (\text{VII})$$

Donde c corresponde a la profundidad de la línea neutra, H_t es el alto del muro, l_w es la longitud del muro, δ_y es la capacidad de desplazamiento elástico o de fluencia, Φ_y es la curvatura elástica y l_p es la longitud de rótula plástica.

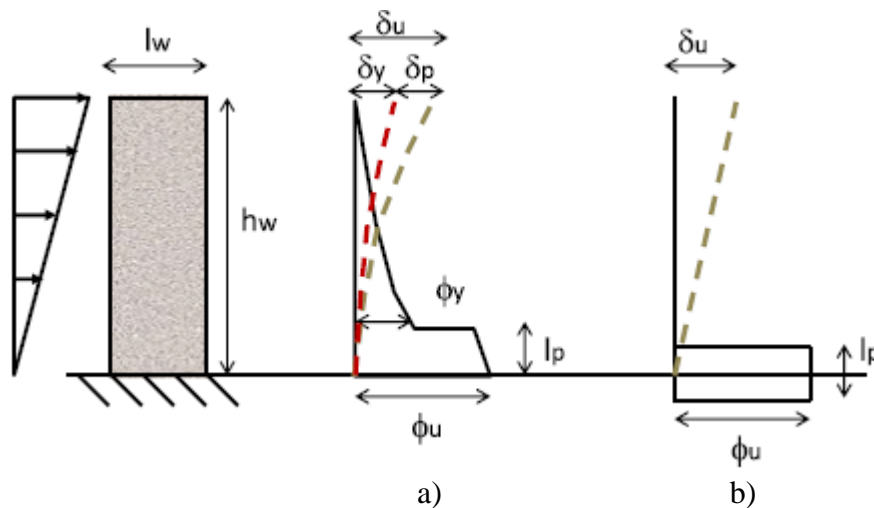


Figura 2.11. Modelo de rótula plástica de un muro
a) componente elástica e inelástica; b) modelo simplificado (Massone y Alfaro, 2016)

Las expresiones antes presentadas asumen la existencia de una rótula plástica donde se concentran las deformaciones inelásticas cerca de la base del muro. La primera, extensamente utilizada, considera una longitud de rótula plástica (l_p) constante e igual a $0.5l_w$ en la cual la curvatura de fluencia es constante; mientras que en la segunda se asume una distribución lineal de la curvatura de fluencia en la zona plástica.

La importancia de establecer la real variación de la curvatura plástica en la altura, considerando la interacción de muros de diferente largo conectados mediante losas o vigas de acople, radica en poseer una mejor herramienta que permita decidir donde proveer especial detallamiento sísmico. (Bohl y Adebar, 2011)

Bohl y Adebar (2011) realizaron un estudio analítico a partir de un modelo no lineal de elementos finitos, tanto para muros aislados como interconectados por losas de piso. Determinaron el perfil de curvatura inelástica en la altura y una estimación de la longitud de rótula plástica.

Observaron que las mayores deformaciones por flexión del muro más corto conectado a otro más largo, causan las grandes curvaturas en la base del primero.

Proponen un modelo simple para predecir la curvatura máxima en la base de un muro conectado a uno más largo, considerando las siguientes hipótesis: (i) los largos en los cuales la curvatura inelástica varía linealmente, para ambos muros, no cambia con respecto al caso aislado; (ii) la curvatura máxima en el muro más largo no cambia; y (iii) la deflexión de los muros debido al desplazamiento por flexión es igual sobre la región con curvatura plástica. La siguiente figura presenta este modelo:

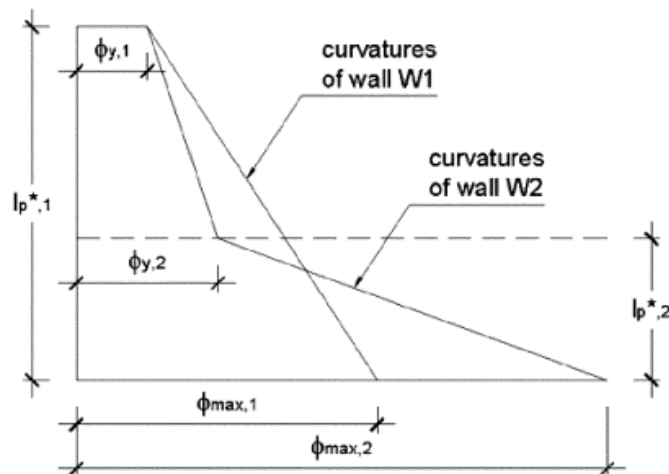


Figura 2.12. Modelo del perfil de curvatura usado para predecir Φ_{max} del muro más esbelto W2 conectado al muro más largo W1 (Bohl y Adebar, 2011)

Cabe mencionar que este modelo sólo considera el acoplamiento de las losas como una restricción de igual desplazamiento para los muros a nivel de piso. Es decir, no considera la transmisión de fuerzas por la flexión de vigas de acople.

La expresión propuesta para calcular la curvatura máxima del muro más esbelto del sistema acoplado es:

$$\Phi_{max,2} = \Phi_{y,1} + (\Phi_{max,1} - \Phi_{y,2}) \cdot \left(\frac{l_{p,1}}{l_{p,2}} \right) \quad (VIII)$$

Donde Φ_y es la curvatura de fluencia y l_p es la longitud de rótula plástica. Los subíndices 1 y 2 se refieren a los muros largo y corto respectivamente.

Massone y Alfaro (2016) proponen una variación no lineal para la distribución de curvatura inelástica: $\Phi(y) = (\Phi_u - \Phi_y) \left(\frac{y}{l_p^*} \right)^{(2/\beta-1)} + \Phi_y$. De esta forma, la rotación plástica está dada por: $\theta_p = \beta(\Phi_u - \Phi_y) \left(\frac{l_p^*}{2} \right) = \beta l_p (\Phi_u - \Phi_y)$.

Luego, considerando que $h_w \gg \frac{l_p}{2}$ en edificios altos, proponen la siguiente expresión para la curvatura ultima:

$$\Phi_u = \Phi_y + \frac{(\delta_u - \widetilde{\delta}_y)}{\beta l_p \left(h_w - \frac{l_p}{2} \right)} \quad (IX)$$

La corrección del desplazamiento de fluencia está dada por: $\widetilde{\delta}_y = \delta_y \left[1 + 0.9 \left(\frac{l_p}{h_w} \right)^{0.23} \right]$

De manera conservadora, se puede asumir $K = 1.4$, $\alpha = 0.22$ y $\widetilde{\delta}_y = 1.4\delta_y$

El factor β está relacionado con la concentración de curvatura en la zona crítica dentro de la longitud de rótula plástica:

$$\beta = 10(b \cdot \rho_b)^{0.42} \left(1 - (\varepsilon_{sh} - \varepsilon_y)^{0.22} \right) \quad (X)$$

Donde $0.0021 \leq \varepsilon_{sh} \leq 0.02$ corresponde al inicio del endurecimiento del acero, $0.005 \leq \rho_b \leq 0.075$ es la cuantía de refuerzo de borde, y $0.005 \leq b \leq 0.04$ es la rigidez relativa del rango plástico.

2.2.1. Componente elástica

El comportamiento elástico de muros puede caracterizarse a partir de la curvatura nominal de fluencia. Paulay (2002) propone estimar la curvatura de fluencia a partir de:

$$\Phi_y = \eta \frac{\varepsilon_y}{l_w} = \frac{\left(\frac{M_n}{M_y}\right) \varepsilon_y}{\xi l_w} \quad (XI)$$

Donde ε_y y L_w son la deformación de fluencia del refuerzo utilizado y la longitud del muro, respectivamente. El coeficiente η cuantifica el efecto combinado del radio entre la resistencia de fluencia y nominal a flexión, y la distancia ξl_w del eje neutro de la sección a la fibra de acero extrema en tracción (ver Figura 2.14)

El radio $M_n/M_y/\xi$ resulta de considerar un modelo bilineal en el diagrama Momento-Curvatura cómo se muestra en la Figura 2.13. La amplificación por el coeficiente η se basa en que para la aproximación del diagrama se extiende la primera fluencia, cuando la barra más extrema a tracción comienza a fluir, a una fluencia equivalente.

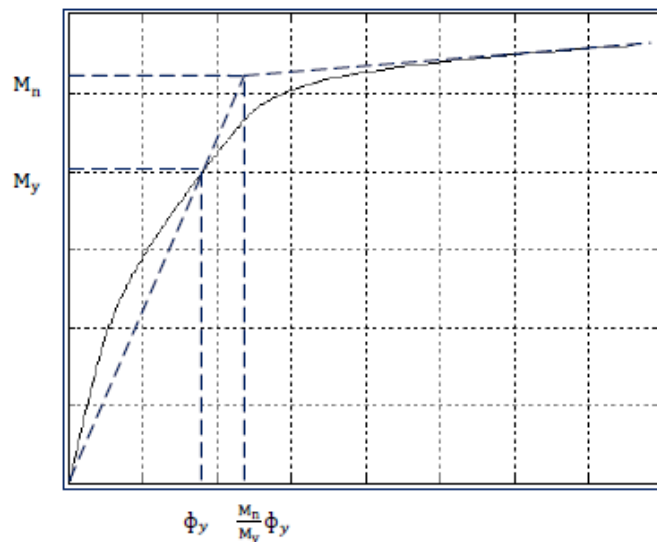


Figura 2.13. Aproximación bilineal del diagrama Momento-Curvatura. (Alfaro, 2013)

Massone & Alfaro (2016) realizaron un análisis paramétrico a partir de un modelo de fibras de muros esbeltos. Desarrollaron expresiones para la curvatura de fluencia y la capacidad de desplazamiento elástico de muros rectangulares y sección T, tanto aislados como acoplados. Los autores consideraron variables como la carga axial, largo de muros, cuantía de refuerzo de borde, número de pisos y nivel de acoplamiento.

Proponen la siguiente expresión para el cálculo de la curvatura de fluencia.

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_y}{\xi l_w} = K \frac{\varepsilon_y}{l_w} \quad (\text{XII})$$

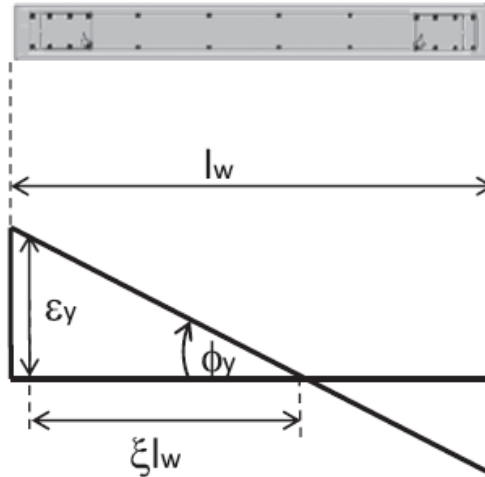


Figura 2.14. Esquema explicativo de cálculo de curvatura de fluencia (Massone y Alfaro, 2016)

Donde ε_y es la deformación de fluencia del acero, l_w el largo del muro y ξl_w la distancia desde el eje neutro a la fibra de acero en estado de fluencia. Los autores obtuvieron que los parámetros con mayor impacto sobre el coeficiente K son la carga axial y la cuantía de refuerzo de borde del alma.

Las ecuaciones XIII, XIV y XV presentan la parametrización de K para un muro aislado, de acuerdo al siguiente orden: muro rectangular, muro T con alma en compresión y radio de aspecto unitario, finalmente muro T con ala en compresión y radio de aspecto unitario.

$$K = 1.25 + 1.69 \left(\frac{P}{f'_c A_g} \right) + 0.65 \rho_b \quad (\text{XIII})$$

$$K = 1.32 + 1.67 \left(\frac{P}{f'_c A_g} \right) + 0.54 \rho_b \quad (\text{XIV})$$

$$K = 1.00 + 0.40 \left(\frac{P}{f'_c A_g} \right) + 0.45 \rho_b \quad (\text{XV})$$

Para considerar el efecto del radio de aspecto entre el largo del alma y el largo del ala, l_w/l_f , los autores proponen la siguiente ecuación.

$$K = 0.86 + 0.46 \left(\frac{P}{f'_c A_g} \right) + 0.47 \rho_b + 0.11 \frac{l_w}{l_f} \quad (\text{XVI})$$

Priestley y otros (2007) definen la curvatura de fluencia adimensional como:

$$\Phi_{Dy} = \frac{\Phi_{yw} \cdot l_w}{\epsilon_y} \quad (\text{XVII})$$

Análisis paramétricos realizados por los autores demuestran que la curvatura de fluencia es insensible a las variaciones de carga axial para cuantía de refuerzo distribuida uniformemente, por lo tanto, es independiente de la resistencia a flexión. Para el caso en que se considera refuerzo de borde, la curvatura adimensional crece casi-linealmente con la razón de carga axial.

Los autores recomiendan los valores $\Phi_{Dy} = 1.85$ y 2.15 para armadura concentrada y distribuida respectivamente. Alternativamente, el valor promedio $\Phi_{Dy} = 2 \pm 15\%$ considera ambos casos con la suficiente precisión para ser utilizada en el diseño de muros rectangulares.

2.2.2. Componente inelástica

Para el cálculo de la componente inelástica de la curvatura última, se debe determinar la longitud de rótula plástica y el desplazamiento de techo de fluencia, los cuales se presentan en las siguientes secciones.

2.3. Desplazamiento nominal de techo

El desplazamiento nominal de techo está relacionado directamente con el nivel de daño en muros para una determinada carga sísmica.

Para determinar el desplazamiento lateral elástico de techo, Paulay (2002) modela la demanda sísmica como una distribución de carga triangular en la altura. Aunque considera una sección transversal agrietada con su respectiva rigidez constante en la altura, lo que sobrestima la capacidad de desplazamiento. La Figura 2.15 describe el modelo utilizado, en el cual el desplazamiento se obtiene de la doble integración del perfil de curvatura.

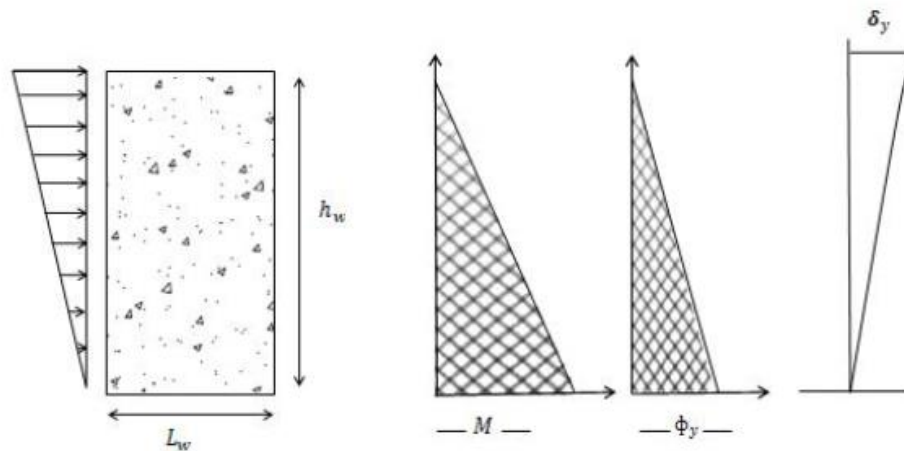


Figura 2.15. Modelo simplificado de muro completamente agrietado (Alfaro, 2013)

$$\delta_y = \frac{11}{40}\Phi_y h_w^2 \quad (\text{XVIII})$$

Massone y Alfaro (2016) proponen la expresión XXX para el cálculo del desplazamiento elástico.

$$\delta_y = \alpha\Phi_y h_w^2 \quad (\text{XIX})$$

Las ecuaciones XX, XXI y XXII presentan la parametrización de α para un muro aislado, en función de la cuantía de refuerzo de borde del alma. Cabe mencionar que, los valores de α se calcularon a partir de los valores del coeficiente K correspondiente, según sea un muro rectangular o de sección T.

$$\alpha = 0.33\rho_b^{0.14} \quad (\text{XX})$$

para muro rectangular AISLADO

$$\alpha = 0.315\rho_b^{0.15} \quad (\text{XXI})$$

para muro T con alma en compresión y radio de aspecto $L_w/L_f=1$

$$\alpha = 0.35\rho_b^{0.16} \quad (\text{XXII})$$

para muro T con ala en compresión y radio de aspecto $L_w/L_f=1$

Para considerar el efecto del radio de aspecto entre el largo del alma y el largo del ala, l_w/l_f , los autores proponen la siguiente ecuación.

$$\alpha = 0.34\rho_b^{0.15} + 0.01\frac{l_w}{l_f} \quad (\text{XXIII})$$

Los autores evalúan el efecto del acoplamiento en la respuesta elástica, con un modelo de fibras de dos muros rectangulares alineados y conectados por losas rectangulares. Las losas se modelaron como elementos tipo viga con rótulas plásticas que concentran la plasticidad en sus extremos.

Los autores proponen la ecuación XXIV para determinar el desplazamiento de fluencia de muros acoplados. El modelo considera una distribución del momento en la altura dada por $M(h) = M_y(h_w - h_o)(h_w^3 h_o - h_w h_o^3)h^3 + M_y(h_w^3 - h_o^3)(h_w^3 h_o - h_w h_o^3)h + M_y$, como se muestra en la Figura 2.16, y depende del momento de fluencia (M_y), de la altura del muro (h_w) y la altura del punto de inflexión (h_o). Cabe mencionar que esta función no considera el efecto de los momentos puntuales que se originan por acción de las losas.

El modelo además considera una distribución de la rigidez dada por la Figura 2.16, donde se tiene $EI_{cr} = 0.4EI_g$ en la base del muro, y aumenta linealmente hasta alcanzar el valor EI_g a una altura h_x , que por simplicidad se asume igual a h_o .

$$\delta_{y_coupled} = \delta_y \left(1.4\frac{h_o}{h_w} - 0.37\right)^{0.4} \quad (\text{XXIV})$$

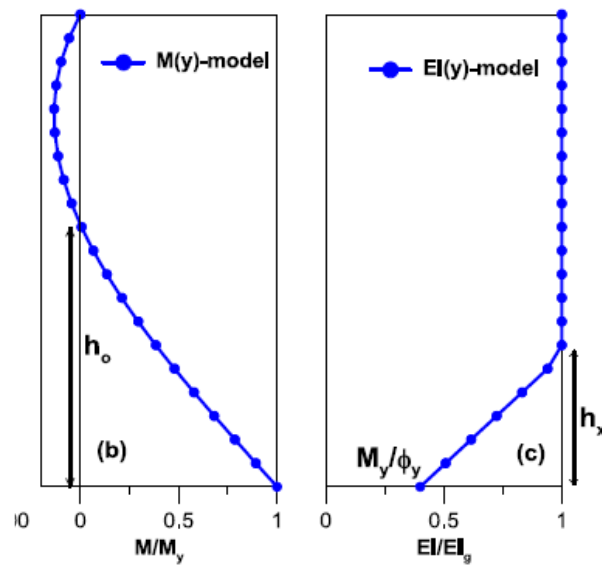


Figura 2.16. Distribución de momento y rigidez a flexión en la altura para muros acoplados (Massone y Alfaro, 2016)

Altos niveles de acoplamiento generan que el diagrama de momento en la altura cambie de signo en los pisos superiores. Los muros más largos son más rígidos y resistentes, lo que resulta en un menor grado de acoplamiento, reduce el radio entre el mínimo y máximo momento y mueve el punto de inflexión a una mayor altura.

Priestley y otros (2007) modifican la expresión sugerida por Paulay, y proponen la ecuación XXV para el cálculo del desplazamiento de fluencia del muro.

$$\delta_y = \delta_{y1} - \delta_{y2} = C \cdot \Phi_{yw} \cdot H_t^2 \quad (\text{XXV})$$

$$C = \frac{0.175}{1 - \beta_{CB}} - \left(\frac{\beta_{CB}}{1 - \beta_{CB}} \right) \cdot \left(\frac{0.1225 + 0.188 \cdot n}{n} \right) \quad (\text{XXVI})$$

El desplazamiento de fluencia se puede determinar restando al desplazamiento asociado al perfil de momento volcante total al δ_{y1} , el desplazamiento asociado al perfil de momento de las vigas de acople δ_{y2} . En las ecuaciones H_t es la altura total, β_{CB} es el grado de acoplamiento y n es el número de pisos.

En las expresiones XXVII y XXVIII la curvatura de fluencia promedio en la base del muro Φ_{yw} se divide proporcionalmente en la curvatura correspondiente al momento volcante total Φ_{y1} , y la asociada al momento de las vigas Φ_{y2}

$$\Phi_{y1} = \frac{\Phi_{yw}}{1 - \beta_{CB}} \quad (\text{XXVII})$$

$$\Phi_{y2} = \frac{\Phi_{yw} \cdot \beta_{CB}}{1 - \beta_{CB}} \quad (\text{XXVIII})$$

2.4. Longitud de rótula plástica

La rótula plástica es un concepto teórico que idealiza el comportamiento de una sección de hormigón en la cual la armadura a tracción alcanza la fluencia, entonces se forma una articulación capaz de girar sin resistir mayor momento.

En el diseño tradicional, ésta se forma en la zona cercana a la base del muro cuando se desarrolla el momento de fluencia de la sección. Al aumentar la sollicitación, se produce una redistribución de esfuerzos que puede generar otras rótulas plásticas.

Bohl y Adebar (2011) observaron que los muros con significantes grietas diagonales por corte presentan una mayor altura en la cual la curvatura inelástica varía linealmente, por tanto, una longitud de rotula plástica mayor que $0.5l_w$, considerada habitualmente en el diseño

Además determinaron que la compresión axial reduce l_p (lo opuesto ocurre en columnas) porque disminuye el radio entre la capacidad a flexión y el momento de fluencia. Por otro lado, establecen que se obtiene la misma rotación si se considera el perfil real de curvatura o si se asume que la curvatura inelástica máxima es uniforme en una altura $l_p = 0.5 l_p^*$, donde l_p^* , es la altura para la cual la curvatura tiene variación lineal.

Los autores proponen la siguiente expresión para muros aislados:

$$l_p = (0.2l_w + 0.05z) \left(1 - 1.5 \frac{P}{f'_c A_g} \right) \leq 0.8 l_w \quad (\text{XXIX})$$

Donde $z = M/V$ en la zona plástica del muro y P es la carga axial (positiva para compresión) sobre la región plástica. El radio de momento-corte (z) puede estimarse como $0.7h_w$ al suponer que la zona plástica se debe a la demanda de desplazamiento del primer modo.

Massone y Alfaro (2016) realizaron un análisis paramétrico de la longitud de rótula plástica. Consideraron las siguientes variables: carga axial, largo y altura del muro, cuantía de borde, endurecimiento del acero, nivel de la deriva de techo.

Los resultados indican que la longitud de rotula plástica se incrementa con el nivel de desplazamiento plástico o deriva $\Delta_p = \frac{(\delta_u - \delta_y)}{h_w}$ en lugar de la deriva total, comenzando con un valor cero en el nivel de deriva plástica cero inicial. Modifican la ecuación propuesta por Bohl y Adebar (2011) y proponen:

$$l_p = (0.2l_w + 0.05 \cdot z) \left(1 - 1.5 \frac{P}{f_c' A_g} \right) \cdot (6.7 \Delta_p^{0,3}) \quad (\text{XXX})$$

$$l_p = (0.2 \cdot l_w + 0.05 \cdot h_w) \left(1 - 1.5 \frac{P}{f_c' A_g} \right) \cdot (5,1 \Delta_p^{0,3}) \quad (\text{XXXI})$$

2.5. Fotogrametría

La fotogrametría o correlación digital de imágenes (DIC) es una técnica sin contacto que mide el campo de desplazamientos y deformaciones de un material. Utiliza un algoritmo para rastrear el desplazamiento relativo de un punto entre la imagen inicial de referencia, o estado no deformado, y la imagen actual deformada. (Blaber y otros, 2015)

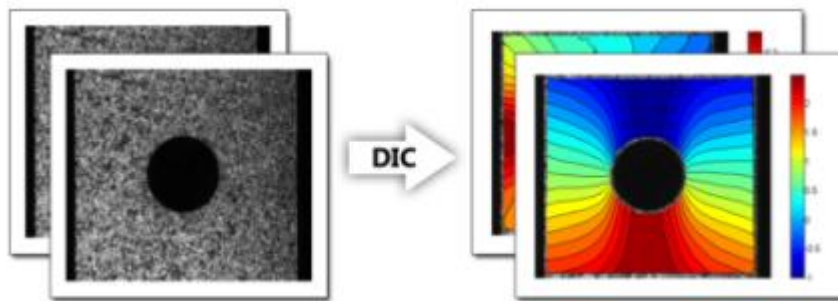


Figura 2.17. Principio de trabajo de la fotogrametría. Extraído de <http://ncorr.com/index.php/dic-algorithms>

Este método experimental consiste primero en pintar la superficie del objeto en estudio con una textura de alto contraste para luego, registrar el ensayo tomando fotografías continuas. De esta forma se crea un set de datos basado en imágenes.

Esta técnica permite monitorear la variación de deformaciones en todo instante de tiempo (registrado por las imágenes), y así identificar el inicio del agrietamiento. Se debe mencionar que sólo se obtiene información de la superficie analizada y no se puede estudiar el daño interno.

De acuerdo a distintos investigadores (Inzunza, 2014), los factores que afectan la precisión de esta técnica, y que son pertinentes para efectos de este estudio, son los siguientes:

- La calidad de las imágenes, que depende de las especificaciones técnicas de la cámara y del lente. Respecto de la cámara, a la resolución del sensor medida en píxeles; en tanto, para el lente, al ángulo de visión (distancia focal), a la apertura del diafragma, al tiempo de exposición y a la sensibilidad ISO.
- La cantidad de información obtenida por la cámara, es decir los cuadros por segundo que es capaz de obtener (fps).
- El montaje experimental definido por la distancia entre el objeto y la cámara, y la luminosidad del ambiente.

Tanto la configuración del montaje como la de la cámara deben permanecer inalterables durante todo el registro, con el fin de evitar que un sistema de referencia móvil y/o desplazamientos relativos provoquen distorsión en los datos finales.

De acuerdo a Inzunza (2014), para que la fotogrametría resulte óptima, se requiere de una alta resolución -medida en pixeles-, debido a que influye directamente en la escala con la que el programa calculará los desplazamientos.

El software utilizado para el procesamiento de imágenes es Ncorr, un paquete de libre acceso implementado en MATLAB. El algoritmo de correlación basado en subconjuntos consiste en particionar la imagen inicial en pequeños subgrupos de pixeles y otorgarles coordenadas, luego cada una de estas regiones se rastrean en las imágenes siguientes para obtener el desplazamiento relativo entre pares de fotografías (Blaber y otros, 2015).

Las nuevas coordenadas de cada subconjunto en la nueva imagen se obtienen a partir de una transformación de primer orden, como sigue:

$$\tilde{x}_{cur i} = x_{ref i} + u_{rc} + \frac{\partial u}{\partial x_{rc}}(x_{ref i} - x_{ref c}) + \frac{\partial u}{\partial y_{rc}}(y_{ref j} - y_{ref c}) \quad (XXXII)$$

$$\tilde{y}_{cur i} = y_{ref j} + v_{rc} + \frac{\partial v}{\partial x_{rc}}(x_{ref i} - x_{ref c}) + \frac{\partial v}{\partial y_{rc}}(y_{ref j} - y_{ref c}) \quad (XXXIII)$$

Donde $x_{ref c}$ e $y_{ref c}$ son las coordenadas del centro de la vecindad en la foto de referencia. El subíndice rc se refiere a que la función se ejecuta en los puntos de la imagen de referencia sobre el sistema de coordenadas de la imagen actual deformada.

Para determinar el desplazamiento de un subconjunto, en primer lugar, el programa calcula un factor de correlación denominado *Normalized Cross Correlation* (NCC) que relaciona las funciones de intensidad en escala de grises de las imágenes de referencia y actual en un punto específico. De este paso resulta una estimación inicial del desplazamiento, que será utilizado como input para la siguiente etapa iterativa. En esta fase se introduce un optimizador no lineal llamado *Inverse Compositional Gauss-Newton* (IC-GN) para refinar los resultados y minimizar el factor de *Least Square Correlation* (LSC). Finalmente, para obtener el campo de desplazamiento para todos los subconjuntos de la región de interés (*Region of Interest-ROI*), Ncorr utiliza un método denominado como *Fiabilidad guiada* (*Reliability Guided*). Éste consiste en determinar los parámetros de las regiones vecinas sólo utilizando el factor CLS para los puntos que se encuentran en forma de cruz alrededor del primero, luego considera el punto con el mínimo factor y repite este procedimiento hasta recorrer toda la región.

Con el objetivo de no incorporar el ruido del campo de desplazamiento en el cálculo de las deformaciones, Ncorr utiliza un plano que se ajusta por mínimos cuadrados para calcular los vectores de desplazamiento suavizados, y obtener el campo de deformaciones de la siguiente manera.

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

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

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

El software permite la implementación de la función “ROI Updating”, una estrategia creada para monitorear materiales sometidos a grandes deformaciones. Este método trabaja formando una frontera alrededor de la Región de Interés (ROI) y actualizando las coordenadas de estos puntos de acuerdo al desplazamiento que sufren.

2.6. Inestabilidad lateral de muros esbeltos

Con el objetivo de evitar la influencia de la inestabilidad global fuera del plano en la falla de las probetas, se instalan soportes laterales en un marco de acero arriostrado separados a aproximadamente 2 [mm] de las caras de los muros (ver Figura 3.9).

En esta sección se presenta el trabajo realizado por Rosso y otros (2016), quienes resumen el estado del arte de la estabilidad lateral y entregan nuevos resultados experimentales de dos muros de hormigón armado con una capa de refuerzo longitudinal, sometidos a ensayos cíclicos cuasi-estáticos.

En el contexto de la respuesta lateral de muros, Los autores distinguen entre estabilidad global y local: “Un problema de estabilidad global es considerada que ocurre cuando un muro, sometido a cargas en su plano, exhibe desplazamientos fuera de su plano (a lo largo de una altura similar o mayor que la longitud de rótula plástica) que conducirá a la falla del muro. Por otro lado, problemas de estabilidad local están principalmente relacionados con el pandeo del refuerzo longitudinal en uno o más espaciamientos (Paulay y Priestley, 1992). Inestabilidad local y global pueden influenciarse mutuamente la una a la otra (...)”



Figura 2.18. Inestabilidad lateral de muros. Izq) Pandeo global; Der) Pandeo local. (Tellen y otros, 2012)

Además, establecen que el mecanismo de pandeo se produce para grandes deformaciones inelásticas de muros sometidos a ciclos de carga. Cuando se desarrollan altas demandas de curvatura en el plano del muro, el elemento de borde sufre grandes deformaciones de tracción. Éstas causan fisuras cuasi-horizontales a través del espesor del muro y la fluencia del acero longitudinal. Luego, al descargar, se produce una recuperación de deformación elástica pero debido a las deformaciones de tracción acumuladas en las barras, las fisuras permanecen abiertas. Entonces, al cargar en compresión y antes de que se cierre la grieta, la fuerza de compresión es resistida por las barras de refuerzo vertical. En esta etapa ocurre el desplazamiento fuera del plano.

En la publicación se resume el trabajo de Paulay y Priestley (1993), quienes propusieron un modelo basado en una columna cargada axialmente que representa el elemento de borde en la región plástica del muro susceptible a pandearse. Esta zona queda delimitada por $l_0 \times l_b \times b_w$, donde $l_0 = l_p$ (longitud de rótula plástica), $l_b < l_w$ (largo del muro) y b_w es el espesor del muro.

Las siguientes expresiones presentan el límite para el desplazamiento fuera del plano y la máxima deformación axial de tracción propuestas por P&P, que desencadenan la inestabilidad fuera del plano:

$$\xi_{oop} \leq \xi_{oop,c} = 0,5 \cdot \left(1 + 2,35 \cdot m - \sqrt{5,53 \cdot m^2 + 4,7 \cdot m} \right) \quad (\text{XXXVII})$$

$$\varepsilon_{sm,c} = 8 \cdot \beta \cdot \left(\frac{b_w}{l_0} \right)^2 \cdot \xi_{oop,c} \quad (\text{XXXVIII})$$

Donde:

$$\delta_{oop} = \xi_{oop} \cdot b_w \quad (\text{XXXIX})$$

$$m = \frac{\rho_b \cdot f_y}{f'_c} \quad (\text{XL})$$

$$l_o = l_p = 0,2 \cdot l_w + 0,044 \cdot l_s \quad (\text{XLI})$$

Donde ξ_{oop} es el desplazamiento fuera del plano normalizado, m el radio de refuerzo mecánico, ρ_b es la cuantía de borde, $\beta \cdot b_w$ es la distancia desde el borde a la ubicación del refuerzo y l_s es el “shear span” o radio de corte.

La principal contribución de Goodsir (1985), primer autor el realizar ensayos sobre estabilidad lateral, extraída de Rosso et al (2016), es que el potencial para la inestabilidad de muros de hormigón armado está directamente relacionado con la máxima deformación de tracción alcanzada antes del siguiente ciclo de carga a compresión.

En las siguientes figuras se presentan los principales resultados obtenidos por Rosso et al (2016), para el modelo TW1 de dimensiones $l_w = 2700 [mm]$, $b_w = 80 [mm]$ y $h_w = 2000 [mm]$ y con una sola capa de refuerzo longitudinal y horizontal.

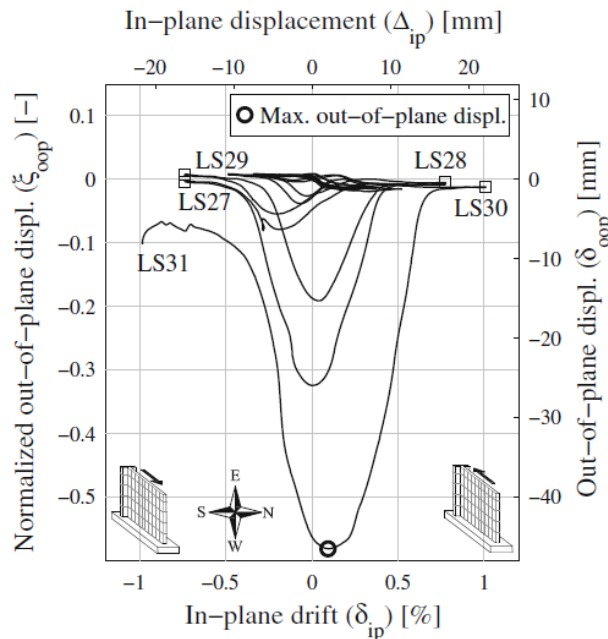


Figura 2.19. Deriva impuesta en el plano versus el desplazamiento fuera-del-plano normalizado a la altura donde se alcanza el mayor desplazamiento fuera-del-plano, 755 [mm] (Rosso et al, 2016)

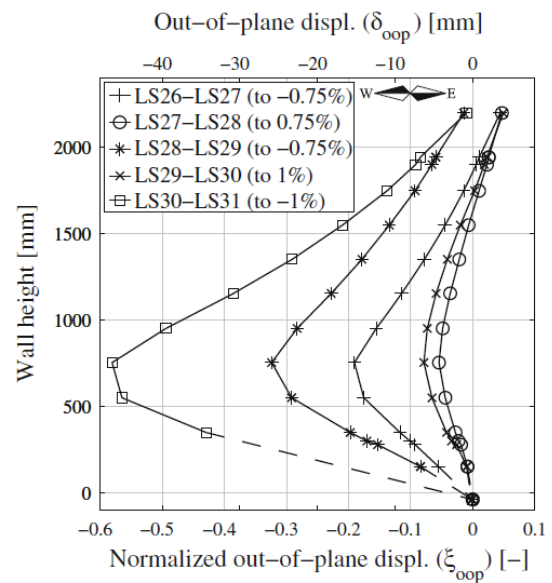


Figura 2.20. Perfil de desplazamiento fuera-del-plano normalizado del borde del alma, a lo largo de la altura del muro y entre ciclos de carga (Rosso et al, 2016)

De la Figura 2.19 se concluye que el máximo desplazamiento fuera-del-plano se obtiene cuando se alcanza el 0% (posición cero o inicial) en cada ciclo de carga. Además, se observa un desplazamiento residual de aproximadamente 10 [mm] para el 1% de la deriva (20[mm]).

Los autores señalan que los desplazamientos fuera-del-plano alcanzados por el elemento de borde son mayores que el límite de estabilidad establecido por Paulay y Priestley (1993), lo que resulta ser un criterio conservador.

De la Figura 2.20 se observa que las deformaciones fuera-del-plano se desarrollan a lo largo de toda la altura del muro, alcanzando el máximo a los 755[mm] sobre la fundación, es decir, a $0,3775h_w$. Por lo tanto, la suposición de P&P de considerar la altura de pandeo como la longitud equivalente de rótula plástica ($l_0 = l_p = 980[mm]$ para el caso del muro en estudio) puede no ser adecuada.

Con el fin de identificar el largo del muro involucrado en el pandeo, se presenta en la Figura 2.21 el desplazamiento fuera-del-plano a lo largo de la longitud del muro a la altura de 755[mm] para los distintos sentidos del ciclo. No es posible reconocer una región del alma donde se concentren las deformaciones, pero si se concluye que el máximo se obtiene en el elemento de borde.

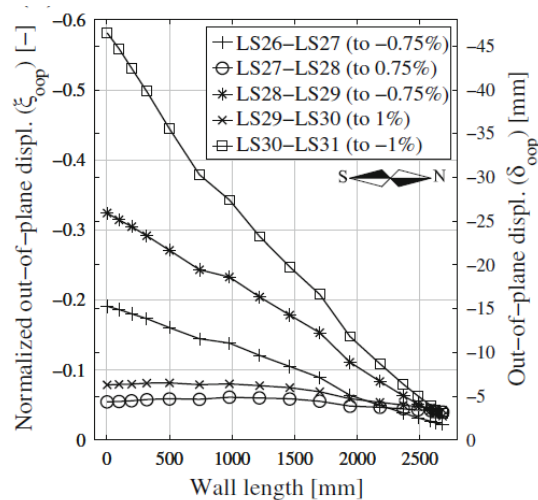


Figura 2.21. Perfil de máximo desplazamiento fuera-del-plano a lo largo de la longitud del muro (a 755[mm] de la fundación), entre ciclos de carga (Rosso et al, 2016)

De la Figura 2.22 se obtiene que entre los marcadores 6 y 8, donde se registra la máxima curvatura fuera-del-plano, se producen deformaciones de compresión, es decir, se cierran las grietas. De esta forma, el muro tiende a enderezarse cuando se comprime.

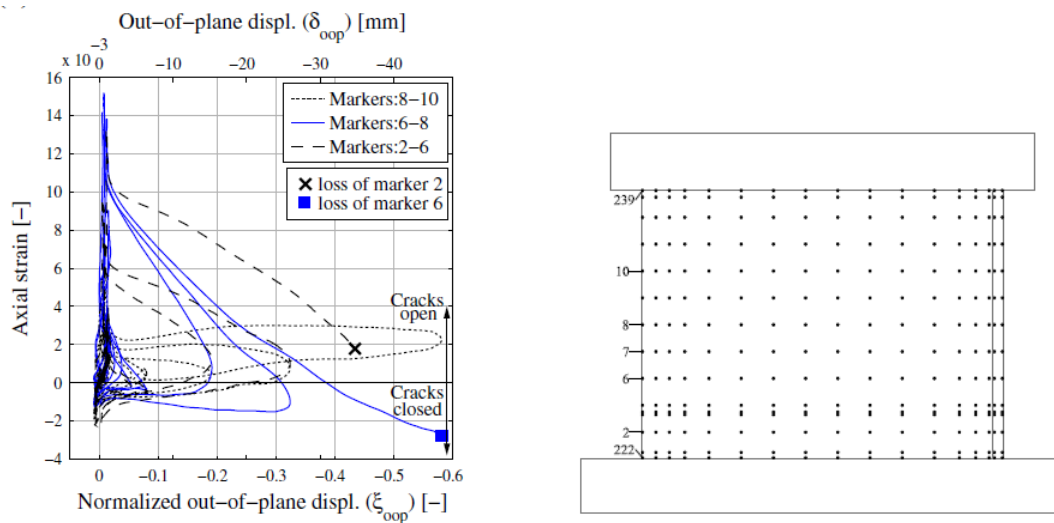


Figura 2.22. Desplazamiento fuera-del-plano versus la deformación axial local calculada entre el par de marcadores indicados. (Rosso et al, 2016)

En el estudio realizado por Telleen y otros (2012) se presentan los principales daños provocados por el terremoto del Maule 2010 en edificios chilenos. La mayoría de ellos consistió en pandeo de barras longitudinales y desprendimiento del hormigón en el borde de muros. Este tipo de daño se puede provocar por dos mecanismos:

- *Spalling-first*: Esta falla se ocasiona por la compresión de flexión. El daño ocurre porque la demanda de deformaciones a compresión excede la capacidad del hormigón. El pandeo de las barras ocurre como consecuencia del desprendimiento del concreto. Grandes cargas axiales contribuyen a esta falla.
- *Buckling-first*: Esta falla está asociada con la tracción por flexión seguida de compresión. Las barras son estiradas por la deformación a tracción antes de la inversión a compresión que causa el bandeo de éstas. El desprendimiento del recubrimiento de hormigón ocurre después como consecuencia del pandeo. Un parámetro importante en este caso es la profundidad del eje neutro.

En el mismo texto, se distingue el pandeo global de muros definido por FEMA 306 como un modo de desempeño de moderada capacidad de ductilidad, dado que está precedido por algunos ciclos de flexión antes del pandeo y la consecuente degradación de la resistencia.

Capítulo 3

Programa experimental

3.1. Diseño y fabricación de probetas

El diseño y construcción de las probetas estuvo a cargo de Santos (2018). En su trabajo de título se encuentra se especifica el escalamiento y detallamiento de los especímenes, moldaje y hormigonado.

Cada probeta representa un eje estructural de pasillo típico de la práctica chilena, restringido por las limitaciones del montaje experimental. En la siguiente tabla se presentan las dimensiones de los muros modelados.

Tabla 3.1. Características del eje estructural real modelado

	Muro real 25 pisos	Muro real 16 pisos
Altura total [m]	65,8	42
Altura entre piso [m]	2,63	2,61
Largo muro derecha [m]	3,5	3,5
Largo muro izquierda [m]	4,55	4,55

El factor de escala para todas las probetas es 35. Este se utilizó para conservar la relación de aspecto, las cuantías y el período. El acoplamiento real en muros de pasillo está dado por refuerzos de losa, pero en las probetas se materializa mediante vigas de acople despreciando la escala.

Tabla 3.2. Características geométricas de los especímenes

		Altura [mm]	Largo [mm]	Espesor [mm]	Área transversal [m ²]
Probeta 1	Muro izquierdo	1200	100	40	0,4
	vigas	30	120	40	0,12
	Muro derecho	1200	130	40	0,52
Probeta 2	Muro izquierdo	1880	100	60	0,6
	vigas	30	120	60	0,18
	Muro derecho	1880	130	60	0,78
Probeta 3	Muro izquierdo	1880	80	60	0,48
	vigas	30	130	60	0,18
	Muro derecho	1880	130	60	0,78
Probeta 4	Muro izquierdo	1880	80	60	0,48
	vigas	40	40	60	0,24
	Muro derecho	1880	130	60	0,78

La altura de entrepiso para los dos primeros es de 15 [cm], y de 22,5 [cm] para el resto.

En este trabajo, las probetas se identifican por el orden en que fueron ensayadas, de acuerdo a la siguiente figura:

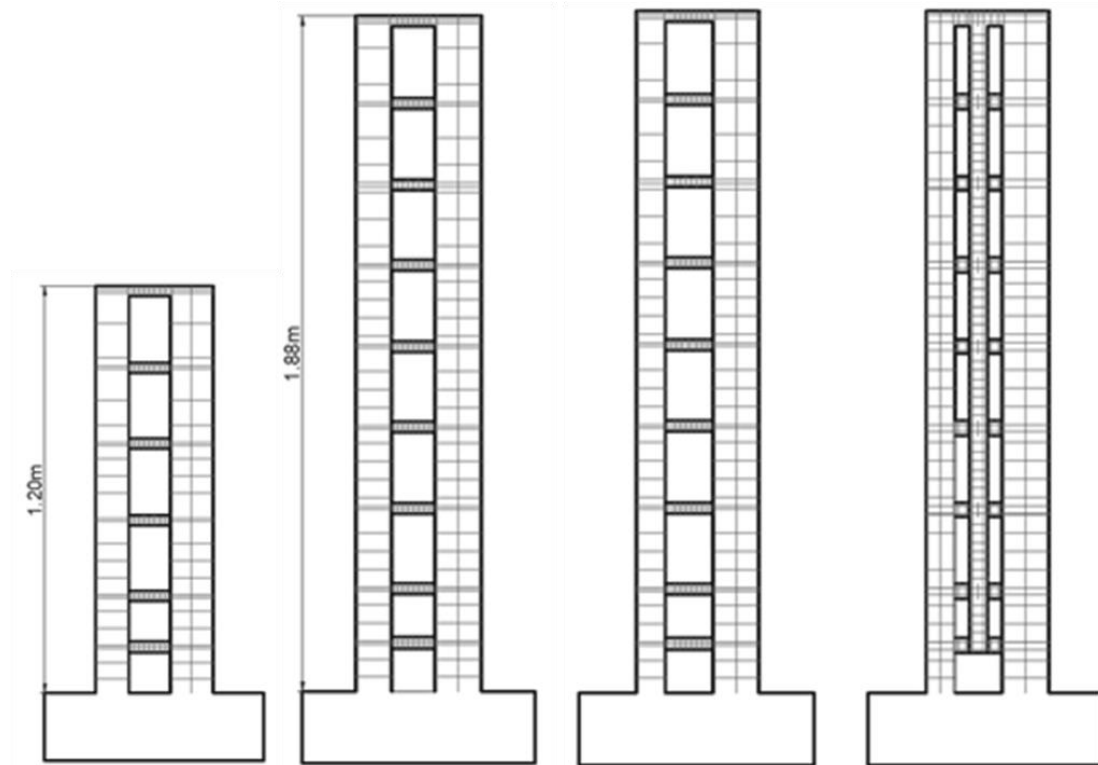


Figura 3.1. Probetas 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

Para el refuerzo longitudinal se utilizó barras estriadas de diámetro 6 [mm]. Respecto al refuerzo transversal, se distinguen dos zonas en la altura de cada muro, la primera corresponde a la región donde se esperan mayores esfuerzos de corte y cuyo espaciamiento de estribos es de 5 [cm], la superior de 7,5 [cm]. Los estribos se elaboran como ganchos de 180° con barras lisas de diámetro 4.2 [mm]. Las vigas, por otro lado, presentan armadura longitudinal igual a $A_s = A'_s = 1 \text{ } \varnothing 6$ y transversal compuesta de 7 estribos.

La Figura 3.2 entrega el detallamiento de las probetas y en la Tabla 3.3 la distribución de armadura y cuantías. Las probetas son ensayadas por el frente que mantiene el muro corto hacia la izquierda y el muro largo hacia la derecha.

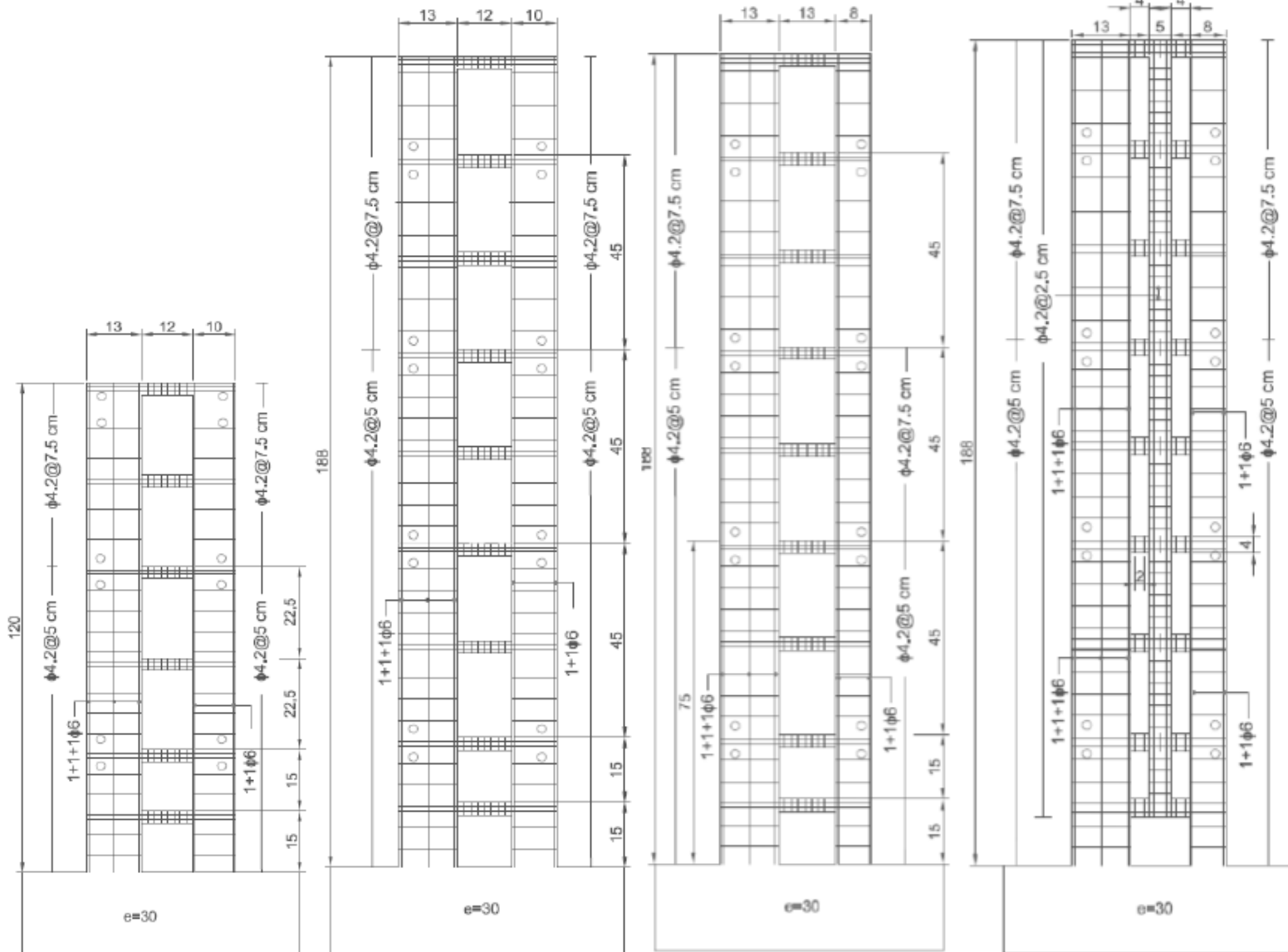


Figura 3.2. Elevación de probeta

Tabla 3.3. Cuantía y armadura de las probetas.

			Cuantía y armadura de borde	cuantía y armadura de malla vertical	cuantía y armadura de malla horizontal Zona 1	cuantía y armadura de malla horizontal Zona 2
Probeta 1	Muro izquierdo	lw=10 [cm]	0.035 1Φ6	- -	0.007 Φ 4.2 @ 50	0.0046 Φ4.2@75
	Muro derecho	lw=13 [cm]	0.027 1Φ6	0.0044 1 Φ 4.2	0.007 Φ 4.2 @ 50	0.0046 Φ4.2@75
Probeta 2	Muro izquierdo	lw=10 [cm]	0.024 1Φ6	- -	0.0046 Φ 4.2 @ 50	0.0036 Φ4.2@75
	Muro derecho	lw=13 [cm]	0.018 1Φ6	0.003 1 Φ 4.2	0.0046 Φ 4.2 @ 50	0.0036 Φ4.2@75
Probeta 3	Muro izquierdo	lw=8 [cm]	0.03 1Φ6	- -	0.0046 Φ 4.2 @ 50	0.0036 Φ4.2@75
	Muro derecho	lw=13 [cm]	0.018 1Φ6	0.003 1 Φ 4.2	0.0046 Φ 4.2 @ 50	0.0036 Φ4.2@75
Probeta 4	Muro izquierdo	lw=8 [cm]	0.03 1Φ6	- -	0.0046 Φ 4.2 @ 50	0.0036 Φ4.2@75
	Muro central	lw=5 [cm]	0.019 1Φ6	- -	0.0082 Φ 4.2 @ 25	0.0082 Φ4.2@25
	Muro derecho	lw=10 [cm]	0.018 1Φ6	0.003 1 Φ 4.2	0.0046 Φ 4.2 @ 50	0.0036 Φ4.2@75

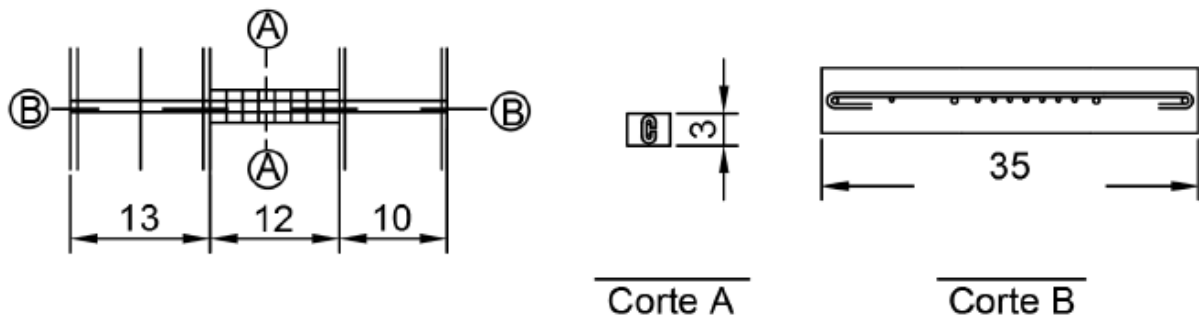


Figura 3.3. Sección transversal de viga y muros.

Para la materialización se utilizó mortero pre-dosificado *Presec Hormigón C-15* fabricado por Melón SA®, el cual tiene un árido de tamaño máximo nominal 2,5 [mm]. Además se adicionó reductor de agua y superplastificante *Sika Viscocrete 5100 CL* elaborado por Sika®.

El acero utilizado para confeccionar los estribos de 4.2 [mm] es de clasificación A56-50T, mientras que los correspondientes a la armadura longitudinal de los muros es de diámetro 6 [mm] y el refuerzo de la fundación de 8 [mm] se clasifican como A630-420H.

A continuación, se presentan los gráficos de carga-deformación correspondiente a los ensayos de materiales.

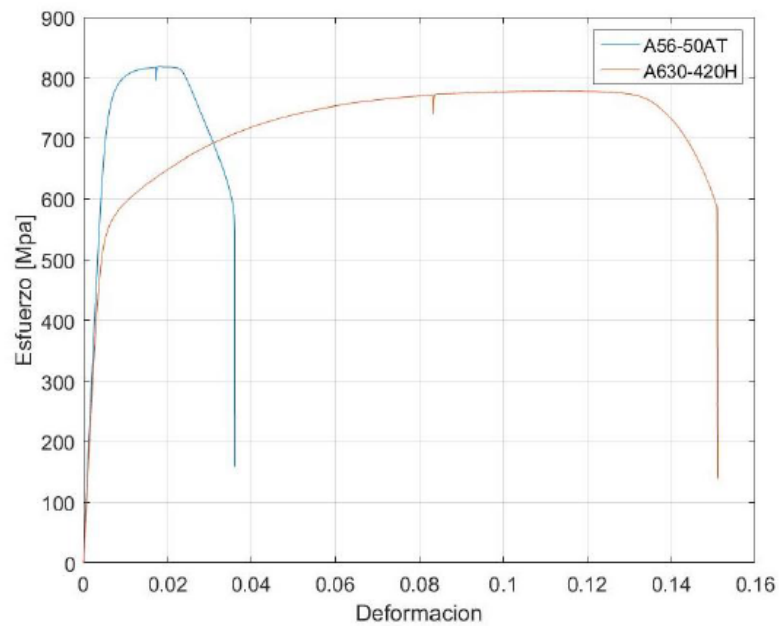


Figura 3.4. Curva de esfuerzo-deformación de los tipos de acero utilizados.

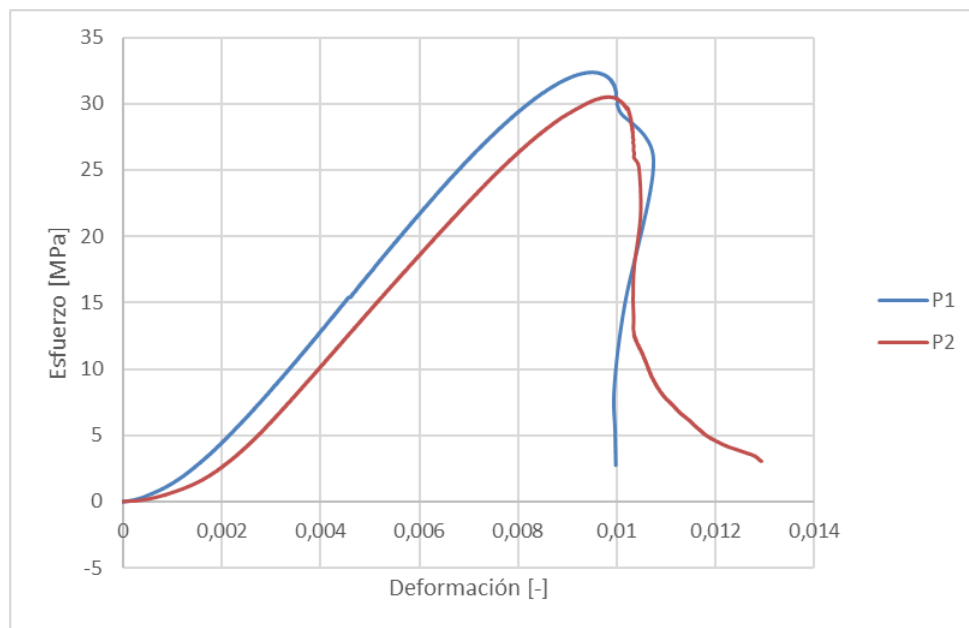


Figura 3.5. Curva de esfuerzo-deformación de probetas de hormigón.

Para el acero A56-50T se utiliza un límite elástico de $f_y = 700 [MPa]$ y de $f_y = 550 [MPa]$ para el acero A630-420H. Mientras que la resistencia del hormigón se fija en $f'_c = 28 [MPa]$.



Figura 3.6. Izq) Moldaje y armadura de probeta 3; Der) Probeta 3 hormigonada (Santos, 2018)

3.2. Equipos utilizados

Los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio Experimental de Estructuras ubicado en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

A continuación, se describen los implementos utilizados.

Mesa vibratoria

Para imponer los desplazamientos al sistema, se utiliza la mesa vibratoria uni-direccional con actuador hidráulico del departamento de Ingeniería Civil. La mesa cuenta con perforaciones cada 100 [mm] con tuercas soldadas. El sistema de sujeción de la probeta a la mesa es a través de pernos enroscados.

La mesa vibratoria tiene una frecuencia máxima de 15[Hz] capaz de simular registros sísmicos chilenos. Sin embargo, como se realizan ensayos cuasi-estáticos, se lleva a cabo un control manual de la mesa.



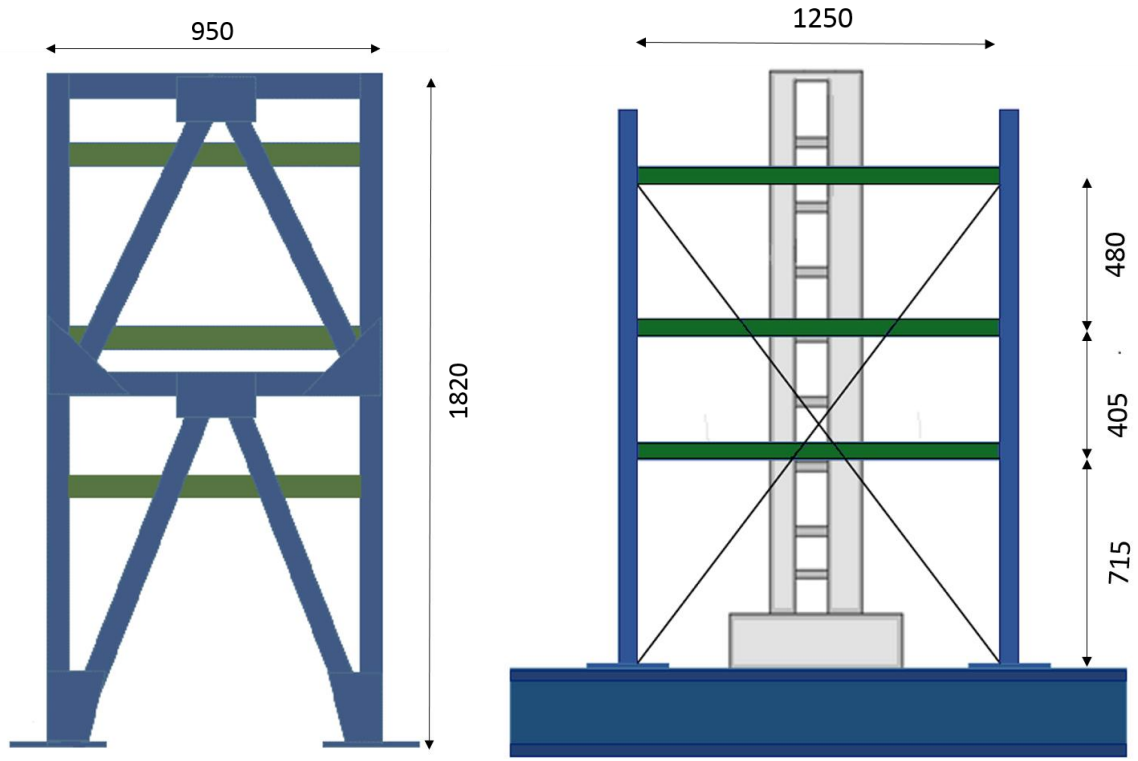
Figura 3.7. Mesa vibratoria unidireccional del laboratorio LEE

Marco de acero y restricción lateral

Con el fin de evitar movimientos fuera del plano, se instala un marco de acero con cuatro apoyos, de 1,82 metros de altura y 1,19 metros cuadrados de superficie basal. Sobre éste se montan placas metálicas a cada lado del muro y en tres niveles de la altura. El diseño y construcción fue parte del trabajo realizado por Santos (2018).

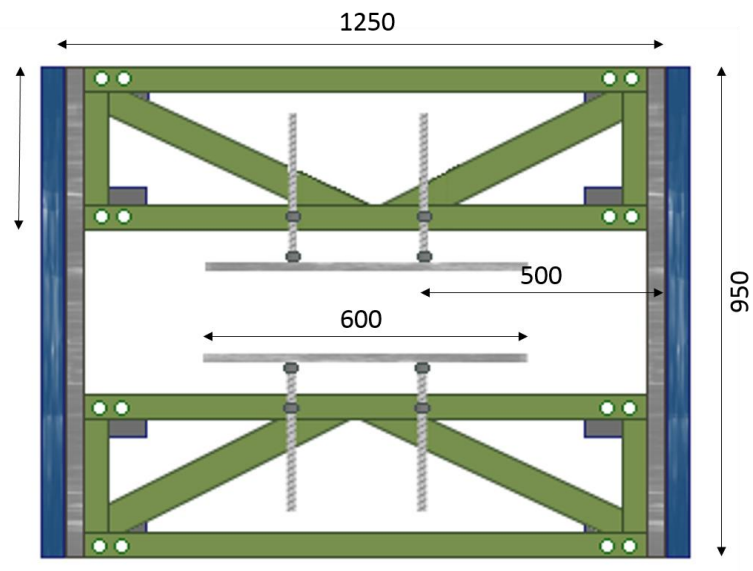
Además, se instalaron pasadores ajustables unidos a una barra de acero horizontal que roza con la superficie de la probeta. Para evitar la interacción en el plano, las barras redondeadas se engrasan antes de cada ensayo. Adicionalmente, se instalan dos cables diagonales par arriostrar el marco.

En la Figura 3.8 se detallan la configuración y dimensiones principales de la estructura.



a)

b)



c)

Figura 3.8. Estructura de soporte lateral.
a) Vista lateral; b) Vista frontal; c) Vista en planta



Figura 3.9. Restricción lateral instalada

Bomba hidráulica

El actuador utilizado es el pistón hidráulico ensamblado a la mesa, conectado mediante dos mangueras a una bomba hidráulica de circuito cerrado.



Figura 3.10. Bomba hidráulica

Celda de carga y puntal de acero

Se utiliza una celda de carga independiente durante la ejecución de los ensayos, para registrar la carga impuesta por el desplazamiento de la mesa. Se conecta mediante un sistema de pernos y placas de acero al puntal por un lado, y a la probeta por el otro. La adquisición de datos se realiza con el software Labview.

El puntal consiste en dos perfiles cajones 100 x 100 [mm] soldados a dos placas de acero en sus extremos. Su principal función es la de ser una restricción de desplazamiento en el plano del muro. Este sistema se instala a $2/3$ de la altura de la probeta.

En la Figura 3.27 se observa que las placas deben estar firmemente aseguradas al muro para imponer desplazamiento cero en ese punto cuando la mesa se mueva en ambas direcciones.



Figura 3.11. Celda de carga marca Revere Transducers

Carga axial

La carga axial total por muro sin considerar la fundación, en términos de [%] de $f'_c A_g$ se presenta en la Tabla 3.4. La masa adicional se consigue mediante placas de acero de 20 [kg] aproximadamente cada una. Éstos se distribuyen en 2 niveles para el caso de la Probeta 1 y en 3 niveles para las demás. Los pesos adicionales se instalan mediante soportes metálicos elaborados por Santos (2018)

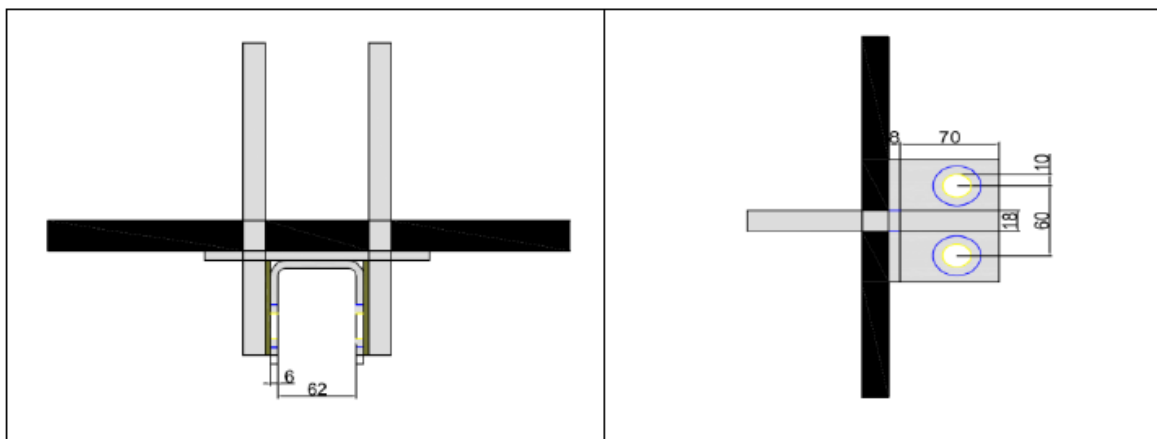


Figura 3.12. Vista en planta y elevación de estructura de soporte de pesos (Santos, 2018)

Tabla 3.4. Carga axial lograda para cada ensayo

Probeta	Alto [m]	Ancho [m]	Muro izquierdo			Muro derecho		
			Lw [m]	Peso adicional [kg]	Carga axial $/(f_c \cdot A_g)$ [%]	Lw [m]	Peso adicional [kg]	Carga axial $/(f_c \cdot A_g)$ [%]
1	1,2	0,04	0,1	100	2,6	0,13	120	2,4
2	1,88	0,06	0,1	100	1,82	0,13	120	1,69
3	1,88	0,06	0,08	80	1,82	0,13	120	1,69
4	1,88	0,06	0,08	80	1,82	0,13	120	1,69



Figura 3.13. Detalle de soportes y pesos instalados

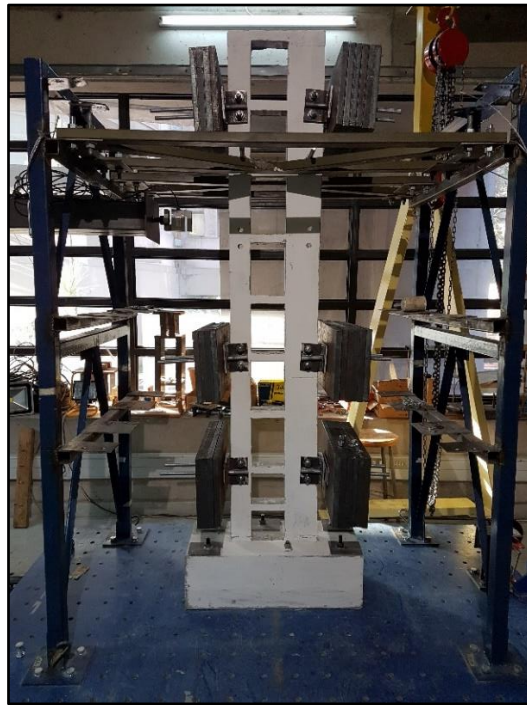


Figura 3.14. Distribución de pesos adicionales en la altura para la probeta 3

3.3. Instrumentación

Para la adquisición de datos se utilizan tres recursos distintos: la celda de carga, sensores LVDT y fotogrametría.

La celda de carga registra la fuerza de compresión o tracción impuesta al muro debido al desplazamiento de la mesa, con una frecuencia de muestreo de 20 [Hz]

El montaje de los sensores de desplazamiento estuvo a cargo de Inga (2018), y sólo se trabaja con los correspondientes al desplazamiento de techo, presentados en la siguiente figura.

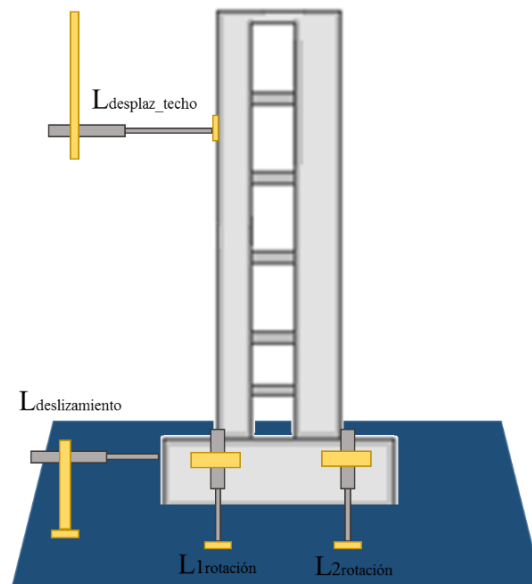


Figura 3.15. Esquema de sensores LVDT's utilizados para corregir el desplazamiento de techo.

3.3.1. Registro por fotogrametría

Por último, por la cara libre de la probeta se lleva a cabo el registro de imágenes necesarias para el procesamiento de desplazamientos y deformaciones con Ncorr.

Preparación de las probetas

El sistema de referencia corresponde a una textura de puntos y/o manchas aleatorias sobre la superficie del hormigón, el cual debe tener un alto contraste para lograr una óptima correlación. Primeramente, se debe lijar y librar de impurezas la superficie del hormigón, para luego dar dos manos de *pintacal* o cal hidráulica que sirve de base blanca y opaca.

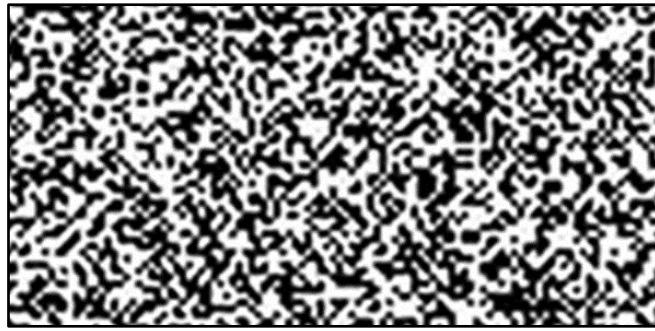


Figura 3.16. Patrón de manchas utilizado para el timbre 10x5 [cm]

Para una impresión fácil y normalizada de las manchas, se fabricaron por cortado laser dos timbres de goma de un patrón no repetitivo e isotrópico. Se utilizó pintura negra y opaca en spray sobre un tapón de espuma para impregnar con pintura el timbre que luego se presionará contra la superficie del hormigón. Debido a que la superficie del hormigón no es completamente lisa, se debió repasar manualmente algunas zonas con pincel.



Figura 3.17. Implementos utilizados para estampar sobre la superficie de hormigón

Adquisición de datos

Con el objetivo de conseguir un amplio set de datos y un adecuado procesamiento, se requiere que las cámaras estén sincronizadas y fotografiando continuamente el ensayo. Para esto se utilizó la función Time-lapse del software DSLR Remote Pro Multi-Camera, retratando el ensayo cada 7 segundos y asegurándose de tener una imagen en la posición cero y otra en el máximo desplazamiento.

La captura de imágenes se realiza con 5 cámaras Canon EOS T6 con lente EF 18-55mm, dispuestas de forma tal de enfocar un área de interés determinado. A partir del primer ensayo correspondiente al Muro 1 se optimizó la configuración de las cámaras obteniendo la distribución mostrada en la Figura 3.20. El registro del primer ensayo no cuenta con las cámaras 4 y 5, y la cámara 1 se ubicó en el mismo soporte que la cámara 2.



Figura 3.18. Cámara Canon EOS T6

Tabla 3.5. Parámetros considerados en el registro de imágenes

Cámara	Canon EOS T6
Sensor	CMOS -18 Megapíxeles (5184 x 3456)
Apertura del diafragma	f/7.1
Tiempo de exposición [s]	1/100
Sensibilidad ISO	400

Tabla 3.6. Distancia focal [mm] considerada para los ensayos

Cámara	Enfoque	Distancia focal Probeta 2 [mm]	Distancia focal Probetas 1, 3 y 4 [mm]
1	Local	30	18
2	Global	24	18
3	Lateral	24	55
4	Vigas 1	-	55
5	Vigas 2	-	55

Para conseguir una iluminación adecuada se instalan tres trípodes con focos LED, con potencia de 50W. En lugar de utilizar trípodes corrientes, se fabricaron soportes metálicos en los cuales se disponen de manera vertical mediante prensas, perfiles metálicos angulares con una perforación en el centro donde se apenará la cámara. De esta manera, se obtiene la misma altura y distancia focal para todos los ensayos. Las cámaras se nivelan de forma manual.

Además, se precisa de una tela negra y opaca como fondo para evitar cambios de luz en las imágenes o que el software reconozca un punto externo como punto de interés.



Figura 3.19. Sistema de iluminación

Además, previo al comienzo del ensayo se deben realizar los siguientes procedimientos:

- Para el cálculo del error intrínseco del programa debido a las condiciones del montaje, se deben tomar dos fotografías consecutivas del muro en estado de reposo con el menor lapso de tiempo posible entre imágenes. Esto se realiza para cada cámara.
- Para el cálculo de la escala que utilizará Ncorr para calibrar los desplazamientos, se requiere fotografiar un objeto de dimensiones conocidas para cada configuración. Para esto, se adhiere momentáneamente una regla metálica en la superficie del hormigón en el cuadro de enfoque de cada cámara y se toman las fotografías correspondientes. Posteriormente, para establecer el formato de las imágenes en el software, se debe dibujar una línea de longitud conocida sobre la cantidad de píxeles correspondientes que resultará en la escala [$mm/pixel$]

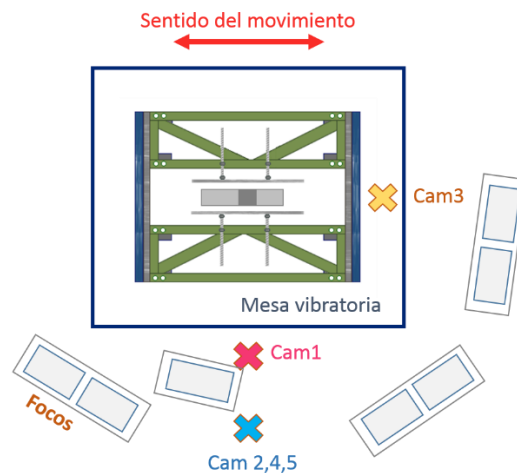


Figura 3.20. Esquema en planta de la configuración de cámaras y focos LED

a)



b)



Figura 3.21. Configuración de focos y cámaras.
a) focos frontales y cámaras 1,2,4 y 5; b) soporte de cámara lateral

Con el objetivo de analizar tanto el comportamiento global como local sin pérdida de precisión, las cámaras se instalan enfocando diferentes zonas de la probeta:

- La cámara 1 (ver Figura 3.19 e), llamada aquí como “cámara local”, enfoca la parte inferior del muro que es donde se produce la mayor concentración de grandes deformaciones
- La cámara 2 (ver Figura 3.19 a), o “cámara global”, dispuesta de forma vertical logra encuadrar toda la altura de la probeta.
- La cámara 3 o “cámara lateral” (ver Figura 3.19 b), se instala en un soporte fijo a la mesa para que el movimiento relativo entre ésta y el muro sea nulo. Esta cámara enfoca la parte inferior del perfil del muro derecho (de mayor longitud), con el fin de registrar posibles movimientos fuera del plano. Por condiciones del montaje, no fue posible encuadrar mayor altura del ejemplar.
- La cámara 4, referida como “cámara vigas 1” (ver Figura 3.19 c) enfoca desde el 4^{to} a 6^{to} piso. Esto con el objetivo de tener una menor escala [mm/pixel] para el análisis de las vigas.
- La cámara 5, llamada como “cámara vigas 2” (ver Figura 3.19 d) encuadra la parte superior de la probeta, registrando las vigas del 8^{vo} y 9^{no} piso.

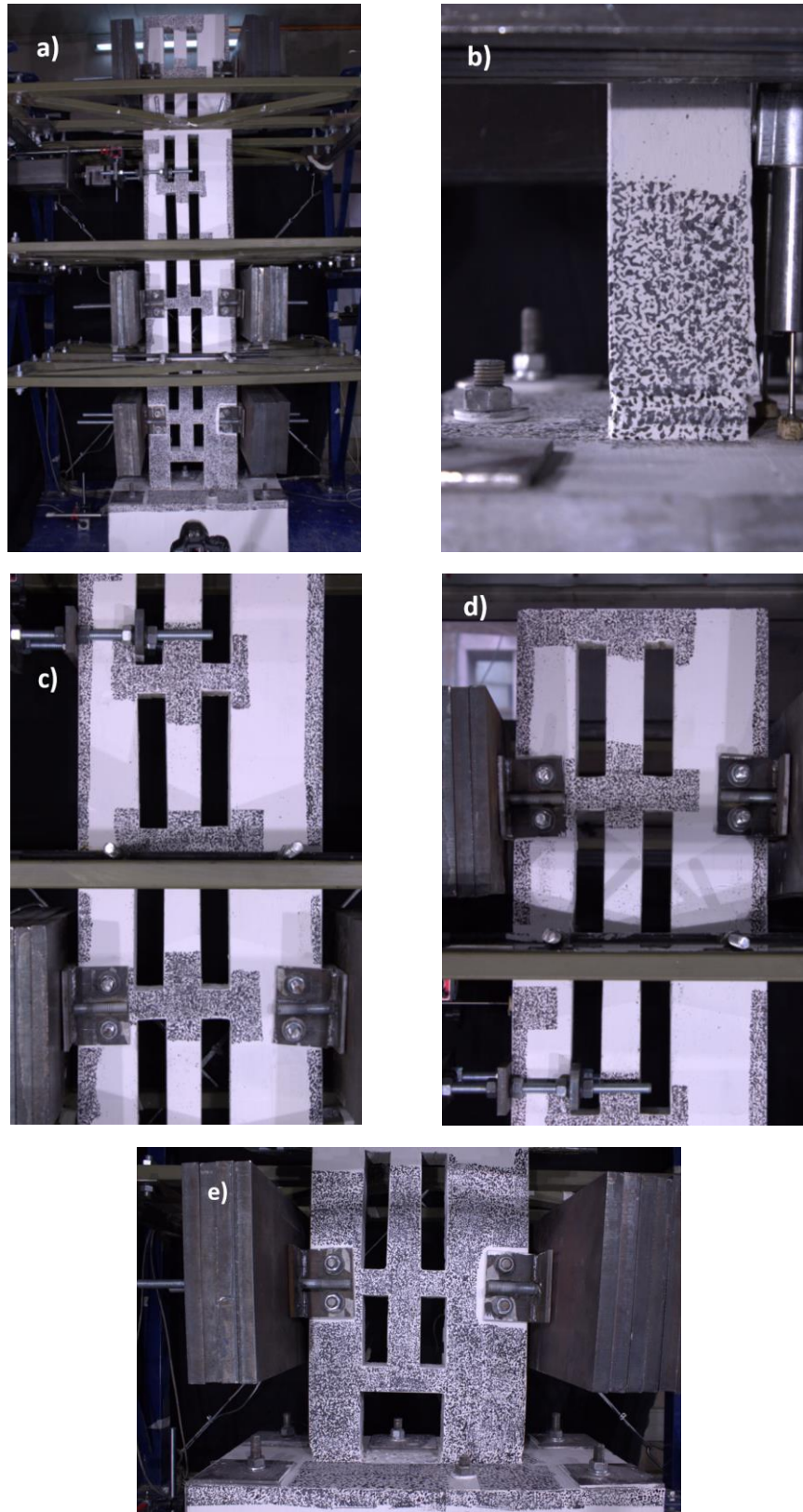


Figura 3.22. Enfoque de cada una de las cámaras utilizadas en el ensayo del Muro 4
a) cámara global; b) cámara lateral; c) cámara vigas 1; d) cámara vigas 2; e) cámara local

3.4. Esquema final del montaje experimental

Finalmente, es necesario indicar la secuencia de instalación. En primer lugar, se debe trasladar la probeta desde las dependencias de IDIEM hasta el laboratorio. Con la ayuda de la grúa tecele es posible bajar el muro del carro de transporte y ubicarlo a un costado de la mesa. Utilizando el tecele de la porta grúa se levanta el muro sobre la mesa hasta su posición final.

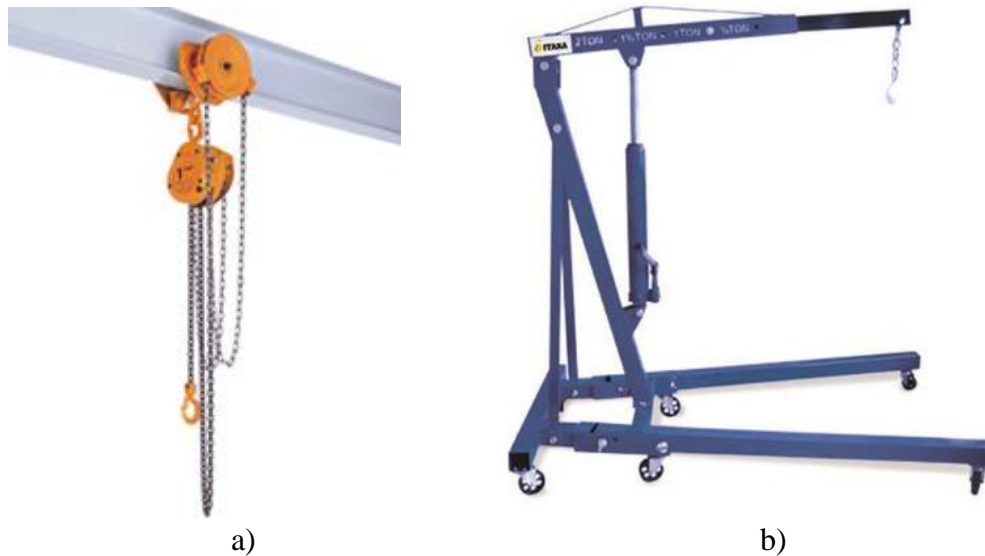


Figura 3.23. Equipos utilizados para transporte y montaje del muro
a)Tecele manual; b) Tecele grúa

Para instalar el puntal, se debe anclar a la columna de reacción y sostener en el otro extremo con la ayuda de una columna de madera fija.

Con el fin de aprovechar la capacidad soportante de la estructura metálica, se instala por los costados y la parte trasera, de modo de permitir la manipulación de la probeta por la cara delantera.

Se procede entonces a desmoldar la probeta y retirar los tubos de PVC. En este punto se debe verificar la verticalidad del muro con ayuda del plomo y el puntero láser: si el muro no es completamente vertical, se debe montar la probeta sobre una placa de acero y rellenar con hormigón de alta resistencia y adhesivo epóxico con una inclinación y hasta una altura tal que se logre la perpendicularidad del muro con respecto a la mesa.

De ser necesario, se ensanchan los orificios de la fundación con un taladro para que coincidan con la ubicación de las perforaciones de la mesa. Luego, se ancla la fundación mediante pernos.

Una vez que la probeta esté completamente fija sobre la mesa, se procede a lijar la superficie del hormigón para aplicar las dos capas de pintura cal. Posteriormente, se instalan los soportes de pesos, los laterales de la cara frontal, y finalmente los pesos.

Enseguida, es posible estampar el patrón de manchas para fotogrametría. Al utilizar los timbres de goma, se debe tener cuidado de alternar los patrones y no crear una misma pauta de impresión. Debido a que la superficie del hormigón no es perfectamente lisa, el estampado puede dejar espacios en blanco que es necesario repasar de forma manual con un pincel y esmalte al agua negro opaco. Esta técnica también se utilizó para crear otros esquemas de manchas aleatorias.

El siguiente paso es instalar los LVDT's.

A continuación, se debe presurizar y verificar el control de la mesa vibratoria y situarla en su posición cero. Finalizado esto, es posible instalar la celda de carga unida al puntal y conectarla al muro mediante el sistema de pernos y placas de acero.

Finalmente, se instalan los equipos necesarios para el registro de fotogrametría: el pedestal de acero como soporte global para las cámaras 2, 4 y 5, el soporte sobre la mesa para la cámara lateral, el trípode para la cámara local y los focos led según la distribución mostrada en la Figura 3.20.

En la Figura 3.24 se presenta la conexión entre los equipos que permite el funcionamiento de los ensayos. En las Figuras 3.25 3.26 y 3.27 se presenta en mayor detalle el montaje final.

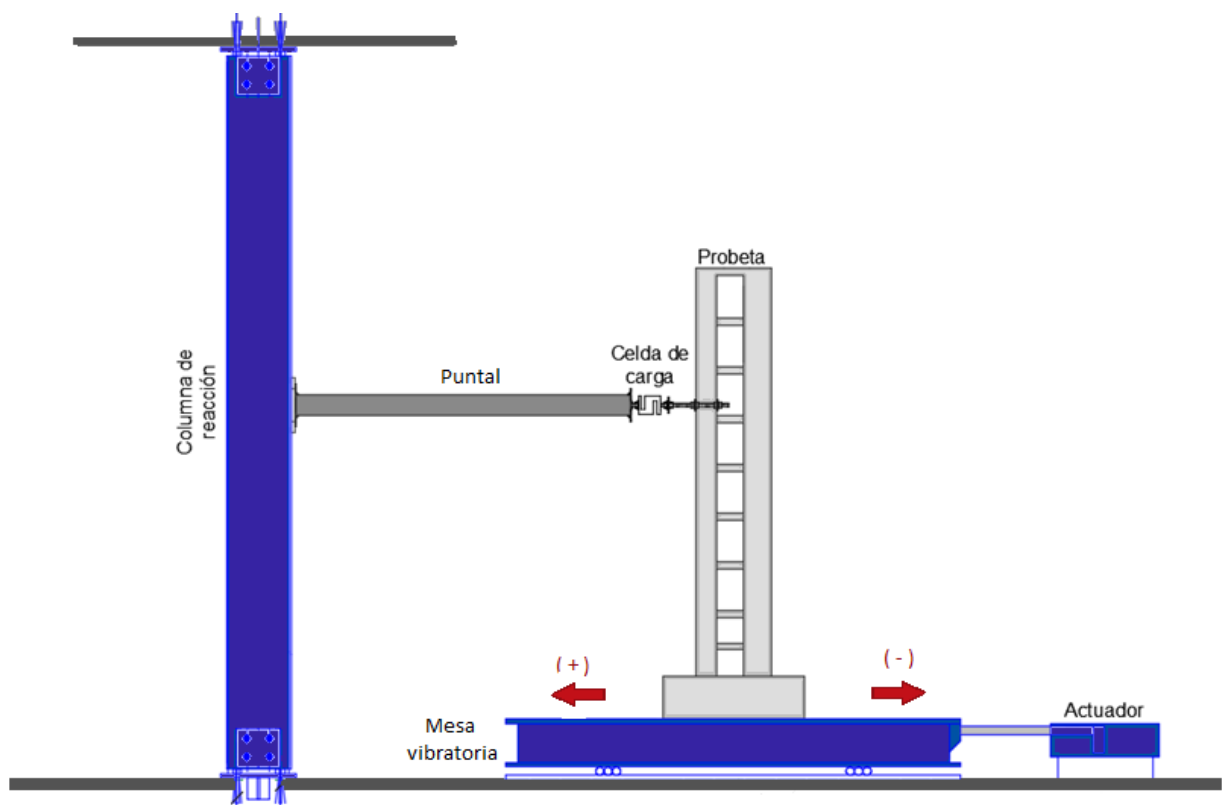


Figura 3.24. Esquema del funcionamiento del ensayo (Inga,2018)

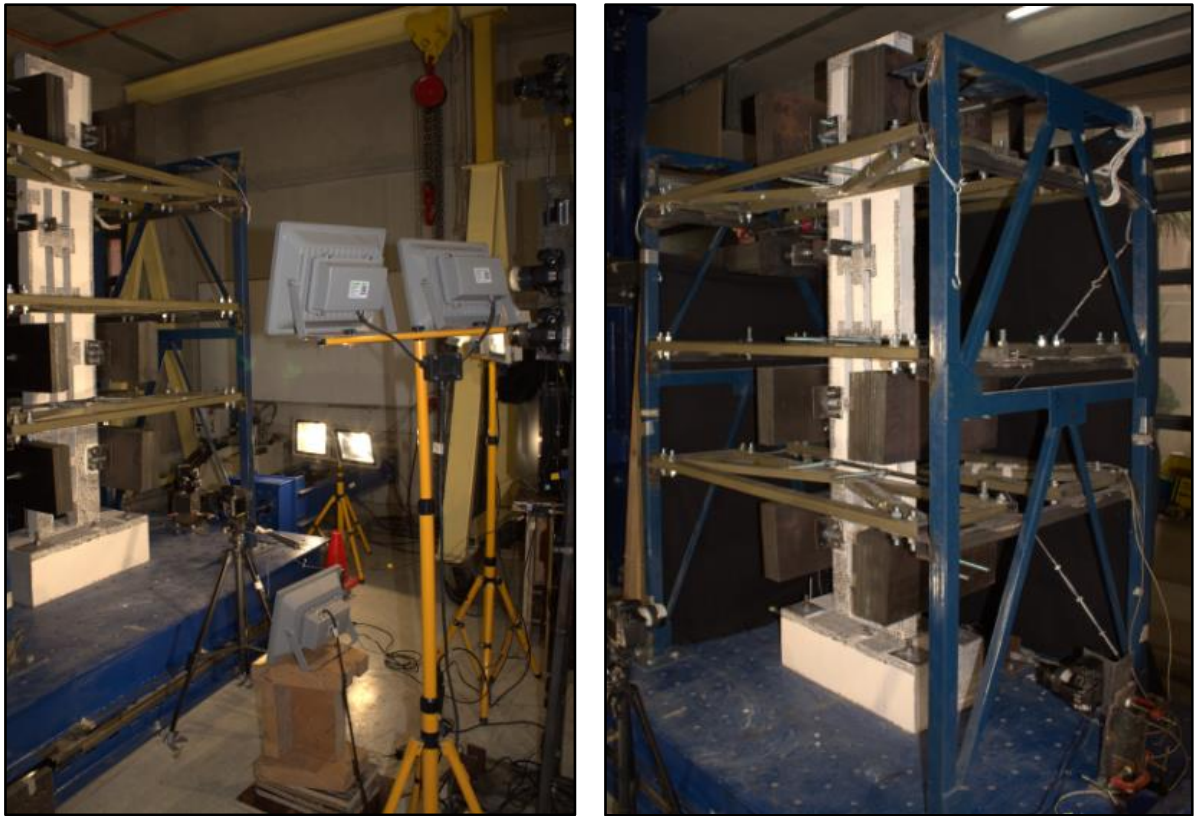


Figura 3.25. Montaje final del marco de restricción lateral y pesos sobre el muro



Figura 3.26. Conexión entre bomba hidráulica y actuador de la mesa vibratoria

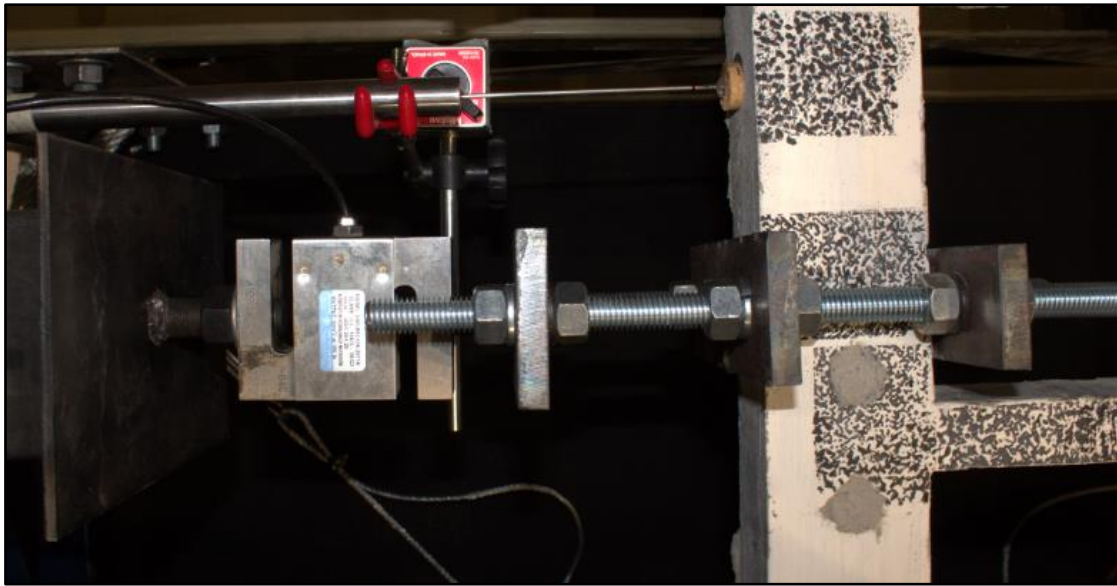


Figura 3.27. Detalle de conexión entre celda de carga y muro mediante sistema de pernos y placas de acero

3.5. Protocolo de carga

El procedimiento de ensayo consiste en un *pushover* cíclico, en el cual el modelo es sometido a una secuencia de desplazamientos horizontales, de forma controlada y cuasi-estática. Estos ciclos de desplazamiento incrementales son representativos de la deriva total esperada.

Para cada nivel de desplazamiento se realizan tres ciclos, considerando como punto neutro la posición cero de la mesa según su LVDT propio. Cada ciclo se define como un peak de extensión y contracción del actuador, pasando por su posición cero.

Tabla 3.7. Desplazamiento nominal del protocolo de ensayo

Deriva de techo [%]	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	0,75	1,00	1,25	1,60	2,00	2,50	3,20	4,00	6,00	8,00
Probeta 1 [mm]	1,5	2	3	4	5	7,5	10	12,5	16	20	25	32	40	60	80
Probetas 2, 3 y 4 [mm]	1,9	2,5	3,7	5,0	6,2	9,3	12,4	15,5	19,8	24,8	31,0	39,7	49,6	74,4	99,2

La distribución de la deriva se define de acuerdo al protocolo de carga desarrollado por la ACI 374.1-1. El nivel de deriva aumenta gradualmente desde un desplazamiento inicial dentro del rango de respuesta lineal elástico hasta el correspondiente a la rotura de la probeta. El documento establece que el aumento del nivel de desplazamiento debe ser entre 25-50%.

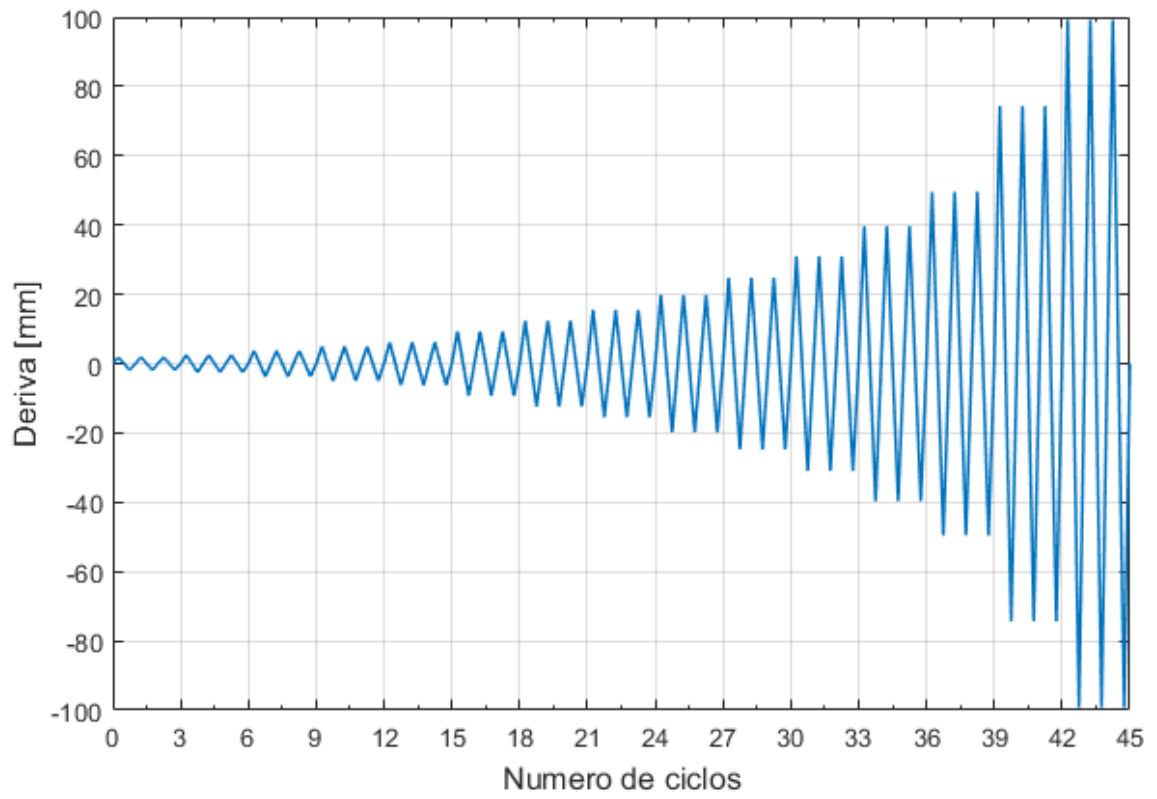


Figura 3.28. Protocolo de desplazamiento para las probetas 2, 3 y 4

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos obtenidos mediante fotogrametría.

En primer lugar, se describe la ejecución de los ensayos y el comportamiento general de las probetas. Luego, se exponen las curvas de carga lateral versus desplazamiento para evidenciar el comportamiento histerético alcanzado.

Seguidamente se presentan los perfiles de deformación vertical y curvatura que permiten fijar el inicio de fluencia de los muros y determinar los parámetros Φ_y y δ_y . Luego se comparan los resultados obtenidos experimentalmente con los valores teóricos calculados según las expresiones de Massone y Alfaro (2016) y Priestley y otros (2007) También se comparan con los resultados del modelo de fibras de Inga (2018)

Posteriormente se presentan los gráficos de deformación axial de las vigas de acople, y finalmente se verifica si existió inestabilidad fuera del plano durante los ensayos.

Cabe mencionar que, los resultados de análisis local se obtienen de analizar la envolvente según cada dirección del movimiento, mientras que el análisis lateral se realiza con el registro cíclico.

4.1. Grado de acoplamiento de las probetas

Las probetas se caracterizan por el grado de acoplamiento analítico calculado según ecuación II. Debido a que éste varía según el instante en el que se estén calculando las fuerzas resistentes, se consideran M_1 y M_2 como M_y de la aproximación bilineal del diagrama momento-curvatura de los muros, instante en el cual se asume que las vigas ya alcanzaron su capacidad.

La componente axial dada por las vigas se calcula a partir de la ecuación V, que supone falla por flexión. El detalle de cálculo del grado de acople se adjunta en el Anexo C.

Tabla 4.1. Grado de acoplamiento de las probetas analizadas

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4
Grado de acoplamiento (β)	51,68%	61,33%	61,91%	73,59%

4.2. Respuesta general de las probetas

En esta sección se presenta la respuesta general de las probetas durante el ensayo y la falla final observada. Los ensayos se realizaron en las fechas indicadas en la siguiente tabla:

Tabla 4.2. Fecha de ensayo de cada probeta

	Fecha ensayo
Probeta 1	25-05-2017
Probeta 2	11-07-2017
Probeta 3	24-08-2017
Probeta 4	11-09-2017

Para evidenciar el comportamiento histerético de cada probeta, se incluyen las curvas de carga versus desplazamiento. La carga lateral es registrada mediante una celda conectada al muro por un lado y al puntal de acero por el otro, mientras que el desplazamiento de techo se registra con un sensor LVDT vinculado a la mesa vibratoria. El desplazamiento real impuesto al muro se obtiene de corregir el registro del LVDT de la mesa, con los asociados al deslizamiento y rotación de la fundación.

Tabla 4.3. Carga máxima y mínima registrada por la celda, para cada probeta

	Carga máxima [kgf]	Deriva de techo [%]	Carga mínima [kgf]	Deriva de techo [%]
Probeta 1	730,13	4,00	-782,09	4,00
Probeta 2	905,14	4,00	-791,89	4,00
Probeta 3	794,63	6,00	-794,59	6,00
Probeta 4	980,83	3,20	-995,48	2,50

Probeta 1

El ensayo de la probeta 1 se realizó el día 25 de mayo de 2017 y tuvo una duración de 4 horas aproximadamente. En la siguiente figura se presenta el registro de carga versus desplazamiento.

Se observa que la carga soportada por la probeta aumenta hasta el 4,0% nominal, luego del cual se registra una disminución de sólo el 1,8% de la capacidad al alcanzar el desplazamiento de techo de 60 [mm] nominal. Ya en el último nivel del desplazamiento del 8,0% se aprecia una degradación de la capacidad.

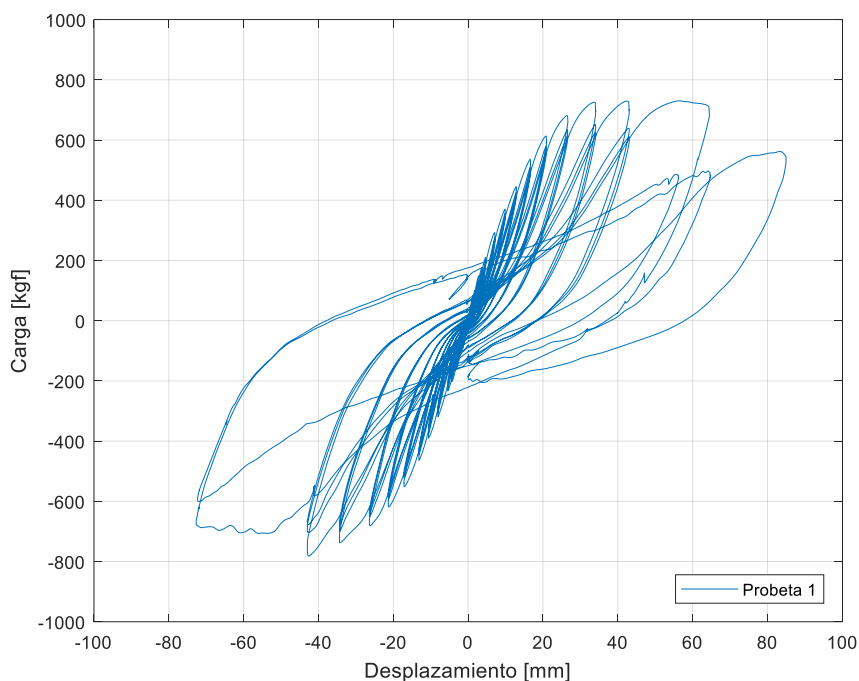


Figura 4.1. Curva de histéresis para la Probeta 1.

Las primeras grietas visibles se desarrollan en las uniones viga-muro del 4to piso en el nivel del 0,5% de la deriva. Al alcanzar el 0,75% se evidencia una grieta en la base por el borde izquierdo del muro más largo.

Debido a la densidad del patrón de manchas, era difícil visualizar las fisuras de pequeño espesor. Ya en el segundo ciclo del nivel 1,25% se observa la grieta basal en el muro más corto.

A medida que avanza el ensayo, se desarrollan fisuras por flexión en las vigas de pisos superiores, que se cierran al pasar por la posición 0% y se abren en la fibra opuesta a alcanzar el peak del sentido opuesto. Sin embargo, la viga del último piso ya en el 2,0% de la deriva comienza a desarrollar una fisura diagonal por su extremo izquierdo hacia el muro, y en el 3,2% aparece en su otro extremo. En este sector finalmente se produce el desprendimiento del hormigón.

Las fisuras en la base de los muros tienden a inclinarse hacia arriba en sus bordes internos (borde derecho para el muro izquierdo, borde izquierdo para el muro derecho). Esto pudo deberse a la imperfección que causó el moldaje de esa zona.

Se observa ya en el 4,0% un leve aplastamiento del hormigón en los extremos de las vigas, donde se puede apreciar que las fisuras abarcan la altura total de éstas.

Al alcanzar los -6[cm] de desplazamiento de techo (-6,0%) se produce una grieta diagonal en la viga del cuarto piso.

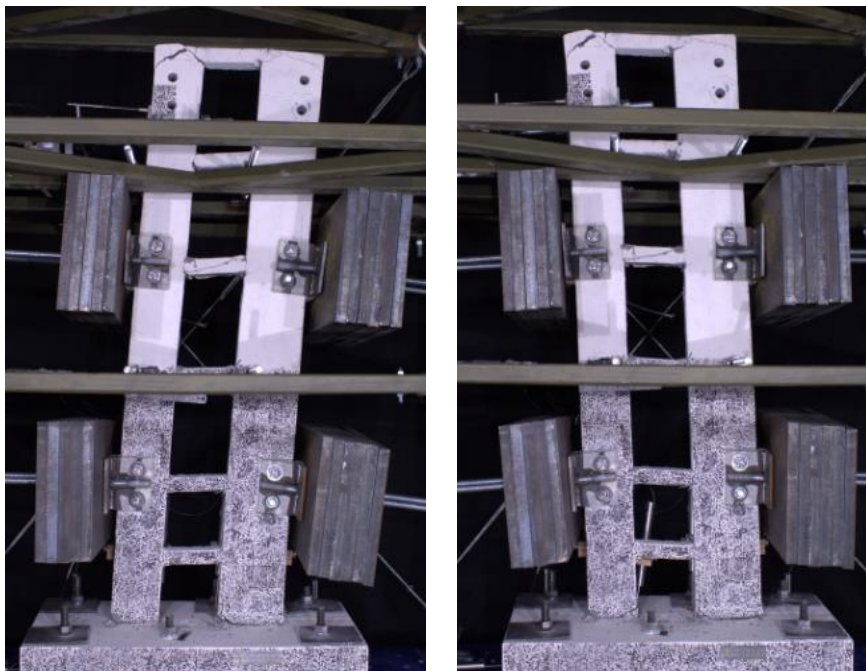


Figura 4.2. Imagen global de la probeta 1 al alcanzar el peak del desplazamiento de techo correspondiente al 6,0% nominal. Izq) sentido positivo; Der) sentido negativo – Probeta 1

En la Figura 4.3 se muestran 3 zonas que presentaron distintos tipos de daño. El análisis de la base del muro se realiza en la sección 4.5.

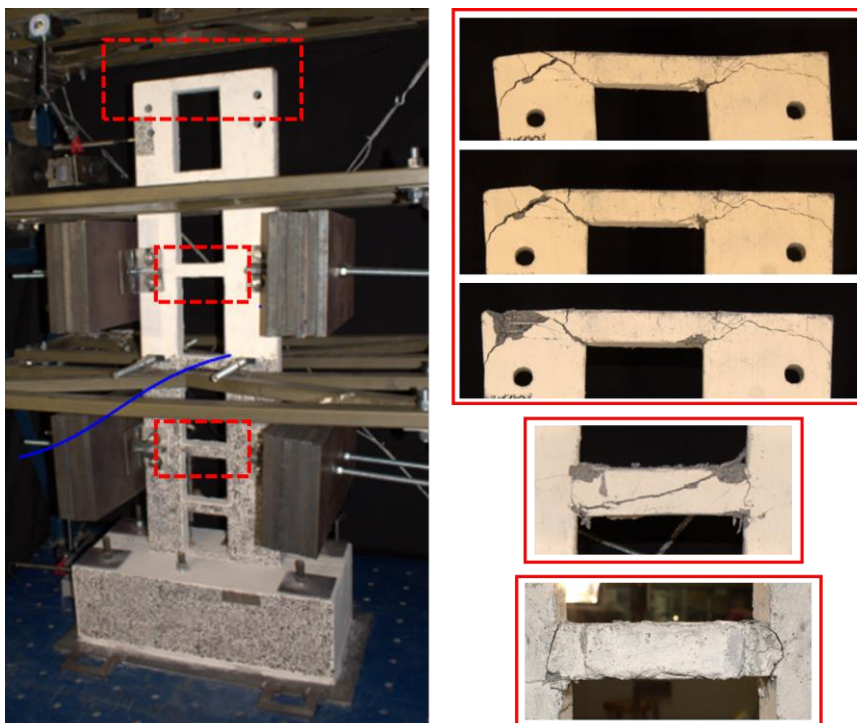


Figura 4.3. Detalle de fisuras en la parte superior del muro y falla de dos vigas – Probeta 1

Probeta 2

El ensayo de la probeta 2 se realizó el día 11 de julio de 2017 y tuvo una duración 4 horas aproximadamente.

El ensayo de la probeta 2 se realizó en dos oportunidades. En la primera, debido a una mala conexión de las mangueras de la bomba hidráulica, se produjo inicialmente un movimiento súbito de la mesa vibratoria que impuso un desplazamiento de techo de aproximadamente 2 cm y fisuró las vigas de acoplamiento. Entonces se interrumpió el ensayo y se reinició el día 11 de julio de 2017. No se tiene registro fotográfico del incidente, por lo que el análisis de la probeta 2 tiene como condición inicial este estado fisurado.

En la Figura 4.4 se presenta la curva de histéresis. Se observa que la carga aumenta hasta alcanzar el 4,0% nominal, luego del cual comienza la degradación de la resistencia. En el siguiente nivel se produce una disminución del 2% de la carga respecto del valor anterior, y en el nivel del 8,0% una reducción del 27%.

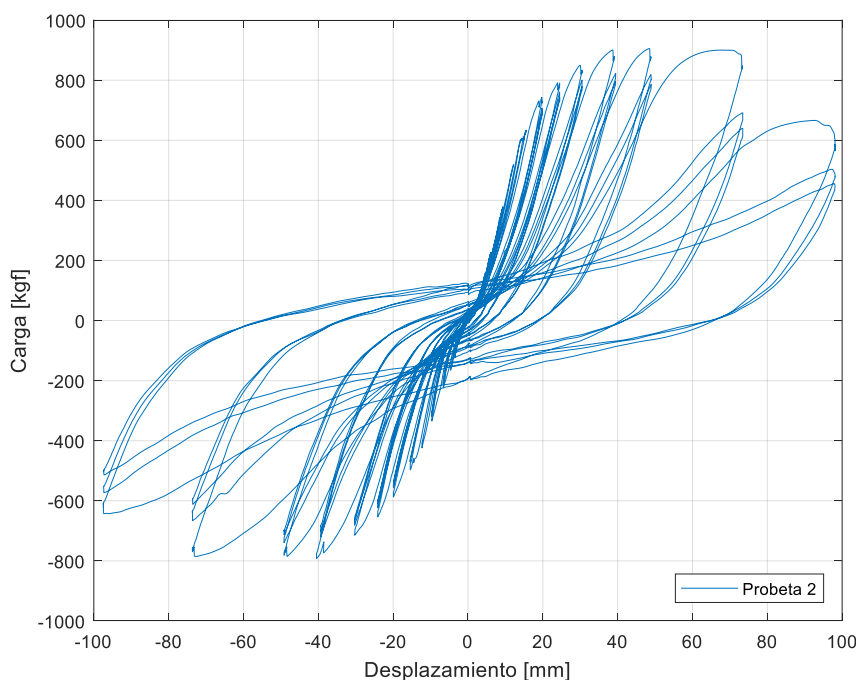


Figura 4.4. Curva de histéresis para la Probeta 2.

En la situación inicial al ensayo, se observa que las vigas del 4to al 6to piso ya presentan grietas por flexión. Incluso en la viga del último piso se observa la fisura diagonal en la unión con el muro corto. Ésta no parece aumentar de espesor hasta alcanzar el máximo del nivel del 1,0%. La grieta del otro extremo se produce en el peak negativo del 0,5%.

En el nivel del -1,0% se observa la grieta en la base del borde más traccionado del muro largo. En el siguiente nivel del +1,25% es posible apreciar las grietas basales en el extremo opuesto de ambos muros y una horizontal a una altura aproximada de 10 [mm] en el muro corto. Para este mismo nivel, al alcanzar el máximo negativo, se produce una grieta horizontal en el borde más traccionado del muro largo a la altura de la viga del primer piso.

Al alcanzar el +1,6% se produce una grieta horizontal en el muro largo, a la altura del eje de la viga del primer piso. Y en el +3,2% se genera la misma en el muro corto.

Al alcanzar el primer máximo positivo del nivel del 6.0% la grieta del último piso se abre completamente y en el tercer ciclo se produce el desprendimiento del hormigón, dejando la armadura a la vista.

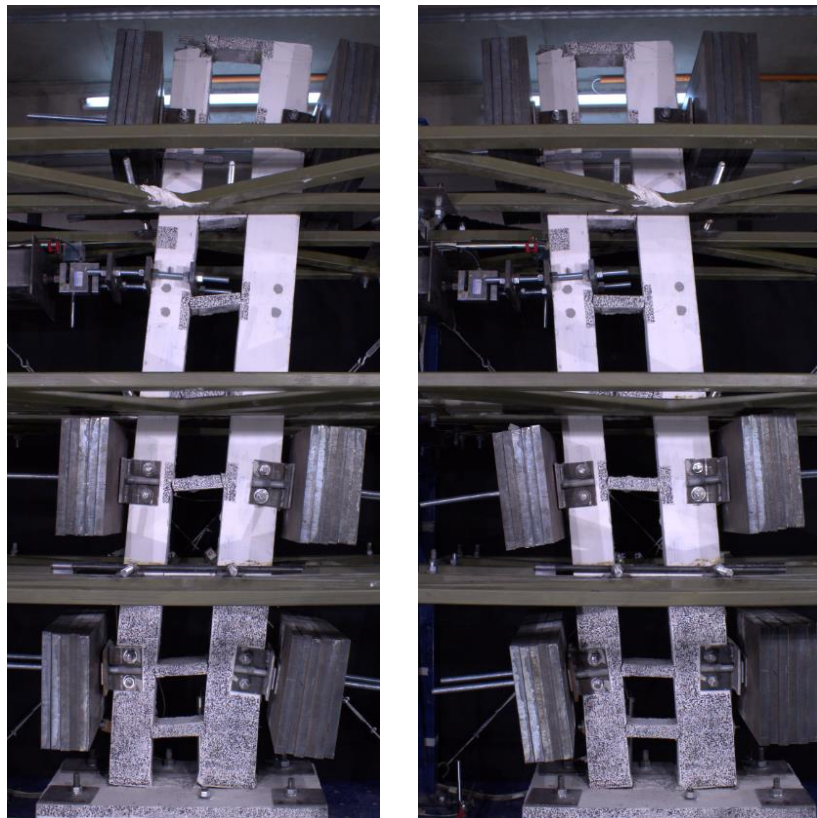


Figura 4.5. Imagen global de la probeta 2 al alcanzar el peak del desplazamiento de techo correspondiente al 8,0% nominal. Izq) sentido positivo; Der) sentido negativo

En la siguiente figura se muestran 3 zonas que presentaron distintos tipos de daño. El análisis de la base del muro se realiza en la sección 4.5.

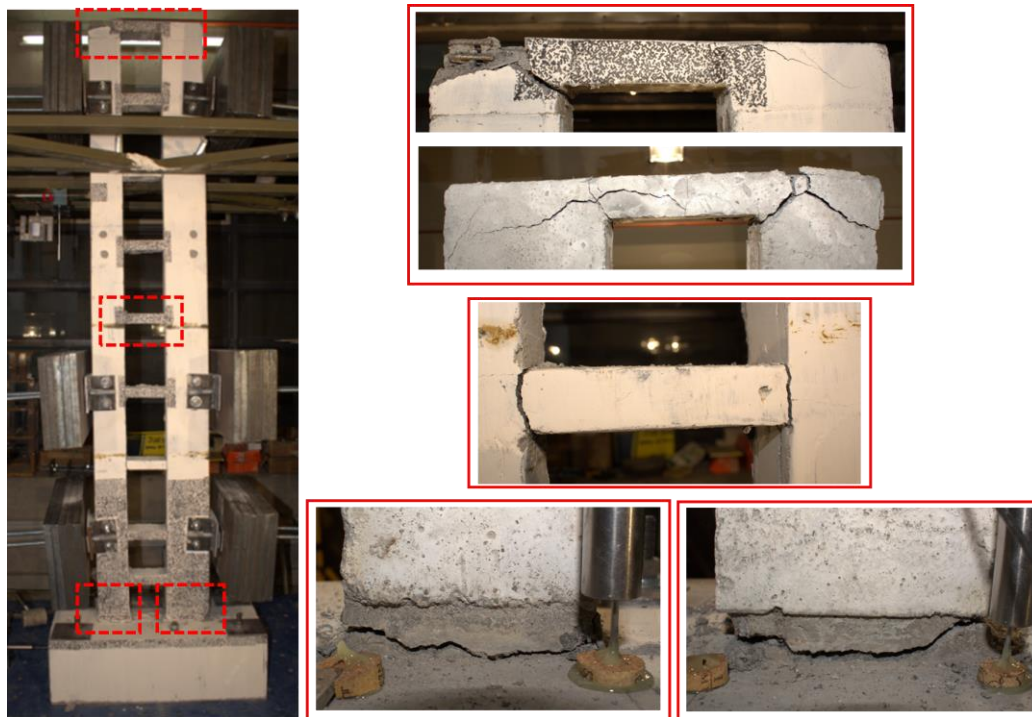


Figura 4.6. Detalle de fisuras en la parte superior de la probeta (por la cara del frente y posterior); grietas de flexión en la 5ta viga; y fisuras en la base de ambos muros – Probeta 2

Probeta 3

El ensayo de la probeta 3 se realizó el día 24 de agosto de 2017 y tuvo una duración de 4 horas aproximadamente.

En la Figura 4.7 se aprecia la histéresis registrada por la Probeta 3. La carga máxima fue de 794 [kgf] al alcanzar el primer peak del 6,0% de la deriva nominal, luego soporta una carga de 655 [kgf] en el último nivel de desplazamiento. Se observa que la pendiente de la envolvente en su tramo inicial es menor que la desarrollada por la Probeta 2, es decir, es menos rígida.

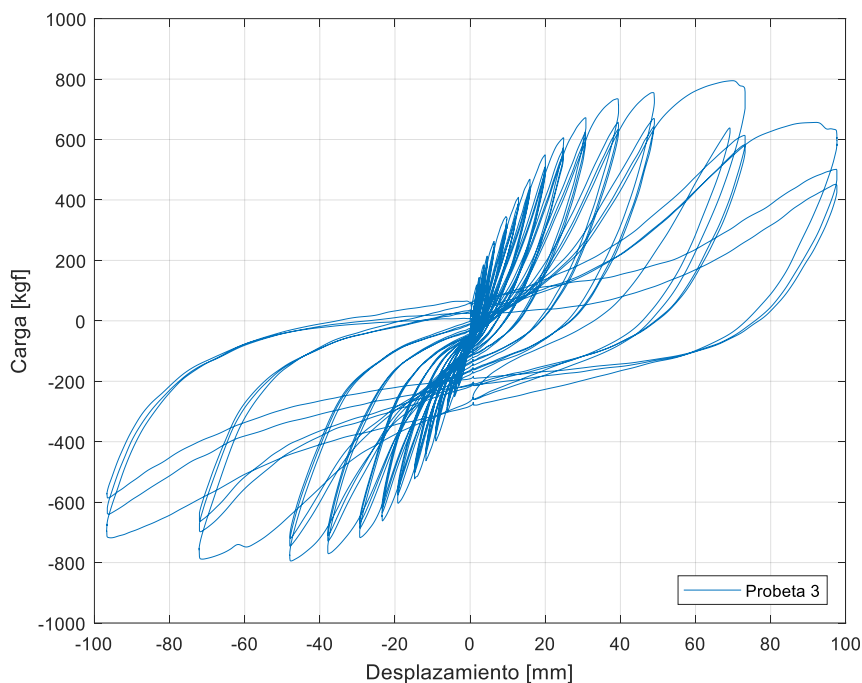


Figura 4.7. Curva de histéresis para la Probeta 3

La primera grieta visible en la base del muro corto se observa en el nivel del +1,0% del desplazamiento de techo. No es posible observar bien el borde izquierdo del muro largo debido a la presencia del perno de anclaje

Cuando se alcanza el máximo del -0,75% y el muro más largo tiende a traccionarse, es posible observar la grieta horizontal en la base.

En este mismo nivel se producen las grietas horizontales a la altura de la viga del primer piso, en el sentido positivo para el muro corto, y en el sentido negativo para el muro largo (sentido correspondiente a la tracción de cada uno)

Ya cuando se alcanza el nivel del 8,0% se observa que la grieta basal de ambos muros abarca toda su longitud, y el hormigón de la base se separa completamente de la fundación. En el segundo ciclo de este nivel, se produce un desprendimiento en el extremo derecho del muro más largo, producto del pandeo de la barra longitudinal.

Con respecto a las vigas, las primeras grietas visibles por flexión se observaron en la viga del 4to piso para el nivel del 0,4%. En la viga del último piso, se genera una grieta inclinada que nace en la unión de la fibra inferior de la viga con el muro y se extiende hacia éste. Esta grieta se abre completamente al alcanzar el máximo positivo del 6,0% y en el primer ciclo del 8,0% se desprende todo el hormigón del borde superior de la probeta.

En la Figura 4.9 se muestran 3 zonas que presentaron distintos tipos de daño. El análisis de la base del muro se realiza en la sección 4.5.

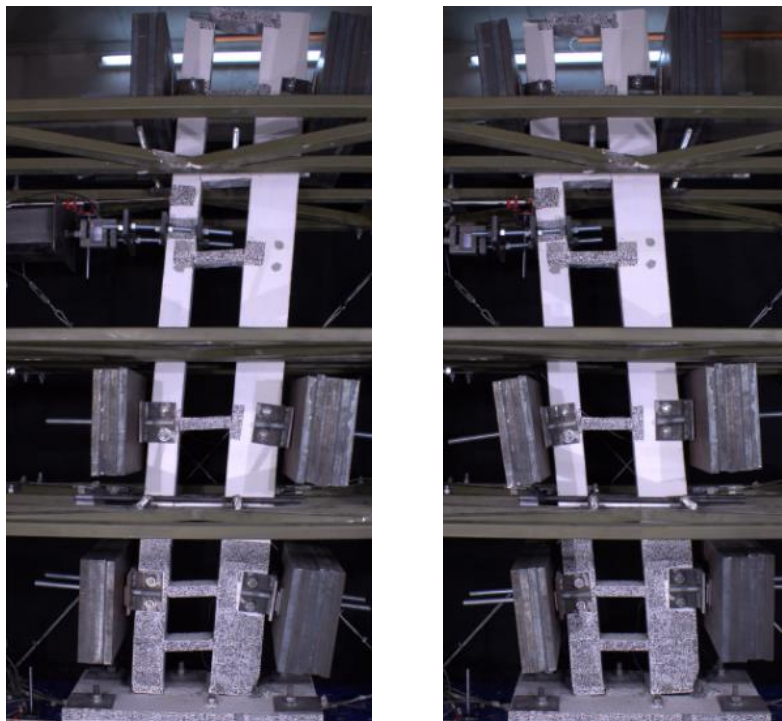


Figura 4.8. Imagen global de la probeta 3 al alcanzar el peak del desplazamiento de techo correspondiente al 8,0% nominal. Izq) sentido positivo; Der) sentido negativo

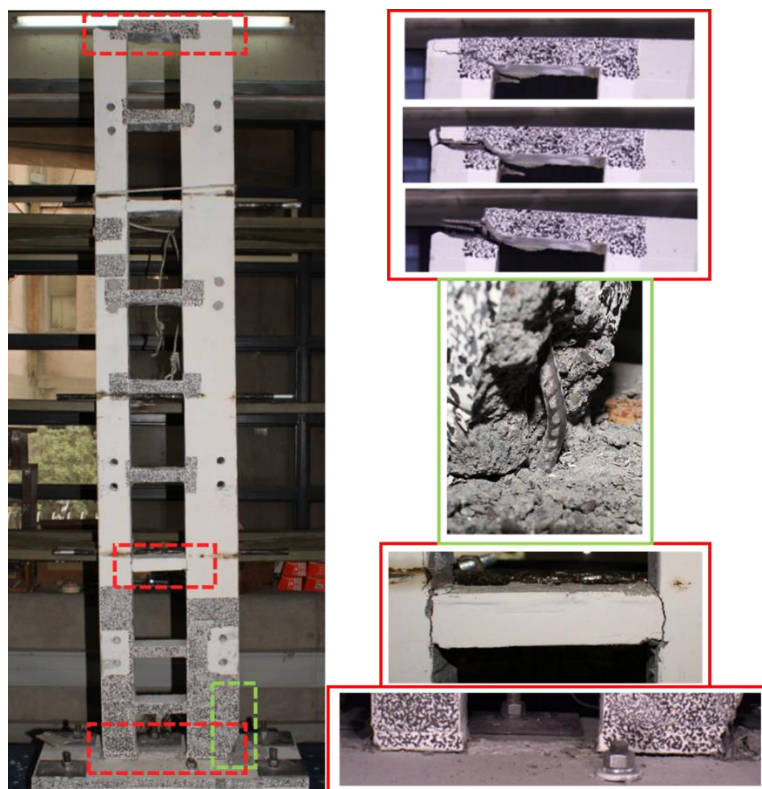


Figura 4.9. Detalle de fisuras en el último piso del muro para los últimos 3 niveles de desplazamiento de techo; pandeo de barra longitudinal; grietas de flexión en las uniones viga-muro; y grietas en la base – Probeta 3

Probeta 4

El ensayo de la probeta 4 se realizó el día 11 de septiembre de 2017 y tuvo una duración de 3 horas con 25 minutos aproximadamente.

En la siguiente figura se muestra el registro de carga versus desplazamiento del ensayo. La carga máxima se alcanza en el 3,2% de la deriva nominal. Luego disminuye sólo un 2% en el siguiente nivel y ya en los drift del 6,0 y 8,0% se observa una gran pérdida de la capacidad (disminución del 16% y 32%).

Al analizar la pendiente de la envolvente, se deduce que esta probeta es la de mayor rigidez.

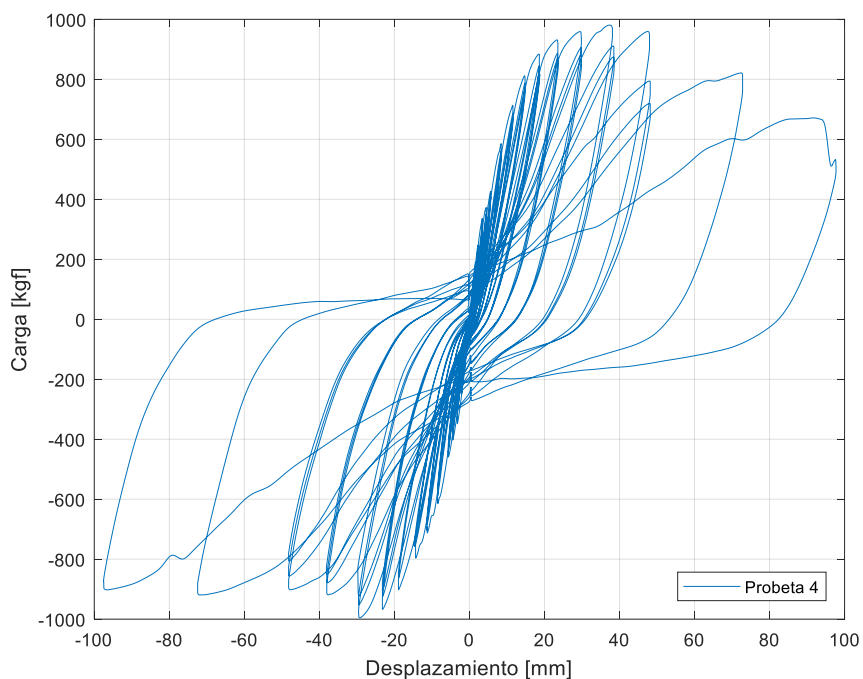


Figura 4.10. Curva de histéresis para la Probeta 4.

La primera grieta visible se observa en la base del muro corto, en el peak de su tracción (sentido positivo) del nivel del 0,3%. Mientras que la primera grieta del muro más largo, observada como una delgada línea, se produce en el nivel del 0,5%. Ya en el nivel del 1,0% se produce una grieta en el otro extremo del muro más largo, cuando el muro corto tiende a traccionarse. En este último además se origina una fisura horizontal a la altura de la viga del primer piso.

Cuando se alcanza el máximo negativo del tercer ciclo del 1,6%, se genera una grieta inclinada en el muro largo que comienza a una altura de 80 [mm] aproximadamente, cruza todo su largo y llega hasta la viga del primer piso.

En el nivel del 3,2% es posible observar que las grietas en la base de ambos muros, permanecen abiertas incluso en la posición no deformada. Y en el primer máximo negativo de este nivel, se produce una grieta diagonal en el muro largo, por debajo de la primera.

Al alcanzar el primer máximo negativo del 4,0% se produce un desprendimiento de hormigón en el extremo izquierdo del muro más largo. Y en el siguiente ciclo se genera una grieta vertical en el mismo muro a aproximadamente 20 [mm] del borde, que crece desde la base hasta la altura del soporte de los pesos, y que luego provocará el desprendimiento del hormigón de ese extremo.

Cuando finaliza el primer ciclo del nivel 6,0%, la grieta diagonal del muro más largo se abre completamente, provocando la caída de todo el hormigón que deja a la vista la armadura.

Con respecto a las vigas, éstas no sufrieron mayor daño. Se observaron delgadas fisuras por flexión en sus extremos.

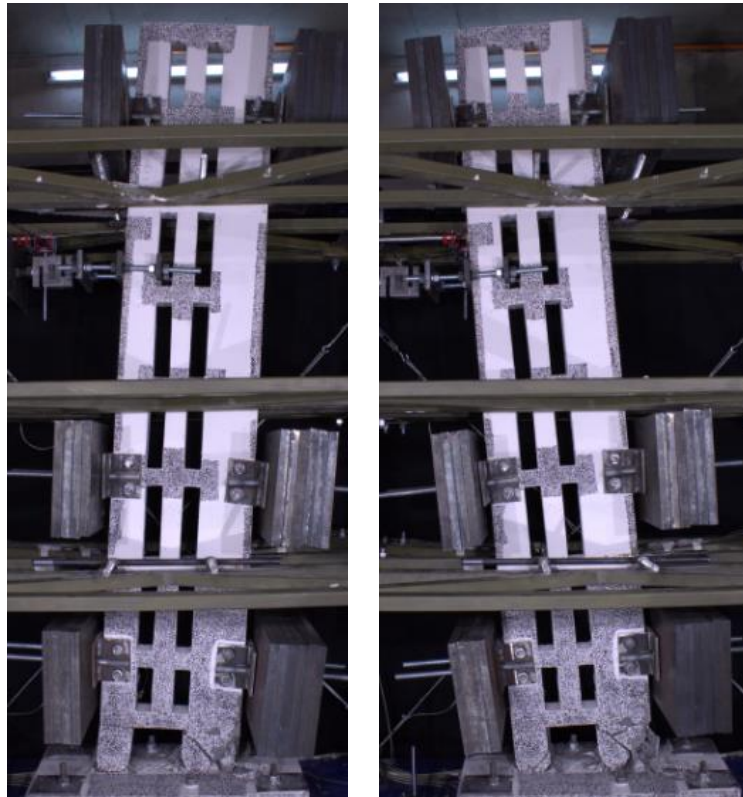


Figura 4.11 Imagen global de la probeta 4 al alcanzar el peak del desplazamiento de techo correspondiente al 8,0% nominal. Izq) sentido positivo; Der) sentido negativo

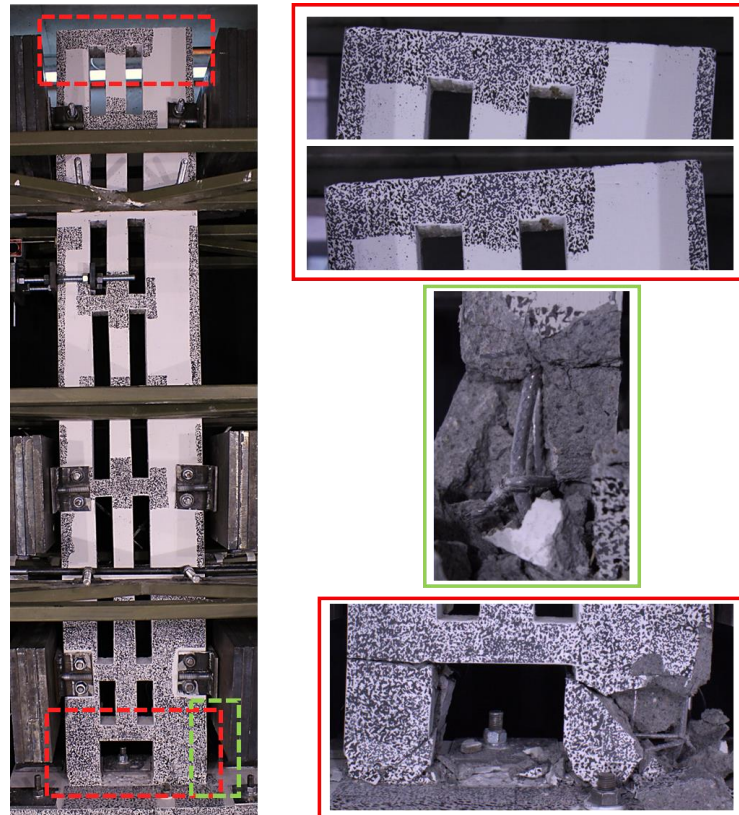


Figura 4.12. Detalle de fisuras en el último piso del muro para los máximos del último nivel de desplazamiento de techo; pandeo de barra longitudinal en cara lateral; y grietas en la base – Probeta 3

Al contrastar el comportamiento histerético de las probetas, es posible ordenarlas en términos de su resistencia, rigidez y ductilidad.

La probeta con mayor capacidad de carga es la Probeta 4, que alcanzó una carga máxima de 980 [kgf]. En orden decreciente, siguen las probetas 2, 3 y 1.

En términos de la pendiente de la envolvente de la curva de histéresis, el modelo de mayor rigidez corresponde a la probeta 4, la cual tiene una columna central que rigidiza el sistema. En orden decreciente, siguen las probetas 2, 1 y 3. A pesar de que la estructuración de la Probeta 1 es de mayor rigidez que el de la Probeta 2 (porque tiene los mismos largos de muro, pero de menor altura), su respuesta se vio afectada por el menor nivel de carga axial adicionada.

Al ordenar las probetas según el nivel de desplazamiento de techo para el cual se produce la degradación de resistencia, se obtiene en orden creciente las probetas 4 (3,2%), 2 (4,0%), 1 (4,0-6,0%) y 3 (6,0%). Por lo tanto, se obtiene que el acoplamiento genera una degradación anticipada.

4.3. Resultados por fotogrametría

4.3.1. Descripción del Software

El software presenta una interfaz fácil de comprender en la que el usuario puede ver el avance en cada una de las etapas del procesamiento (ver Figura 4.13). Las etapas son las siguientes:

- Cargar imagen de referencia
- Cargar imágenes deformadas
- Establecer el área de interés (*Region-of-interest, ROI*)
- Elección de los parámetros de correlación (*DIC parameters*): Tamaño del subconjunto, espaciamiento entre puntos, cantidad máxima de iteraciones, cantidad de núcleos del procesador a utilizar, y otros (ver Tabla 4.5).
- Ejecutar análisis: en este paso se ubica la “semilla” que utiliza el software como punto inicial para el cálculo de los puntos vecinos.
- Formatear desplazamientos: se debe ingresar (o calcular) la escala [mm/pixel] para convertir los datos a unidad de longitud.
- Cálculo de deformaciones: en esta etapa se debe escoger el tamaño del plano que se ajustará por mínimos cuadrados al campo de desplazamientos, para obtener el gradiente y deformaciones.

Cabe mencionar que, en la condición inicial de cada ensayo, la probeta se encuentra cargada axialmente debido a los pesos instalados en los soportes. Por lo tanto, la imagen de referencia corresponde a este estado.

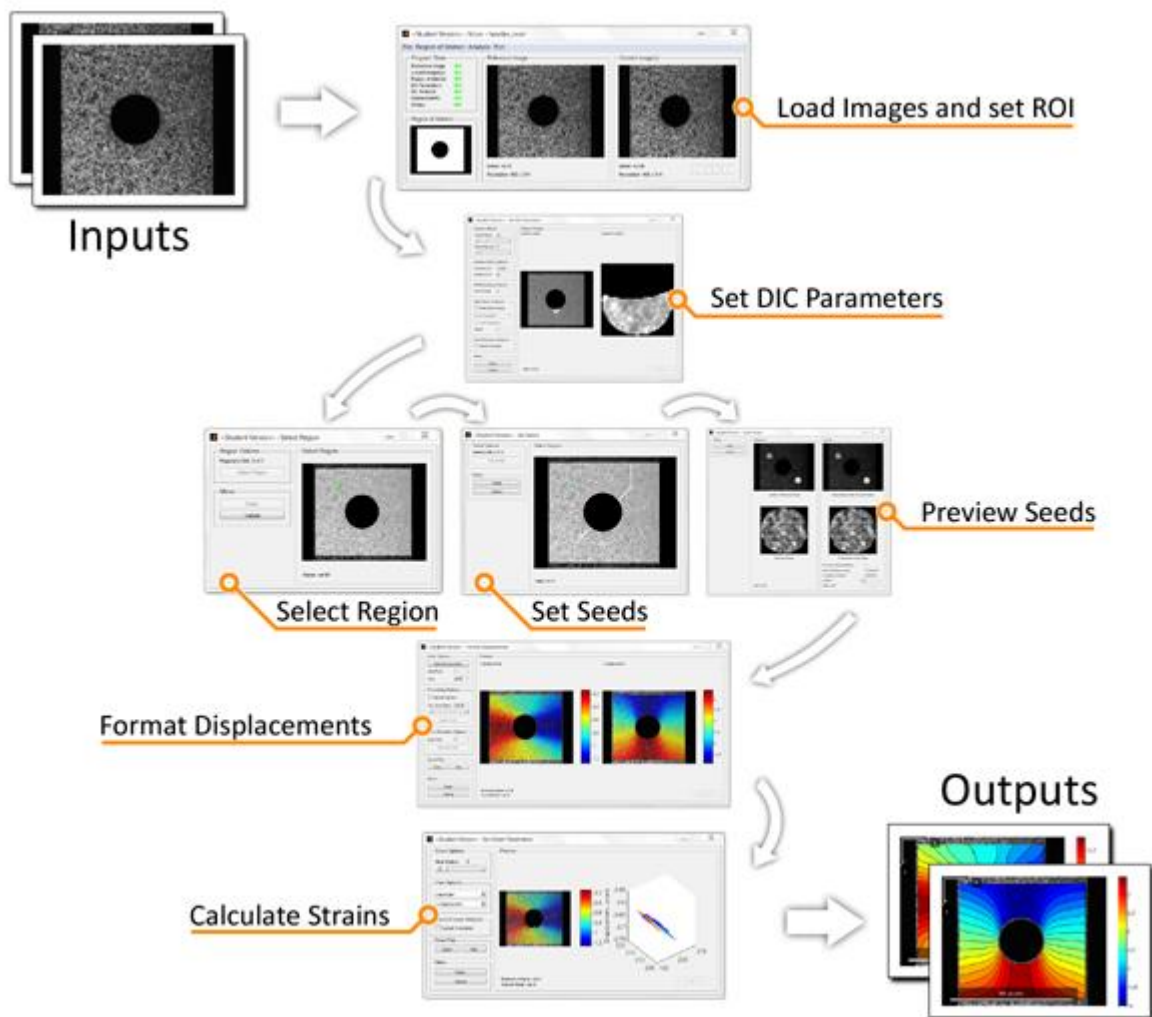
Los parámetros utilizados en el procesamiento se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 4.4. *DIC parameters*: Tamaño del subconjunto, espaciamiento y radio de deformaciones

		Subset Radius	Subset Spacing	Strain Radius
Muro 1	local	40	10	10
	lateral	40	10	10
Muro 2	local	40	10	10
	lateral	120	10	10
	vigas	40	10	10
Muro 3	local	40	10	10
	lateral	120	20	10
	vigas	40	10	10
Muro 4	local	40	10	10
	lateral	100	20	10
	vigas	40	10	10

Tabla 4.5. DIC parameters constantes para todos los ensayos

Diff Norm C/O	1E-06
Iteration #	50
Num Threads (cantidad de núcleos)	4
High Strain Analysis (análisis de grandes deformaciones)	Seed Propagation
Step Analysis (análisis por pasos)	Habilitado
Discontinuous Analysis o subset truncation	Habilitado

Figura 4.13. Flujo general de cómo se utiliza el programa. Extraído de <http://ncorr.com/index.php/applications>

4.3.2. Medidas de precisión

Con respecto a la precisión de los resultados obtenidos por fotogrametría, es posible distinguir dos tipos de error: uno relacionado con la cantidad de información que el programa puede obtener de una imagen; y otro relacionado con la forma de obtener esta información.

En el primer caso, el error está dado por la escala [$mm/pixel$] que representa el tamaño de un pixel, por lo tanto es una cota inferior para los resultados de desplazamiento permitidos por la fotogrametría. El pixel es la unidad básica de una imagen, entonces el programa puede confundir como mínimo entre un pixel y otro adyacente, de esta manera se puede entender la escala como la exactitud del software para escoger los puntos correctos en su procesamiento. Entre menor sea la escala, mayor es la cantidad de pixeles en una distancia específica, y por tanto menor es el error.

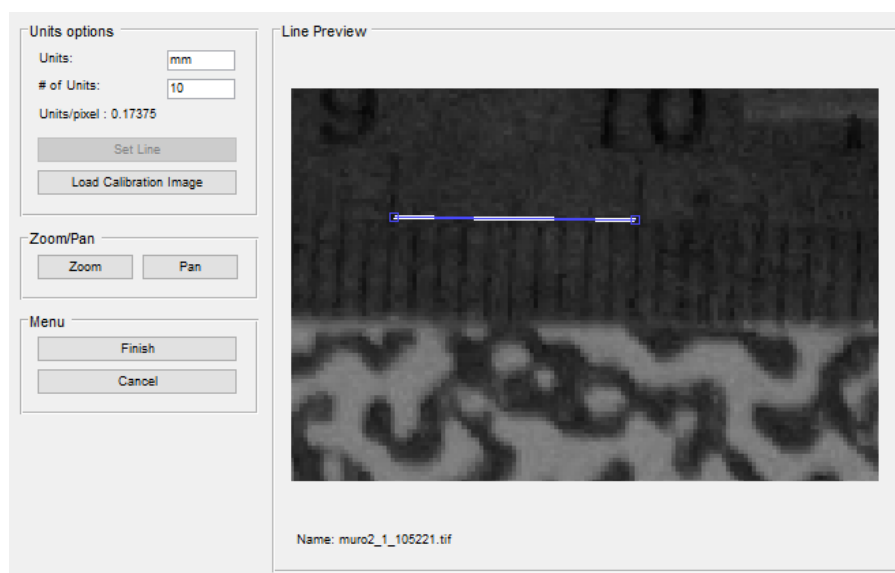


Figura 4.14. Procedimiento para obtener la escala en Ncorr

Para obtener la escala en el software Ncorr, se debe introducir la “imagen de calibración” correspondiente a aquella que se capturó con la regla adherida a la superficie del hormigón. Se traza una línea de longitud conocida sobre la cantidad de pixeles correspondientes, y el programa la calcula de manera automática.

La escala se relaciona directamente con la resolución de las imágenes dada por la cantidad de fotositos del sensor de la cámara, y la distancia al objeto retratado. Existen dos formas de obtener una menor escala: contar con una cámara de alta resolución medida en pixeles; y para una distancia focal fija acercarse lo más posible al objeto de manera de que éste abarque todo el enfoque. Si las condiciones del montaje no permiten una adecuada proximidad a la probeta, se puede considerar disminuir la distancia focal del lente óptico.

Tabla 4.6. Escala [mm/pixel] para cada configuración y probeta ensayada

	Local	Lateral	Vigas 1	Vigas 2	Fundación
Probeta 1	0.2598	0.0875	-	-	0.2443
Probeta 2	0.1738	0.0655	0.1474	0.1473	0.1494
Probeta 3	0.1707	0.0419	0.1445	0.1477	0.1416
Probeta 4	0.1686	0.0457	0.1471	0.1496	0.1456

El error en la precisión de las deformaciones se determina como el error de un pixel sobre la cantidad de pixeles que contiene la vecindad de subconjuntos donde se calcula la deformación (ver Tabla 4.4) Esto queda expresado en la siguiente ecuación (Manriquez, 2016)

$$e_s = \frac{1 \text{ [pixel]}}{(S_S + 1)(2R_S + 1)} \quad (\text{XLII})$$

Donde e_s es el error asociado al cálculo de deformaciones, S_S es el *Subset Spacing* o espaciamiento del subconjunto y R_S es el *Strain Radius* o radio de vecindad de la deformación.

De este modo, se obtiene que el error de deformación asociado a la escala y parámetros de correlación es para todas las configuraciones $4,3 \cdot 10^{-3}$.

Por otro lado, el error asociado al procesamiento de la información proviene directamente de las condiciones iniciales del montaje: contraste y aleatoriedad del patrón sobre la superficie del elemento, luminosidad adecuada y estable durante el ensayo, inmovilidad de los soportes de cámara, etc.

La forma de obtener este error intrínseco consiste en procesar, utilizando los mismos parámetros que para el resto del ensayo, dos imágenes consecutivas con el objeto en estudio completamente en reposo y estable. Cabe mencionar, que estas fotografías se deben tomar bajo las mismas condiciones en las que se llevarán a cabo cada uno de los ensayos.

Debido a que el objeto en estudio se encuentra inmóvil, las matrices de desplazamiento y deformación debiesen ser nulas, por lo tanto, cada valor distinto de cero se interpreta como un defecto del montaje y/o procesamiento. La Figura 4.15 muestra el mapa de colores de las deformaciones obtenidas para éste análisis, mientras que la Figura 4.16 presenta el gráfico de los desplazamientos

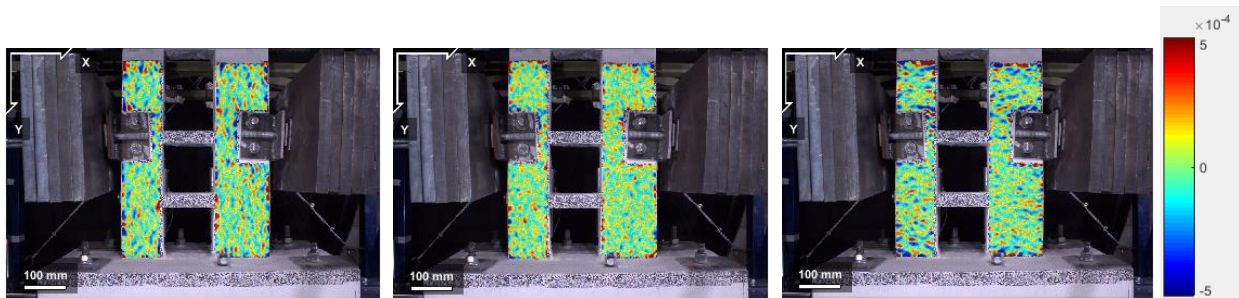


Figura 4.15. Detección de imprecisiones debido a montaje y formulación para probeta 2
a) Deformación ϵ_{xx} ; b) Deformación ϵ_{xy} ; c) Deformación ϵ_{yy}

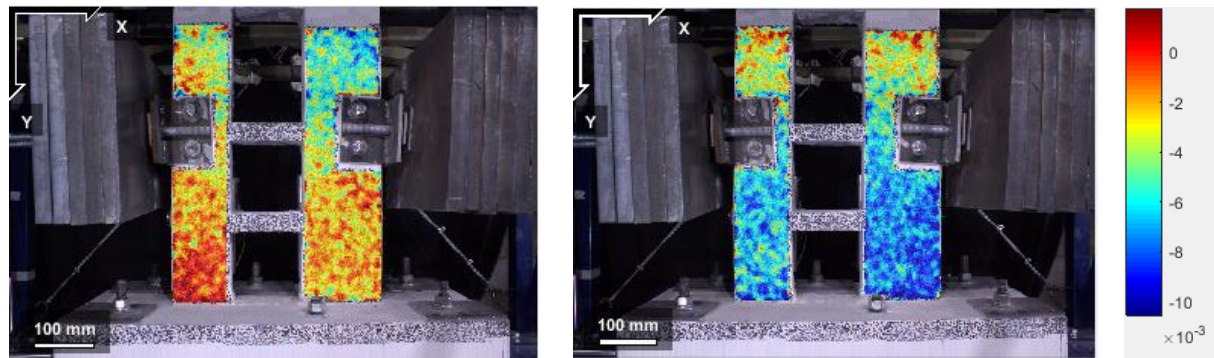


Figura 4.16. Detección de imprecisiones debido a montaje y formulación del software para probeta 2
a) Desplazamiento u ; b) Desplazamiento v

En las siguientes tablas se presentan los datos estadísticos de desplazamiento y deformación obtenidos del análisis recién expuesto, para cada una de las cámaras y todos los ensayos.

Tabla 4.7. Datos estadísticos de error por montaje y procesamiento del software – Probeta 1

Probeta 1		u [mm]	v [mm]	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{xy}
local	max	0.0735	0.0938	0.0029	0.0038	0.003
	prom	0.0008	0.0188	-0.0001	-0.0003	0
	min	-0.0665	-0.0323	-0.0051	-0.0032	-0.019
lateral	max	0.006	0.0125	0.0017	0.0025	0.0008
	prom	-0.0047	0.0016	0	0	0
	min	-0.0151	-0.0099	-0.0028	-0.003	-0.0014

Tabla 4.8. Datos estadísticos de error por montaje y procesamiento del software – Probeta 2

Probeta 2		u [mm]	v [mm]	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{xy}
local	max	0.0119	0.0155	0.0019	0.0024	0.0012
	prom	-0.0024	-0.0063	0	0	0
	min	-0.0157	-0.0170	-0,0018	-0.0021	-0.0019
lateral	max	0.0106	0.0089	0.0025	0.0026	0.0015
	prom	0.0004	0.0017	0	0	0
	min	-0.0099	-0.0098	-0.0025	-0.0025	-0.0018
vigas 1	max	0.0218	0.0044	0,0005	0.0008	0.0007
	prom	0.0141	0.0035	0	0	0
	min	-0.0059	0.0094	-0,0007	-0.0015	-0.0011
vigas 2	max	0,0307	-0.0073	0,0005	0.0008	0.0007
	prom	-0,0516	-0,0178	0	0	0
	min	-0,0755	-0,0248	-0,0007	-0.0015	-0.0011

Tabla 4.9. Datos estadísticos de error por montaje y procesamiento del software – Probeta 3

Probeta 3		u [mm]	v [mm]	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{xy}
local	max	0.0383	0.032	0.0018	0.0026	0.0008
	prom	0.0025	0.0046	0	0	0
	min	-0.0078	-0.0184	-0.0017	-0.0022	-0.0018
lateral	max	0.006	0.0042	0.0009	0.0007	0.0007
	prom	-0.0104	-0.0005	0	0	0
	min	-0.0134	-0.0038	0.0014	-0.0013	0.0007
vigas 1	max	0.0308	0.0074	0.0005	0.0004	0.0004
	prom	0.0075	-0.0015	0.0001	0	0
	min	-0.0149	-0.0127	-0.0004	-0.0004	-0.0002
vigas 2	max	-0.0041	0.0201	0.0003	0.0008	0.0002
	prom	-0.018	0.0072	0	0	0
	min	-0.0355	-0.0207	-0.0003	-0.0003	-0.0003

Tabla 4.10. Datos estadísticos de error por montaje y procesamiento del software – Probeta 4

Probeta 4		u [mm]	v [mm]	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{xy}
local	max	0.0249	0.004	0.001	0.0006	0.0006
	prom	0.0045	-0.0102	0	0	0
	min	-0.0121	-0.0247	-0.0008	-0.0008	-0.0004
lateral	max	-0.0203	0.0105	0.0002	0.0001	0.0002
	prom	-0.0288	0.0042	0	0	0
	min	-0.0351	-0.0016	-0.0002	0.0003	-0.0002
vigas 1	max	-0.00154	0.0228	0.0001	0.0006	0.0002
	prom	-0.0303	0.0141	-0.0001	0	0
	min	-0.0488	-0.0019	-0.0005	-0.0002	-0.0002
vigas 2	max	-0.1191	0.0439	0.0005	0.0006	0.0004
	prom	-0.1507	0.0122	0	0	0
	min	-0.1801	-0.0046	-0.0005	-0.0003	-0.0007

Existe además otra medida del error intrínseco: el coeficiente de correlación. Este valor representa la relación de correspondencia entre la ubicación de un punto entre la imagen de referencia y la imagen siguiente, es decir, indica que tan precisa fue la iteración en busca del desplazamiento. Un valor cercano a 0 indica una buena correlación. Cada punto de la región de interés tiene su coeficiente, por lo tanto, cada imagen tendrá una matriz del tamaño de puntos creados, y un set de imágenes tendrá tantas matrices como cantidad de fotografías analizadas.

Es importante mencionar que los puntos con mayor error son aquellos cercanos al borde de la región de interés. Esto debido a que el campo de desplazamiento para los puntos limítrofes debe ser extrapolados antes de obtener los coeficientes de la interpolación que aproxima la solución de desplazamiento.

Tabla 4.11. Máximo coeficiente de correlación para el análisis de error intrínseco (dos fotos en reposo)

	Local	Lateral	Vigas 1	Vigas 2
Probeta 1	0.0172	0.0396	-	-
Probeta 2	0.0352	0.8233	0.0172	0.0164
Probeta 3	0.0604	0.0145	0.0269	0.0351
Probeta 4	0.0564	0.0231	0.0389	0.0498

En resumen, para todos los casos se obtiene que el error medido con la escala [mm/pixel] es mayor al que se obtiene por condiciones de montaje experimental y procesamiento, por lo tanto, es ésta la que se considerará para la discusión de resultados.

4.3.3. Comparación de desplazamientos entre fotogrametría y LVDT

Con el objetivo de verificar la similitud de los datos obtenidos por los sensores de desplazamiento con los de fotogrametría, se realiza un análisis de grandes desplazamientos. Se comparan los resultados de desplazamiento de techo obtenidos por el LVDT de referencia (L_{ref}) que conecta la mesa vibratoria a un sistema fijo (piso del laboratorio) y los correspondientes al movimiento de la fundación.

La Figura 4.17 presenta los resultados para los cuatro ensayos realizados. Se observa una alta correlación de los datos, que siguen la tendencia de la recta diagonal. En la siguiente tabla se resume el factor de regresión lineal de cada probeta.

Tabla 4.12. Factor de correlación para desplazamiento de techo obtenido por LVDT y fotogrametría

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4
R^2	0.9999	0.9894	0.9999	0.9999

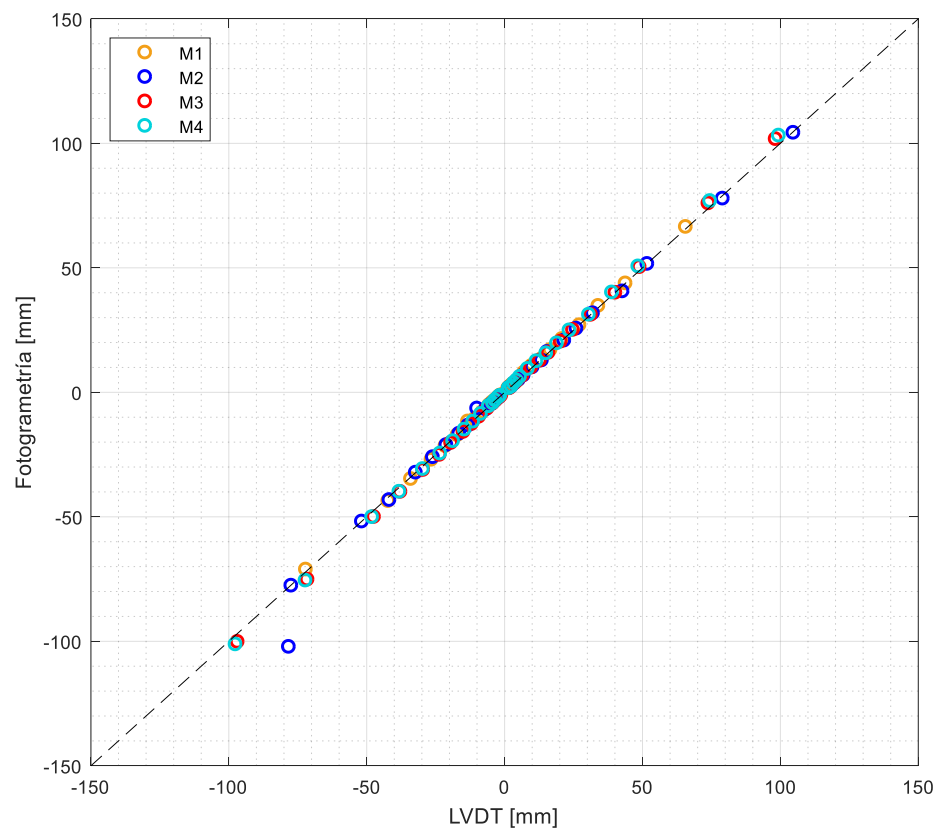


Figura 4.17. Comparación de desplazamiento de techo entre LVDT y fotogrametría

4.4. Corrección del desplazamiento de techo

El desplazamiento de techo se registra mediante dos instrumentos: sensores LVDT y fotogrametría.

Se utilizan dos principales sensores de desplazamiento: uno vinculado a la mesa vibratoria y otro conectado entre el marco de restricción lateral y el muro, a la altura de aplicación de la carga. Se consideran correcciones para ambos casos, gracias a la instalación de sensores auxiliares. Para el primer caso se corrige por rotación de la mesa, y para el segundo por deslizamiento y rotación del pedestal.

En relación con el registro de fotogrametría, el desplazamiento de techo se obtiene a partir de los resultados de desplazamiento de la zona del muro donde se aplica la carga y de la fundación. La primera región es registrada por la cámara que enfoca las vigas superiores (vigas2), mientras que la fundación se registra por la cámara de análisis local.

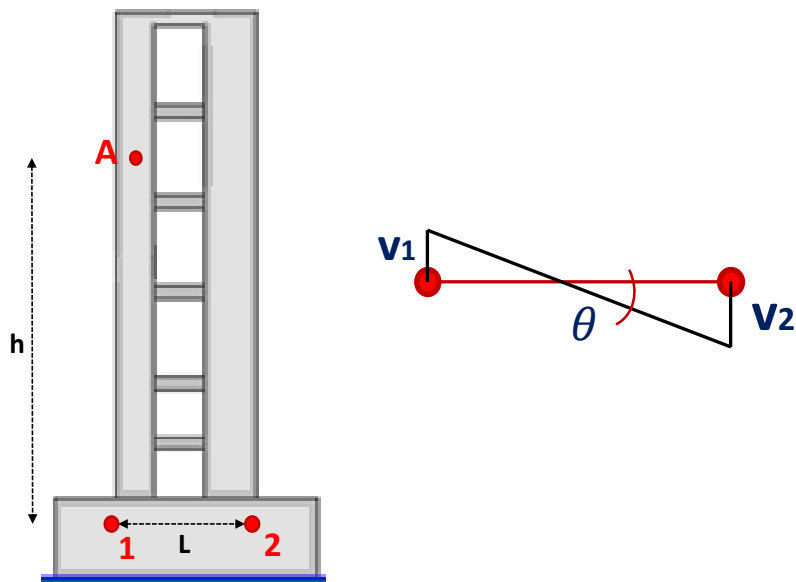


Figura 4.18. Esquema explicativo de corrección del $\delta_{techo_corregido}$

$$\delta_{techo_corregido} = u_A - u_{fundación} - \theta_{fundacion} \cdot h \quad (XLIII)$$

$$\theta_{fundacion} = \frac{v_1 - v_2}{L} \quad (XLIV)$$

Tabla 4.13. Desplazamiento de techo corregido para la Probeta 1 (Fotogrametría)

		Probeta 1	
Deriva nominal [%]	Desplazamiento nominal [mm]	Desplazamiento real [mm]	Deriva real [%]
0,15%	1,5	1,23	0,12
0,20%	2,0	1,73	0,17
0,30%	3,0	2,66	0,27
0,40%	4,0	3,61	0,36
0,50%	5,0	4,64	0,46
0,75%	7,5	7,15	0,71
1,00%	10	9,56	0,96
1,25%	12,5	11,29	1,13
1,60%	16	15,46	1,55
2,00%	20	19,61	1,96
2,50%	25	24,78	2,48
3,20%	32	32,37	3,24
4,00%	40	41,23	4,12
6,00%	60	66,42	6,64

Tabla 4.14. Desplazamiento de techo corregido para la Probeta 1 (Fotogrametría)

Deriva nominal [%]	Desplazamiento nominal [mm]	Probeta 4		Probeta 3		Probeta 2	
		Desplazamiento real [mm]	Deriva real [%]	Desplazamiento real [mm]	Deriva real [%]	Desplazamiento real [mm]	Deriva real [%]
0,15%	1,9	1,15	0,10	0,98	0,08	1,42	0,12
0,20%	2,5	1,59	0,13	1,42	0,12	1,95	0,16
0,30%	3,7	2,60	0,22	2,31	0,19	2,96	0,25
0,40%	5,0	3,52	0,29	3,16	0,26	4,02	0,34
0,50%	6,2	4,63	0,39	4,63	0,39	5,57	0,46
0,75%	9,3	7,15	0,60	7,22	0,60	6,73	0,56
1,00%	12,1	9,70	0,81	9,52	0,79	10,60	0,88
1,25%	15,5	12,35	1,03	12,06	1,01	13,32	1,11
1,60%	19,8	15,99	1,33	15,76	1,31	17,10	1,42
2,00%	24,8	20,36	1,70	19,74	1,64	21,15	1,76
2,50%	31,0	25,81	2,15	24,85	2,07	26,37	2,20
3,20%	39,7	33,76	2,81	32,42	2,70	34,77	2,90
4,00%	49,6	42,88	3,57	41,28	3,44	43,23	3,60
6,00%	74,4	65,88	5,49	63,61	5,30	65,78	5,48
8,00%	99,2	89,37	7,45	86,50	7,21	88,42	7,37

4.5. Perfiles de deformación vertical unitaria

Las deformaciones unitarias se obtienen a través del campo de desplazamientos calculados con Ncorr, como se describió en la sección 2.5. Se analizan las fibras extremas de cada muro y para cada sentido del desplazamiento, esto con el objetivo de contrastar el comportamiento de los muros acoplados con el caso de un cantiléver.

En las figuras 4.20, 4.22, 4.24 y 4.26 se presentan la deformación vertical unitaria en función del desplazamiento de techo para los puntos basales extremos de cada muro en tracción teórica. En el sentido positivo del desplazamiento, los bordes traccionados serían el lado izquierdo de cada muro, mientras que para el sentido negativo se traccionarían los del lado derecho. De estos gráficos es posible identificar el inicio de fluencia cuando la deformación excede el valor $\varepsilon_y = f_s/E_s$ nominal de la armadura de refuerzo.

Alternativamente, las figuras 4.21, 4.23, 4.25 y 4.27 presentan la evolución de la deformación vertical unitaria para la sección considerada en la base, según el desplazamiento de techo. Se analiza por separado el comportamiento en sentido positivo y negativo del desplazamiento. En estas figuras se presenta mediante una línea horizontal de color rojo, una deformación ε_{yy} igual a la fluencia nominal del acero ε_{sy} . Estas figuras se comparan con las obtenidas por el modelo de fibras de Inga (2018) adjuntas en el Anexo A.

Cabe mencionar que, para los niveles de desplazamiento más pequeños, donde las fibras no superan deformaciones de 3‰, la línea que une los puntos del gráfico ε_{yy} vs *Posición_horizontal* no es completamente recta como lo establece la Ley de Bernoulli. Esto se debe a que las mediciones de deformación de Ncorr están cercanas al error ($4,3 \cdot 10^{-3}$).

Otro aspecto importante es que los siguientes resultados se refieren sólo al comportamiento local de los muros obtenidos por las fotografías de la cámara local. Es decir, se registran las deformaciones hasta una altura de 450 [mm] sobre la base del muro.

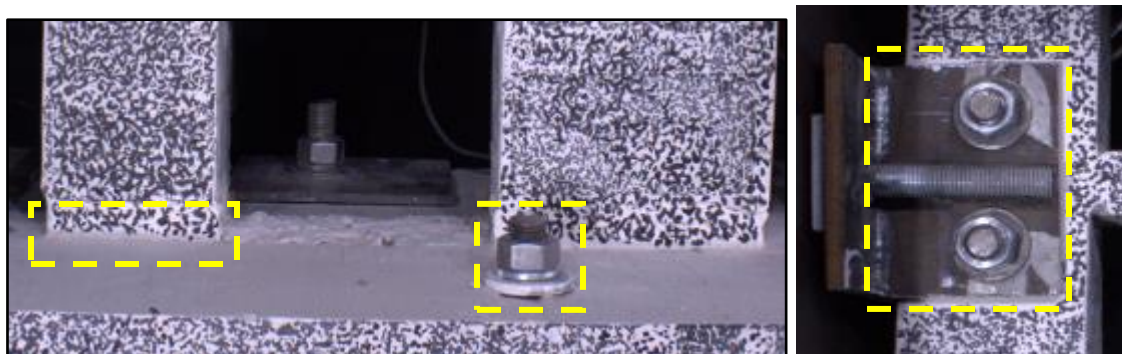


Figura 4.19. Dos factores que producen pérdida de información.

Además, debido a la falta de un patrón de manchas de pintura en las zona basal y cara superior de la fundación, no es posible obtener suficientes datos válidos en aquella zona. Se eliminaron aquellos datos que excedían el coeficiente de correlación límite. Esto se resuelve para el montaje del ensayo de la probeta 4.

Se produce otra pérdida de información en el borde izquierdo del muro más largo, debido a la presencia de un perno de la fundación que no permitió fotografiar esa zona.

Considerando lo anterior, algunos análisis se realizarán de manera cualitativa y no cuantitativamente para evitar el uso del error de deformación.

4.5.1. Inicio de fluencia en la base de los muros

Probeta 1

Respecto a la probeta 1, se observa en la Figura 4.20 que para el sentido positivo del movimiento, fluye primero el muro largo un poco antes de alcanzar el máximo de la deriva nominal de 0,5 % y luego el muro izquierdo al alcanzar ese nivel. Mientras que, para el sentido negativo, el borde traccionado del muro largo alcanza la fluencia en el 0,5% nominal y el extremo derecho del muro corto en el 0,75% nominal. El estado de fluencia se alcanza para los mismos niveles en el modelo de fibras.

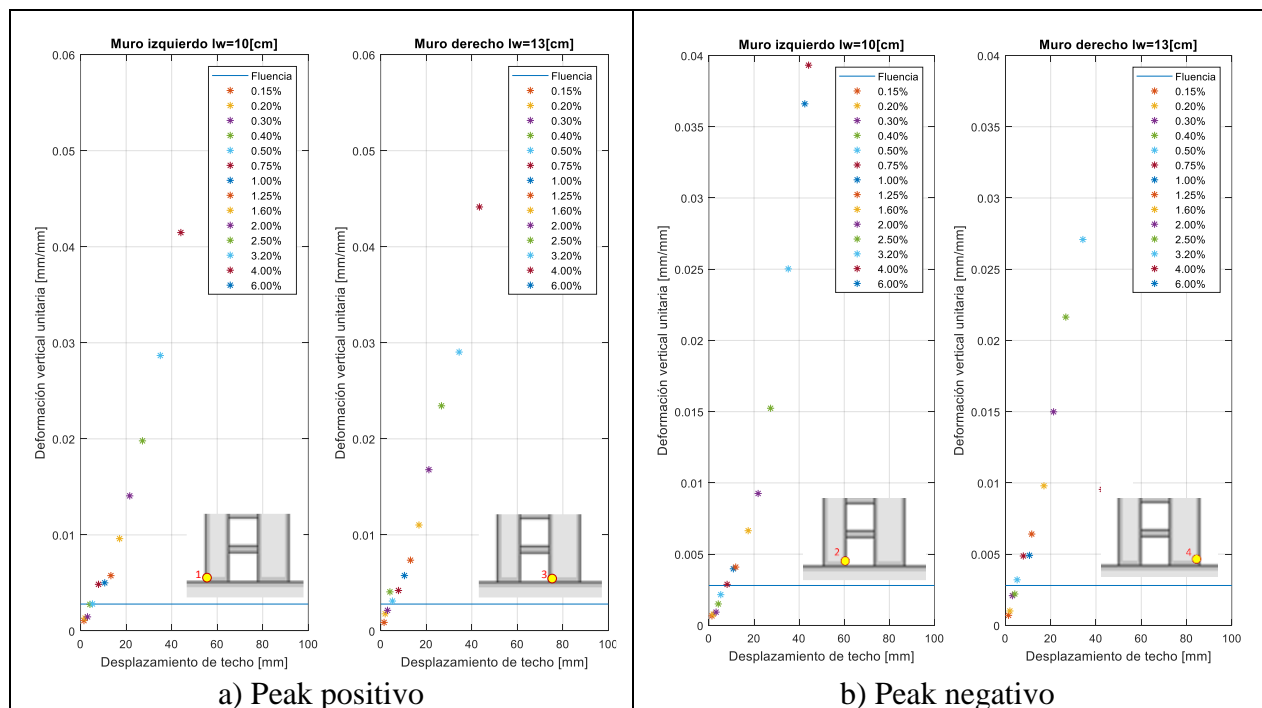


Figura 4.20. Deformación vertical unitaria de un punto traccionado en la base en función del desplazamiento de techo y según el sentido del movimiento – Probeta 1.

En la Figura 4.21 se presenta la evolución del perfil de deformaciones para la base de ambos muros. Se observa que para el sentido positivo, el muro izquierdo de $l_w = 10$ [cm] se encuentra completamente traccionado mientras que el muro derecho de mayor largo presenta sus bordes correspondientes en tracción y compresión. Esto coincide con el comportamiento predicho por el modelo de fibras (ver figura A.1)

Por otro lado, para el sentido negativo del desplazamiento se observa que tal y como se esperaba, ambos muros presentan tracción y compresión en sus fibras extremas. Para este caso los muros trabajan separadamente o, en otras palabras, el acoplamiento es menor.

En ambos casos, se observa que (al igual que los gráficos del modelo de fibras) las deformaciones de tracción alcanzadas por el muro más largo son mayores que las del muro más corto (muro izquierdo).

La diferencia o error relativo entre el modelo y la fotogrametría para los valores de deformaciones en el 1,6% de la deriva es de un 12% y 60% promedio para los sentidos positivo y negativo, respectivamente. La mayor diferencia se produce para el muro izquierdo (corto) en el sentido negativo.

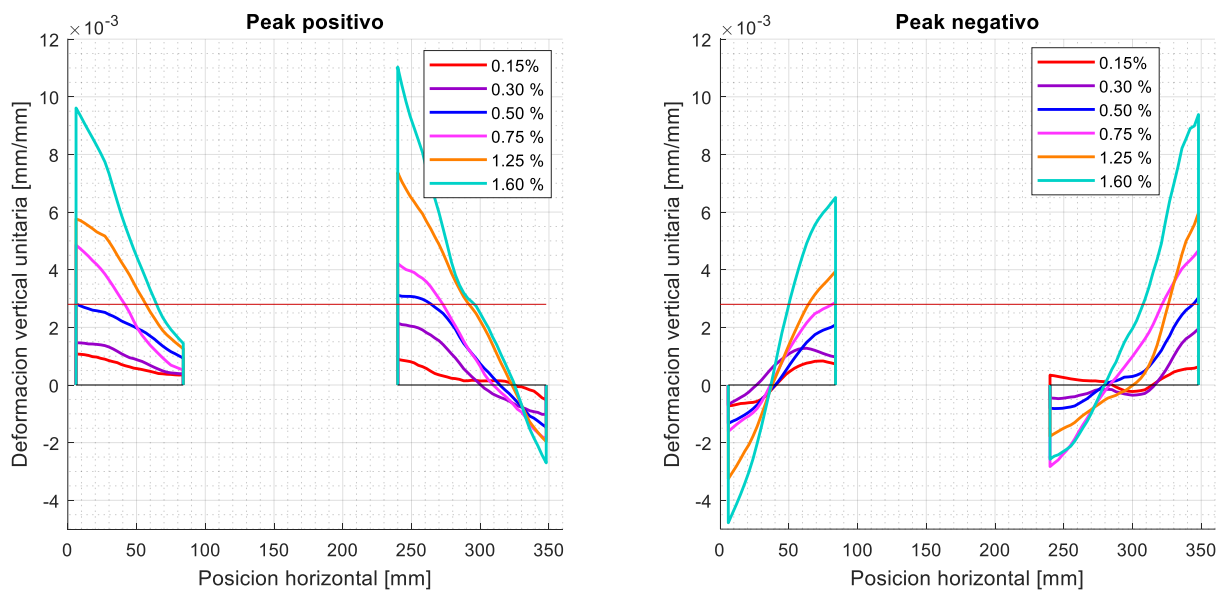


Figura 4.21. Evolución de la deformación vertical unitaria para la sección basal según el drift nominal - Probeta 1

Probeta 2

Respecto a la probeta 2, se observa en la Figura 4.22 que para el sentido positivo del movimiento, el punto más traccionado en la base del muro izquierdo (corto) sobrepasa la deformación de fluencia nominal del acero en el 0,75 % de la deriva. No se tienen datos del punto izquierdo del muro largo debido a la presencia del perno en ese borde. Por otro lado, para el sentido negativo los extremos de los muros alcanzan el estado plástico en los niveles 0,3% y 1,0% para los muros largo y corto, respectivamente.

El inicio de fluencia predicho por el modelo coincide con el experimental para el sentido positivo, pero en el otro caso, el muro más largo fluye anticipadamente.

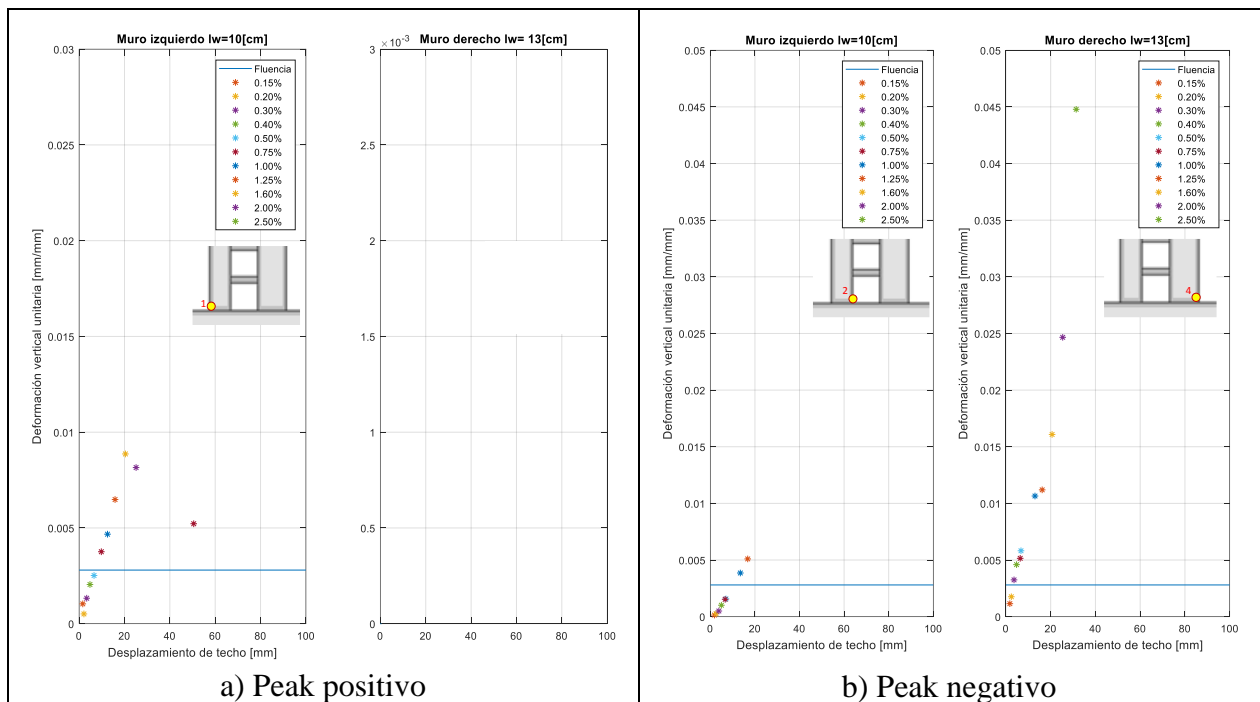


Figura 4.22. Deformación vertical unitaria de un punto traccionado en la base en función del desplazamiento de techo y según el sentido del movimiento – Probeta 2.

En la Figura 4.23 se presenta la evolución del perfil de deformaciones para la base de ambos muros. Se observa que, para el sentido positivo, el muro izquierdo de menor longitud se encuentra completamente traccionado, mientras que el muro más largo presenta gran parte de su longitud en tracción.

Siguiendo la envolvente negativa se observa que inicialmente ambos muros presentan tracción y compresión en sus bordes correspondientes. Para niveles de desplazamientos mayores sólo es posible concluir lo mismo para el muro más corto, ya que no se tienen datos en el borde extremo del muro derecho. A juzgar por la pendiente, el muro estaría completamente traccionado.

Se advierte además que el eje neutro disminuye a medida que aumenta el nivel de desplazamiento de techo.

El perfil de deformaciones de los muros concuerda con el predicho por el modelo de fibras, sin embargo, este último predice valores de deformaciones máximas de tracción menores. El error relativo para el 1,25% de la deriva es de un 34% promedio para el muro izquierdo y de 43% promedio para el peak negativo.

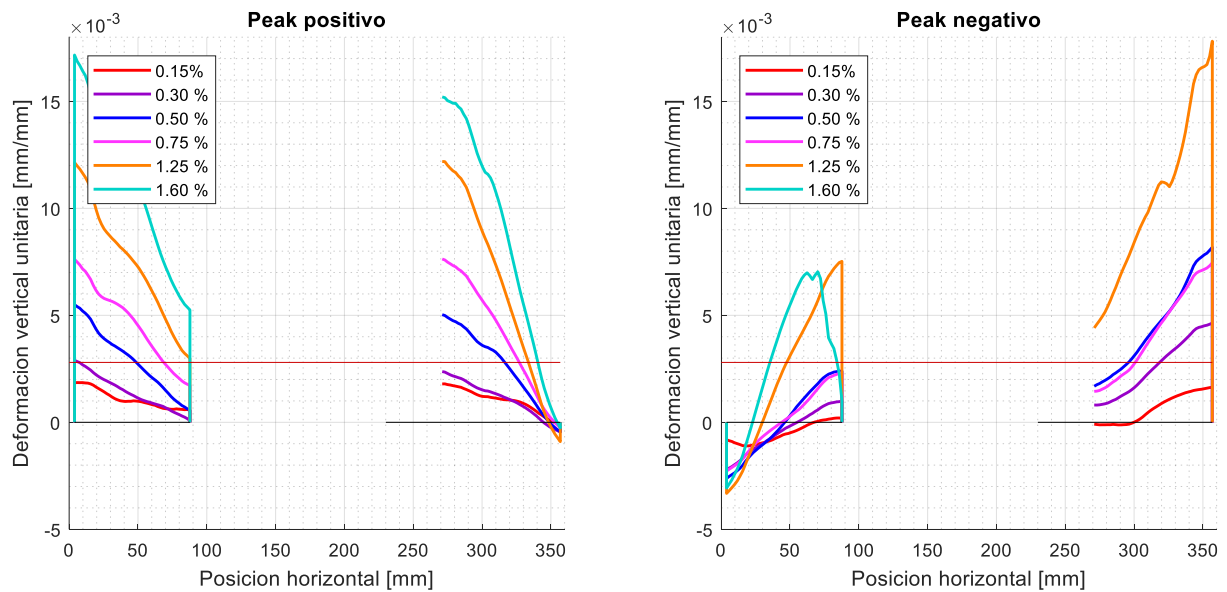


Figura 4.23. Evolución de la deformación vertical unitaria para la sección basal según la deriva de techo nominal - Probeta 2

Probeta 3

Respecto a la probeta 3, es posible deducir el inicio de fluencia a partir de la Figura 4.24. Se obtiene que, para el sentido positivo, el extremo más traccionado del muro más corto aun no alcanza la fluencia nominal en el nivel de deriva 0,5% y que ya en el 0,75% presenta una deformación de 0,0051. No se tienen datos del extremo traccionado del muro más largo debido a la presencia del perno en la foto. En la figura de la derecha, se observa que los extremos traccionados de ambos muros fluyen casi simultáneamente al 0,5% nominal.

El inicio de fluencia experimental se presenta para menores niveles de desplazamiento de techo que aquellos propuestos por el modelo de fibras.

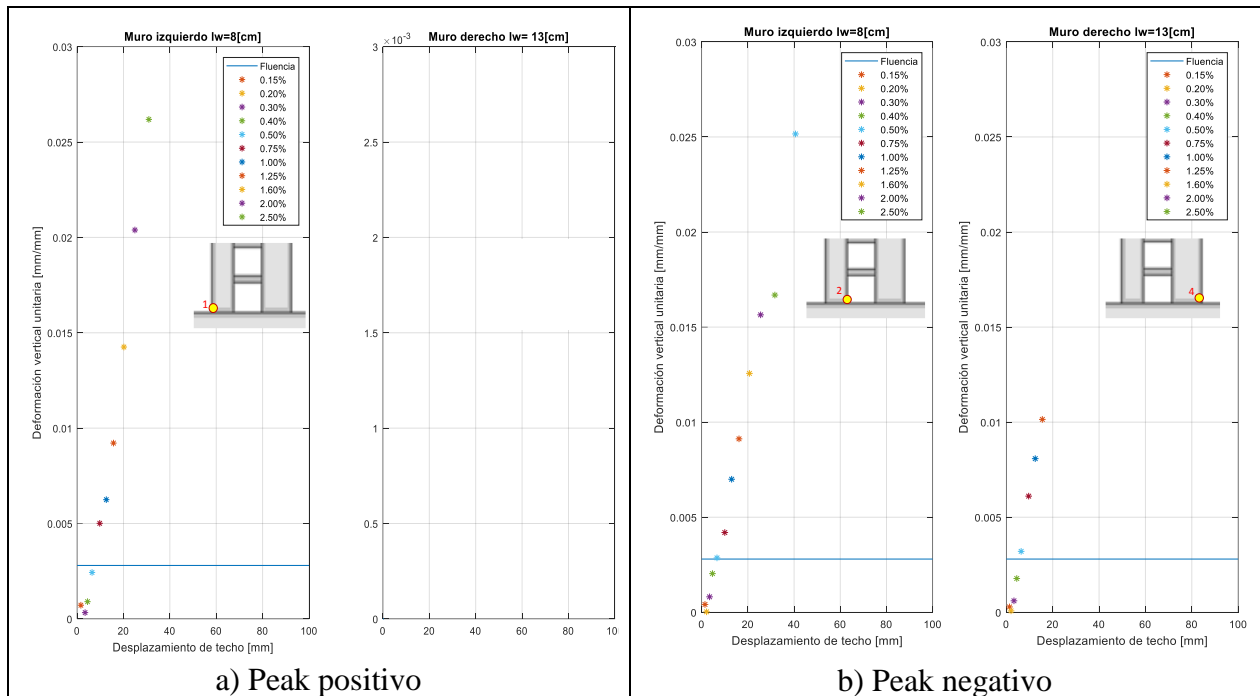


Figura 4.24. Deformación vertical unitaria de un punto traccionado en la base en función del desplazamiento de techo y según el sentido del movimiento – Probeta 3.

En la Figura 4.25 se presenta la evolución del perfil de deformaciones para la base de ambos muros. Se observa que, para el sentido positivo del movimiento de la mesa, ambos muros presentan el extremo izquierdo en tracción y el derecho en compresión. También se observa que el eje neutro disminuye a medida que aumenta el nivel de desplazamiento de techo. Además, se advierte que la longitud de éste es menor para el muro más corto (izquierdo) que para el muro más largo (derecho).

En la derecha de la Figura 4.25, se muestra el sentido negativo del desplazamiento. Inicialmente ambos muros presentan tracción y compresión en sus fibras extremas, y ya en la deriva de 0,75% nominal se presenta sólo tracción en el muro más corto (izquierdo).

A pesar que el perfil experimental de deformaciones de los muros es similar al predicho por el modelo de fibras, este último predice valores menores de tracción. El error relativo para el 1,25% de la deriva es de un 48% promedio para el muro izquierdo y de 52% promedio para el peak negativo. La mayor diferencia se registra en las altas deformaciones (experimentales) alcanzadas en la base del muro más corto.

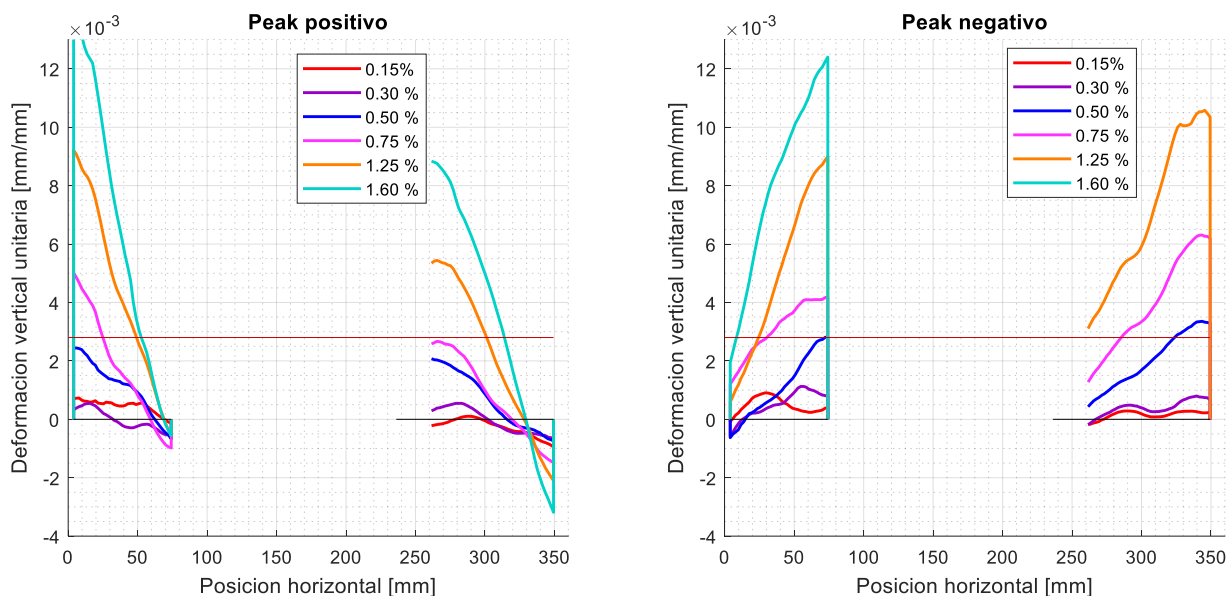


Figura 4.25. Evolución de la deformación vertical unitaria para la sección basal según la deriva de techo nominal - Probeta 3

Probeta 4

Respecto a la probeta 4, en la Figura 4.26 se presenta la deformación vertical de los puntos extremos basales en función del nivel del desplazamiento de techo. Se observa en la figura de la izquierda (sentido positivo) que el muro más corto fluye inmediatamente iniciado el protocolo de ensayo, mientras el borde izquierdo del muro más largo supera la fluencia en el 0,4 % nominal

Por otro lado, para el sentido negativo del movimiento (figura de la derecha) se advierte el comportamiento esperado: el muro más largo fluye primero ya en un 0,2% y luego el muro más corto en el 0,75%.

En la Figura 4.27 se presenta la evolución del perfil de deformaciones para la base de ambos muros. Es posible notar que, para el sentido positivo del movimiento, el muro más corto es el más solicitado y sólo presenta tracción en su base para todos los niveles de desplazamiento. Mientras que, si se analiza la envolvente negativa, ambos muros en un comienzo presentan tracción y compresión en sus extremos correspondientes, para luego traccionar por completo el muro más solicitado (muro largo/derecho).

Los perfiles de deformación representan un comportamiento similar al descrito por la figura A.4 correspondiente al modelo de fibras. También se registra la fluencia anticipada del muro más corto en el sentido positivo, y se observa la tracción completa de la base de los muros más traccionados según la dirección del movimiento. No obstante, es mayor el valor de las deformaciones obtenidas por fotogrametría.

El error relativo de las máximas deformaciones para el nivel de 1,25% de la deriva es de un 42% y 36% promedio para el sentido positivo y negativo, respectivamente.

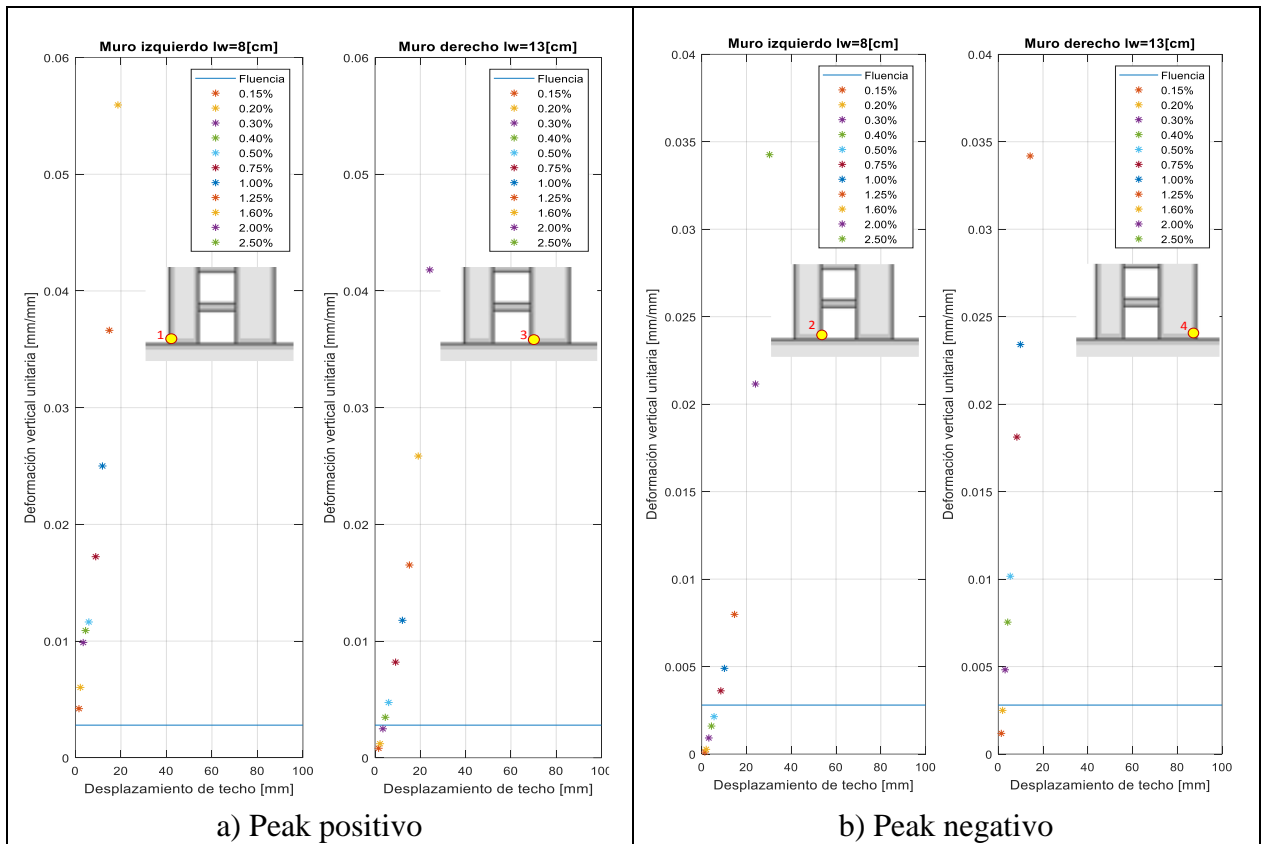


Figura 4.26. Deformación vertical unitaria de un punto traccionado en la base en función del desplazamiento de techo y según el sentido del movimiento – Probeta 4.

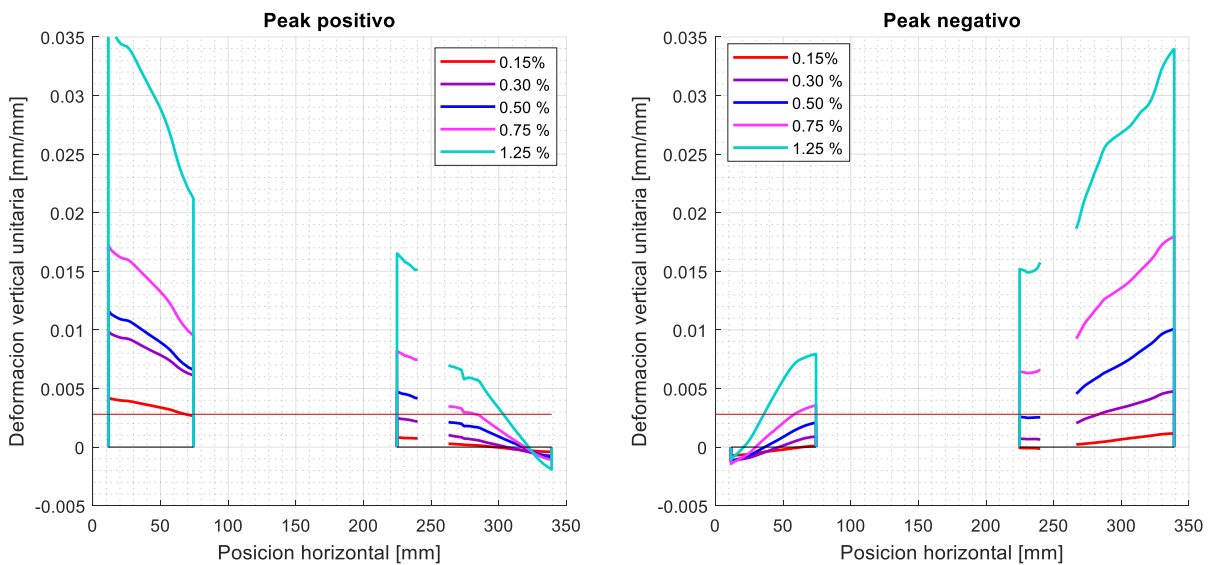


Figura 4.27. Evolución de la deformación vertical unitaria para la sección basal según la deriva de techo nominal - Probeta 4

4.5.2. Zona plástica en la altura de los muros

A continuación, se presentan las deformaciones verticales en un mapa de intensidad de color, donde es posible evidenciar la propagación de las grietas en la altura del muro.

Seguidamente, se muestra la distribución de deformación vertical unitaria en la altura del muro, para las fibras extremas consideradas. Se presentan para cada sentido del desplazamiento correspondiente al primer ciclo de cada nivel de deriva total. De estos gráficos es posible identificar la longitud de rótula plástica como la altura del muro en la cual las deformaciones exceden el valor $\varepsilon_y = f_s/E_s$ nominal de la armadura de refuerzo. Debido a que el error asociado al cálculo de deformaciones es mayor a este valor, se asegura fluencia cuando las deformaciones exceden $4,3 \cdot 10^{-3}$.

Cabe mencionar que los siguientes resultados se refieren sólo al comportamiento local de los muros, obtenidos del registro de cámara local. Se registran las deformaciones hasta una altura de 450 [mm] sobre la base del muro. El análisis de las vigas se realiza más adelante.

Probeta 1

En relación con la probeta 1, es posible distinguir que la primera grieta se forma en la base del muro más traccionado según el sentido del movimiento (ver Figura 4.28 y Figura 4.30). Luego se forman fisuras cuasi-horizontales en la altura del muro. Las primeras se forman por arriba y abajo de la ubicación de la viga del primer piso y a la altura del 2do piso. Después se forma una fisura a nivel del eje central de la primera viga.

La distribución de deformaciones de la probeta 1 se muestra en la Figura 4.29 para el sentido positivo y en la Figura 4.31 para el negativo. Se observan distintos peaks de deformación en la altura, correspondientes a las grietas, pero la mayor concentración de daño se ubica en la base de los muros.

Es posible notar que a medida que aumenta el nivel de desplazamiento la curva de deformación en la altura sigue la misma forma y solo aumenta en magnitud. De esta forma se evidencia el aumento en longitud y/o grosor de las grietas.

Cabe mencionar que, el perfil de los extremos presenta una discontinuidad en los datos debido a la presencia del soporte de los pesos adicionales. Para esta probeta no existe pérdida de información en el borde del muro largo debido a un perno.

Se observa además en la base, que la curva va aumentando la altura a la cual sobrepasa el valor de fluencia nominal, de esta manera se obtiene que la longitud de rótula plástica aumenta con el desplazamiento de techo. De un modo similar, el “ancho” de la perturbación correspondiente a las fisuras en la altura, también aumenta.

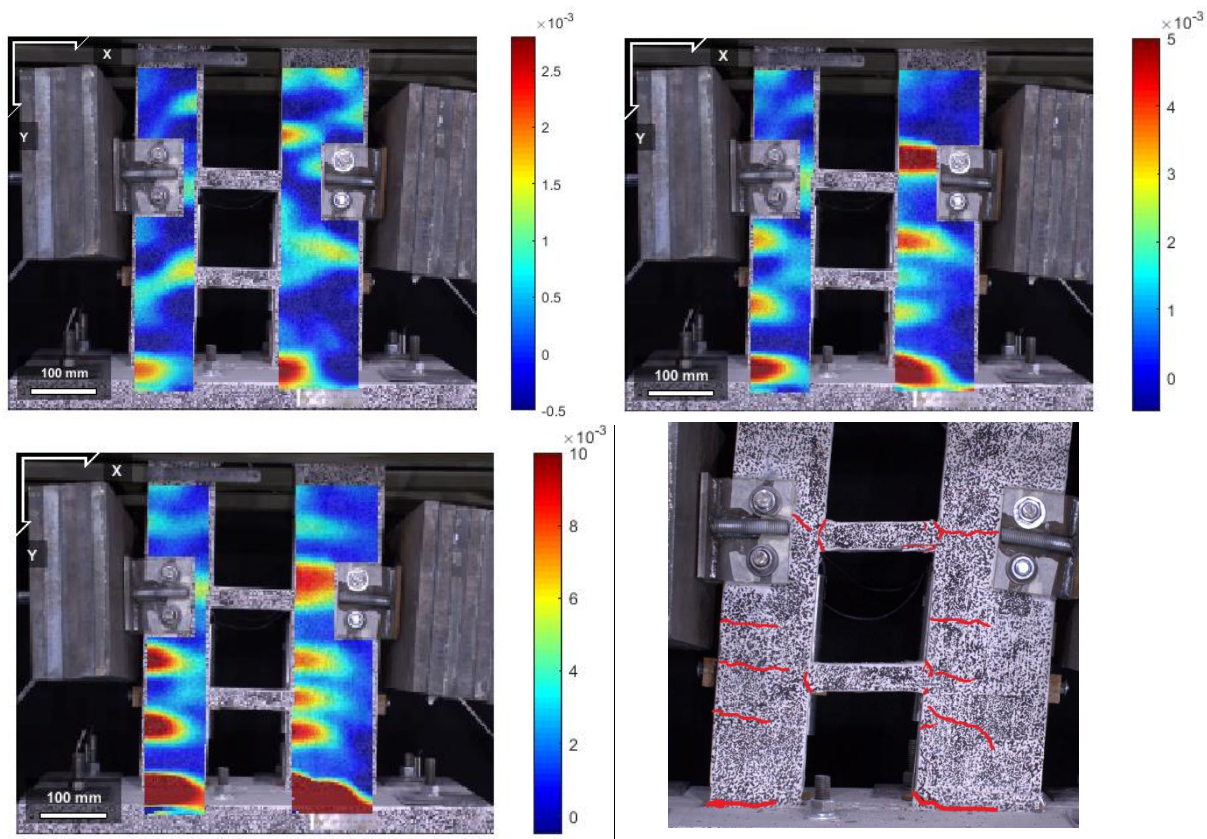


Figura 4.28. Evolución de la deformación vertical unitaria (Probeta 1) en el sentido positivo del movimiento
 a) Drift 0,3% b) Drift 1,0% c) Drift 3,2% d) grietas en 6,0%

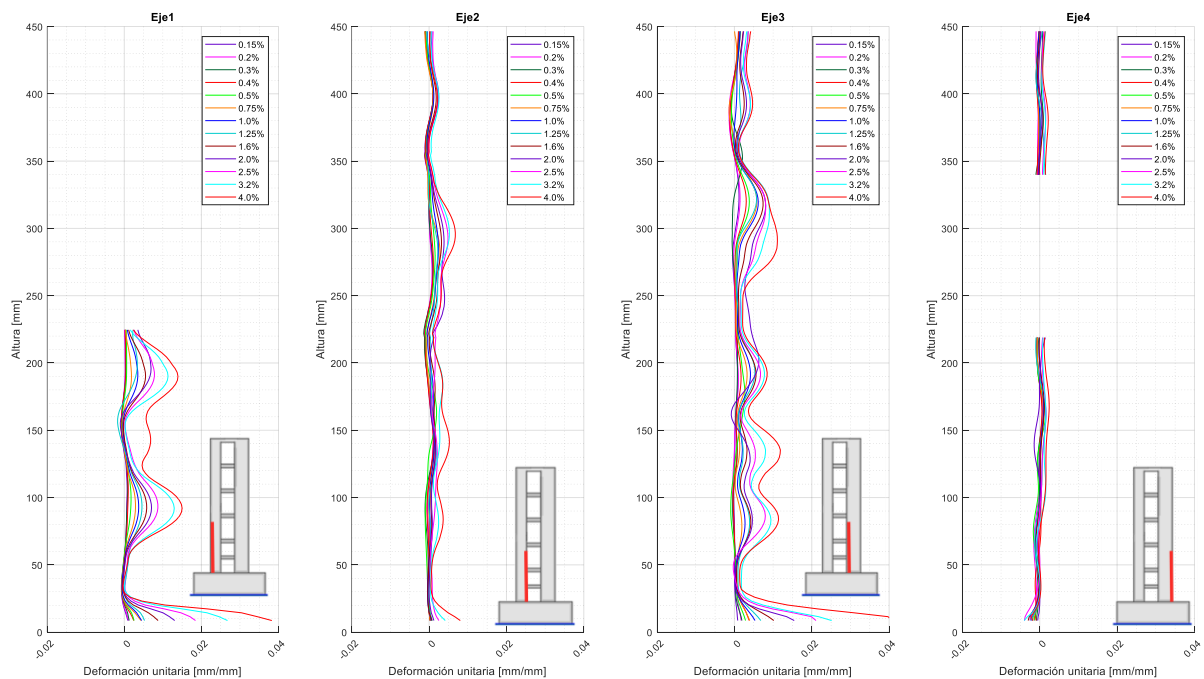


Figura 4.29. Perfil de deformación vertical unitaria para el peak positivo - Probeta 1

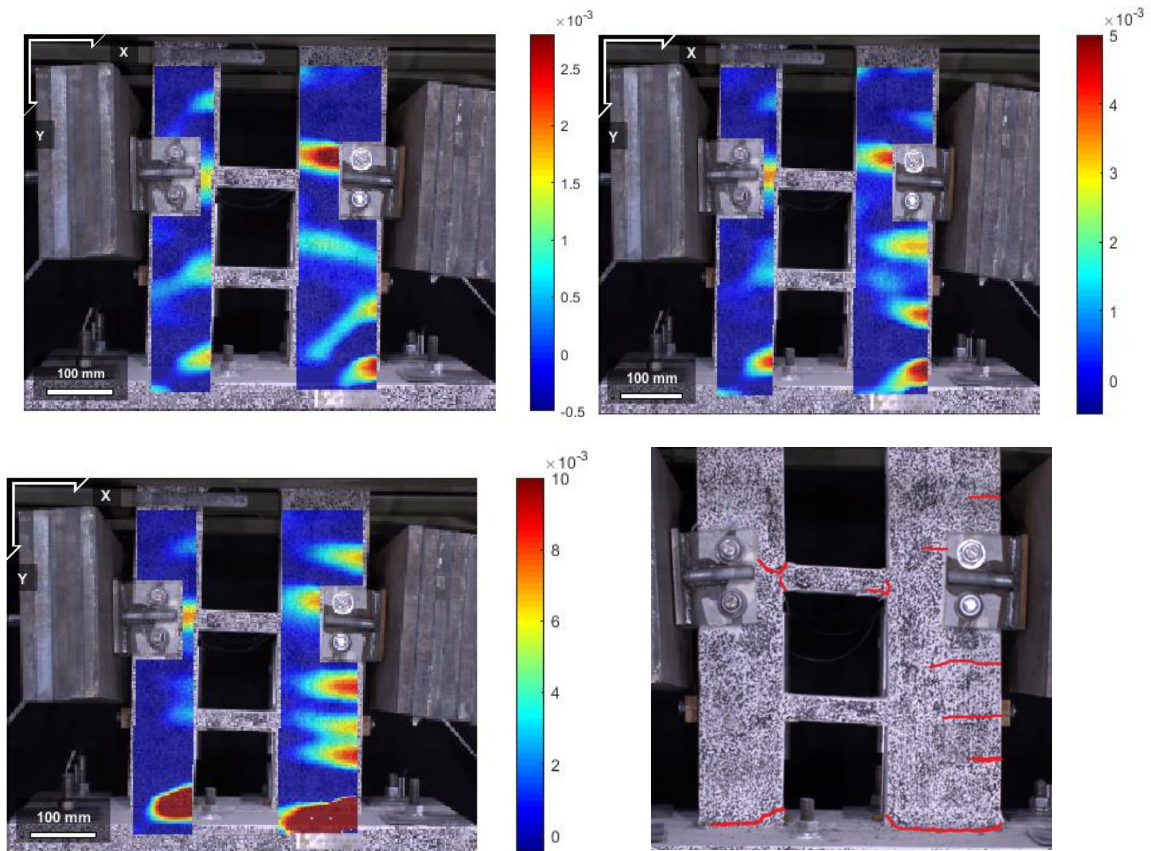


Figura 4.30. Evolución de la deformación vertical unitaria (Probeta 1) en el sentido negativo del movimiento
 a) Drift 0,3% b) Drift 1,0% c) Drift 3,2% d) grietas en 6,0%

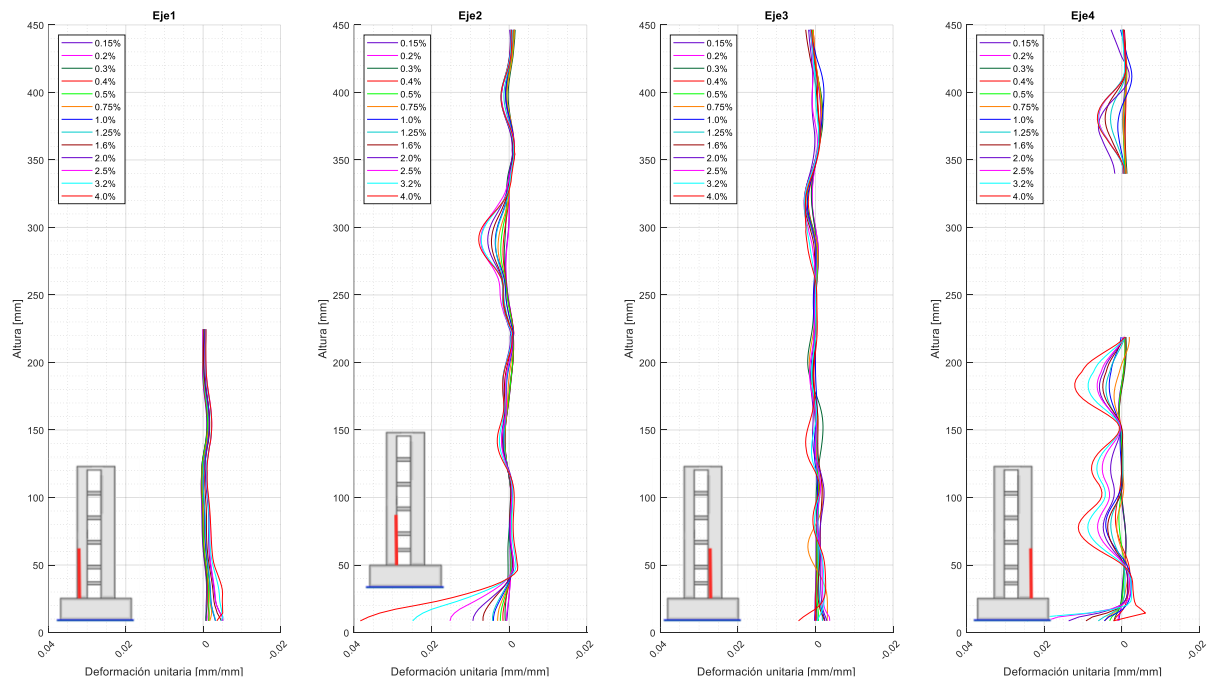


Figura 4.31. Perfil de deformación vertical unitaria para el peak negativo - Probeta 1

El inicio de fluencia se establece cuando el punto más cercano a la base del que se tiene registro, alcanza la deformación de fluencia nominal. En el sentido positivo, para el muro más corto esto ocurre a 8,6 [mm] de la base en el 0,5%, para el siguiente nivel de 0,75% se alcanza a 14,4 [mm] y ya para el 4,0% en los 23 [mm]. Para el muro más largo, el punto basal extremo fluye también en el 0,5% a 8,6 [mm] de la base, pero en el 4,0% se propaga hasta los 30 [mm].

Sin embargo, para la envolvente negativa, se obtiene que el borde traccionado del muro más corto es donde se obtiene una mayor zona plástica, alcanzando los 35 [mm] en el 4,0% versus los 20 [mm] del borde traccionado del muro largo.

Probeta 2

Con respecto a la probeta 2, se observa que la primera grieta se forma en la base del muro más traccionado según el sentido del movimiento (ver Figura 4.32 y Figura 4.34). La formación de las siguientes fisuras es levemente diferente para los sentidos del movimiento.

Al comparar ambos casos en el 0,75 % nominal, en el sentido positivo del movimiento, las siguientes grietas se forman a la altura del primer y segundo piso en los bordes traccionados de ambos muros; mientras que en el sentido negativo sólo se forma una grieta a nivel de la primera viga en el muro más largo, en este caso traccionado. Se produce un par de grietas en el muro más corto sólo al alcanzar el nivel de deriva 3,2 % nominal.

La distribución de deformaciones de la probeta 2 se muestra en las figuras 4.33 y 4.35. Los máximos de deformación corresponden a la ubicación de las fisuras en altura, tal y como se muestra en las figuras que le preceden.

No es posible observar la concentración de las deformaciones en la base del muro debido a que no se lograron manchas de pintura adecuadas en esa zona. Por lo tanto, el software entregó coeficientes de correlación muy altos, invalidando aquellos resultados.

Analizando las deformaciones alcanzadas por las fisuras en la altura, se presenta el primer peak en el lado derecho del muro más corto a 85 [mm]. Se observa el aumento del “ancho” de la curva en esa zona a medida que aumenta el nivel de desplazamiento. Esto debido a que el software realiza el cálculo de deformaciones por medio de un “suavizado” en un radio determinado en torno al punto. En ese mismo borde (eje 1), se produce la siguiente grieta por sobre la altura de la viga aproximadamente a 130 [mm] de la base, en la deriva de 3,2% nominal.

Las mayores deformaciones se alcanzan en la ubicación de las grietas en los extremos del muro de mayor longitud. En el sentido positivo, en la ubicación del eje central de la viga a aproximadamente 127 [mm] de altura se alcanza una deformación de 0,027 en el 4,0% del drift. En aquella zona se aprecia que la zona plástica aumenta desde un ancho de 25 [mm] en torno a ese punto en el 0,5% hasta un ancho de aproximadamente 56 [mm] en el 4,0%.

En el sentido negativo, es nuevamente la ubicación de la grieta a la altura del eje de la viga, donde se alcanzan las mayores deformaciones. Para este caso el ancho varía desde 18[mm] en el 1,0% a 28 [mm] en el 4,0%, con un máximo local de deformación de 0,029 a 150[mm] de altura en el eje4.

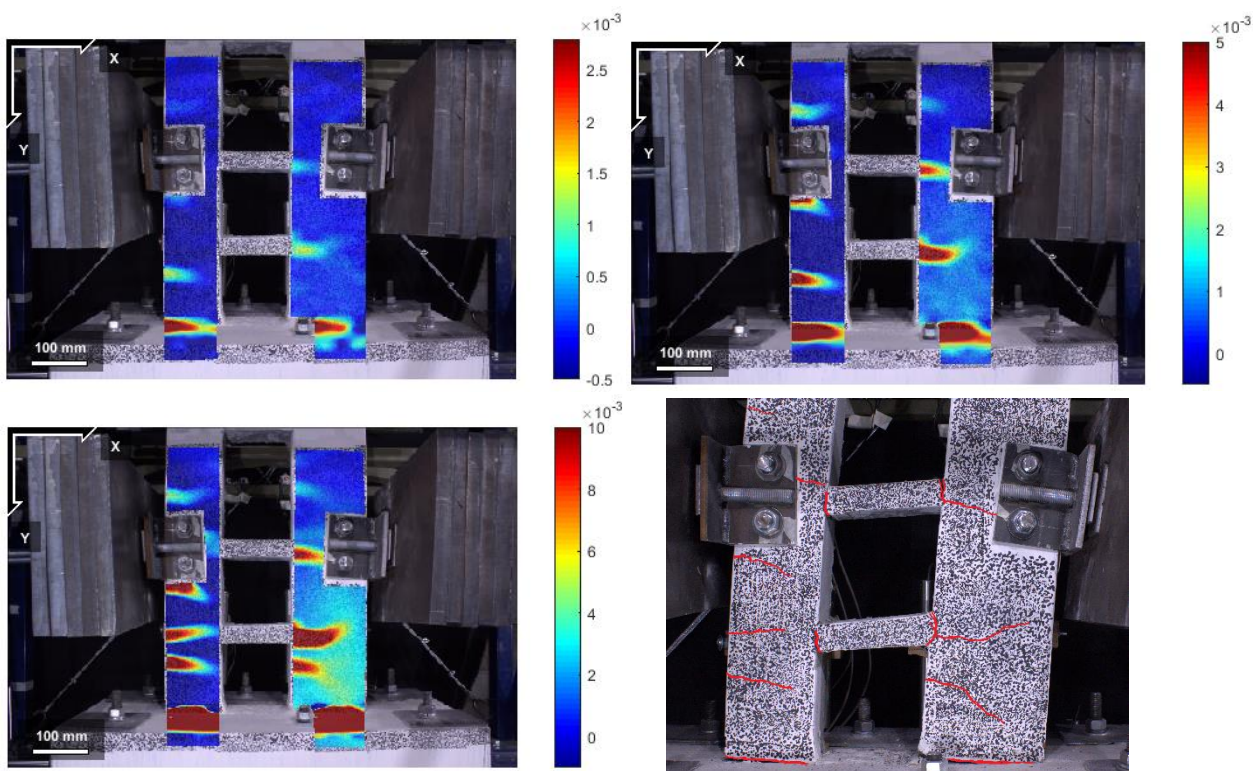


Figura 4.32. Evolución de la deformación vertical unitaria (Probeta 2) en el sentido positivo del movimiento
 a) Drift 0,3% b) Drift 0,75% c) Drift 3,2% d) grietas en 8,0%

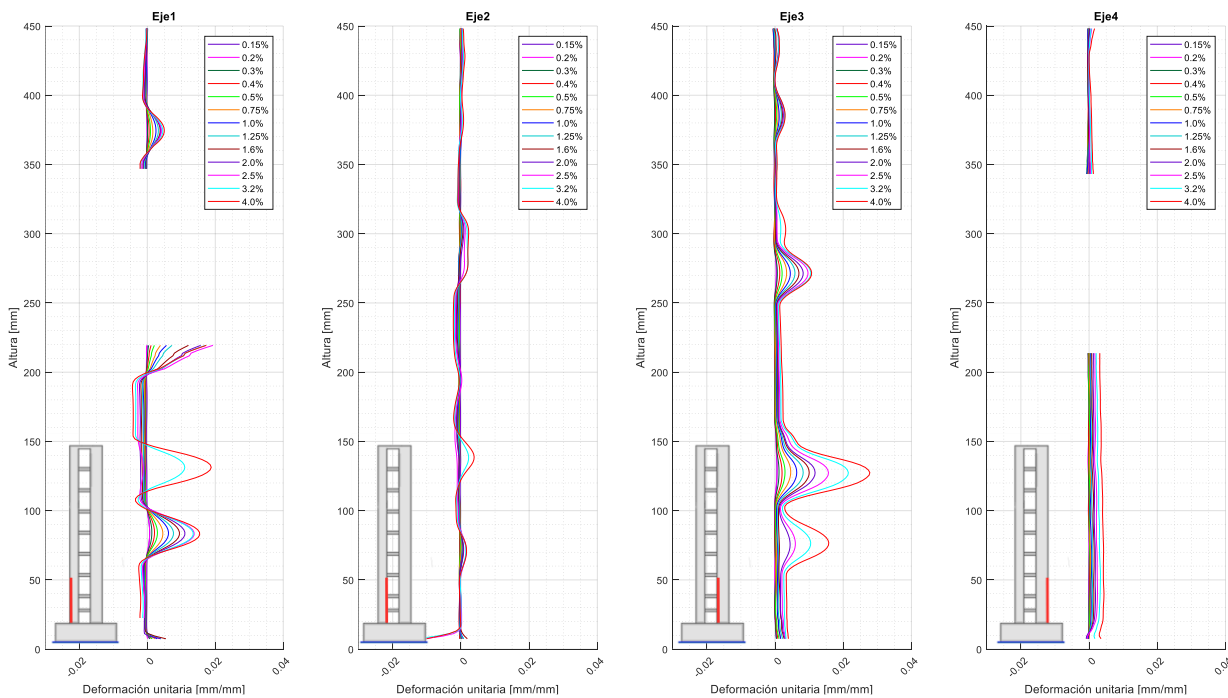


Figura 4.33. Perfil de deformación vertical unitaria para el peak positivo - Probeta 2

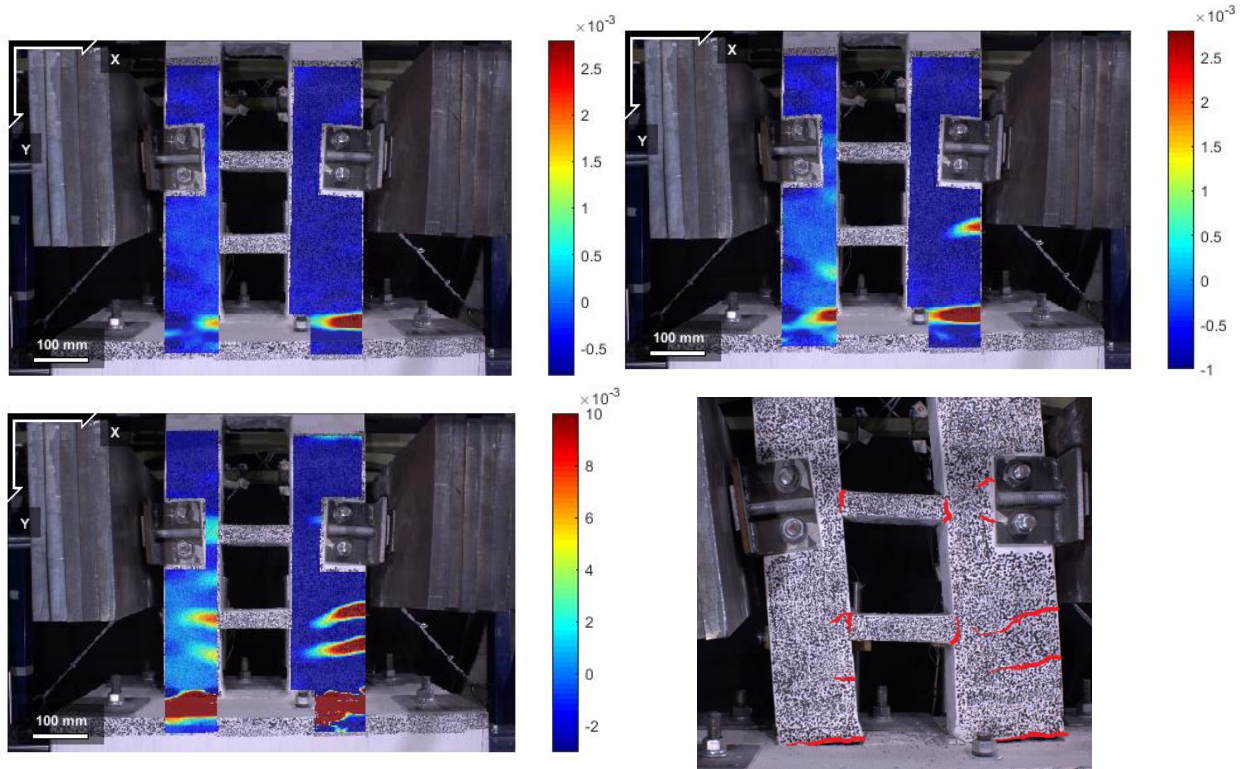


Figura 4.34. Evolución de la deformación vertical unitaria (Probeta 2) en el sentido negativo del movimiento
 a) Drift 0,3% b) Drift 0,75% c) Drift 3,2% d) grietas en 8,0%

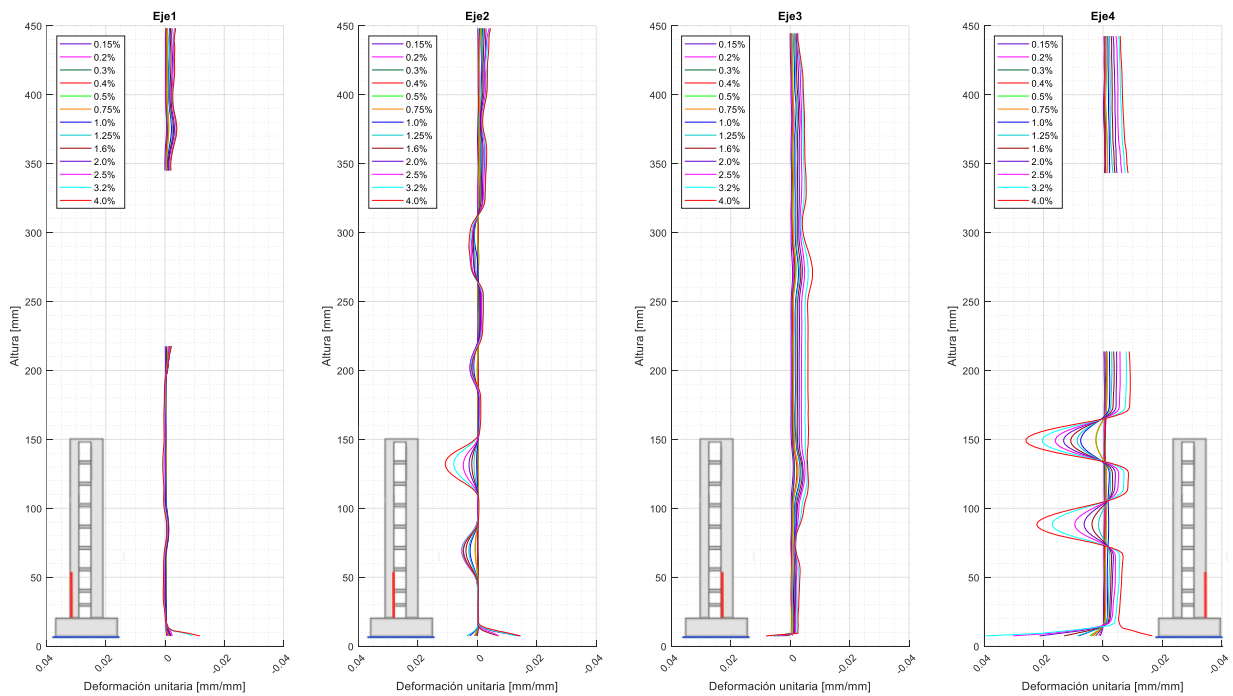


Figura 4.35. Perfil de deformación vertical unitaria para el peak negativo - Probeta 2

Probeta 3

Las siguientes figuras presentan la distribución de deformaciones para la probeta 3. Se observa que al alcanzar el desplazamiento de techo correspondiente al 0,4% se produce una primera grieta cuasi-horizontal a la altura del primer piso en el muro más largo, y no en la base del muro más traccionado como era de esperarse. Esto último si ocurre para el sentido negativo del desplazamiento.

Se evidencia que se producen más grietas en la altura para el caso en que la mesa se mueve en sentido positivo, mientras que para el otro sentido se desarrolla sólo una gran grieta a nivel del primer piso.

Al analizar la Figura 4.37, del eje 1 se obtiene que la zona plástica aumenta de 13 [mm] de altura en el 0,75% hasta los 18,6[mm] en el 3,2%. Los datos del nivel 4,0% presentan perturbaciones que invalidan los datos. Además, se observa que, a la altura del eje central de la primera viga, se produce una grieta en ambos muros. Para el muro corto (más solicitado a tracción) se registra una deformación de 0,045 a 136 [mm], mientras que en el muro de mayor longitud se obtiene un peak de 0,024 a 126 [mm]. Esta última grieta, induce una zona plástica de ancho 17 [mm] en el 0,5% que aumenta hasta 43 [mm] en el nivel 4,0%.

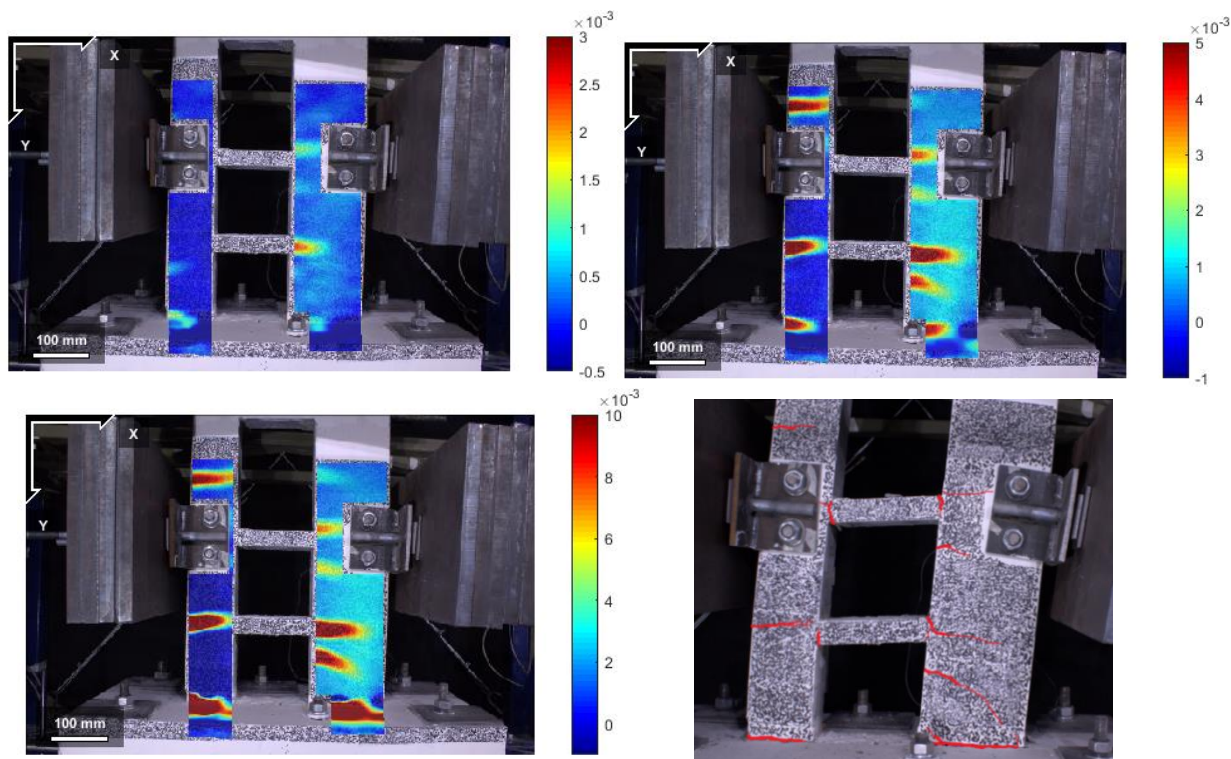


Figura 4.36. Evolución de la deformación vertical unitaria (Probeta 3) en el sentido positivo del movimiento
 a) Drift 0,4% b) Drift 1,0% c) Drift 2,5% d) grietas en 8,0%

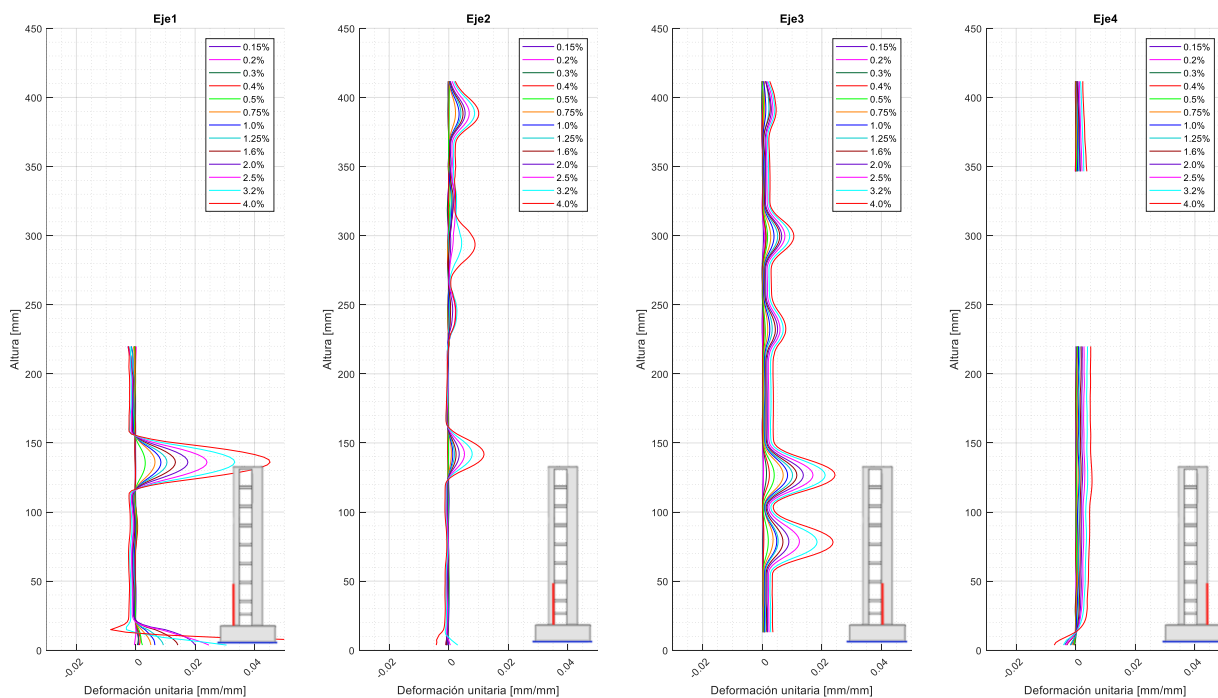


Figura 4.37. Perfil de deformación vertical unitaria para el peak positivo - Probeta 3

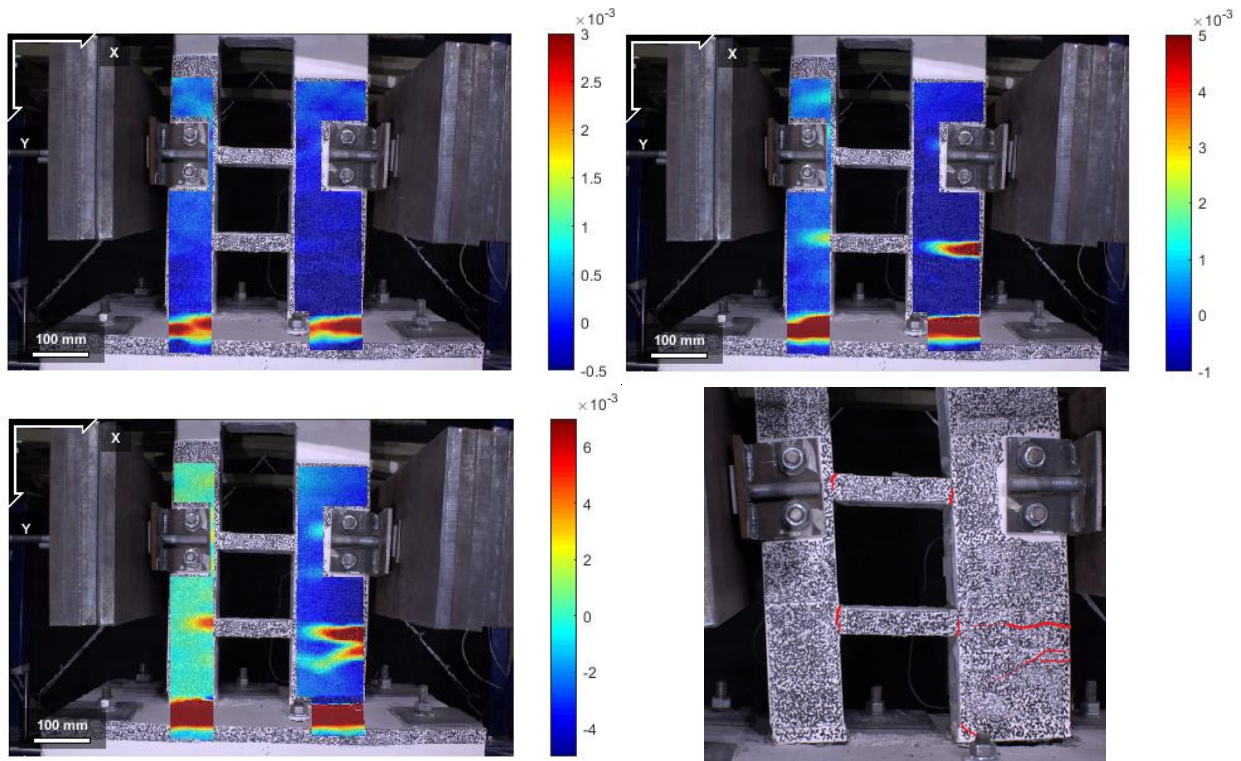


Figura 4.38. Evolución de la deformación vertical unitaria (Probeta 3) en el sentido negativo del movimiento
 a) Drift 0,4 % b) Drift 1.0 % c) Drift 2,5% d) grietas en 8,0%

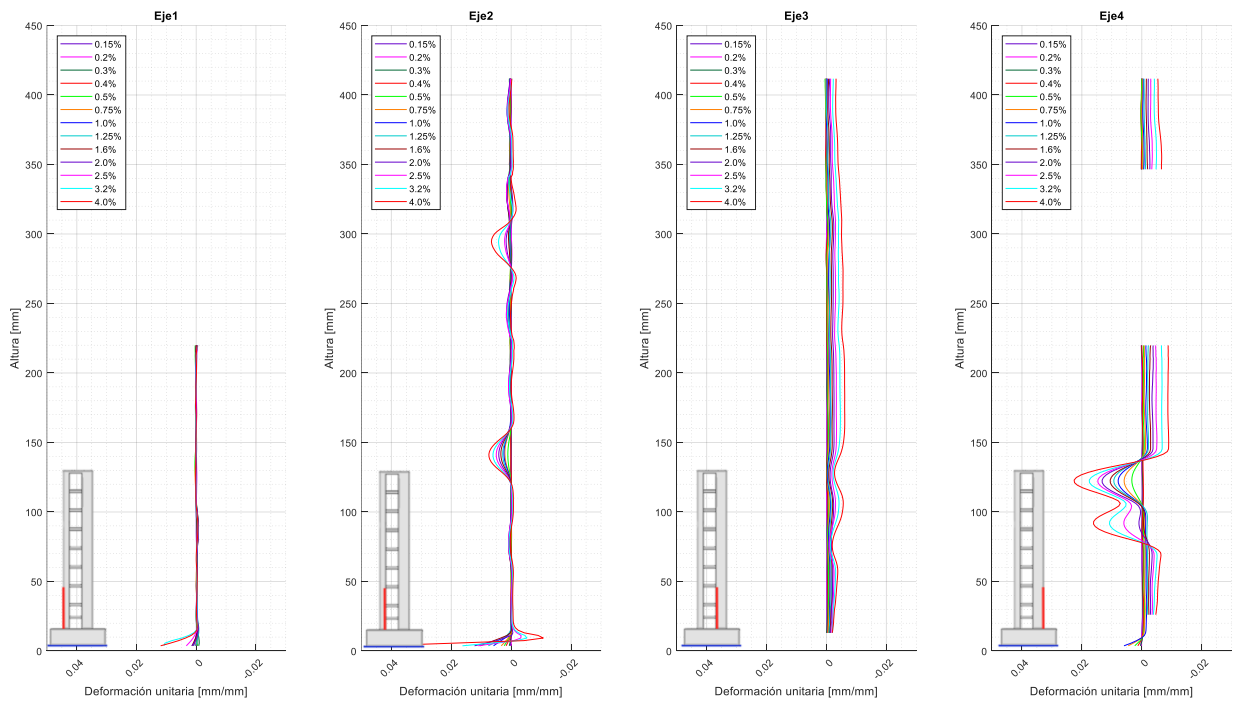


Figura 4.39. Perfil de deformación vertical unitaria para el peak negativo - Probeta 3

Probeta 4

En relación con la probeta 4, es posible distinguir que la primera grieta se forma en la base del muro más traccionado según el sentido del movimiento (ver Figura 4.40 y Figura 4.42).

La formación de las siguientes fisuras es levemente diferente para los sentidos del movimiento. Para una deriva de techo 1,0% nominal, en el sentido positivo se forma una gran grieta cuasi-horizontal a nivel del primer piso, mientras que en el negativo se produce una grieta diagonal en el muro de longitud 13 [cm].

La grieta diagonal se produce por efecto del corte, que adquiere importancia a mayor grado de acoplamiento, como es el caso de la probeta 4.

El perfil de deformaciones en la altura de las figuras 4.41 y 4.42 muestra que a nivel general se obtienen mayores deformaciones en el sentido positivo del movimiento que en el negativo. Además, el muro más corto se encuentra más solicitado que el muro de mayor longitud en ambos casos. Es más, la deformación de la grieta que se forma a nivel de la viga, alcanza el orden de magnitud de las deformaciones en la misma base (para el sentido positivo).

Al analizar el eje 1 de la Figura 4.41 (sentido positivo del movimiento) se obtiene que el inicio de la fluencia en la base del muro corto (a 5,5 [mm]) se produce en el 0,15% nominal. La zona plástica alcanza una altura de 20,4 [mm] 3,2%. Por otro lado, el ancho de la zona plástica correspondiente a la grieta del primer piso aumenta desde 20 [mm] en el 0,5% hasta 36 [mm] en el 4,0%

Si bien se observa en el eje 3 que las deformaciones de la base aumentan, se advierte que el perfil se curva a deformaciones más pequeñas en lugar de variar linealmente. Esto se debe a que el software está calculando las deformaciones en un radio que incluye los puntos fijos de la interfaz muro-fundación, con un alto coeficiente de correlación.

En el sentido negativo del movimiento (ver Figura 4.43) se observa en el eje 2 que la zona plástica en el muro corto alcanza los 35,2 [mm] en el drift 4,0% nominal. Del eje 5 se obtiene que se alcanzan 29,6 [mm] en el muro largo.

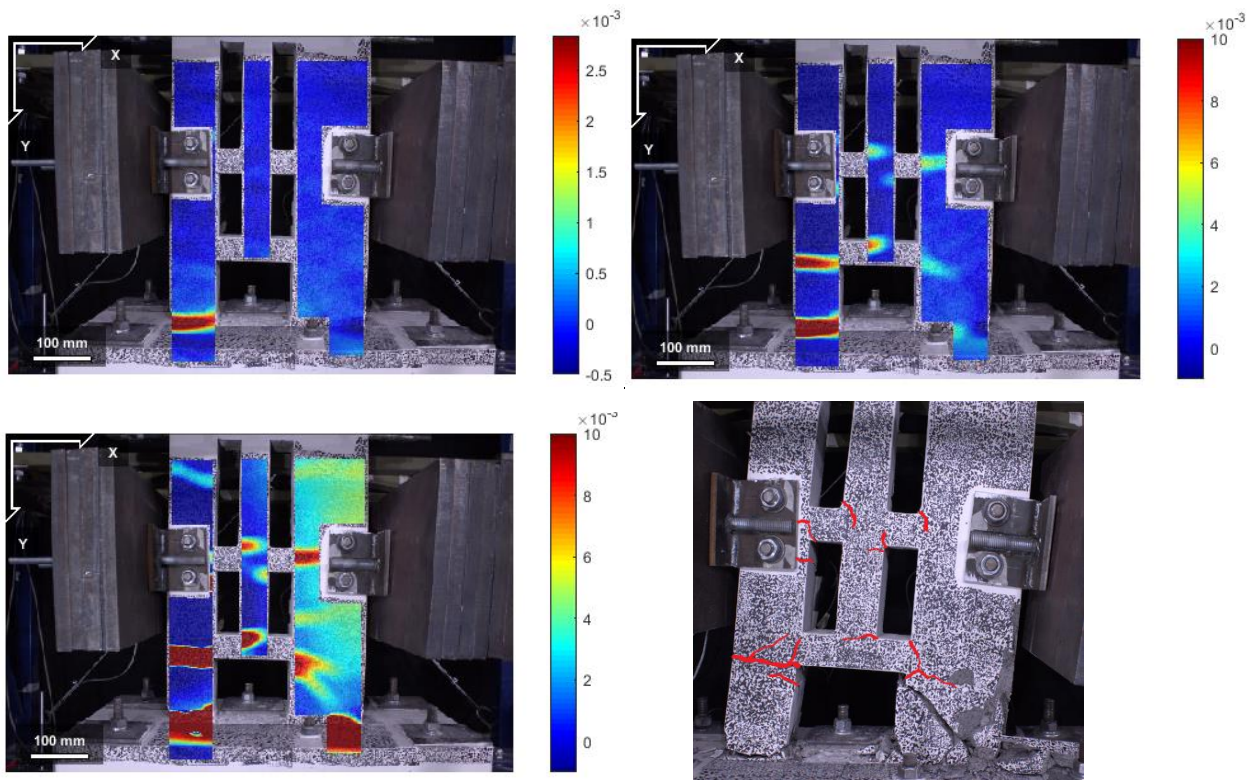


Figura 4.40. Evolución de la deformación vertical unitaria (Probeta 4) en el sentido positivo del movimiento
 a) Drift 0,15% b) Drift 1,0% c) Drift 3,2% d) grietas en 8,0%

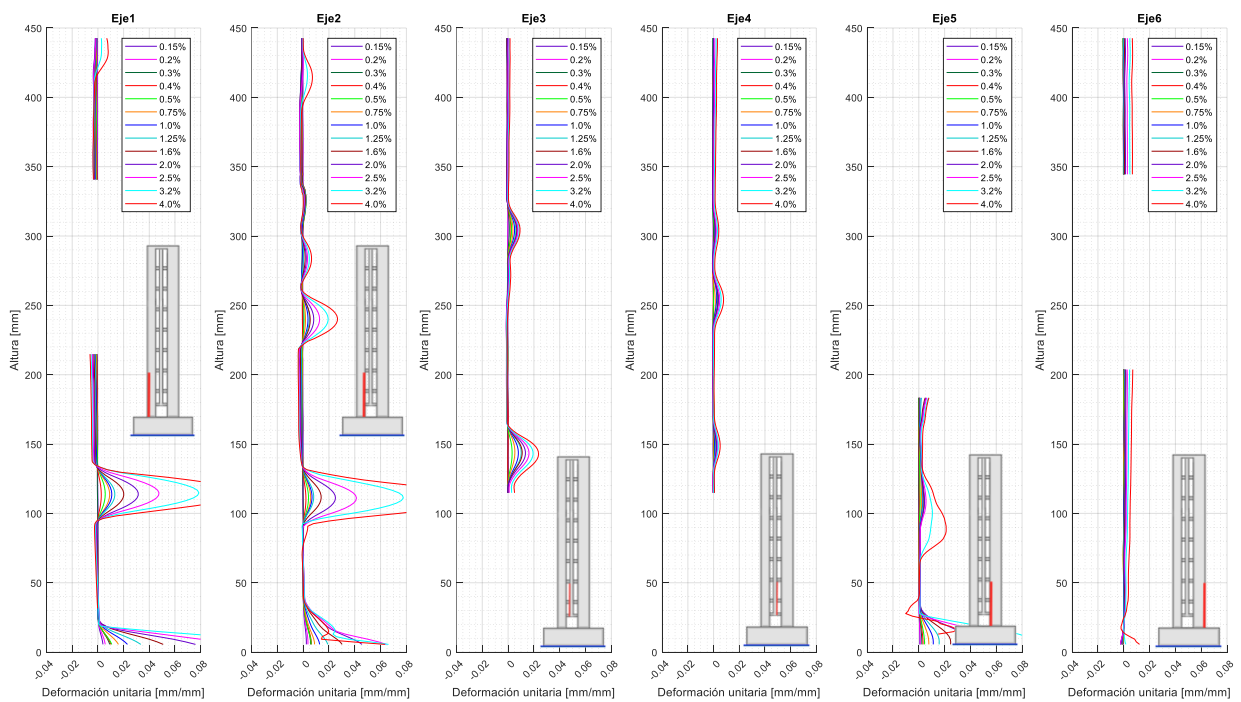


Figura 4.41. Perfil de deformación vertical unitaria para el peak positivo - Probeta 4

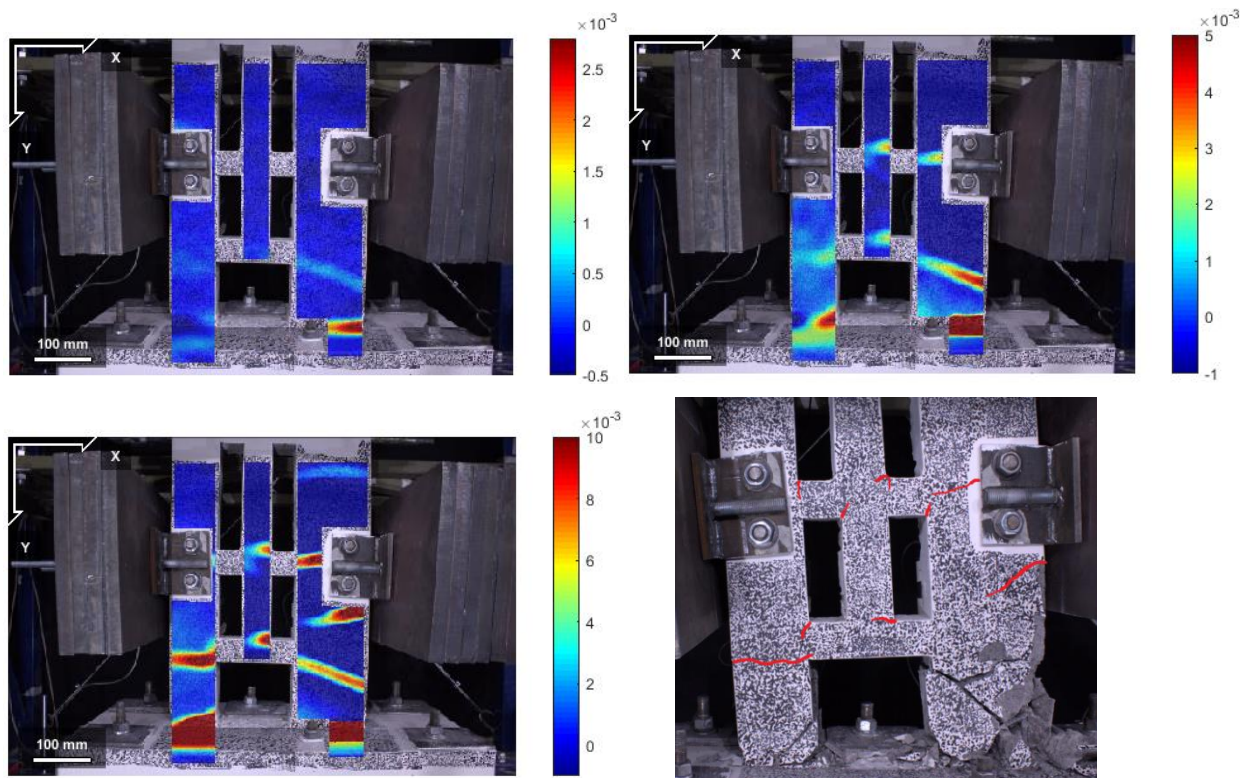


Figura 4.42. Evolución de la deformación vertical unitaria (Probeta 4) en el sentido negativo del movimiento
 a) Drift 0,2% b) Drift 1,0% c) Drift 3,2 % d) grietas en 8,0%

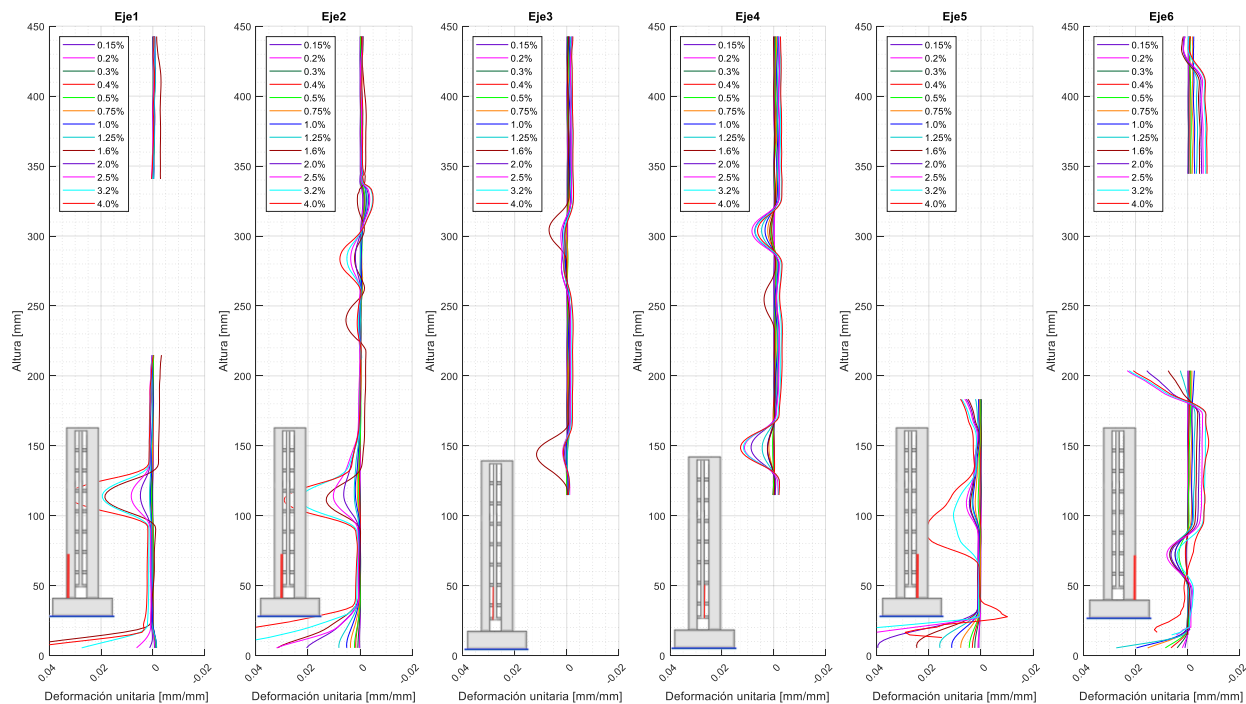


Figura 4.43. Perfil de deformación vertical unitaria para el peak negativo - Probeta 4

4.6. Perfiles de curvatura

La curvatura es el ángulo que forma el perfil de deformaciones con respecto al eje vertical de una sección plana. En este trabajo, la curvatura se calcula según la ecuación XLV. En las figuras 4.45, 4.46, 4.47 y 4.48 se presentan el perfil de curvatura para cada caso estudiado

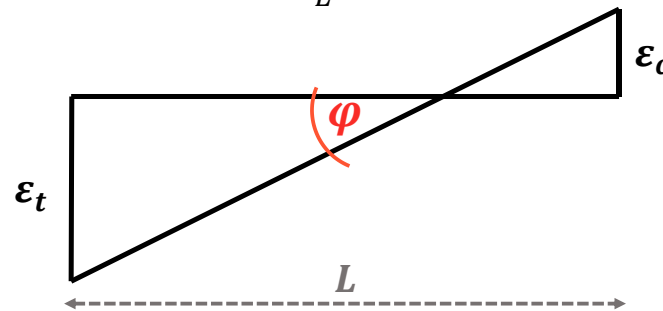
$$\phi = \frac{\varepsilon_{yy,c} + \varepsilon_{yy,t}}{L} \quad (\text{XLV})$$


Figura 4.44. Esquema explicativo de cálculo de curvatura

La siguiente tabla presenta la distancia entre las fibras extremas consideradas para el cálculo de curvatura.

Tabla 4.15. Distancia entre las fibras extremas de cada muro en estado de tracción y compresión teóricos

	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3		Probeta 4	
	Muro izquierdo	Muro derecho	Muro izquierdo	Muro derecho	Muro izquierdo	Muro derecho	Muro izquierdo	Muro derecho
Distancia entre fibras [mm]	84,5	112,13	89,91	129,9	73,93	115,54	63,36	111,42

Si se asume que el porcentaje del muro que se encuentra a tracción es un 10%, entonces el error asociado al cálculo de la curvatura es:

$$e_{\phi} = \frac{e_s}{0,9L} \quad (\text{XLVI})$$

Donde L es la distancia entre las fibras extremas consideradas. El error promedio es aproximadamente $e_{\phi} = 4,8 \cdot 10^{-5}$

A continuación, se presentan los perfiles de curvatura para cada una de las probetas y en cada sentido del desplazamiento de techo. Se advierte que el perfil de curvatura de cada probeta es similar al de deformaciones. Esto debido a que la magnitud de las tracciones supera al de las compresiones.

Se observa que la variación de curvatura desde la base hasta un punto en la altura que se hace cercana al valor del error, es aproximadamente lineal para la mayoría de los perfiles. A excepción del caso de la probeta 2 por la ausencia de datos válidos en la base.

Otro aspecto importante de mencionar, es que los perfiles de curvatura presentan discontinuidades en la altura debido a la pérdida de información por los soportes, y no es posible observar algunas grietas que sí aparecen en los peaks de las curvas de deformación vertical en la sección anterior. Estas perturbaciones son fundamentales para establecer la longitud de rótula plástica.

Probeta 1

Respecto a la Probeta 1, en la Figura 4.45 se obtiene que para el nivel de deriva de 4,0% nominal, la longitud de rótula plástica para el caso de sentido positivo, alcanza una altura de 23 [mm] en el muro corto y 25,9 [mm] en el muro largo. En el otro sentido del desplazamiento de techo, se registran 28 [mm] y 17,3 [mm] para los muros corto y largo respectivamente.

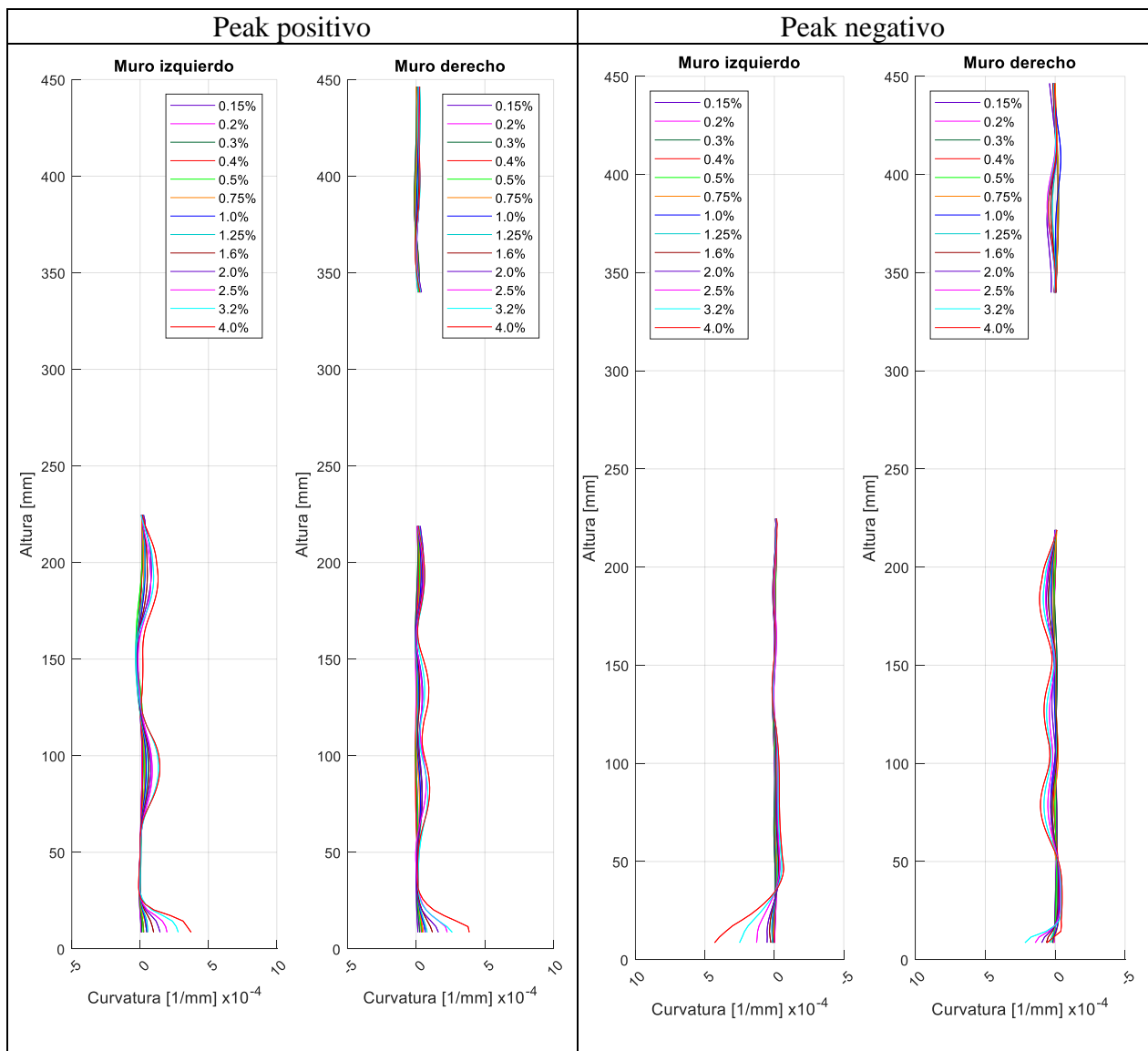


Figura 4.45. Perfil de curvatura en altura de la Probeta 1
izquierda) Peak positivo; derecha) Peak negativo

Probeta 2

Respecto al perfil de curvatura de la Probeta 2 mostrada en la Figura 4.46, no es posible deducir l_p , y en caso de necesitarse, se utilizará la altura a la cual se magnifican las deformación verticales.

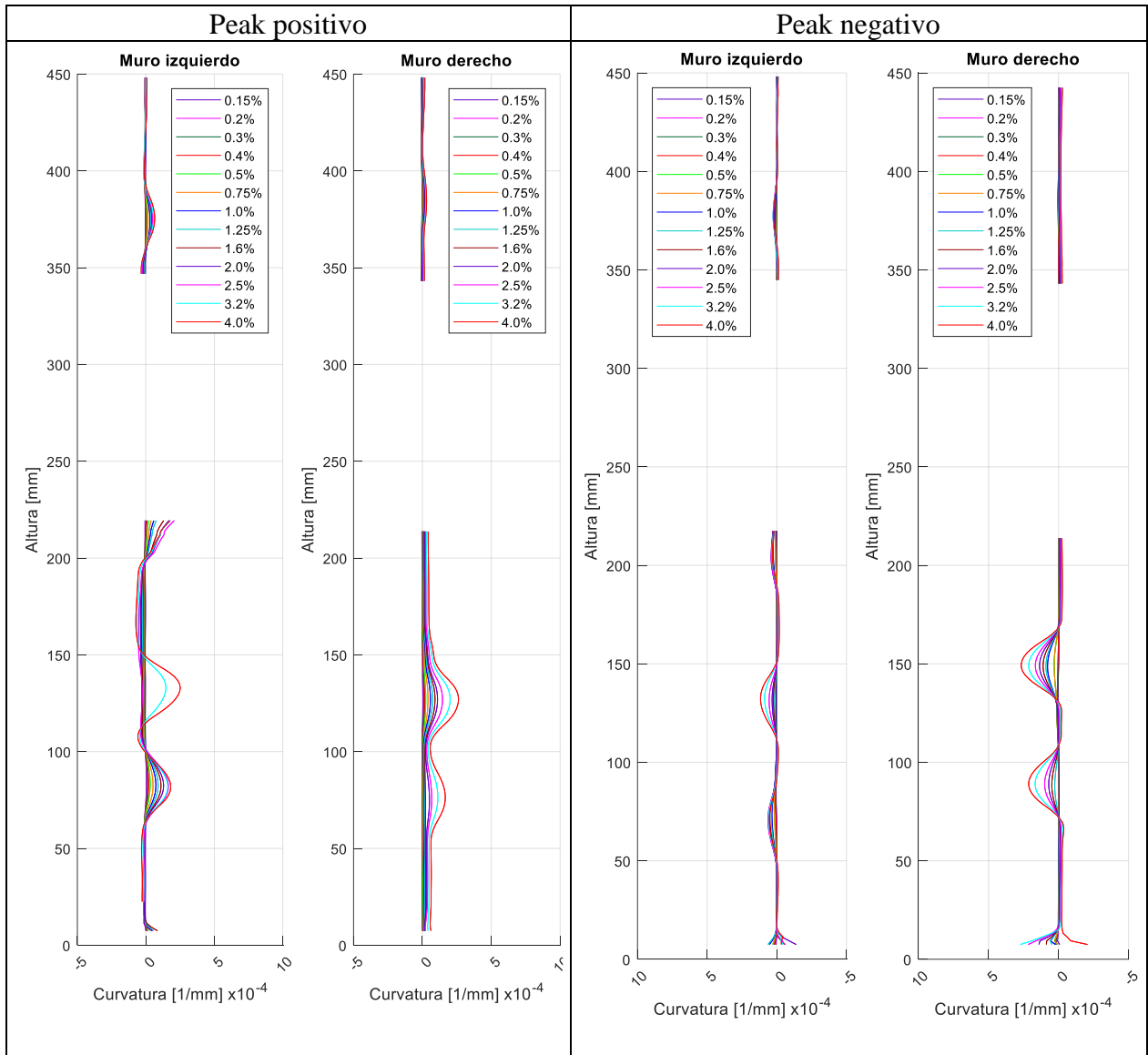


Figura 4.46. Perfil de curvatura en altura de la Probeta 2
izquierda) Peak positivo; derecha) Peak negativo

Probeta 3

Al analizar el perfil de la Figura 4.47 correspondiente a la Probeta 3, se obtiene que para el drift de 3,2% nominal, la longitud de rótula plástica alcanza una altura de 18,6 [mm] y 11,2[mm] en el muro corto, para los sentidos positivo y negativo del desplazamiento de techo, respectivamente.

En la figura no es posible observar la curvatura en la base para el muro más largo debido a la falta de datos en el borde del eje 3 (presencia del perno).

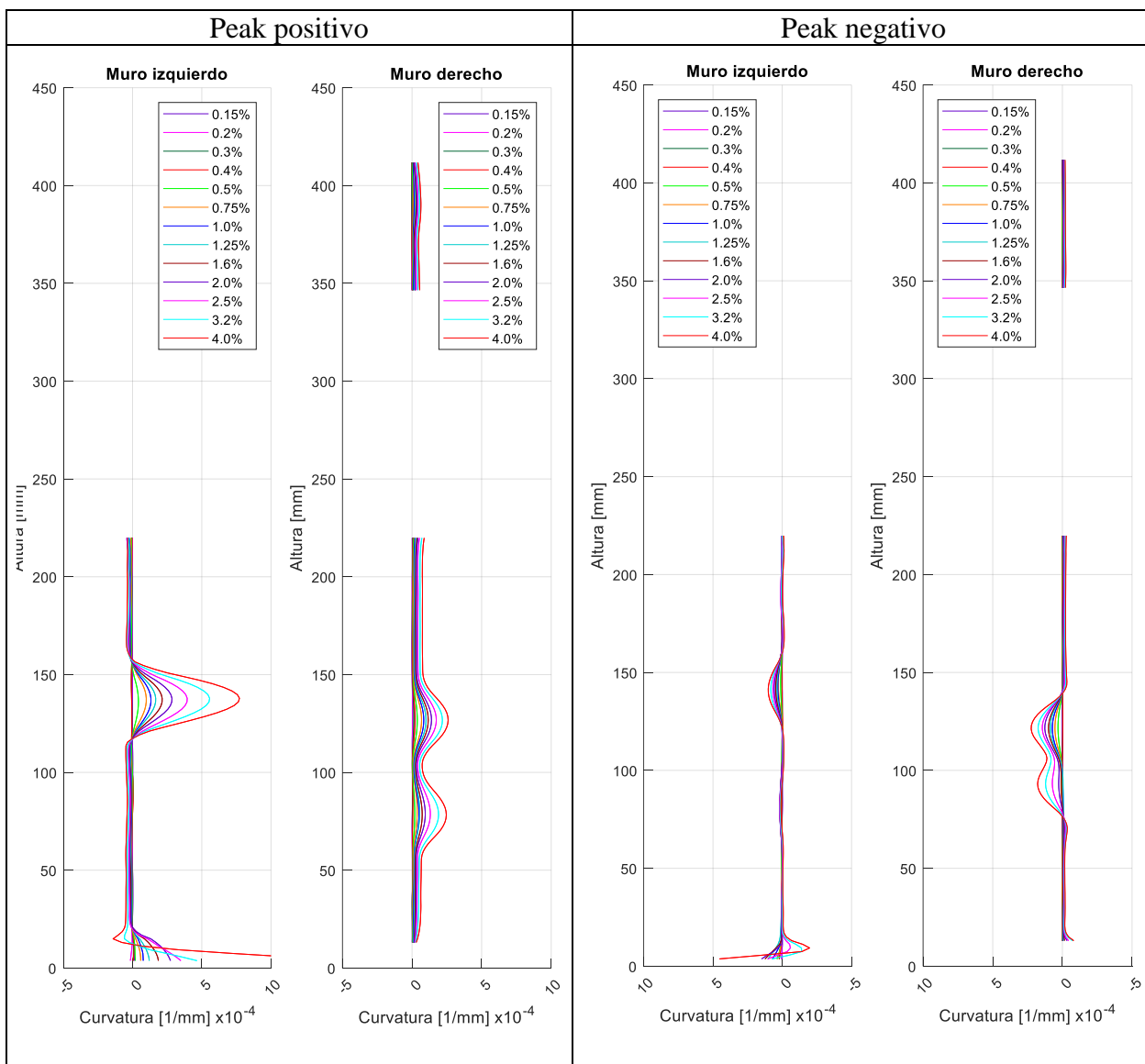


Figura 4.47. Perfil de curvatura en altura de la Probeta 3 (izquierda) Peak positivo; derecha) Peak negativo

Probeta 4

Respecto a la Probeta 4, en la Figura 4.48 se obtiene que para la deriva de techo de 3,2% nominal, la longitud de rótula plástica para el caso del sentido positivo, alcanza una altura de 33 [mm] en el muro corto y 26 [mm] en el muro largo. En el otro sentido del desplazamiento de techo, se registran 40 [mm] (para el 4,0%) y 24 [mm] para los muros corto y largo respectivamente.

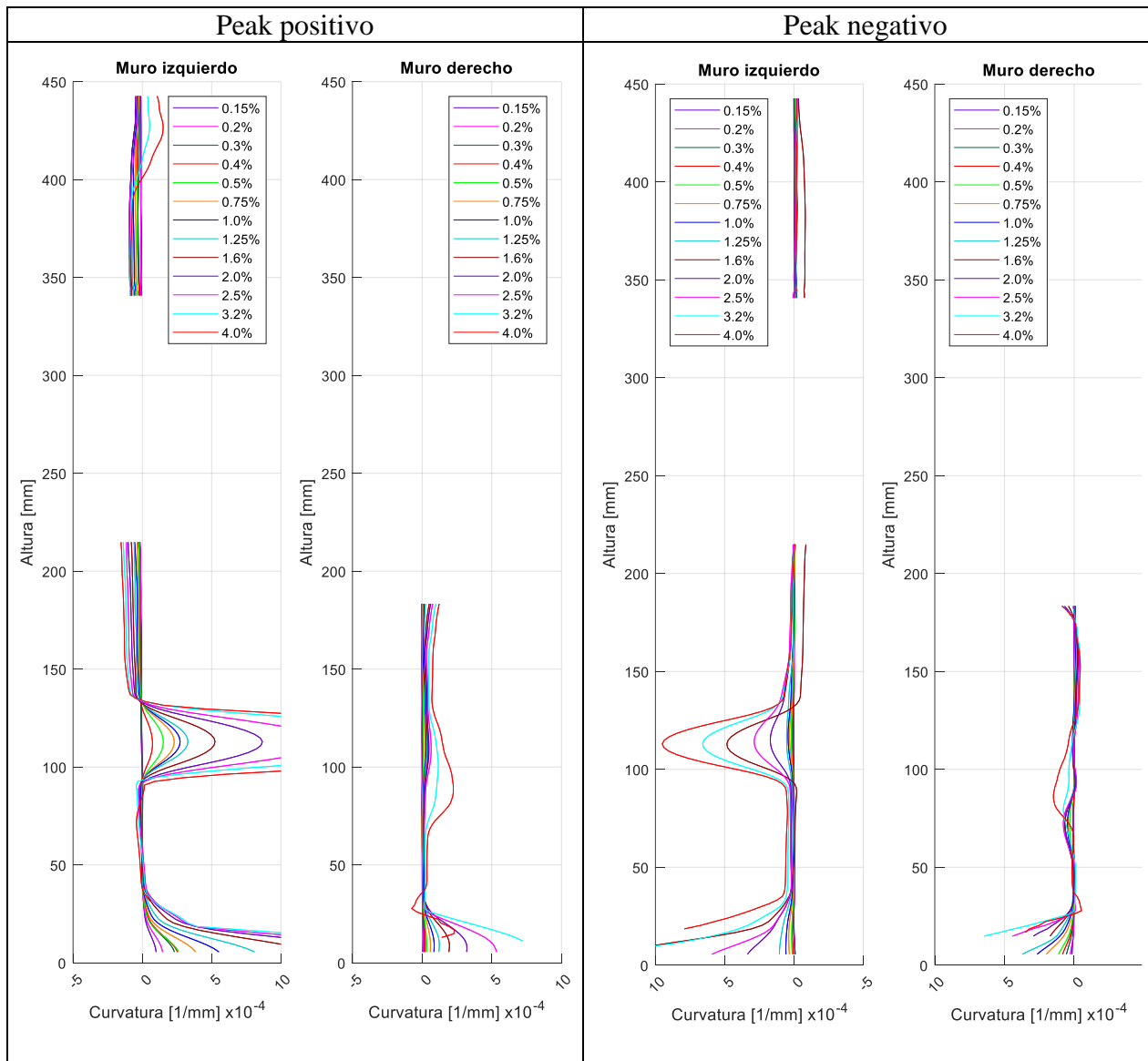


Figura 4.48. Perfil de curvatura en altura de la Probeta 4 (izquierda) Peak positivo; derecha) Peak negativo

Cabe mencionar que los gráficos de curvatura no presentan el perfil típico de un muro cantiléver de gran altura, como el mostrado en la Figura 4.49. Esto se debe a que: a) sólo se está enfocando la parte basal del muro a una altura de 450 [mm] sobre la base, correspondiente a 3/8 de la altura total de la probeta 1, y 1/4 de las probetas 2, 3 y 4; b) la escala del modelo (factor de 35) que permite construir el muro más alto de 1,8 [m] y de pocos pisos (vigas); c) sólo se desarrollan grietas aisladas en la altura del muro y no es posible observar la concentración de fisuras por flexión característica de grandes muros (ver Figura 4.50); d) las grandes deformaciones que se producen a nivel de las vigas genera una escala visual en el grafico donde la curva presenta perturbaciones aisladas y luego parece volver a cero (rango del error).

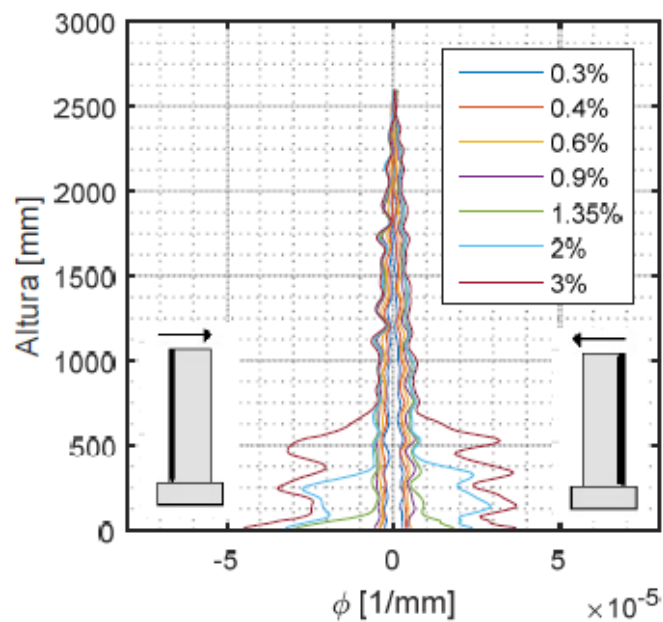


Figura 4.49. Perfil de curvatura registrada por cámara de enfoque global – Probeta 1 (Modificado de Manriquez, 2016)

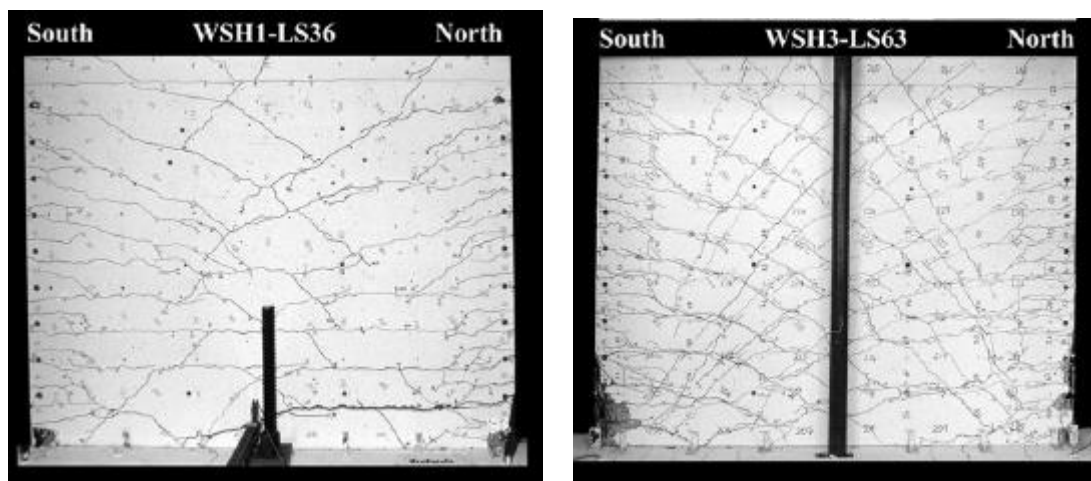


Figura 4.50. Patrón de grietas de dos probetas tras la falla (Modificado de Dazio y otros, 2009)

4.7. Comparación de Φ_y y δ_y con expresiones analíticas de la literatura

Para el cálculo teórico de Φ_y y δ_y se consideraron los valores de resistencia de materiales obtenidos de los ensayos correspondientes.

Tabla 4.16. Valores obtenidos de los ensayos de materiales

Parámetro	Valor
ϵ_y [-]	0,00275
E_s [tonf/m ²]	200000
f_y [tonf/m ³]	550
f'_c [tonf/m ²]	2855

La metodología para determinar Φ_y y δ_y consiste en identificar el inicio de fluencia de cada muro, como el instante en que el punto basal más traccionado supera el valor de deformación de fluencia del acero. Para ese instante, se registran el desplazamiento de techo y la curvatura de la sección.

La Tabla 4.17 presentan los valores de curvatura y desplazamiento de fluencia obtenidos tanto de manera experimental,

Tabla 4.17. Curvatura y desplazamiento de fluencia

	Probeta 1				Probeta 2				Probeta 3				Probeta 4			
	Muro izquierdo		Muro derecho		Muro izquierdo		Muro derecho		Muro izquierdo		Muro derecho		Muro izquierdo		Muro derecho	
	ϕ_y	δ_y	ϕ_y	δ_y	ϕ_y	δ_y	ϕ_y	δ_y	ϕ_y	δ_y	ϕ_y	δ_y	ϕ_y	δ_y	ϕ_y	δ_y
Massone&Alfaro (2016)	3,5E-5	7,1	2,7E-5	5,2	3,5E-5	9,1	2,7E-5	6,6	4,4E-5	11,8	2,7E-5	6,7	4,4E-5	8,8	2,7E-5	5,3
Priestley y otros (2007)	5,1E-5	7,5	3,9E-5	5,7	5,1E-5	10,4	3,9E-5	8,0	6,4E-5	12,9	3,9E-5	7,9	6,4E-5	10,7	3,9E-5	6,6
Experimental (sentido negativo)	2,5E-5	7,2	2,2E-5	4,2	2,4E-5	8,8	2,0E-5	2,6	3,3E-5	5,6	2,3E-5	4,2	3,9E-5	5,8	2,4E-5	2,0

Se observa que, en todos los casos, el muro más corto desarrolla una mayor curvatura en su base que el muro más largo. Esto concuerda con lo establecido por Bohl y Adebar.

Respecto a los resultados experimentales, se obtiene que para la probeta 1, en el sentido positivo del movimiento cuando el muro derecho (largo) se comprime, alcanza una curvatura de fluencia mayor que en el sentido negativo (cuando se tracciona), debido a que en el segundo caso se tiene una mayor profundidad del eje neutro. Lo contrario ocurre para la probeta 4, porque en el sentido negativo, el muro se tracciona completamente.

Para el caso del muro izquierdo (corto), éste registra mayores valores de curvatura para el sentido positivo del movimiento. Esto se debe a que, para este sentido el muro izquierdo se tracciona en toda su longitud.

En resumen, se obtiene que la probeta 4 presenta el mayor valor de curvatura para el muro corto, en ambos sentidos del movimiento.

En el Anexo B se adjunta el detalle de cálculo según las expresiones de Massone y Alfaro (2016). Es importante mencionar que las ecuaciones están calibradas para el caso en que el desplazamiento de techo se mide en el último piso, entonces para comparar los resultados experimentales se consideró la altura de la probeta hasta el punto de aplicación de la carga (punto fijo) y todos los niveles de deriva se corresponden con este valor.

Además, debido al bajo nivel de carga axial en los muros, se despreció este valor en el cálculo. Según las expresiones, al aumentar la carga axial se obtendría un mayor desplazamiento de fluencia. Se obtiene que un mayor acoplamiento produce un menor valor de h_o/h_w por lo tanto una mayor reducción del desplazamiento de fluencia corregido por acoplamiento, como en el caso de la probeta 4.

Para el cálculo según la expresión propuesta por Priestley y otro (2007) se consideró un valor de $\phi_y D = 1,85$ para la curvatura adimensional.

De manera general, se obtiene que los valores del desplazamiento de fluencia son mayores que los obtenidos de forma experimental, es decir, los muros fluyen anticipadamente a lo esperado. La mayor diferencia se produce para el caso de la Probeta 4, donde es el muro más corto el que fluye antes que el muro más largo (sentido positivo).

En las siguientes figuras se presentan de manera gráfica, los resultados expuestos anteriormente.

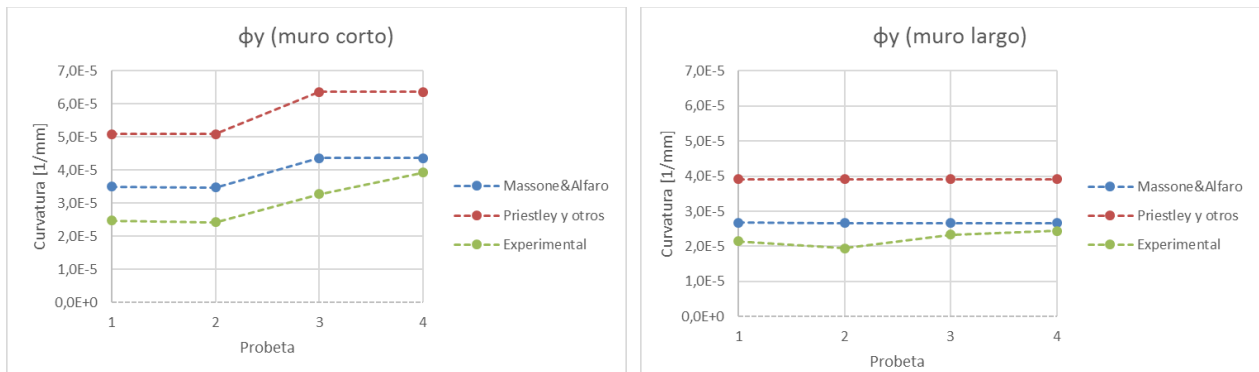


Figura 4.51. Curvatura de fluencia experimental y analítico.

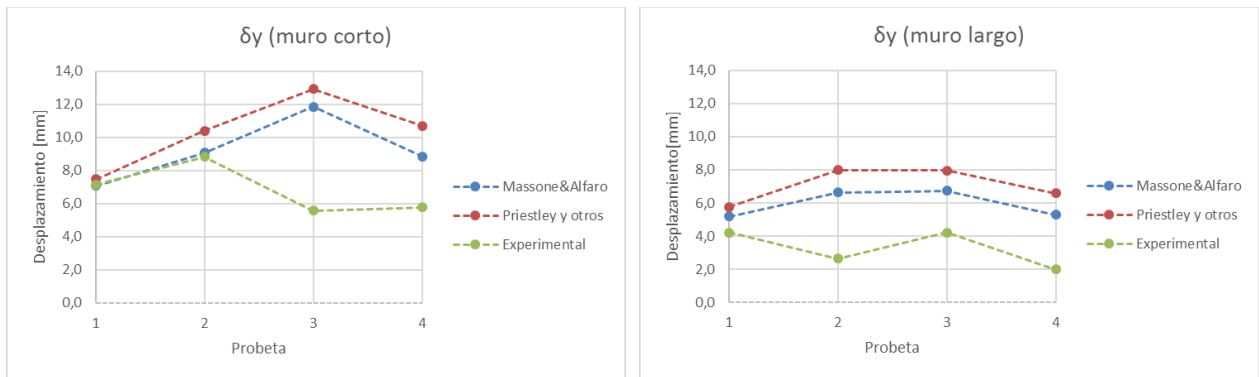


Figura 4.52. Desplazamiento de fluencia experimental y analítico.

4.8. Comparación de Φ_y y δ_y con modelo de fibras: Inga (2018)

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos por el modelo de fibras de Inga (2018). De manera general, los resultados sugieren el mismo comportamiento que el obtenido de manera experimental: i) La curvatura del muro más corto (izquierdo) es mayor que la del muro más largo en el sentido que tiende a traccionarlo; ii) los valores de curvatura son mayores para el caso del sentido positivo; iii) el muro más largo fluye primero en todos los casos, a excepción de la Probeta 4 para el sentido positivo.

Sin embargo, el desplazamiento de fluencia experimental es menor en todos los casos. La mayor diferencia se observa para el muro corto, para el cual ya se mencionó que anticipa su fluencia debido al efecto del acoplamiento.

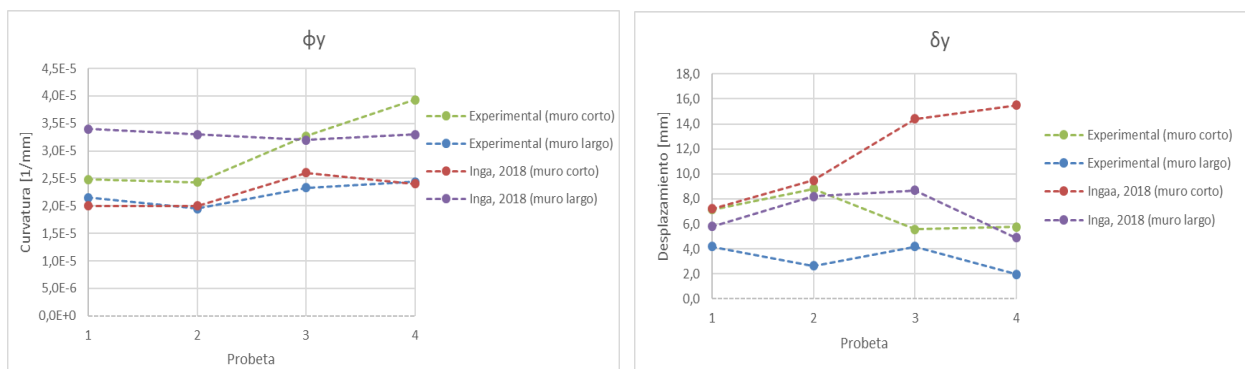


Figura 4.53. Comparación de la curvatura y desplazamiento de fluencia con el modelo de fibras.

4.9. Longitud de rótula plástica de los muros

La longitud de rótula plástica (l_p^*) de la base se obtiene del perfil de curvatura como la altura en la cual la curvatura decrece hasta alcanzar valores cercanos al error $e_\phi = 4,8 \cdot 10^{-5}$, por ser éste mayor que los resultados experimentales de las tablas 4.17 y 4.18

Se comparan los perfiles de curvatura en altura de las probetas 1 y 4, las cuales tienen el menor y mayor grado de acoplamiento respectivamente.

Es posible observar que para la probeta 1, la mayor concentración de daño se produce en la base de los muros. Sin embargo, la curvatura tiende a decrecer al acercarse a la base, esto debido al error asociado al suavizado que realiza el software sobre las deformaciones en la interfaz muro-fundación.

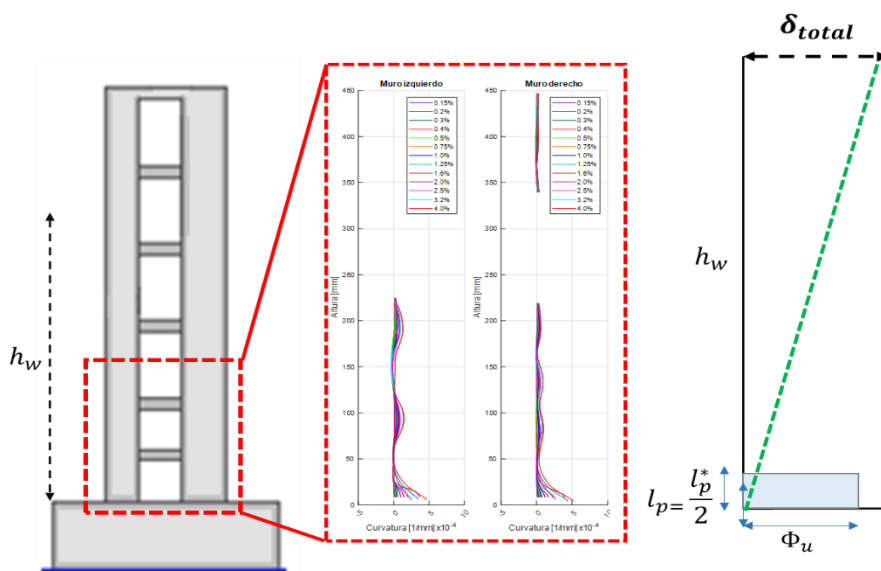


Figura 4.54. Modelo convencional de rótula plástica para la Probeta 1

De esta forma, se propone un modelo simple (tradicional) de una única rótula plástica en la base del muro para la Probeta 1 (de menor acoplamiento), considerando $l_p = Kl_p^*$, con $l_p^* = l_w$. El valor de K se elige de tal forma de minimizar el error relativo promedio. Para $K=0,55$ se obtiene un error de 17,2% para el muro corto y de 23,7% para el muro largo.

La Figura 4.55 presenta el desplazamiento de techo calculado a partir del modelo propuesto, para distintos niveles de la deriva. En línea punteada se presenta la función identidad que representa la correlación ideal del modelo.

Al aplicar una regresión lineal a las curvas de desplazamiento, se obtiene un factor $R^2=0,95$ y un error relativo para la pendiente de 23% para el muro corto, y $R^2=0,94$ y error 27% para el muro largo.

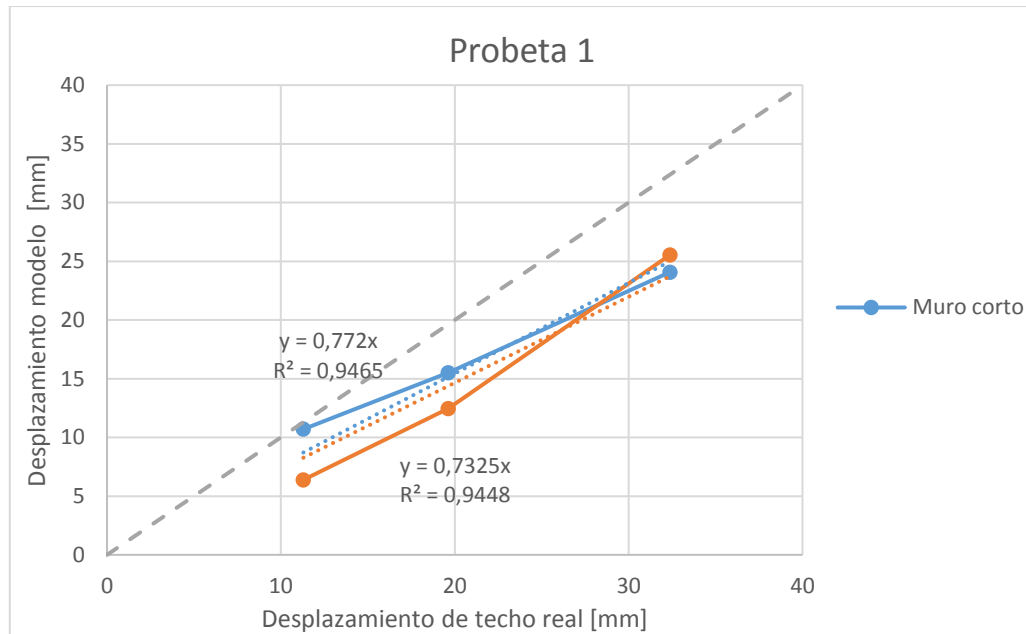


Figura 4.55. Comparación del desplazamiento de techo real y calculado con modelo de rótula plástica – Probeta 1

En el caso de la probeta 4, se distingue el comportamiento entre el muro corto y el de mayor longitud. En el muro corto (izquierdo), los máximos correspondientes a las grietas que se ubican a nivel de las vigas del primer y segundo piso, son del orden de magnitud del máximo basal. Mientras que, en el muro más largo, el daño se concentra en la base.

De esta forma se propone el modelo de la Figura 4.56, donde se distingue el comportamiento entre el muro corto y largo (Modelos N°1 y N°2, respectivamente). Para este caso se considera $l_p = 0,85l_p^*$. El valor de K se escoge en el rango (0,45-1,0) de tal forma de minimizar el error relativo promedio para el cálculo del desplazamiento.

Se obtiene un error relativo promedio de 9,6% para el modelo N°1 aplicado al muro corto, y de un 3,9% para el modelo N°2 aplicado al muro largo.

Es posible expresar la longitud plástica equivalente en términos de la longitud del muro. Para el nivel de 3,2% se obtiene $l_{p, base}^{eq} = 0,39 l_w$ y $l_{p, viga}^{eq} = 0,22 l_w$ para el muro corto, y $l_{p, base}^{eq} = 0,21 l_w$ para el muro largo.

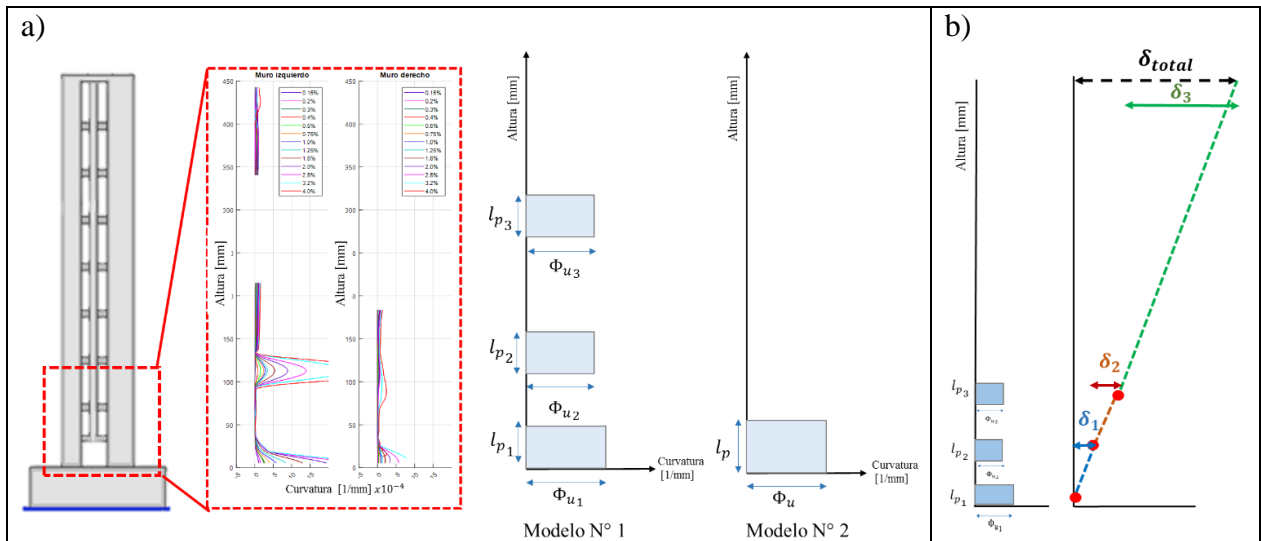


Figura 4.56. a) Modelo de rótula plástica propuesto para Probeta 4; b) Cálculo de desplazamiento de techo para el Modelo N°1.

En la siguiente figura se presenta el cálculo del desplazamiento de techo a partir de los modelos 1 y 2, para diferentes niveles de la deriva. En línea punteada se presenta la función identidad que representa la correlación ideal del modelo.

Al aplicar una regresión lineal a las curvas de desplazamiento, se obtiene un factor $R^2=0,98$ y un error relativo para la pendiente de 4% para el muro corto, y $R^2=0,90$ y error -4% para el muro largo.

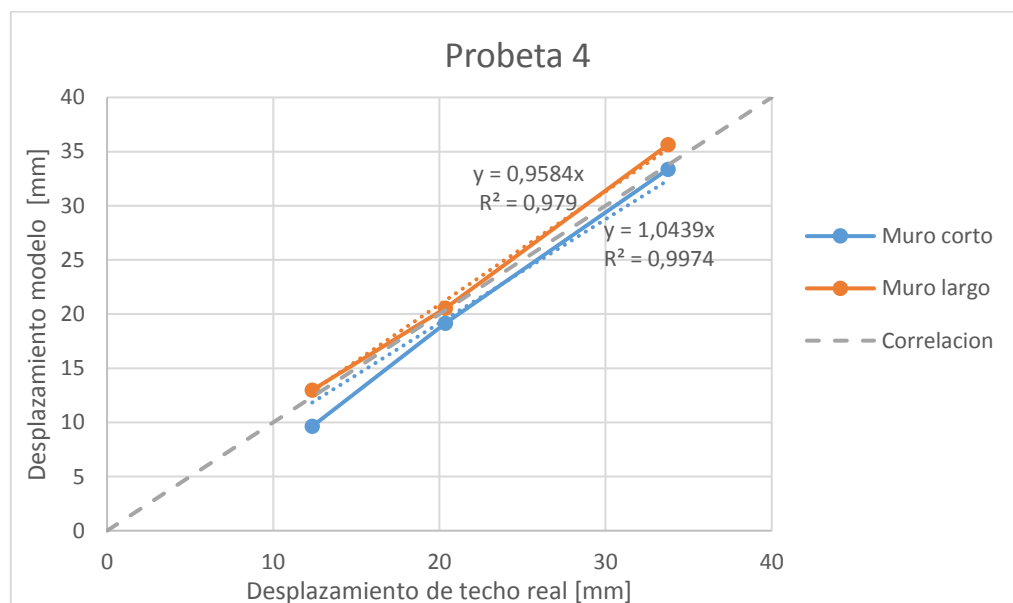


Figura 4.57. Comparación del desplazamiento de techo real y calculado con modelo de rótula plástica – Probeta 4

Finalmente se verifica la validez de los datos extraídos de los perfiles de curvatura experimentales, para la calibración de los modelos. Se debe cumplir que:

$$\delta = \iint \Phi(h)dh \quad (\text{XLVII})$$

Se calcula el desplazamiento de techo para tres niveles de la deriva considerando ambos sentidos del movimiento. En la siguiente tabla se presenta el error relativo promedio obtenido para cada probeta.

Tabla 4.18. Error relativo promedio del cálculo de desplazamiento de techo experimental.

	Probeta 1		Probeta 4	
	Muro corto	Muro largo	Muro corto	Muro largo
Error relativo promedio [%]	21,7	23,9	-1,5	5,4

Se aprecia que, para ambas probetas, la diferencia porcentual obtenida por la doble integración de la curvatura y por el modelo propuesto es similar.

4.10. Comportamiento de vigas de acople

El registro de las vigas mediante fotogrametría se realiza para las probetas 3 y 4.

El comportamiento de una viga se puede reconocer por su relación de aspecto L/h . Una viga con una gran luz se comportará predominantemente en flexión, mientras que para aspectos bajos el esfuerzo que controla es el corte. En la siguiente tabla se presenta este parámetro para cada uno de los casos estudiados.

Tabla 4.19. Relación de aspecto de las vigas de cada probeta analizada.

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4
Relación de aspecto (L/h)	4	4	4,33	1

Cuando el movimiento de la mesa tiene sentido positivo, la carga lateral tiene sentido negativo y se registra como fuerza de tracción por la celda de carga. En este caso, teóricamente la viga presentará una deformación por flexión como la mostrada en a) de la Figura 4.58. Por otro lado, cuando se alcanza el peak negativo del movimiento, la viga presentará la deformación de b).

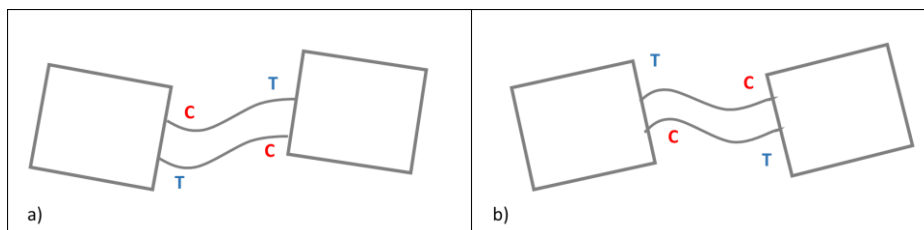


Figura 4.58. Deformación por flexión según el sentido del movimiento.
a) peak positivo del desplazamiento de techo; b) peak negativo del desplazamiento de techo

Sólo es posible estudiar el comportamiento de 7 de las 9 vigas en la altura de la probeta, debido a que dos de ellas se ocultan tras los laterales del marco de acero. Para el análisis, se realiza una correlación de las imágenes que siguen la envolvente en cada dirección del ensayo.

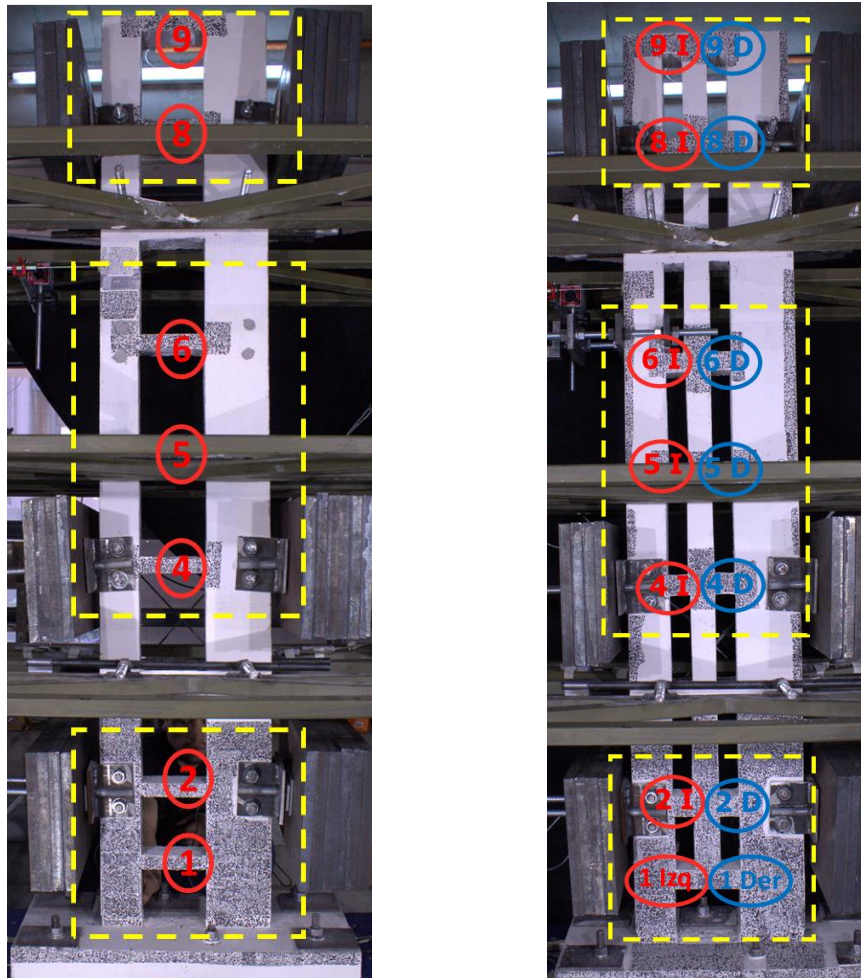


Figura 4.59. Numeración de vigas analizadas. Izquierda) Probeta 3; Derecha) Probeta 4

Probeta 3

Se observa de las figuras 4.60 y 4.61, que para la probeta 3, las vigas presentan principalmente un comportamiento a flexión. Las vigas más solicitadas corresponden a las del 5^{to} y 4^{to} piso. La magnitud de las deformaciones disminuye desde aquella zona central hacia la parte superior e inferior de la altura del muro, es decir, las vigas menos solicitadas son las del 1^{er} y último piso.

La fluencia comienza en la fibra inferior de la 4ta viga y se alcanza para el 0.2% de la deriva de techo. Luego fluye la fibra superior de la viga del 5to piso (no se muestra este nivel).

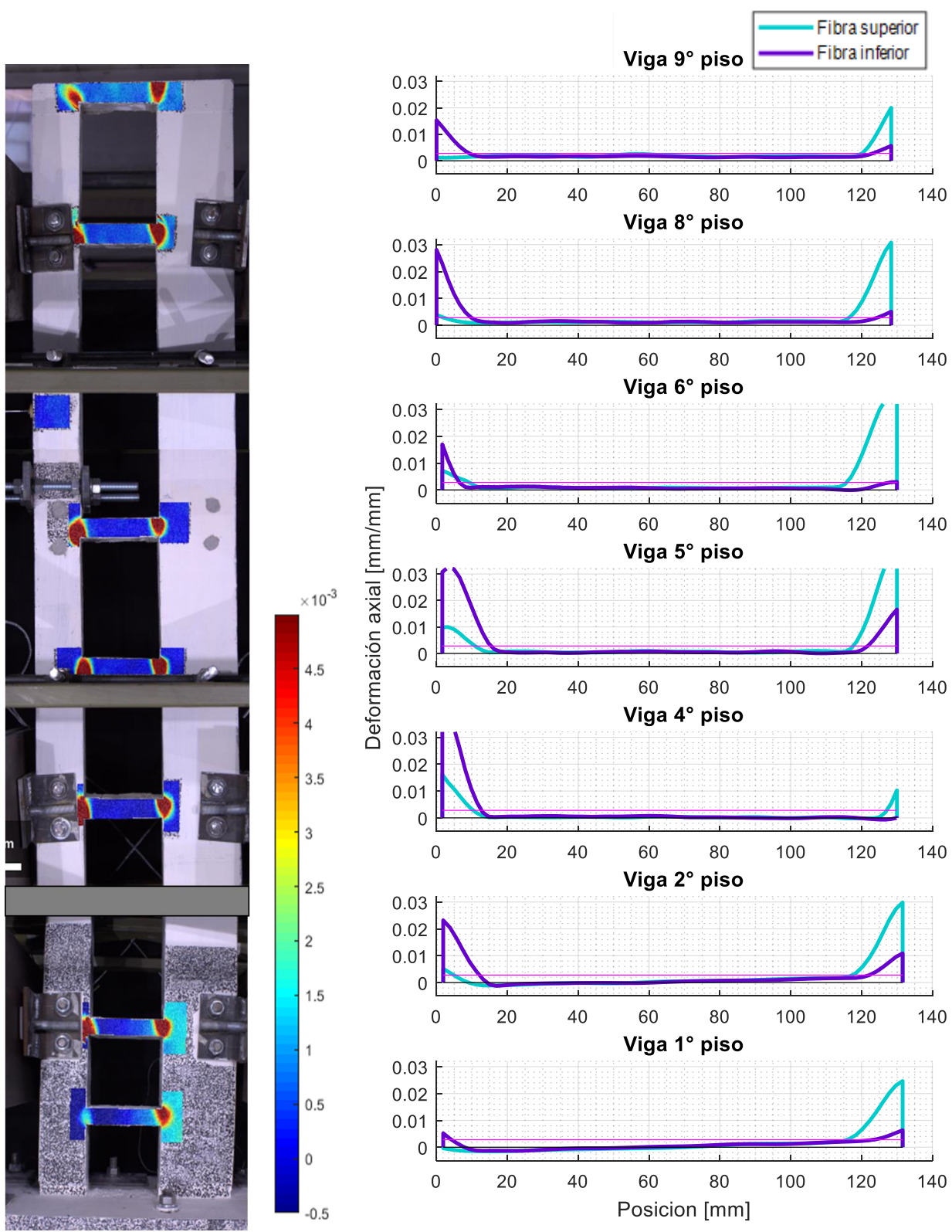


Figura 4.60. Deformación axial de las vigas para el 1.6% nominal en sentido positivo.
Izq) Mapa de intensidad de color; Der) ϵ_{xx} de fibras superior e inferior - Probeta 3

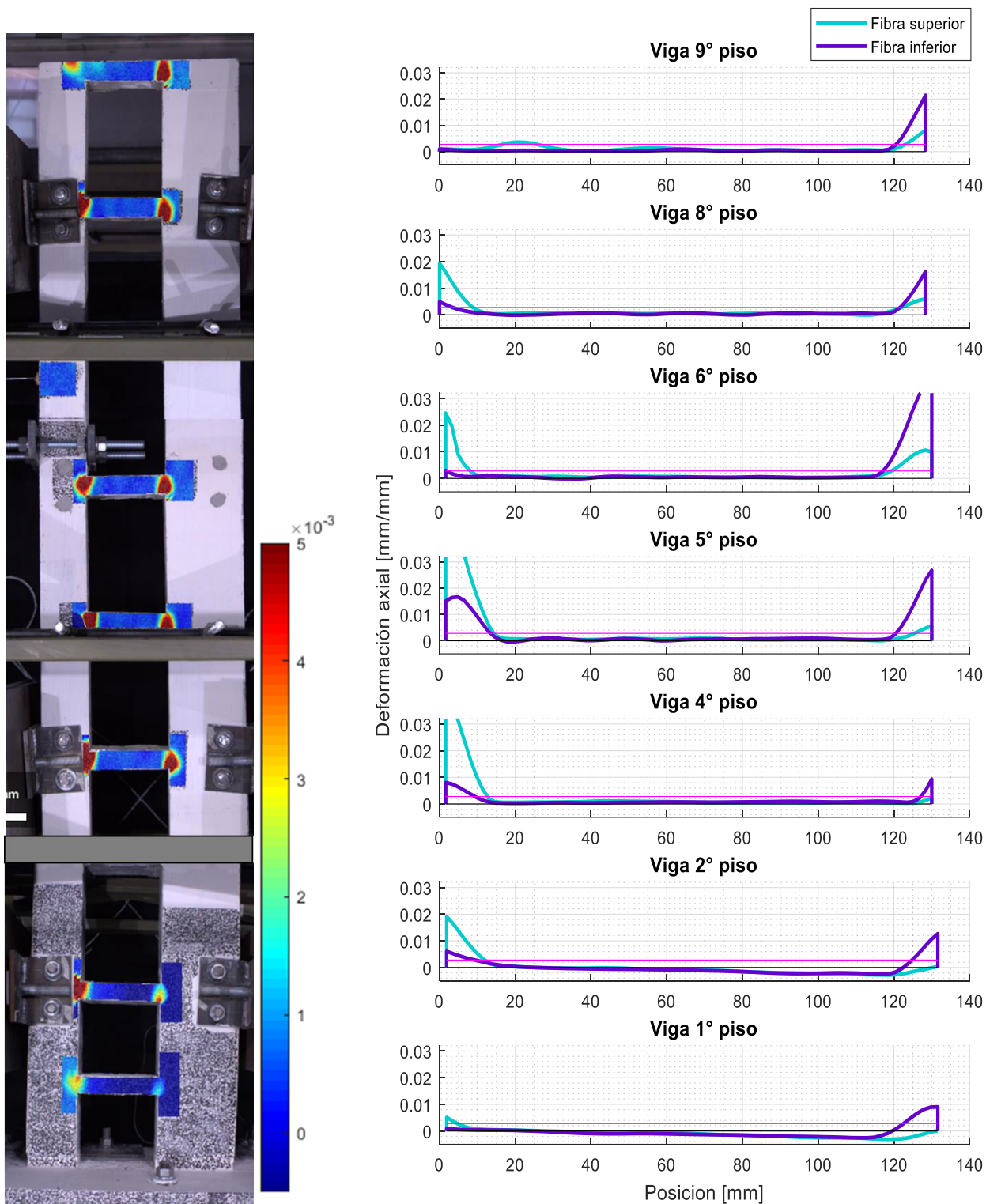


Figura 4.61. Deformación axial de las vigas para el 1.6% nominal en sentido negativo.
 Izq) Mapa de intensidad de color; Der) ϵ_{xx} de fibras superior e inferior - Probeta 3

En las figuras 4.62 y 4.63 se muestra la evolución de las deformaciones axiales de las fibras superior e inferior de la 6ta viga para diferentes niveles de desplazamiento, y según la dirección de movimiento. Se observa que, se presentan las deformaciones de tracción en los extremos esperados. También se advierte que, a pesar de que se espera un comportamiento simétrico, se registran mayores deformaciones en el extremo derecho de la viga (en la fibra superior para el sentido positivo y en la fibra inferior para el negativo).

Además, se aprecia que el extremo teóricamente en compresión, presenta pequeñas deformaciones de tracción. Esto debido a una deformación remanente producto de una fisura que no logra cerrarse. Esta grieta se produce en los primeros instantes de iniciado el protocolo de ensayo.

Se observa que a medida que aumenta el desplazamiento de techo impuesto a la probeta, las deformaciones de tracción aumentan de forma lineal, a excepción del extremo derecho de la fibra superior. El largo de la viga para la cual se alcanza la fluencia, aumenta levemente y parece estabilizarse en los 10[cm] para el extremo izquierdo y en 15[cm] para el derecho.

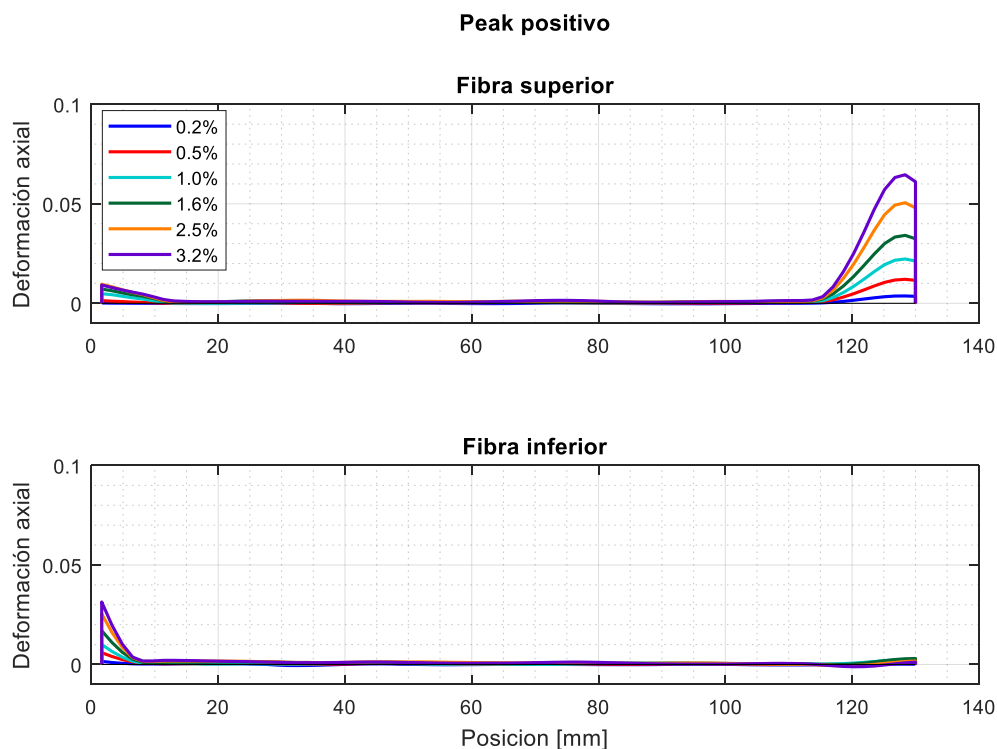


Figura 4.62. Deformación axial de las fibras superior e inferior de la viga del 6to piso para diferentes niveles de la deriva de techo en sentido positivo – Probeta 3

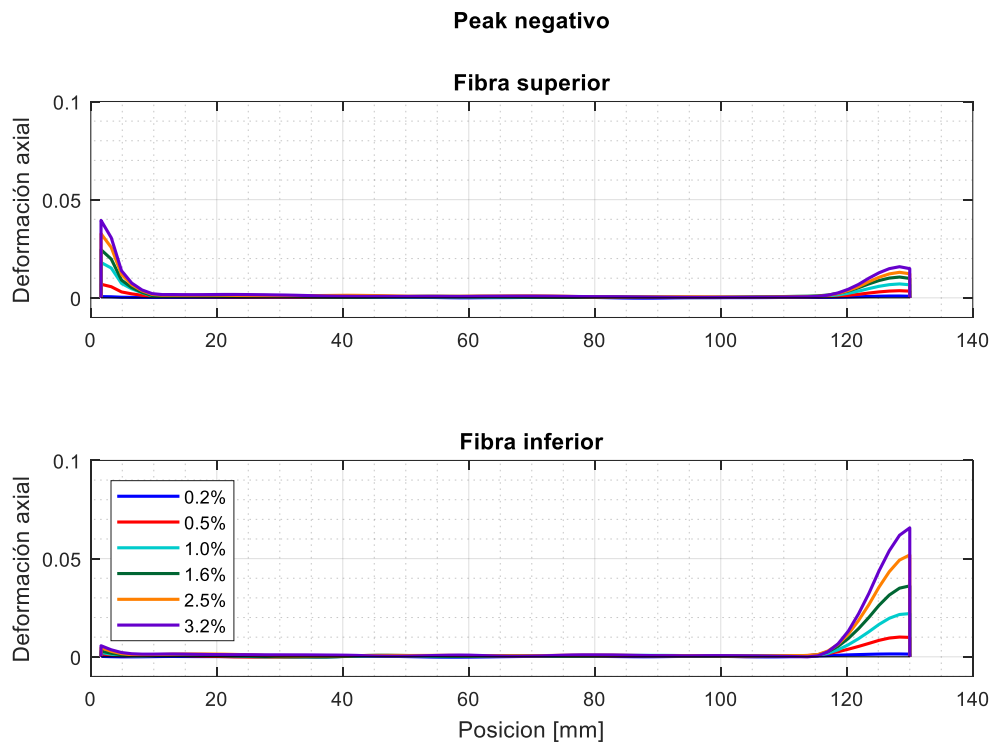


Figura 4.63. Deformación axial de las fibras superior e inferior de la viga del 6to piso para diferentes niveles de la deriva de techo en sentido negativo – Probeta 3

Las vigas de la probeta 3 tienen una longitud de 130 [mm], pero en la

Figura 4.62 se observa que para el extremo derecho de la fibra superior, se produce la máxima deformación a los 128 [mm] y luego decae. De la misma forma, se puede observar en las figuras 4.50 y 4.51 que la concentración de grandes deformaciones en los extremos de las vigas se adentra en la longitud del muro.

En la siguiente figura se presentan los perfiles de deformación axial de las fibras superior e inferior de las vigas en una mayor longitud, considerando parte del muro.

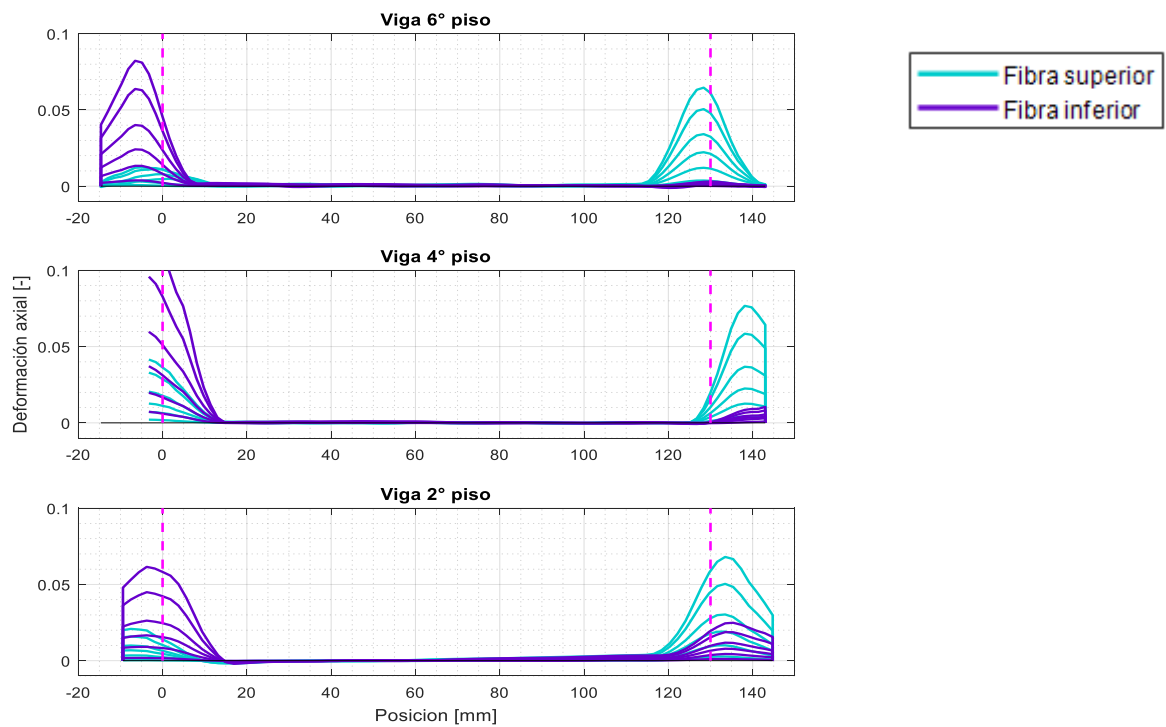


Figura 4.64. Deformación axial de las fibras superior e inferior de las vigas del 6to, 4to y 2do piso para diferentes niveles de la deriva de techo en el sentido positivo – Probeta 3

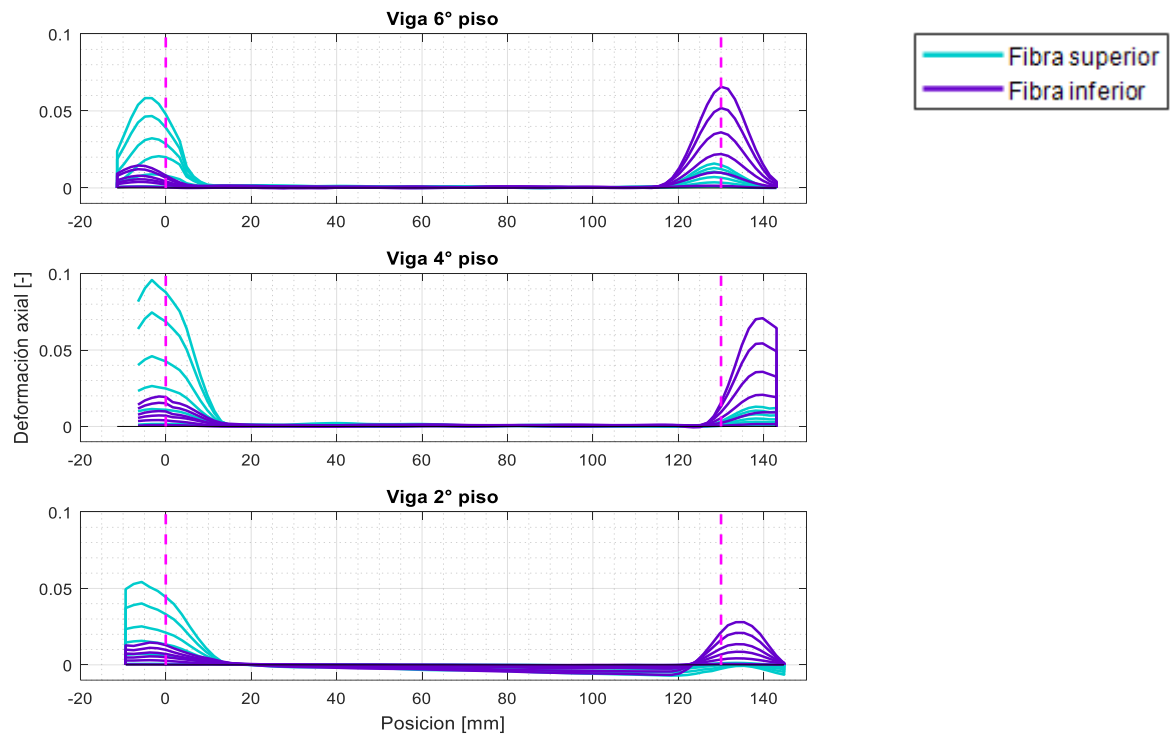


Figura 4.65. Deformación axial de las fibras superior e inferior de las vigas del 6to, 4to y 2do piso para diferentes niveles de la deriva de techo en el sentido negativo – Probeta 3

Probeta 4

Se observa de las figuras 4.66 y 4.67 que para la probeta 4, las vigas presentan principalmente un comportamiento a flexión. Las vigas más solicitadas corresponden a las del 5^{to} y 4^{to} piso. La magnitud de las deformaciones disminuye desde aquella zona central hacia la parte superior e inferior de la altura del muro, es decir, las vigas menos solicitadas son las del 1^{er} y último piso.

Se advierte que, para ambos sentidos del movimiento las vigas del primer piso tienden a comportarse como una sola de longitud total 130 [mm]. En los pisos superiores se distingue la flexión de ambas vigas, izquierda y derecha.

La fluencia inicia en la viga derecha del 4to piso para a deriva del 0,4% en sentido positivo (tracción en muro corto) , mientras que para el otro sentido se inicia en la viga izquierda del 5to piso.

Para el nivel de 1,0% de la deriva de techo, algunas fisuras ya se encuentran completamente abiertas a lo largo de la altura de la viga, por lo tanto, se obtienen deformaciones de tracción tanto en la fibra superior como inferior para ciertas vigas.

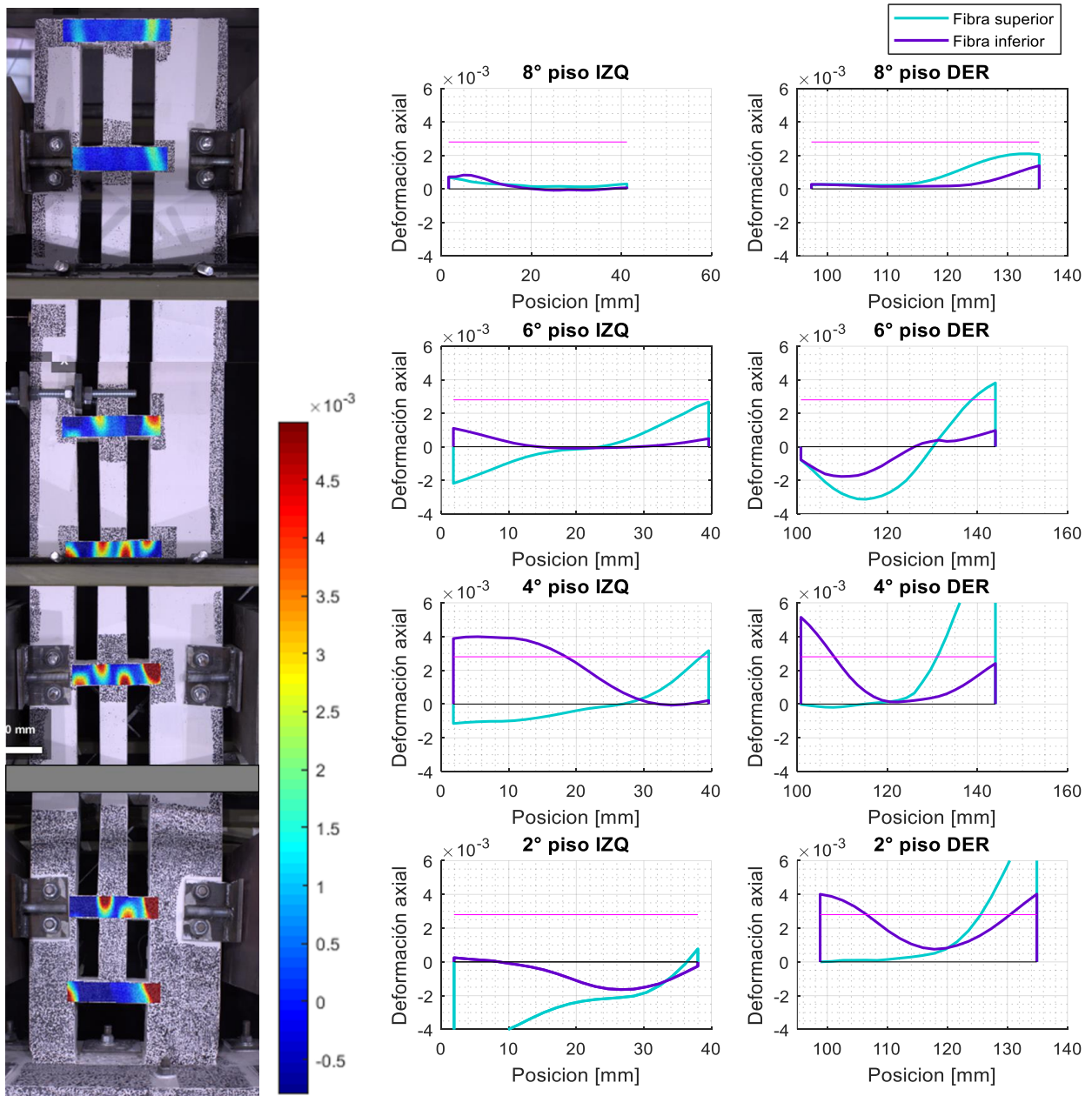


Figura 4.66. Deformación axial en las vigas para la deriva de techo del 1,0% nominal, en sentido positivo del movimiento. Izq) Mapa de intensidad de color; Der) ϵ_{xx} de las fibras superior e inferior - Probeta 4

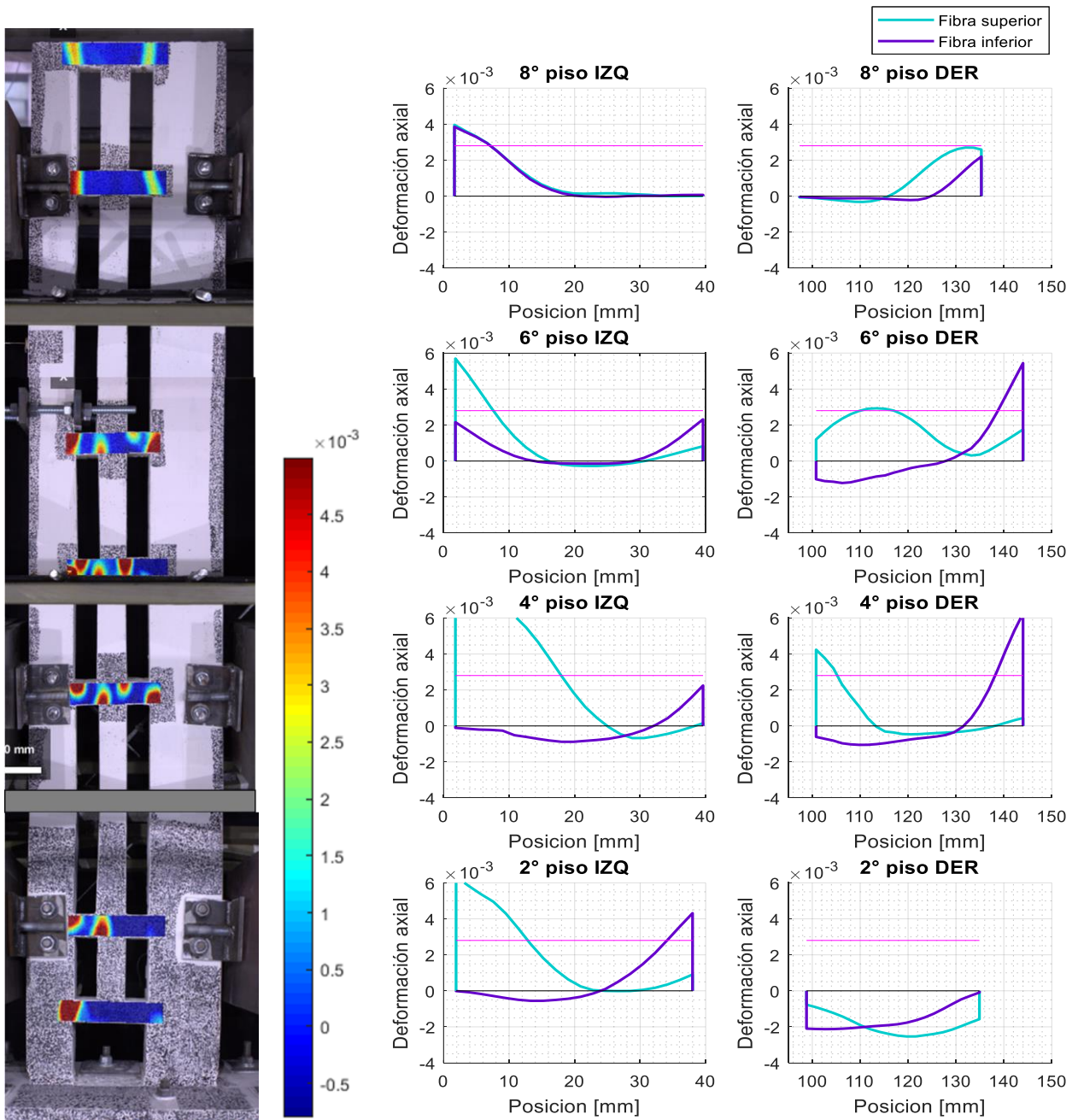


Figura 4.67. Deformación axial en las vigas para la deriva de techo del 1,0% nominal, en sentido negativo del movimiento. Izq) Mapa de intensidad de color; Der) ϵ_{xx} de las fibras superior e inferior - Probeta 4

En las figuras 4.68 y 4.69 se presenta la evolución de la deformación axial de las fibras superior e inferior de la viga del 4to piso, para diferentes niveles de la deriva de techo nominal según el sentido del movimiento.

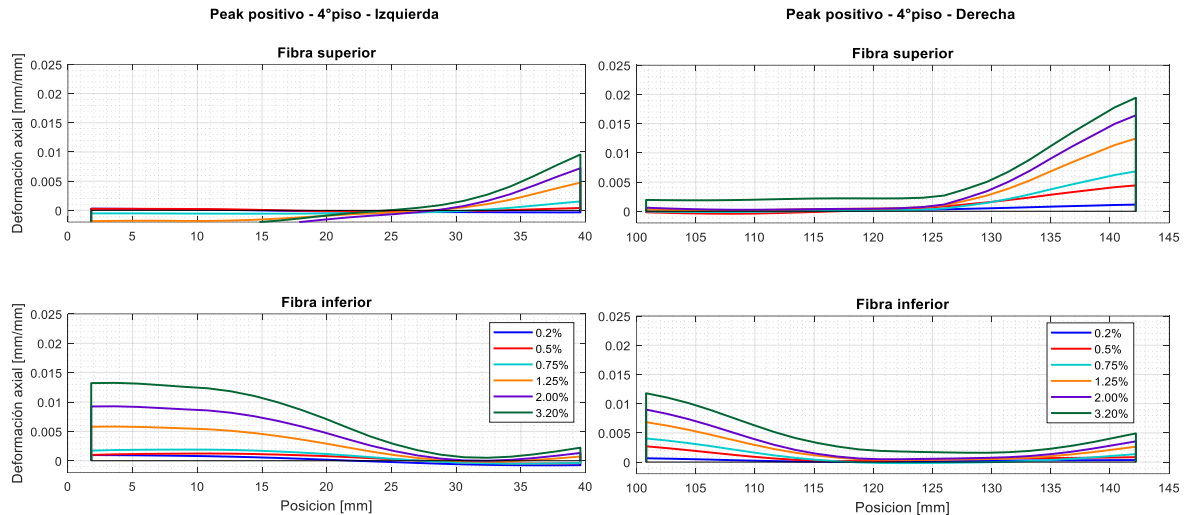


Figura 4.68 Evolución de las deformaciones axiales de las fibras superior e inferior de la viga del 4to piso, en el sentido positivo del movimiento – para diferentes niveles de la deriva de techo – Probeta 4

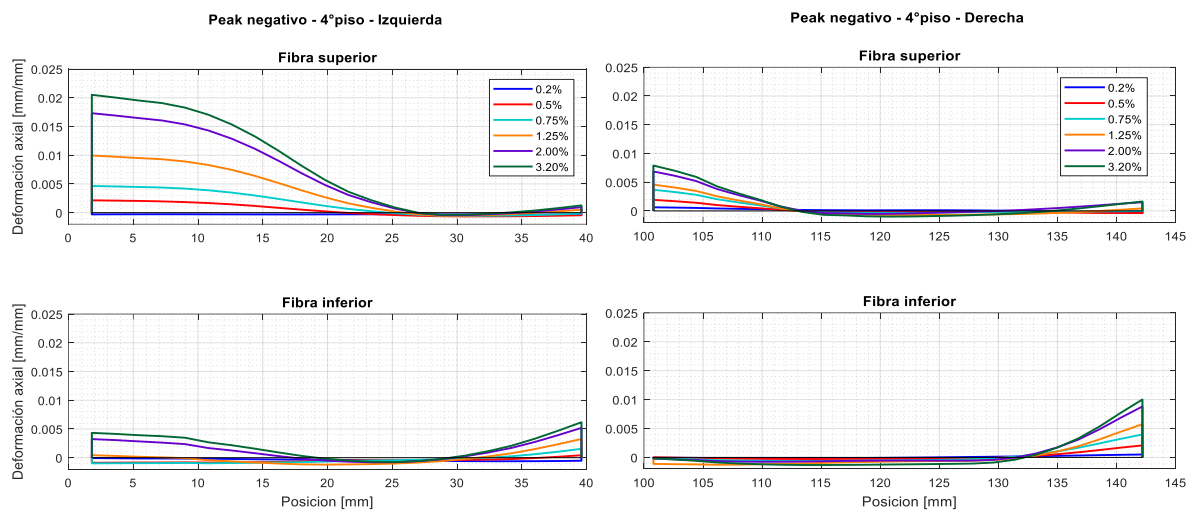


Figura 4.69. Evolución de las deformaciones axiales de las fibras superior e inferior de la viga del 4to piso, en el sentido negativo del movimiento – para diferentes niveles de la deriva de techo – Probeta 4

Se observa que tanto la viga izquierda como derecha presentan el comportamiento a flexión esperado. Además, se advierte que las mayores deformaciones se producen en la unión viga-muro (extremos) en comparación con la unión viga-columna central. Por lo tanto, no es simétrico.

A medida que aumenta el desplazamiento de techo impuesto a la probeta, aumentan las deformaciones de tracción y el largo de la viga donde se excede el nivel de fluencia. Se observa que para la viga del lado derecho, esta variación es de tendencia lineal, mientras que en la viga izquierda se presenta un suavizado en el extremo.

Las vigas de la probeta 4 tienen una longitud de 40 [mm], pero de igual forma que en la probeta 3, no se observan deformaciones simétricas en los extremos. Para descubrir la penetración de las vigas en los muros, en las siguientes figuras se presentan las fibras superiores e inferiores para diferentes niveles de deriva, en toda la longitud instrumentada del piso.

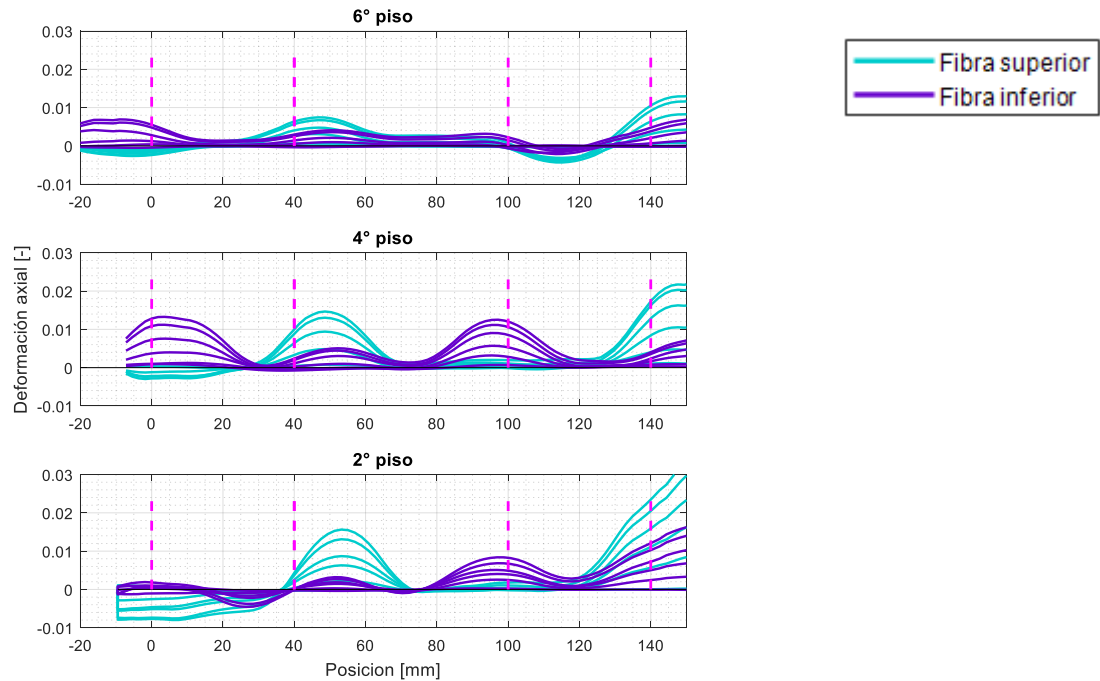


Figura 4.70. Deformación axial de las fibras superior e inferior de las vigas del 6to, 4to y 2do piso para diferentes niveles de la deriva de techo en el sentido positivo – Probeta 4

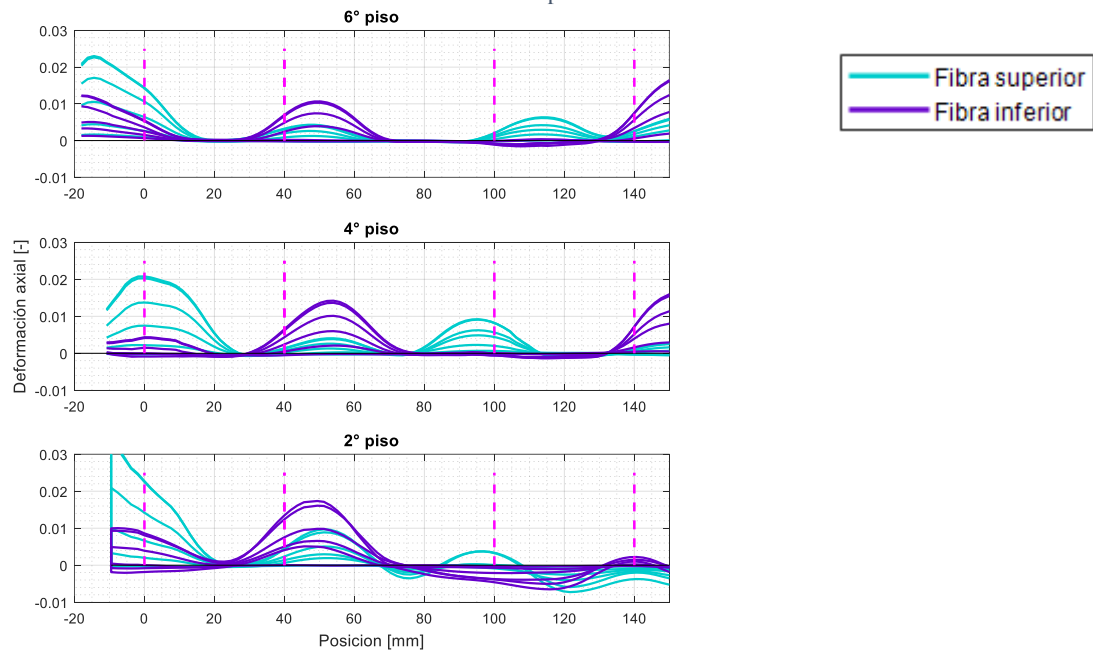


Figura 4.71. Deformación axial de las fibras superior e inferior de las vigas del 6to, 4to y 2do piso para diferentes niveles de la deriva de techo en el sentido negativo – Probeta 4

4.10.1. Deformaciones de corte

Con el objetivo de confirmar que el comportamiento de las vigas se debe principalmente por flexión, se analiza la magnitud de las deformaciones de corte promedio de las vigas de ambas probetas.

Además, se calcula la contribución del corte al desplazamiento total entre los extremos de las vigas como $\delta_{corte}/\delta_{total}$ [%]. El detalle de cada uno de estos desplazamientos se adjunta en el AnexoD.

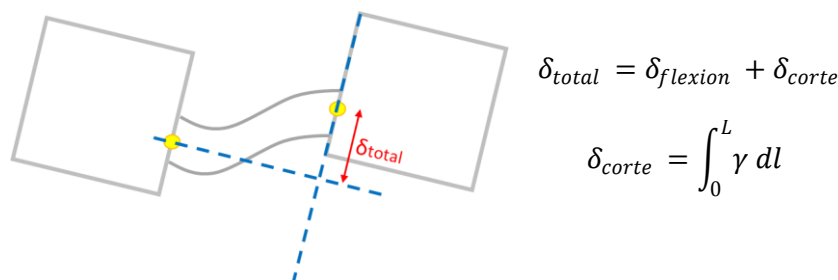


Figura 4.72. Medición del desplazamiento entre los extremos de la viga.

Probeta 3

En la Figura 4.73 se muestra la deformación de corte promedio para distintas secciones a lo largo de la longitud de las vigas, y en ambos sentidos del movimiento. Es posible deducir que las mayores deformaciones de corte se presentan en las vigas inferiores.

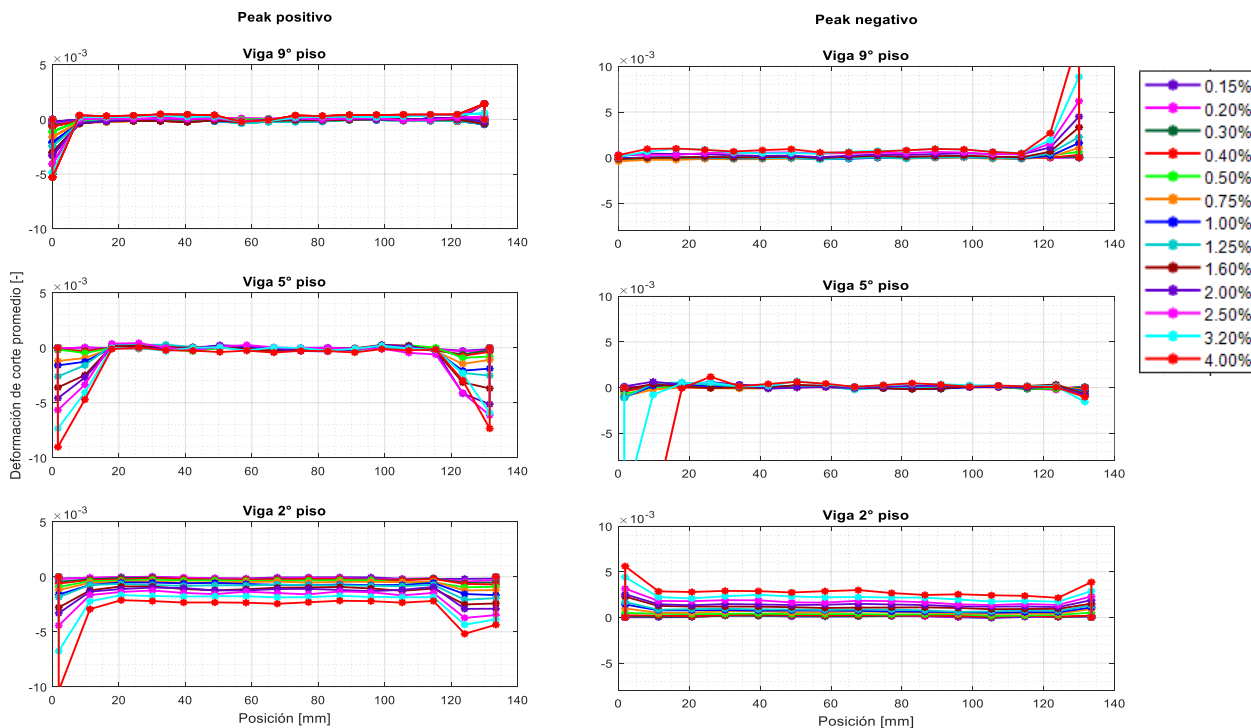


Figura 4.73. Deformaciones de corte promedio (ϵ_{xy}) a lo largo de la longitud de las vigas del 9°, 5° y 2° piso – según diferentes niveles del drift –para cada sentido del movimiento - Probeta 3

En la siguiente tabla se presenta como porcentaje, la contribución del corte en el desplazamiento total de la viga. A modo de ejemplo, se muestra sólo para algunas de las vigas en altura. Se registra la mayor contribución por corte en la viga del segundo piso alcanzando un 5% en la deriva del 8,0% nominal. El resto de las vigas no supera el 2%.

Tabla 4.20. Contribución del desplazamiento de corte en el desplazamiento total para cada nivel de la deriva [%], en sentido positivo – Probeta 3

Drift [%]	Viga 2 piso	Viga 4 piso	Viga 6 piso	Viga 8 piso
0,15	0,152	0,088	0,058	0,092
0,20	0,217	0,062	0,039	0,033
0,30	0,375	0,098	0,029	0,051
0,40	0,438	0,075	0,114	0,050
0,50	0,654	0,074	0,026	0,081
0,75	0,840	0,150	0,108	0,035
1,00	1,119	0,230	0,142	0,053
1,25	1,306	0,311	0,015	0,110
1,60	1,731	0,116	0,072	0,114
2,00	1,854	0,321	0,066	0,107
2,50	2,274	0,586	0,065	0,012
3,20	2,699	0,688	0,168	0,025
4,00	3,297	0,968	0,183	0,150
6,00	3,821	0,893	0,403	1,257
8,00	5,013	1,544	0,523	1,962

Probeta 4

En las figuras 4.74 y 4.75 se muestran las deformaciones de corte promedio para varias secciones a lo largo de la longitud de las vigas izquierda y derecha de cada piso.

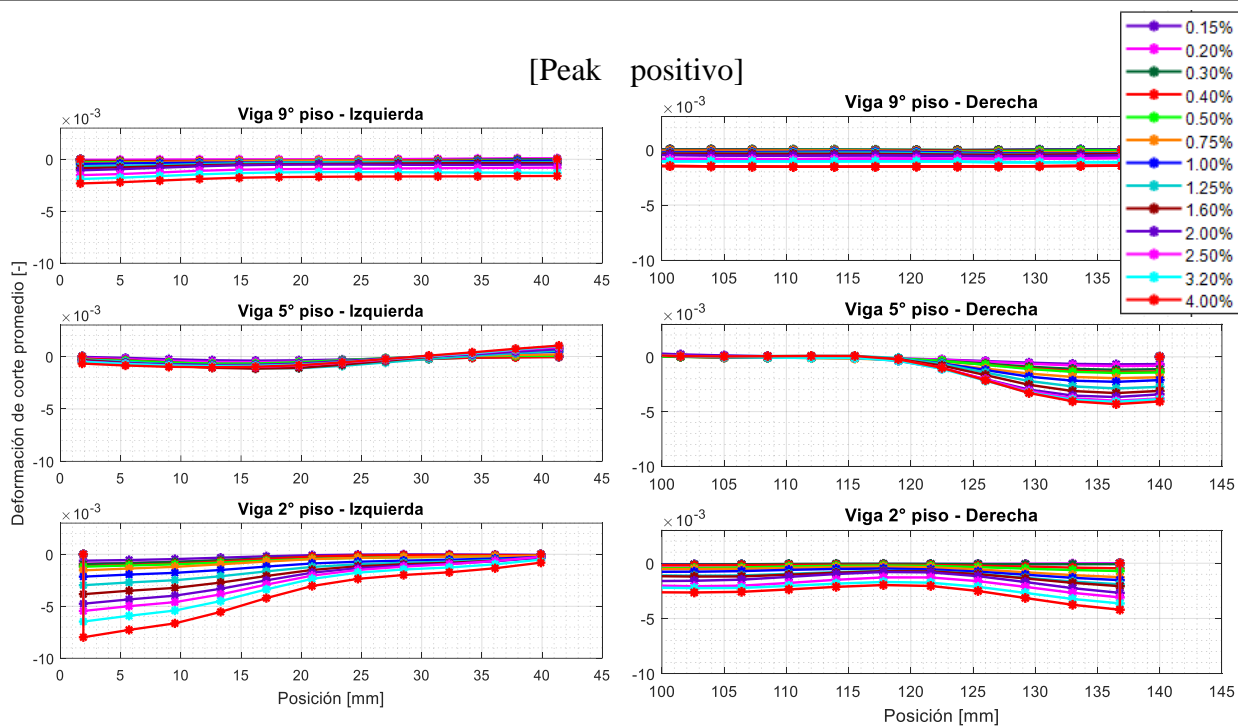


Figura 4.74. Deformaciones de corte promedio (ϵ_{xy}) a lo largo de la longitud de las vigas del 9°, 5° y 2° piso – según diferentes niveles del drift – en el sentido positivo del movimiento - Probeta 4

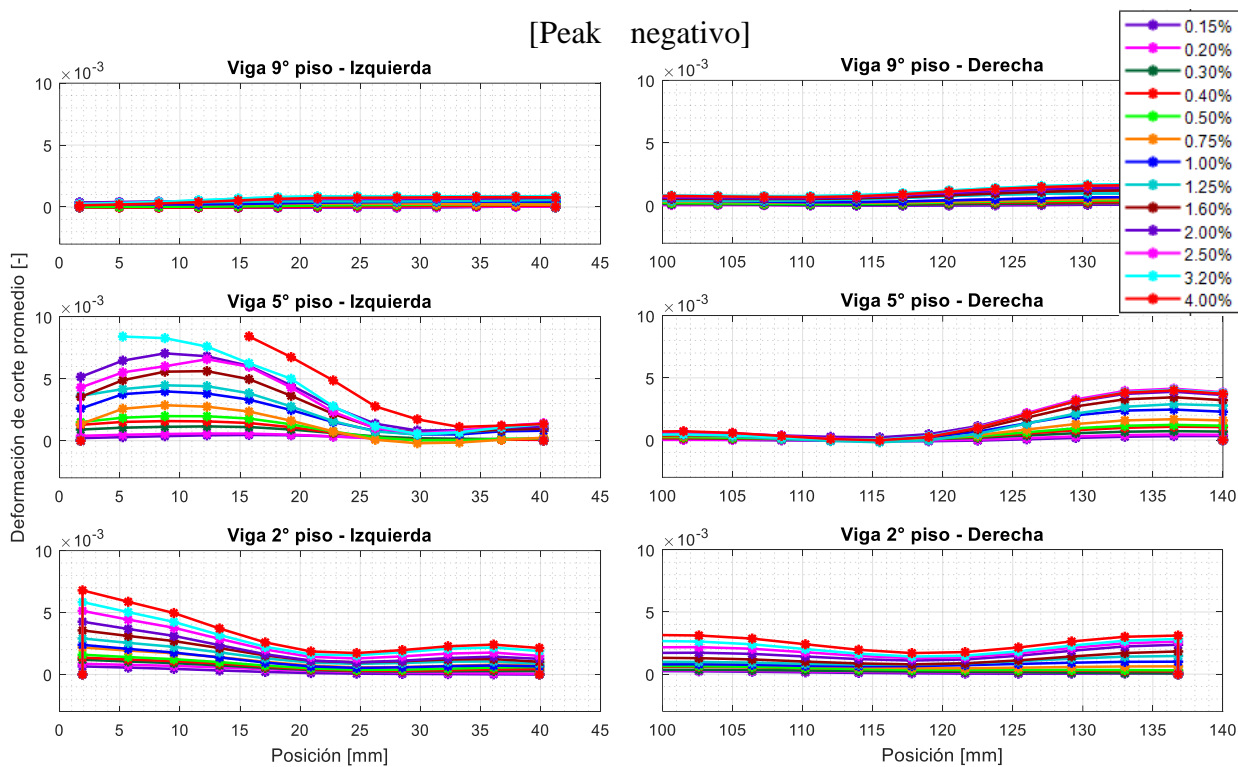


Figura 4.75. Deformaciones de corte promedio (ϵ_{xy}) a lo largo de la longitud de las vigas del 9°, 5° y 2° piso – según diferentes niveles del drift – en el sentido negativo del movimiento - Probeta 4

En la siguiente tabla se presenta la razón entre el desplazamiento de corte y el desplazamiento total de la viga. A modo de ejemplo, se muestra sólo para algunas de las vigas en altura. Se aprecia que el efecto del corte es mayor para las vigas inferiores.

Se registra la mayor contribución por corte en la viga del segundo piso alcanzando un 10,9% en la deriva del 8,0% nominal.

Tabla 4.21. Contribución del desplazamiento de corte en el desplazamiento total para cada nivel de la deriva [%], en sentido positivo – Probeta 4

Drift [%]	2 piso		4 piso		6 piso		8 piso	
	Viga izq	Viga der	Viga izq	Viga der	Viga izq	Viga der	Viga izq	Viga der
0,15	0,326	0,116	0,075	0,420	0,060	0,176	0,058	0,142
0,20	0,636	0,182	0,345	0,429	0,043	0,328	0,085	0,056
0,30	0,621	0,139	0,539	0,414	0,149	0,765	0,116	0,208
0,40	0,680	0,347	0,829	0,645	0,152	0,666	0,054	0,203
0,50	0,912	0,604	1,240	0,559	0,269	0,781	0,255	0,329
0,75	1,071	0,918	1,583	0,998	0,579	1,175	0,234	0,388
1,00	1,745	1,233	2,685	1,163	0,736	1,621	0,230	0,514
1,25	2,408	1,688	3,110	1,388	0,866	1,785	0,293	0,574
1,60	3,036	1,801	3,586	1,549	1,081	1,998	0,413	0,738
2,00	3,709	2,240	3,945	1,497	1,310	2,144	0,492	0,812
2,50	4,282	2,964	4,088	1,272	1,595	2,527	0,719	1,152
3,20	5,245	3,562	4,254	1,104	1,880	2,707	0,863	1,315
4,00	6,707	4,076	4,299	0,801	2,169	3,061	1,104	1,521
6,00	10,943	5,739	5,445	0,316	2,520	3,300	1,207	1,621
8,00	10,986	5,776	4,998	0,374	1,989	2,530	0,912	1,218

Se obtiene de forma general que la magnitud de las deformaciones de corte promedio alcanzadas por las fibras de las vigas de la Probeta 4 son mayores. Visto desde otra perspectiva, la contribución del corte en el desplazamiento total de las vigas es mayor para la probeta 4 que para la probeta 3.

La máxima razón $\delta_{corte}/\delta_{total}$ es de un 10% y se registra para la viga del segundo piso de la Probeta 4. Este valor se considera prácticamente bajo.

De esta forma es posible concluir que el corte no afecta significativamente el comportamiento global de las vigas, por lo tanto, se puede aplicar un modelo de rotula plástica por flexión.

4.10.2. Longitud de rótula plástica de vigas

En la siguiente figura se presenta el modelo de rótula plástica propuesto para las vigas con comportamiento principal a flexión.

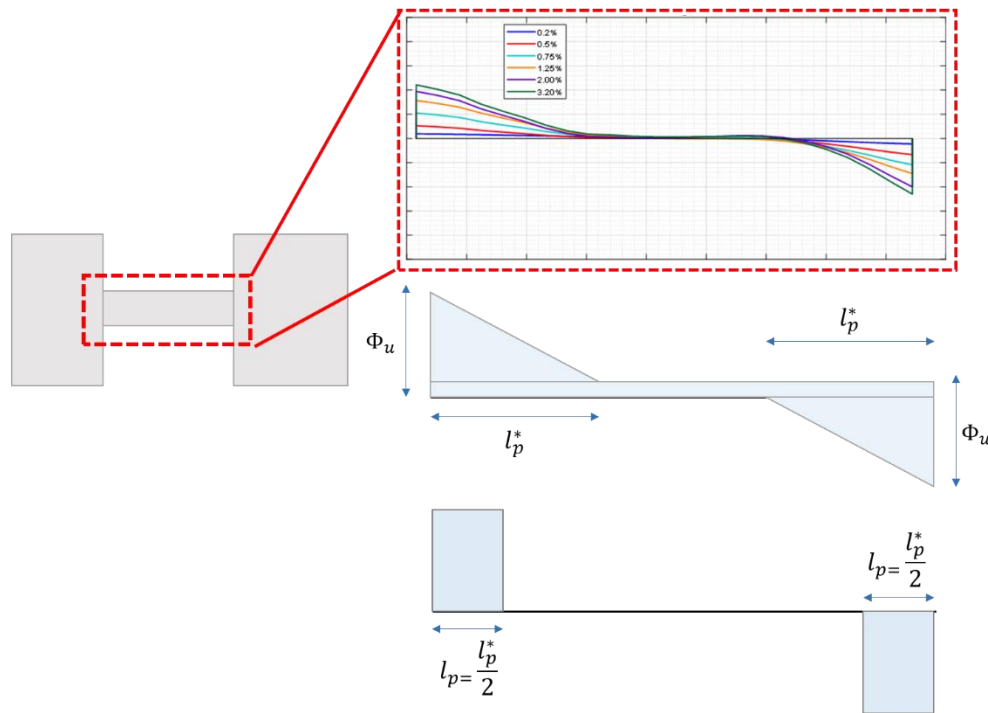


Figura 4.76. Modelo de rótula plástica propuesto para vigas con comportamiento dominado por flexión.

A continuación se presentan los perfiles de curvatura a lo largo de la longitud de las vigas. Para exponer el efecto de la penetración de las deformaciones de la viga en los muros, se considera una extensión de la longitud para los perfiles. Los límites de la viga se representan con una línea rosada punteada.

En relación con la forma de los perfiles, se puede observar que la variación de la curvatura es aproximadamente lineal, salvo el suavizado que se genera al alcanzar el máximo de deformación y curvatura.

Probeta 3

En la Figura 4.77 se observa que el perfil de curvatura es simétrico, sin embargo, no respecto al centro de la luz de la viga, debido al empotramiento de las deformaciones.

La curvatura de fluencia para las vigas de la probeta 3 es $\Phi_y = 1,87 \cdot 10^{-4}$. Se considera zona plástica como la longitud para la cual la curvatura supera dicho valor. De esta forma se obtiene que l_p^* aumenta rápidamente en los primeros niveles plásticos y luego tiende a estabilizarse.

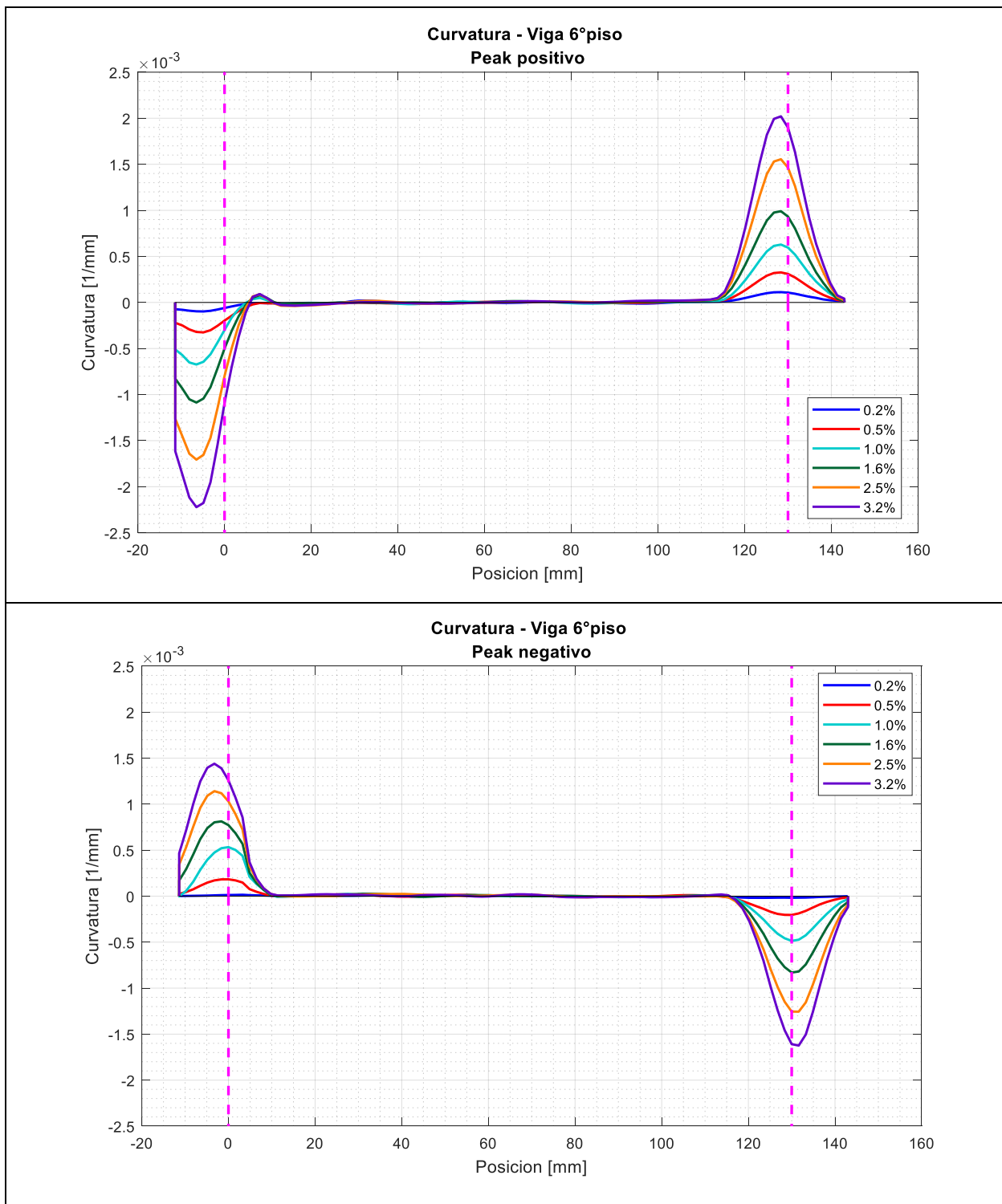


Figura 4.77. Perfil de curvatura a lo largo de la longitud de la viga del 6to piso, según el sentido del movimiento – Probeta 3

En la siguiente figura se registra la variación de la longitud plástica l_p en función de la deriva nominal. “Pos” y “Neg” corresponden al sentido positivo y negativo del movimiento respectivamente, e “izq” y “der” a los extremos izquierdo y derecho de la misma viga. Se incluye el valor de l_p obtenido a partir de la expresión (XXXI) propuesta por Massone y Alfaro (2016)

Se obtienen mayores longitudes para el extremo derecho de la viga. La longitud plástica promedio en el nivel 3,2% de la deriva es de 10,2 [mm], que corresponde a $0,078L_{viga}$ ó $0,34h_{viga}$.

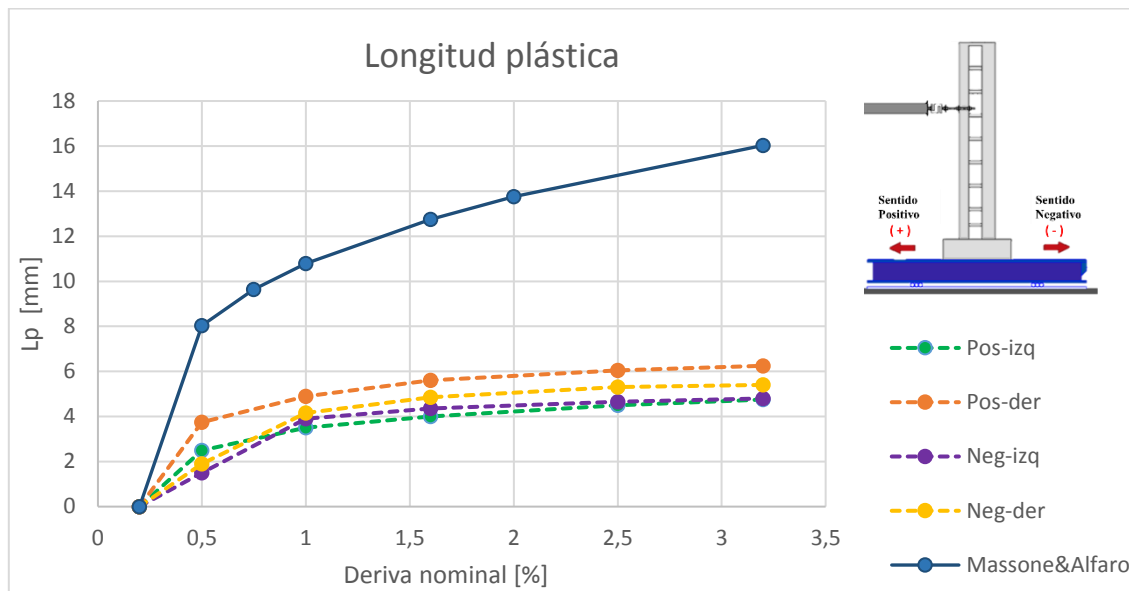


Figura 4.78. Variación de la longitud plástica de la viga del 4to piso, según el nivel del desplazamiento de techo – Probeta 3

En la figura anterior se observa que la curva analítica excede los valores de la longitud plástica experimental.

las curvas exhiben la misma tendencia hasta el nivel de la deriva 2,0%, pero al alcanzar el 3,2% la longitud plástica experimental tiende a estabilizarse.

Se obtiene además que la expresión analítica sobreestima los valores de la longitud plástica.

Probeta 4

En la Figura 4.79 se presenta el perfil de curvatura a lo largo de la viga. Es posible observar el largo de penetración de la viga dentro de los muros. Se registran magnitudes similares entre los extremos internos de la viga izquierda y derecha. Lo mismo ocurre con los bordes externos que alcanzan una curvatura de $4,3 \cdot 10^{-4}$ en ambos sentidos del movimiento.

La curvatura de fluencia para las vigas de la probeta 4 es $\Phi_y = 1,4 \cdot 10^{-4}$. Se considera zona plástica como la longitud para la cual la curvatura supera dicho valor.

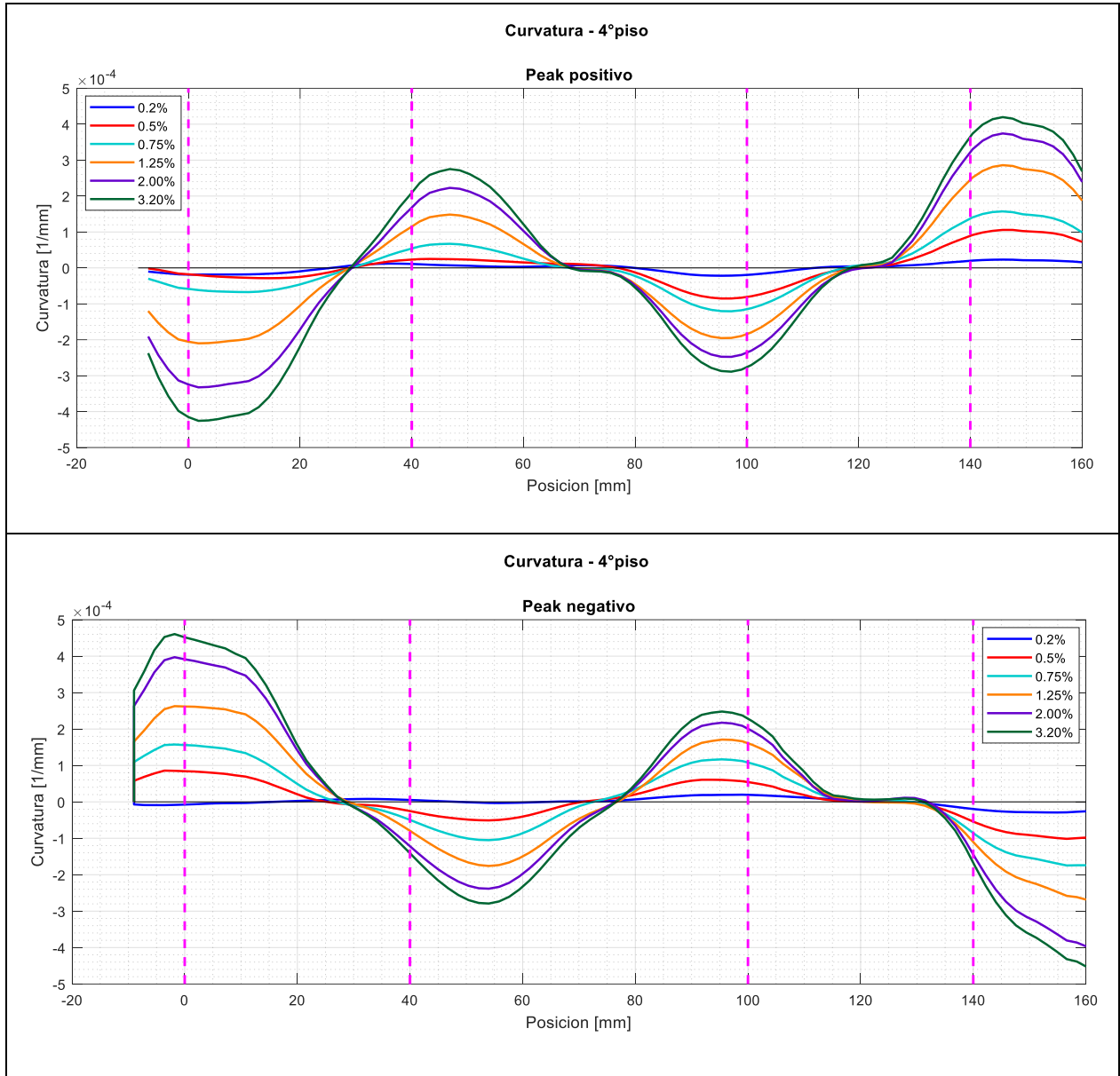


Figura 4.79. Perfil de curvatura a lo largo de la longitud del 4to piso, según el sentido del movimiento – Probeta 4

En las siguientes figuras se registra la variación de la longitud plástica l_p en función de la deriva nominal. “Pos” y “Neg” corresponden al sentido positivo y negativo del movimiento respectivamente, e “izq” y “der” los extremos izquierdo y derecho de la misma viga. Se incluye el valor de l_p obtenido a partir de la expresión (XXXI) propuesta por Massone y Alfaro (2016).

Se obtienen mayores longitudes para los extremos externos de cada viga. La longitud plástica promedio en el nivel 3,2% de la deriva es de 17,25 [mm] para la viga izquierda y de 13,7 [mm] para la derecha.

Estos valores corresponden a un promedio de $0,38L_{viga}$ con $L_{viga} = h_{viga}$ para el caso de la Probeta 4.

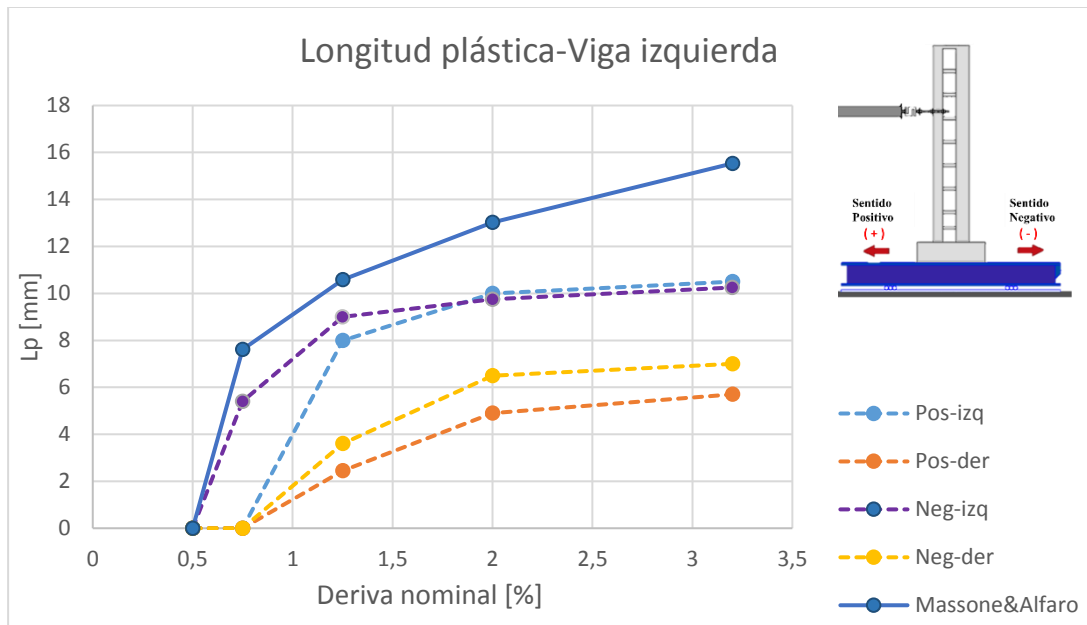


Figura 4.80. Variación de la longitud plástica según el nivel del desplazamiento de techo- Viga izquierda 4to piso – Probeta 4

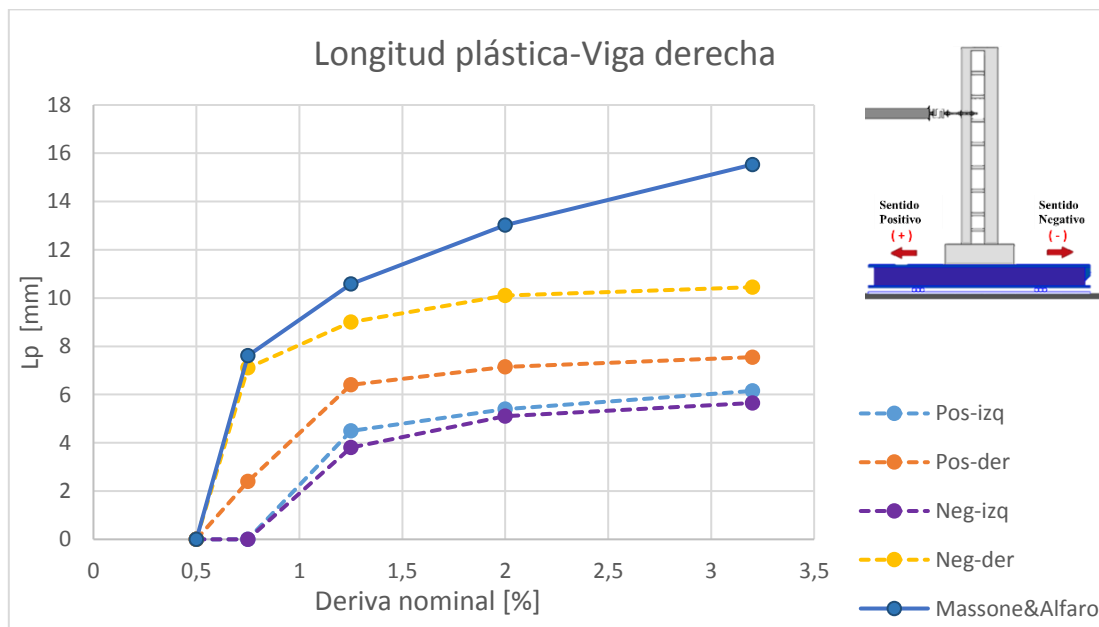


Figura 4.81. Variación de la longitud plástica según el nivel del desplazamiento de techo- Viga derecha 4to piso – Probeta 4

En las figuras 4.80 y 4.81, se observa que las curvas exhiben la misma tendencia hasta el nivel de la deriva 2,0%, pero al alcanzar el 3,2% la longitud plástica experimental tiende a estabilizarse.

Se obtiene además que la expresión analítica sobreestima los valores de la longitud plástica.

4.11. Inestabilidad fuera del plano

Debido a que se estudia experimentalmente el movimiento unidireccional de las probetas, se debe restringir el movimiento fuera de su plano. Para evaluar la efectividad del marco de acero instalado, se introdujo el concepto de inestabilidad lateral de muros en la sección 2.6

Se obtiene el campo de desplazamientos y deformaciones en la cara lateral del muro más largo (derecho) de cada probeta, hasta una altura de 150 [mm] aproximadamente. El registro de imágenes utilizadas corresponde a cada instante en que se alcanza el máximo desplazamiento (peak de la deriva de techo) y posición inicial (cero) en cada sentido del movimiento, y para los tres ciclos de cada nivel. Es decir, cada ciclo contiene 4 fotografías: peak positivo, posición cero, peak negativo y posición cero.

En la siguiente tabla se presentan los desplazamientos máximos fuera-del-plano calculados según las ecuaciones XXXVII a XLI. Estos corresponden al límite para la estabilidad lateral de cada probeta denominado aquí como criterio P&P.

Tabla 4.22. Desplazamiento fuera-del-plano límite para la estabilidad lateral de muros (criterio P&P)

		Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3		Probeta 4	
		Muro izquierdo	Muro derecho	Muro izquierdo	Muro derecho	Muro izquierdo	Muro derecho	Muro izquierdo	Muro derecho
$\xi_{oop,c}$	[-]	0,088	0,105	0,114	0,135	0,098	0,135	0,098	0,135
$\delta_{oop,c}$	[mm]	3,527	4,211	6,815	8,111	5,887	8,111	5,887	8,111

A continuación, se detalla el comportamiento lateral de cada una de las probetas ensayas.

Probeta 1

La probeta 1 registró el menor desplazamiento fuera del plano, alcanzando los 1,8[mm] en el peak de compresión del tercer ciclo de la deriva de techo 4,0% nominal (ver Figura 4.83)

Además se observa que el muro tiende a pandearse sólo hacia el lado frontal de la probeta (cara poniente).

Utilizando el criterio de P&P, la probeta 1 no excede el desplazamiento máximo fuera del plano, por lo tanto, no presenta inestabilidad.

En la siguiente figura se presenta la cara lateral del muro para distintos instantes del ensayo. Cuando el borde del muro más largo se tracciona (sentido negativo del movimiento) se producen grietas horizontales en la cara lateral. Al comprimirse, comienza a desprenderse el recubrimiento en la base y cuando alcanza el tercer ciclo del 6,0% se produce una grieta central vertical desde la base. Ese momento coincide con una disminución brusca del nivel de carga en la curva de histéresis.

En el ciclo de compresión del 8,0% (peak del sentido positivo) se desprende gran parte del recubrimiento y se puede observar el leve pandeo de la armadura.



Figura 4.82. Registro de fotografías de la cara lateral del muro derecho. a) posición cero inicial; b) tracción en la deriva de techo 6,0%; c) compresión en la deriva de techo 6,0% - Probeta 1

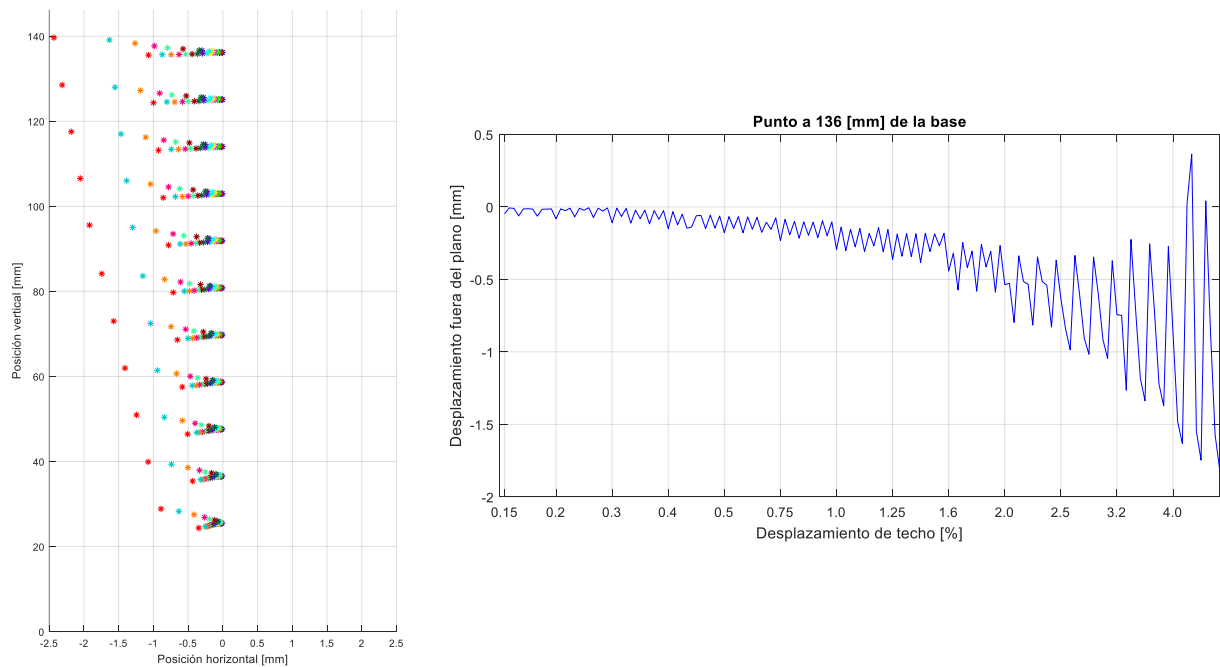


Figura 4.83. Evolución del desplazamiento fuera del plano. Izquierda) Posición de puntos ubicados en el eje central; Derecha) Para un punto ubicado en el eje central a 136 [mm] de la fundación- Probeta 1

En la Figura 4.84 se observa que la deformación axial promedio del eje central de la cara lateral alcanza valores de aproximadamente 0,07 para las tracciones y 0,012 para compresiones en el 4,0% de la deriva de techo nominal. La magnitud de las deformaciones transversales no supera los 0,003.

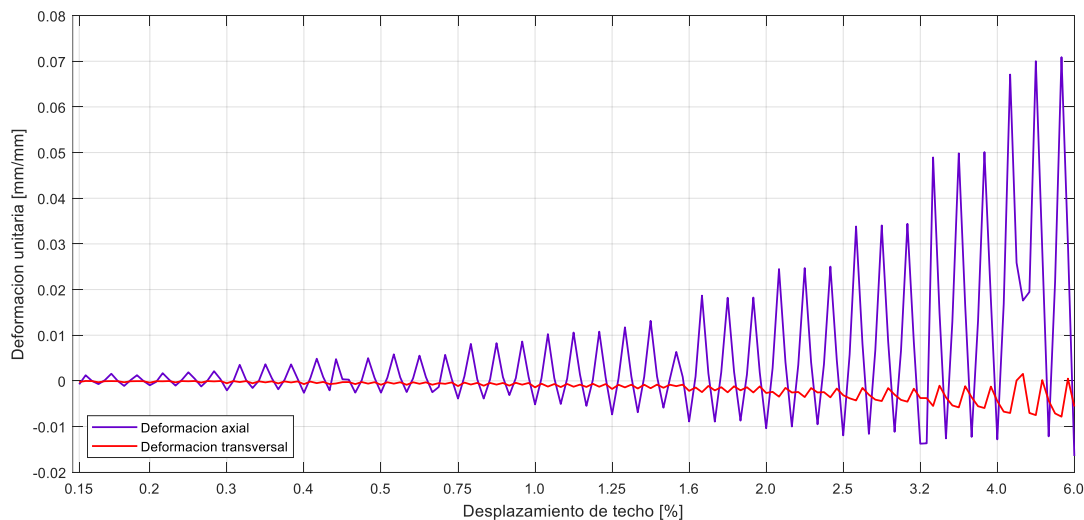


Figura 4.84. Deformación axial y trasversal promedio medido en la cara lateral del muro derecho (de mayor longitud) en función del desplazamiento de techo – Probeta 1

En la Figura 4.85 se observa que los mayores desplazamientos fuera-del-plano se registran cuando la fibra se tracciona, tiende a enderezarse cuando pasa por su posición 0% y se inclina nuevamente (con menor magnitud) al comprimirse. Además se registra un desplazamiento remanente en la posición cero.

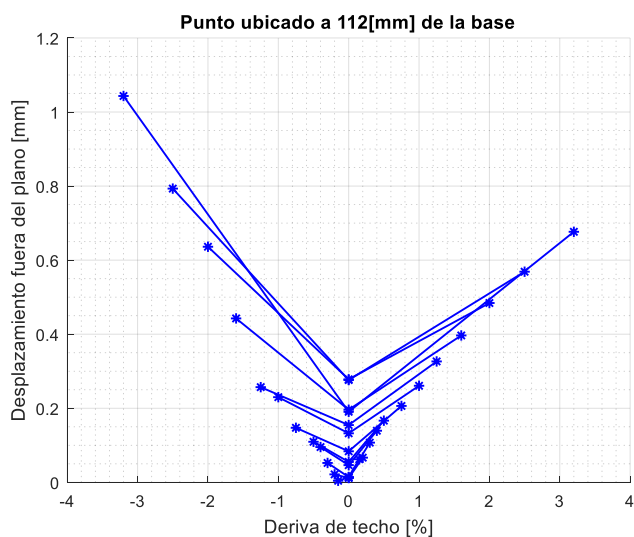


Figura 4.85. Desplazamiento fuera del plano en función de la deriva de techo [%] para un punto ubicado en el eje central de la cara lateral del muro derecho (de mayor longitud) a 112 [mm] de la fundación – Primer ciclo de cada nivel de desplazamiento de techo – Probeta 1

Probeta 2

El máximo desplazamiento fuera-del-plano registrado es de 2,9 [mm] en el peak de compresión del primer ciclo de la deriva de techo del 6,0% nominal. (ver Figura 4.87). Además, se observa que la fibra central se desplaza simétricamente en ambos sentidos, pero con un desplazamiento residual en su posición 0%.

Utilizando el criterio de P&P, la probeta 2 no excede el desplazamiento máximo fuera del plano, por lo tanto, no presenta inestabilidad.

En la Figura 4.86 se presenta la cara lateral del muro para distintos instantes del ensayo. Se debe recordar que el ensayo de esta Probeta se tuvo que repetir, por lo tanto, su estado inicial pudo estar fisurado. La primera grieta se aprecia de forma horizontal a 4[mm] de la interfaz con la fundación aproximadamente, en el primer ciclo de tracción del 0,15%.

Debido a un problema con el almacenamiento de las imágenes durante este ensayo, no se tiene registro de los ciclos de 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5%. Ya en el ciclo de tracción del 0.75% se aprecia una grieta horizontal a la altura de la viga del primer piso, y al alcanzar el 1,25% se abre otra a media altura.

En los siguientes ciclos se observa cómo aumenta el espesor de la grieta que se abre en tracción y se cierra en compresión. No se produce pérdida de recubrimiento



Figura 4.86. Registro de fotografías de la cara lateral del muro derecho. a) posición cero inicial; b) tracción en primer ciclo 3,2%; c) tracción en primer ciclo de la deriva de techo 8,0%- Probeta 2

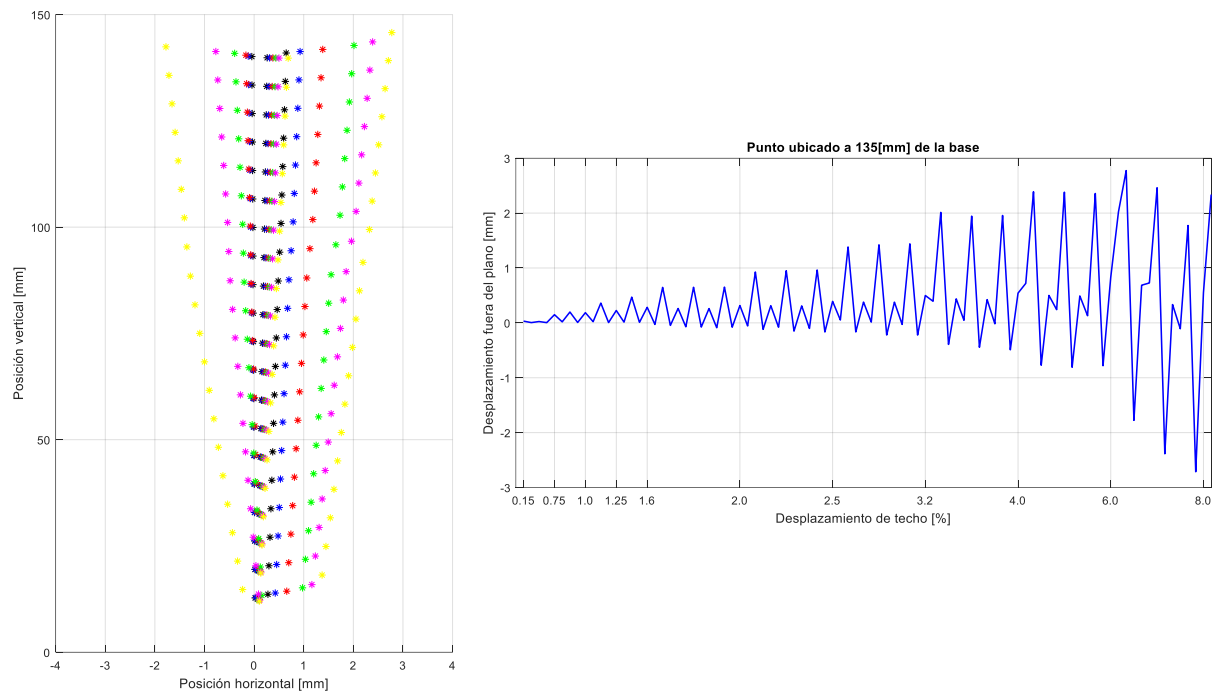


Figura 4.87. Evolución del desplazamiento fuera del plano. Izq) Posición de puntos ubicados en el eje central; Der) Para un punto ubicado en el eje central a 136 [mm] de la fundación– Probeta 2

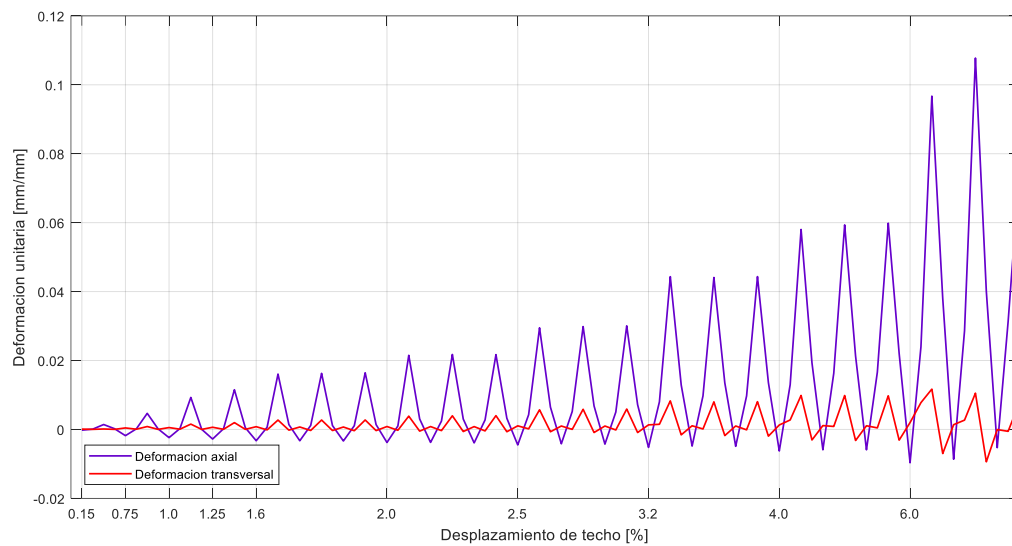


Figura 4.88. Deformación axial y trasversal promedio medido en la cara lateral del muro derecho (de mayor longitud) en función del desplazamiento de techo – Probeta 2

En la Figura 4.89 se presenta las deformaciones axial y trasversal promedio en la cara lateral del muro de $l_w = 120$ [mm]. Se observa que la componente axial alcanza valores de aproximadamente 0,068 en tracción y 0,008 en compresión para el nivel de deriva de 6,0%

Al comparar el desplazamiento fuera del plano registrado en los peaks de tracción y compresión (ver Figura 4.87) se obtiene que inicialmente el movimiento fuera del plano es simétrico, pero aumenta en los siguientes ciclos de tracción (sentido negativo del desplazamiento de techo)

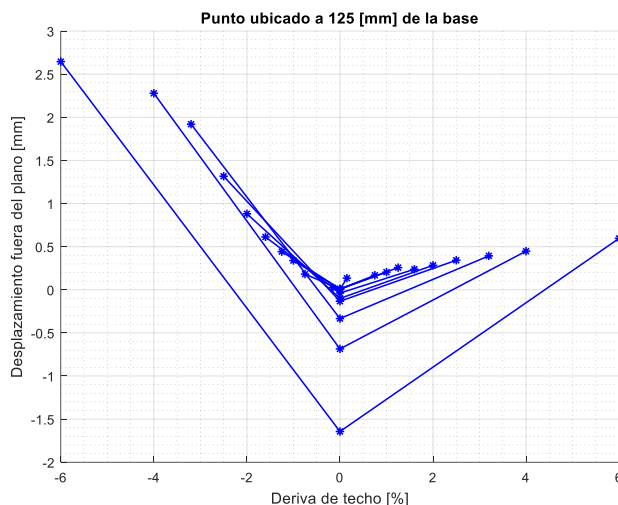


Figura 4.89. Desplazamiento fuera del plano en función de la deriva de techo [%] para un punto ubicado en el eje central de la cara lateral del muro derecho (de mayor longitud) a 125 [mm] de la fundación – Primer ciclo de cada nivel de desplazamiento de techo – Probeta 2

Probeta 3

El máximo desplazamiento fuera-del-plano registrado es de 3,5 [mm] en el peak de compresión del primer ciclo de la deriva de techo del 6,0% nominal. (ver Figura 4.91). Además, se observa que la fibra central oscila en torno a un desplazamiento residual, y parece inclinada hacia la derecha (sentido de la cara posterior del muro)

Utilizando el criterio de P&P, la probeta 3 no excede el desplazamiento máximo fuera del plano, por lo tanto, no presenta inestabilidad.

En la Figura 4.90 se presenta la cara lateral del muro para distintos instantes del ensayo. Se observa que se abren grietas horizontales cuando el borde del muro se tracciona, y luego se cierran cuando se comprime. El recubrimiento en la base de la cara lateral comienza a desprenderse superficialmente en el segundo ciclo de compresión del 6,0%. Al alcanzar el segundo peak del 8,0% en compresión, se produce una grieta vertical desde la base que se inclina hacia la izquierda y provoca finalmente el desprendimiento de todo el borde izquierdo. En ese momento, se aprecia el pandeo de la barra hacia el mismo lado.

En los siguientes ciclos es posible observar la alineación de la armadura en tracción y el pandeo en compresión. No se produce el corte de la barra.

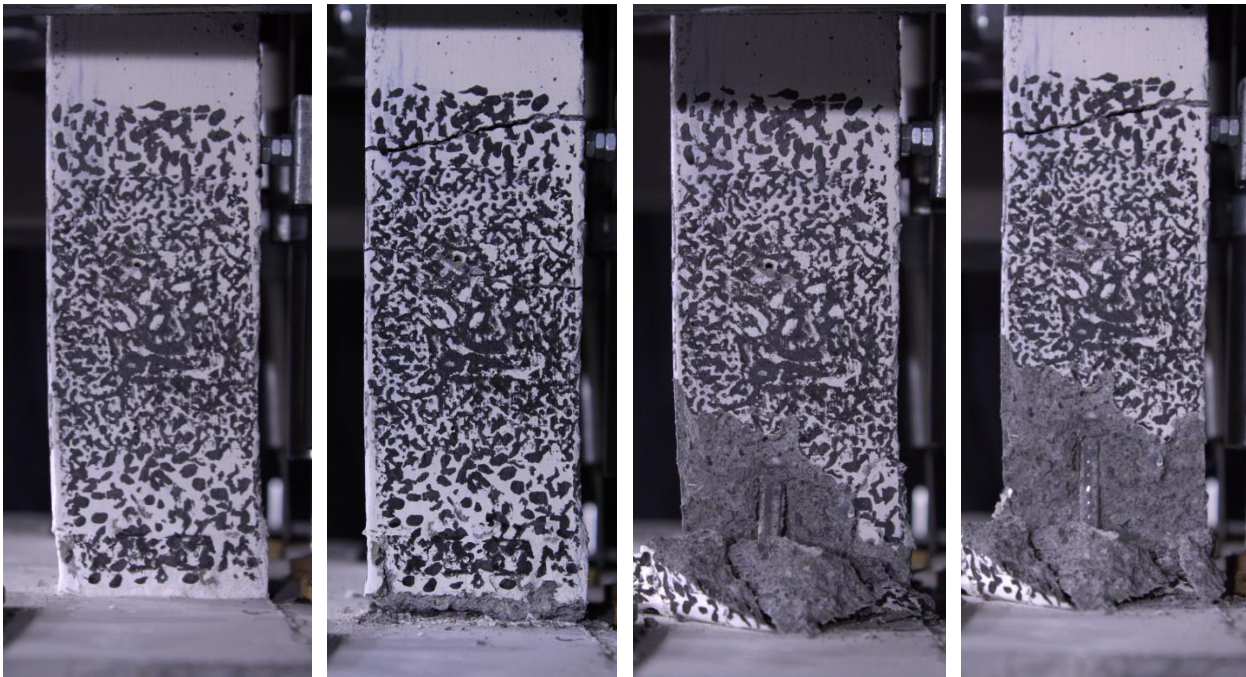


Figura 4.90. Registro de fotografías de la cara lateral del muro derecho. a) posición cero inicial; b) tracción en primer ciclo 6,0%; c) compresión en la deriva de techo 8,0%; d) tracción en la deriva de techo 8,0% - Probeta 3

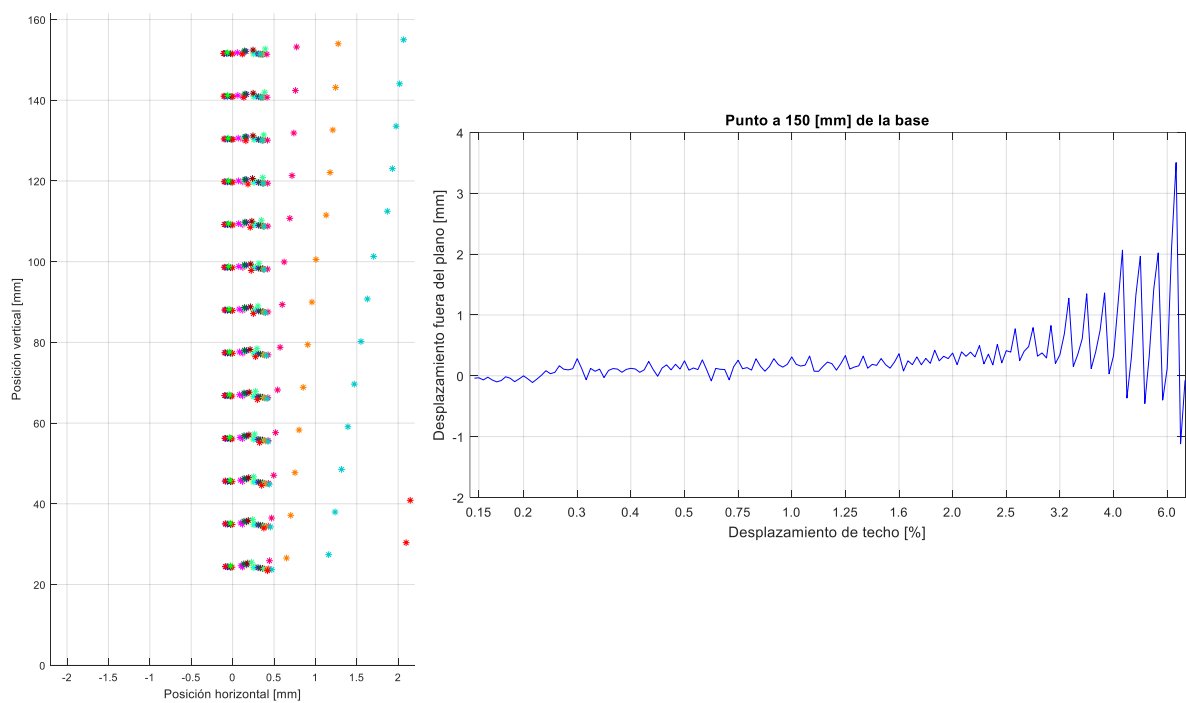


Figura 4.91. Evolución del desplazamiento fuera del plano. Izq) Posición de puntos ubicados en el eje central; Der) Para un punto ubicado en el eje central a 136 [mm] de la fundación- Probeta 3

En la Figura 4.93 se presenta las deformaciones axial y transversal promedio en la cara lateral del muro de $l_w = 130$ [mm]. Se observa que la componente axial alcanza valores de aproximadamente 0,07 en tracción y 0,008 en compresión para el nivel de deriva de 4,0%, y para la deriva del 6,0% alcanza los 0,12 y 0,015 respectivamente.

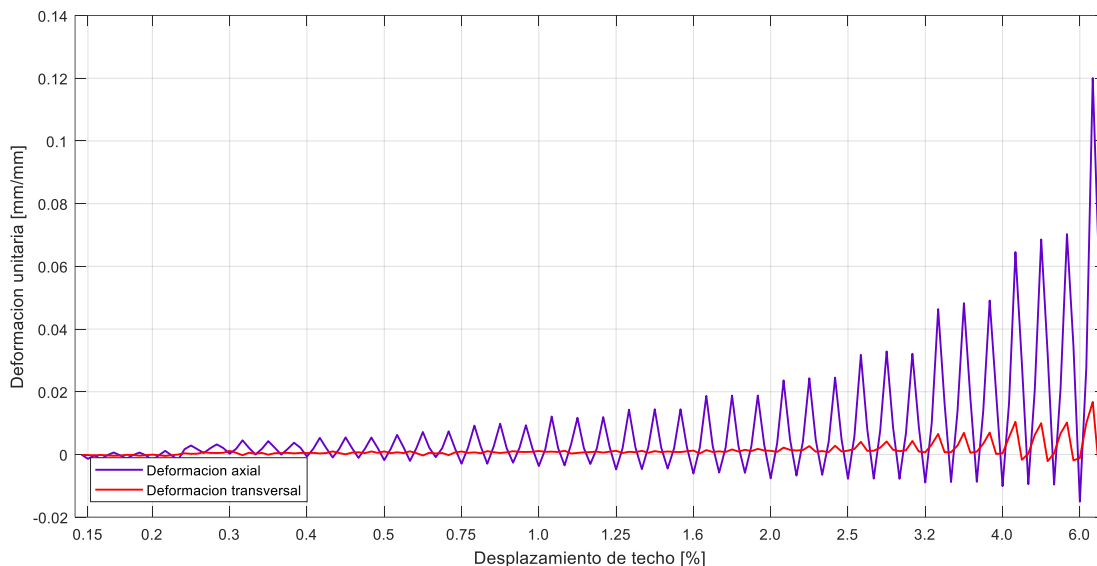


Figura 4.92. Deformación axial y trasversal promedio medido en la cara lateral del muro derecho (de mayor longitud) en función del desplazamiento de techo – Probeta 3

Al comparar el desplazamiento fuera del plano registrado en los peaks de tracción y compresión (ver Figura 4.91) se obtiene que inicialmente el movimiento fuera del plano es simétrico, y a medida que aumenta el nivel de deriva de techo el desplazamiento horizontal del punto rastreado en mayor cuando la fibra se tracciona.

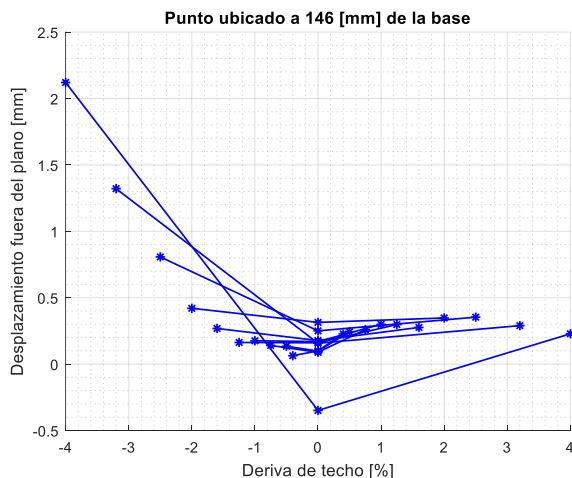


Figura 4.93. Desplazamiento fuera del plano en función de la deriva de techo [%] para un punto ubicado en el eje central de la cara lateral del muro derecho (de mayor longitud) a 146 [mm] de la fundación – Primer ciclo de cada nivel de desplazamiento de techo – Probeta 3

Probeta 4

En la figura de la izquierda de la Figura 4.95 se observa que la fibra central se desplaza simétricamente en ambos sentidos (hacia la cara frontal o poniente y hacia a cara posterior o al oriente) hasta el nivel de 3,2%. Luego se produce el máximo desplazamiento fuera-del-plano en el peak de compresión del segundo ciclo de la deriva de techo del 4,0% nominal, de aproximadamente 5 [mm].

Utilizando el criterio de P&P, la probeta 4 no excede el desplazamiento máximo fuera del plano, por lo tanto, no presenta inestabilidad.

En la Figura 4.94 se presenta la cara lateral del muro para distintos instantes del ensayo. Se observa que primero se produce una grieta horizontal en toda la base cuando el borde del muro se tracciona, y luego se cierra cuando se comprime. En los siguientes niveles de tracción se abre una fisura horizontal a la altura de la viga, y en los ciclos de compresión comienza a fracturarse el recubrimiento en la base.

Al alcanzar el segundo peak del 4,0% en compresión, se propaga desde la base una grieta vertical. En el peak consecutivo de tracción se produce un aumento brusco del ancho del muro, es decir, la grieta se abre. Ese momento coincide con una disminución brusca del nivel de carga en la curva de histéresis.

Ya en el ciclo de compresión del 6,0% se desprende completamente el recubrimiento y se evidencia el pandeo de la armadura longitudinal.

En el siguiente ciclo es posible observar la alineación de la armadura en tracción y el pandeo en compresión. Finalmente se produce el corte de la barra al alcanzar el peak de tracción del 8,0%.

En la Figura 4.96 se presentan las deformaciones axial y transversal promedio en la cara lateral del muro derecho de $l_w = 130$ [mm]. Se observa que la componente axial alcanza valores de aproximadamente 0,125 en tracción y 0,006 en compresión para el nivel de deriva de 3,2%. Además se advierte que la deformación transversal alcanza sus máximos locales cuando la fibra se tracciona, y tiende a cero cuando la fibra se comprime.

Al analizar la Figura 4.95, se obtiene que el punto ubicado a 145 [mm] de la base, en el 4,0% de la deriva, sufre de un desplazamiento máximo hacia la cara frontal del muro (sentido poniente) es de 5 [mm], y hacia la cara posterior es de 3 [mm], lo que resulta en un total de 8 [mm]

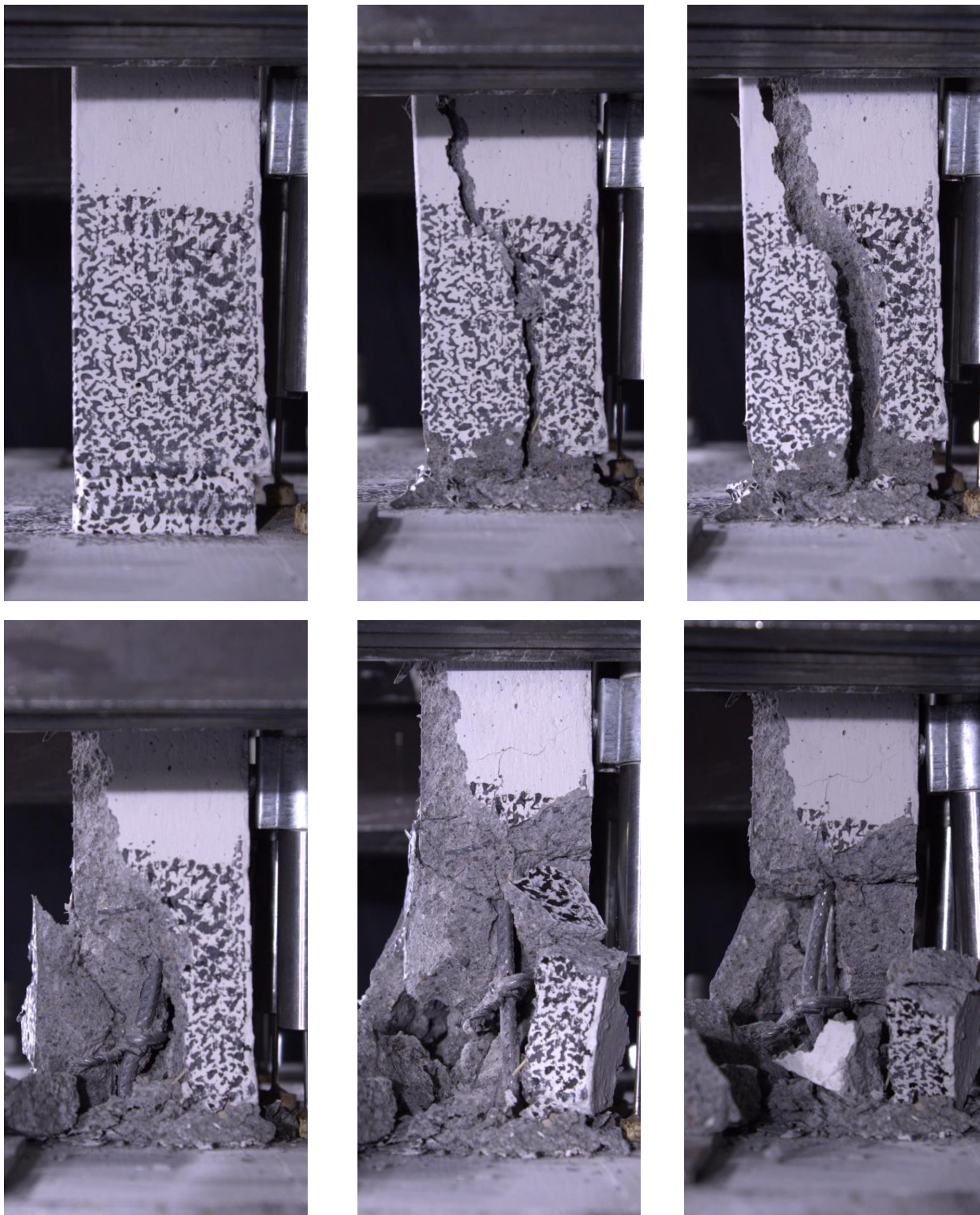


Figura 4.94. Registro de fotografías de la cara lateral del muro derecho. a) posición cero inicial; b) compresión en el tercer ciclo de la deriva de techo 4,0%; c) tracción en el tercer ciclo de la deriva de techo 4,0%; d) compresión en el tercer ciclo de la deriva de techo 8,0%; e) tracción en el tercer ciclo de la deriva de techo 8,0%; f) posición cero final – Probeta 4

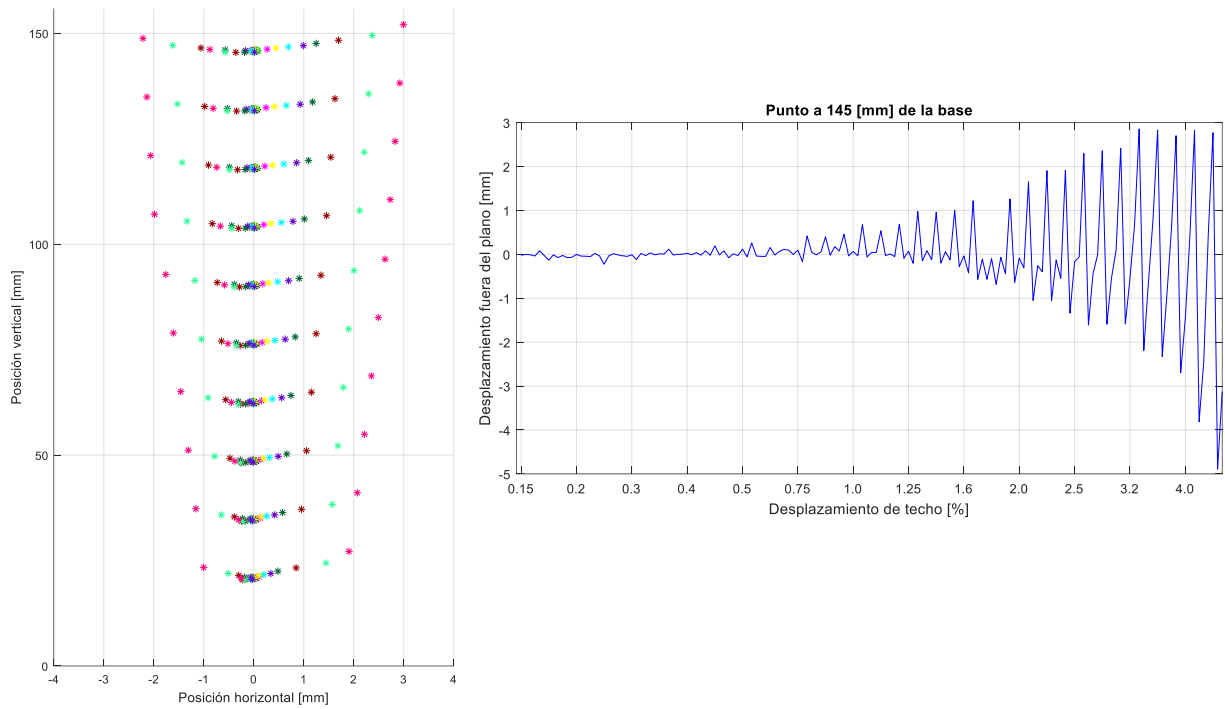


Figura 4.95. Evolución del desplazamiento fuera del plano. Izq) Posición de puntos ubicados en el eje central; Der) Para un punto ubicado en el eje central a 136 [mm] de la fundación– Probeta 4

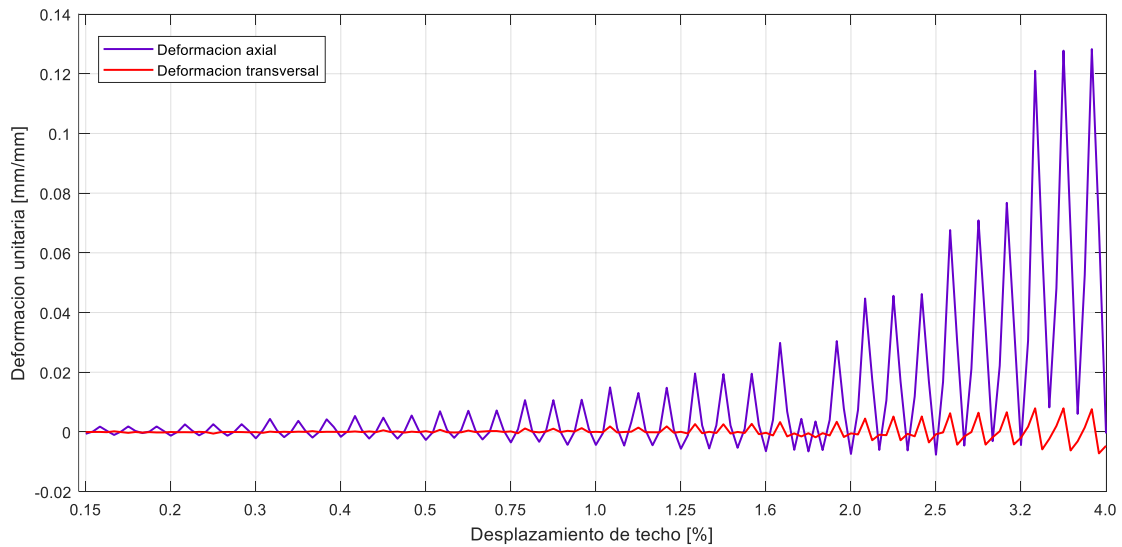


Figura 4.96. Deformación axial y trasversal promedio medido en la cara lateral del muro derecho (de mayor longitud) en función del desplazamiento de techo – Probeta 4

En la Figura 4.97 se presenta el desplazamiento fuera del plano para un punto ubicado en la fibra central a una altura de 140 [mm] de la base. Se observa que el mayor desplazamiento lateral se produce cuando la fibra se tracciona, luego al pasar por su posición 0% se inclina hacia el otro lado (desplazamiento en el sentido negativo) y finalmente tiende a enderezarse cuando la fibra se comprime.

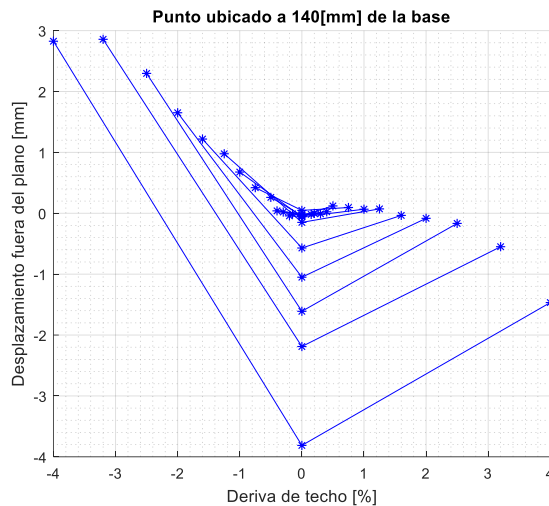


Figura 4.97. Desplazamiento fuera del plano en función de la deriva de techo [%] para un punto ubicado en el eje central de la cara lateral del muro derecho (de mayor longitud) a 140 [mm] de la fundación – Primer ciclo de cada nivel de desplazamiento de techo – Probeta 4

El seguimiento de los puntos ubicados en la fibra central de la cara lateral muestra que para las Probeta 1 y 4, ésta se desplaza simétricamente hacia la cara frontal y posterior del muro. Mientras que las Probetas 2 y 3 parecen inclinadas hacia un costado. Esto puede deberse a una diferencia en la holgura proporcionada por las restricciones laterales del marco, a una asimetría en la ubicación de la barra longitudinal, o a imperfecciones del material heterogéneo.

Capítulo 5

Comentarios y Conclusiones

Se realizaron cuatro ensayos *pushover* con desplazamiento controlado a probetas compuestas de dos muros de distinto largo conectados con vigas de acople. Las pruebas fueron instrumentadas mediante sensores LVDT's para el control del desplazamiento de techo, una celda de carga para el registro de la fuerza impuesta al muro, y fotogrametría para el cálculo del campo de desplazamientos y deformaciones de muros y vigas.

En relación con la respuesta histerética de las probetas:

- Todas las probetas presentaron una falla dúctil.
- En términos de la pendiente de la envolvente de la curva de histéresis, el modelo de mayor rigidez corresponde a la probeta 4, la cual tiene una columna central que rigidiza el sistema. En orden decreciente, siguen las probetas 2, 1 y 3. La respuesta de la probeta 1 se vio afectada por el menor nivel de carga axial adicionado.
- Para concluir sobre la ductilidad, se compara el nivel de desplazamiento de techo para el cual se produce la degradación de resistencia. En orden creciente: probetas 4 (3,2%), 2 (4,0%), 1 (4,0-6,0%) y 3 (6,0%). Por lo tanto, se obtiene que el acoplamiento genera una degradación anticipada.
- La probeta con mayor capacidad de carga es la Probeta 4, que alcanzó una carga máxima de 980 [kgf]. En orden decreciente, siguen las probetas 2, 3 y 1.

Respecto al montaje experimental y procesamiento de la fotogrametría:

- En relación a las medidas de precisión:
 - Para el cálculo del desplazamiento horizontal:

	Cámara local	Cámara vigas	Cámara lateral
Escala promedio [mm/pixel]	0,19	0,14	0,06
Error intrínseco máximo [mm]	0,07	0,03	0,01

- El error para las mediciones de deformación unitaria (ϵ_{yy}) para cada uno de los métodos es de $e_{escala} = 4,3 \cdot 10^{-3}$ y $e_{prom,intrinseco} = 2,2 \cdot 10^{-3}$.

Por lo tanto, la precisión del método está controlada por la escala. Esto permite concluir que el patrón de manchas, la luminosidad y la elección de los parámetros fueron adecuados. Entonces se debe optimizar la resolución del sensor (aumentar Megapíxeles) y/o los soportes de las cámaras para disminuir la distancia al objeto.

- Las dificultades del montaje experimental que es recomendable mejorar son:
 - La configuración de las restricciones laterales y soportes de pesos, ya que impiden la visibilidad de toda la superficie del muro;
 - La iluminación, con el fin de evitar la proyección de sombras del marco sobre el muro, debido al movimiento de la mesa vibratoria;
 - La altura máxima del trípode de los focos, ya que no fue suficiente para iluminar las vigas del 8to y 9no piso;
 - El soporte de las cámaras. Si se instalan más cámaras con el fin de enfocar una zona más pequeña, se evitará la distorsión de la imagen debido a la perspectiva;
 - Cubrir con el patrón de manchas la mayor superficie de hormigón posible e incluir la interfaz muro-fundación. Esto con el objetivo de aumentar la región de interés para el procesamiento
- La principal desventaja de la realización de los ensayos (y el diseño de las probetas) es que al simular edificios altos con restricciones de tamaño dadas por el laboratorio (como la altura máxima y tamaño de la mesa vibratoria), se obtiene un gran factor de escala. Esto implica reproducir grandes fuerzas en secciones esbeltas. Sin embargo, por temas constructivos sólo fue posible escalar las principales propiedades de los modelos, y adicionar una carga axial promedio de $2\% f'_c A_g$.
- Se obtuvo una excelente correlación para mediciones de grandes desplazamientos entre LVDT y fotogrametría. El factor R^2 promedio para las mediciones de desplazamiento de techo es de 0,999.

En relación con el inicio de fluencia:

- El inicio de fluencia se ve afectado por el nivel de carga axial aportada por las vigas, el cual aumenta con el grado de acoplamiento.
- El efecto de la carga axial es mayor en el muro de menor longitud, cuando el desplazamiento se produce en el sentido que tiende a traccionarlo. Se obtiene que el muro más corto anticipa su estado de fluencia al estar acoplado a uno de mayor longitud.

Con referencia a los perfiles de deformación y curvatura:

- Se obtiene para todas las probetas, la curvatura de fluencia del muro de menor longitud es mayor que la alcanzada por el muro más largo.
- En la zona cercana a la base se observa que, para distintos niveles de la deriva, la curva aumenta la altura para la cual se sobrepasa el valor de fluencia nominal. De esta manera se deduce que la longitud de rótula plástica aumenta con el desplazamiento de techo.
- No se aprecia una variación lineal de la curvatura en la base. Esto puede deberse al efecto de suavizado sobre el cálculo de las deformaciones en los puntos ubicados cerca de la interfaz muro-fundación, los cuales contienen datos de baja precisión.

- Se obtiene que la probeta 1 (de menor grado de acoplamiento) presenta una mayor concentración de deformaciones verticales unitarias en la base de los muros. Mientras que en las demás probetas, cuanto mayor es el acoplamiento, la distribución de curvatura produce deformaciones a nivel de las vigas del 1er y 2do piso similares al de la base

Respecto a la comparación de resultados con las expresiones analíticas:

- Se obtiene que los valores del desplazamiento de fluencia experimentales son menores que los obtenidos de forma analítica. Esto se debe principalmente a que las probetas poseen un grado de acoplamiento mayor al considerado en el modelo, lo que produce mayores cargas de tracción que anticipan el estado de fluencia.
- La expresión para el cálculo de $\delta_{y,coupled}$ según Massone y Alfaro (2016) no considera el aporte de carga axial de las vigas, es decir, la corrección por acoplamiento considera solo la variación de la altura del punto de inflexión del diagrama de momento sin recalculer el momento en la base.

En lo concerniente a los modelos de longitud de rótula plástica de muros:

- A partir del análisis de los perfiles de curvatura, se distingue el comportamiento entre las probetas 1 y 4, con menor y mayor grado de acoplamiento respectivamente.
 - Se propone para la Probeta 1 el modelo tradicional de una única rotula plástica en la base de los muros, con $l_p = 0,55l_w$
 - En el caso de la Probeta 4 se distingue el comportamiento entre el muro corto y el de mayor longitud. El primero presenta zonas plásticas a la altura de las vigas del 1er y 2do piso, mientras que el muro de mayor longitud concentra las deformaciones en la base. Para este caso se consideró $l_p = 0,85l_p^*$ con l_p^* la altura o ancho para la cual la curvatura excede el valor del error. La expresión de $l_p^{equivalente}$ en función del largo del muro se presenta en la tabla 5.1
 - Este resultado no es extrapolable. Es necesario llevar a cabo estudios adicionales para generar una expresión que permita el cálculo de longitud de rótula plástica de muros acoplados.

Tabla 5.1. Resumen del modelo de longitud plástica de muros

	Probeta 1		Probeta 4	
	Muro corto	Muro largo	Muro corto	Muro largo
Rótula plástica	En la base	En la base	en la base y a la altura de las vigas del 1er y 2do piso	En la base
Longitud plástica	$l_p^{eq} = 0.55 l_w$	$l_p^{eq} = 0.55 l_w$	$l_{p, base}^{eq} = 0.39 l_w$ $l_{p, viga}^{eq} = 0.22 l_w$	$l_{p, base}^{eq} = 0.21 l_w$
Factor de correlación R^2	0,95	0,94	0,98	0,99
Error relativo pendiente [%]	23	27	4	-4

De esta forma se concluye que, para dos muros de distinto largo conectados mediante vigas, el muro más largo permanece casi invariable respecto de su comportamiento cantiléver en términos de su perfil de deformación y curvatura en la altura. Es decir, las deformaciones unitarias se concentran en la base.

Mientras que el muro de menor longitud se ve mayormente afectado por las cargas transmitidas por las vigas.

Al comparar las probetas, para un mayor grado de acoplamiento se obtiene que el muro más corto aumenta la curvatura en la base, anticipa su estado de fluencia y además se producen zonas plásticas a la altura de las vigas.

Respecto al comportamiento de las vigas de acople:

- A partir de los perfiles de deformación axial de las fibras superior e inferior de las vigas, se concluye que el comportamiento es predominantemente por flexión.
- Con respecto a la contribución del corte medida como $\delta_{corte}/\delta_{total}$, ésta es mayor para las vigas inferiores y aumenta con el nivel de deriva. El máximo para la viga del 2do piso es de un 5% en el caso de la probeta 3 ($L/h=4,33$) y de un 10,9% para la Probeta 4 (mayor acoplamiento y vigas con $L/h=1$). Este valor se considera bajo, por lo tanto, es aplicable un modelo de rótula plástica por flexión.
- Debido a que se observa una variación lineal de la curvatura a lo largo de la zona inelástica de las vigas, se propone un modelo convencional de rótula plástica donde $l_p = 0,5l_p^*$. La longitud plástica promedio en el nivel 3,2% de la deriva es de $l_p^*=10,2$ [mm] para la probeta 3, correspondiente a $0,34h_{viga}$. Para la probeta 4 se obtiene $l_p^*=17,25$ [mm] para la viga izquierda y $l_p^*=13,7$ [mm] para la derecha, que resulta en un promedio de $0,38h_{viga}$.

En relación con la existencia de inestabilidad fuera del plano de carga:

- A partir de los resultados de la tabla 4.27 que consideran las ecuaciones del criterio P&P descrito en la sección 2.6, se concluye que no se produce inestabilidad fuera del plano.
- La probeta 1 registró el menor desplazamiento fuera del plano, alcanzando los 1,8[mm] en el máximo de compresión del tercer ciclo de la deriva de techo 4,0% nominal. Mientras que el mayor desplazamiento se registró para la Probeta 4 con 5 [mm] en el tercer ciclo del 4,0%
- Se concluye que sólo se produce inestabilidad local debido al fenómeno de *Buckling-first*, cuando el pandeo de la barra causa el desprendimiento del recubrimiento.
- El momento en que se genera la grieta vertical producto del pandeo de la barra, coincide con una disminución brusca del nivel de carga en la curva de histéresis de las probetas. Por lo tanto, el pandeo de la barra afecta directamente la degradación de resistencia del sistema.

Capítulo 6

Bibliografía

ACI Committee 374 (2005). *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary*. pp. 374.1-5 a 374.1-7

Alfaro, J. (2013). *Estimación del desplazamiento lateral elástico e inelástico de muros esbeltos mediante un modelo de rótula plástica basado en un modelo de fibras* (Tesis para optar al título de ingeniero civil). Universidad de Chile. Recuperado de: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/113669/cf-alfaro_jm.pdf?sequence=1

Beyer, K.; Simonini, S.; Constantin, R; Rutenberg, A. (2014). *Seismic shear distribution among interconnected cantilever walls of different lengths*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 43:1423–1441. DOI: 10.1002/eqe.2403

Blaber, J.; Antoniou, A. (2017). *Ncorr: Instruction Manual*. Versión 1.2.2. Recuperado de: <http://www.ncorr.com/index.php/downloads>

Blaber, J.; Adai, B.; Antoniou, A. (2015). *Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software*. Society for Experimental Mechanics. DOI 10.1007/s11340-015-0009-1

Bohl, A.; Adebar, P. (2011). *Plastic hinge lengths in high-rise concrete shear walls*. ACI Structural Journal. V. 108, No. 2, March-April. 2011, pp. 148-157.

Chaallal, O.; Gauthier, D.; Malefant, P. (1996). *Classification methodology for coupled shear walls*. Journal of Structural Engineering, Vol. 122, No. 12, December, 1996. ©ASCE. Paper No. 11189.

Dazio, A.; Beyer, K.; Hugo, B. (2009). *Quasi-static cyclic tests and plastic hinge analysis of RC structural walls*. Engineering Structures 31, pp. 1556-1571. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.02.018

Fox, M.; Sullivan, T.; Beyer, K. (2014). *Capacity design of coupled RC Walls*. Journal of Earthquake Engineering, 18:734-758

Harilal, R.; Ramji, M. (2014). *Adaptation of open source 2D DIC software Ncorr for solid mechanics applications*. 9th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 1-6 November. New Delhi, India.

Harries, K. (2001). *Ductility and Deformability of coupling beams in reinforced concrete coupled walls*. Earthquake Spectra, Vol. 17, No. 13, August.

Inga, J. (2018). *Estudio experimental y modelamiento numérico de muros acoplados de hormigón armado*. (Tesis para optar al grado de magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención en Ingeniería Estructural, Sísmica y Geotécnica). Universidad de Chile.

- Inzunza, E. (2014). *Uso de fotogrametría en elementos de hormigón armado*. (Tesis para optar al título de ingeniero civil). Universidad de Chile.
- Manriquez, I. (2016). *Ensayo de muros bandera de hormigón armado con carga lateral cíclica medido por fotogrametría y comparado con modelo puntal-tensor* (Tesis para optar grado de magíster en Ingeniería sísmica, Tesis para optar al título de ingeniero civil). Universidad de Chile.
- Massone, L.; Alfaro, J. (2016). Displacement and curvature estimation for the design of reinforced concrete slender walls. The structural design of tall and special buildings. DOI: 10.1002/tal.1285
- Moehle J. (2014). *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. pp. 658-671
- Naish, D.; Fry, A.; Klemencic, R.; and Wallace, J. (2013). *Reinforced Concrete Coupling Beams-Part I: Testing*. ACI Structural Journal. V. 110, No. 6, Nov-Dec. 2013, pp. 1057-1066.
- Paulay, T. (2002). *The displacement capacity of reinforced concrete coupled walls*. Engineering Structures 24(9): 1165–1175.
- Priestley, M.J.N.; Calvi, G.M.; Kowalsky, M.J. (2007). *Displacement-Based seismic design of structures*. IUSS Press. pp. 1-34, 372-382.
- Rosso, A.; Almeida, P.; Beyer, K. (2016). *Stability of thin reinforced concrete walls under cyclic loads: state of the art and new experimental findings*. Bull Earthquake Eng (2016) 14:455-484.
- Santos, H. (2018). *Estudio numérico de la respuesta de sistemas de muros de hormigón armado acoplados y diseño experimental para su evaluación*. (Tesis para optar al grado de magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención en Ingeniería Estructural, Sísmica y Geotécnica). Universidad de Chile.
- Seo, S.; Yun, H.; Chun, Y. (2017). *Hysteretic behavior of conventionally reinforced concrete coupling beams in reinforced concrete coupled shear wall*. International Journal of Concrete Structures and Materials.
- Subedi, N. K. (1991). *RC-coupled shear wall structures I—Analysis of coupling beam*. Journal of Structural Engrs, ASCE, 117(3), 667–680.
- Subedi, N. K. (1991). *RC-coupled shear wall structures II—Ultimate strength calculations*. Journal of Structural Engrs. ASCE. 117(3), 681–698.
- Subedi, N. K., Marsono, A. K., & Aguda, G. (1999). *Analysis of reinforced concrete coupled shear wall structures*. Structural Design of Tall Buildings, 8(2), 117-143. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1794(199906)8:2<117::AID-TAL124>3.0.CO;2-7
- Telleen, K.; Maffei, J.; Heintz, J.; Dragovch, J. (2012). *Practical lessons for concrete wall design, based on studies of the 2010 Chile Earthquake*. 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE). LISBOA

Anexos

Anexo A

Gráficos de evolución de la deformación vertical unitaria para la sección basal para diferentes niveles de la deriva nominal, obtenidos del modelo de fibras de Inga (2018)

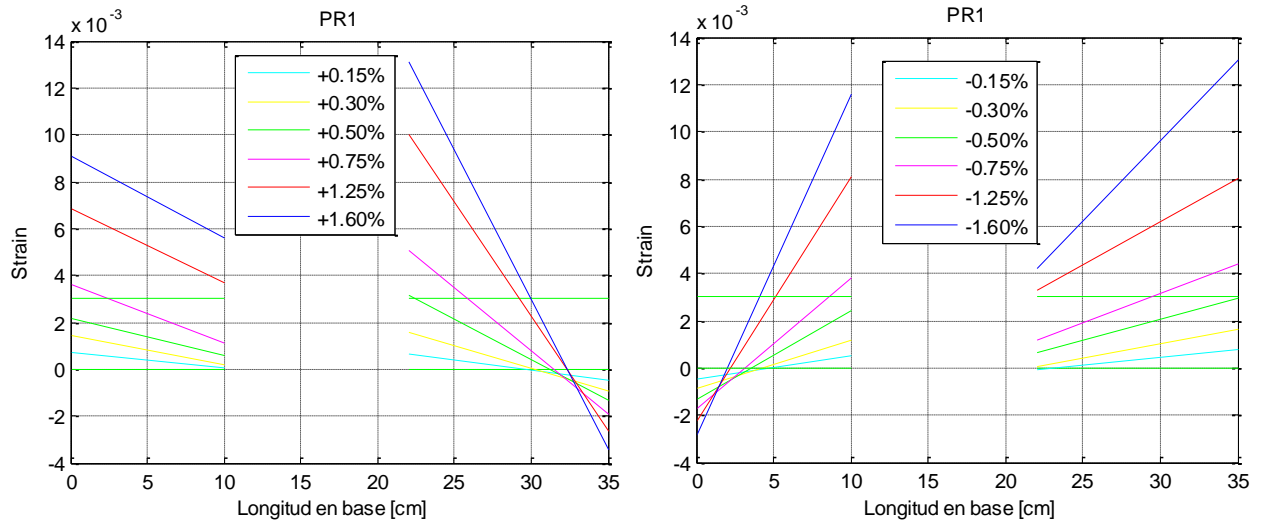


Figura A. 1. Probeta 1. Izquierda) Sentido positivo; Derecha) Sentido negativo

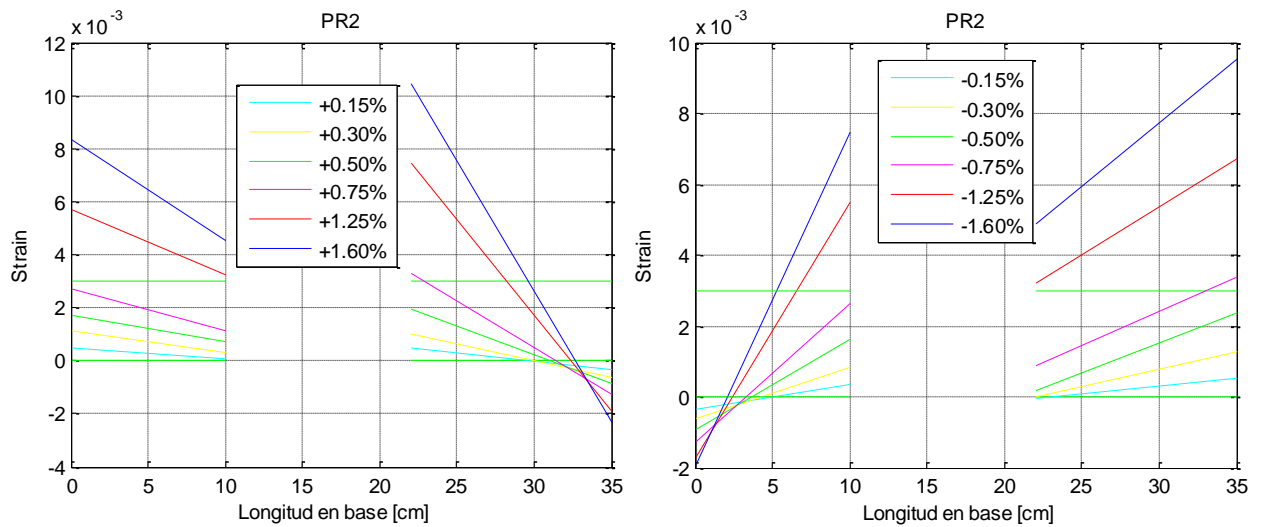


Figura A. 2. Probeta 2. Izquierda) Sentido positivo; Derecha) Sentido negativo.

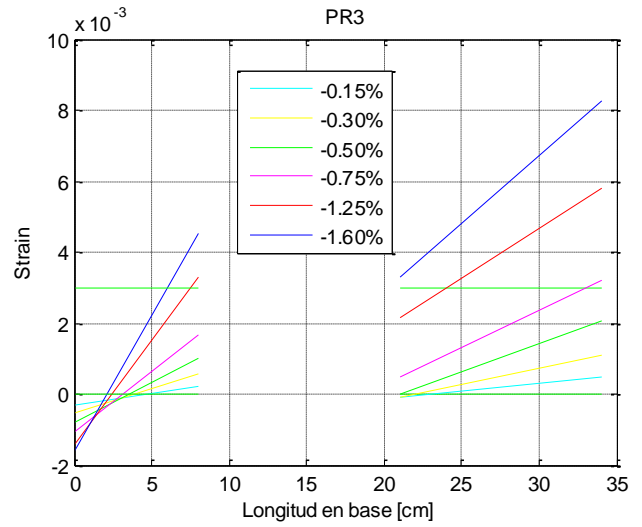
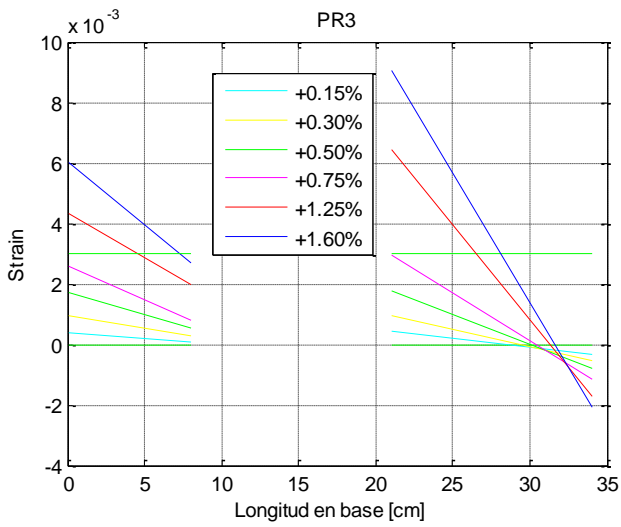


Figura A. 3. Probeta 3. Izquierda) Sentido positivo; Derecha) Sentido negativo

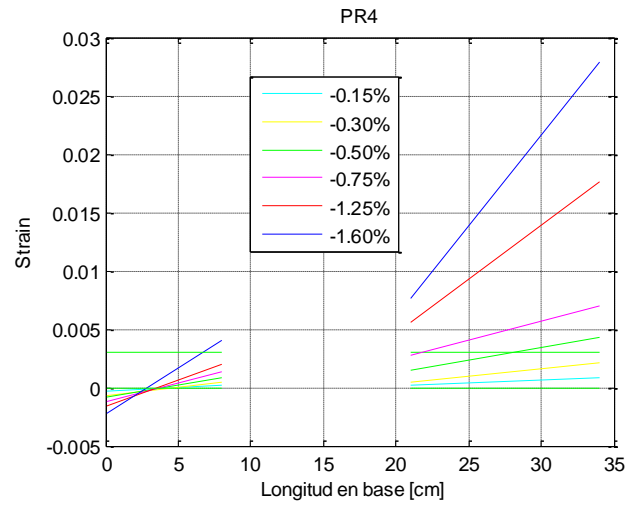
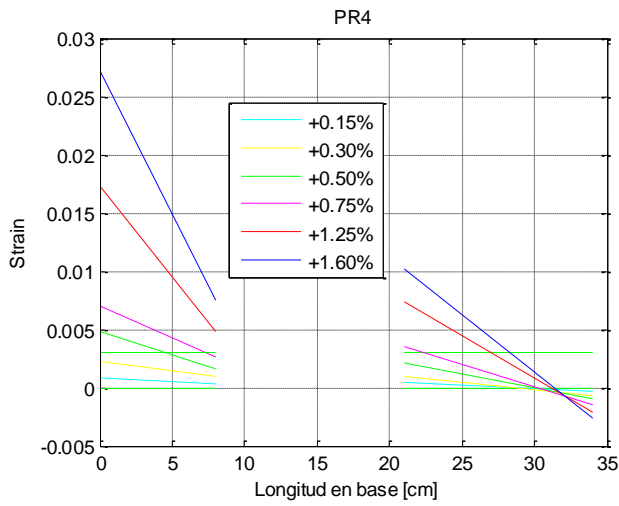


Figura A. 4. Probeta 4. Izquierda) Sentido positivo; Derecha) Sentido negativo.

Anexo B

Detalle de cálculo de curvatura y desplazamiento de fluencia con expresiones de Massone y Alfaro (2016) y Priestley (2007)

Tabla B. 1. Cálculo de curvatura y desplazamiento de fluencia según expresiones de Massone y Alfaro (2016) – Considerando carga axial nula

	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3		Probeta 4	
	Muro izquierdo	Muro derecho	Muro izquierdo	Muro derecho	Muro izquierdo	Muro derecho	Muro izquierdo	Muro derecho
lw [m]	0,1	0,13	0,1	0,13	0,08	0,13	0,08	0,13
t [m]	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
hw [m]	1	1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
P [tonf]	0	0	0	0	0	0	0	0
Ag [m2]	0,004	0,0052	0,006	0,0078	0,0048	0,0078	0,0048	0,0078
ρ_b [-]	0,035	0,027	0,024	0,018	0,03	0,018	0,03	0,018
ho [m]	0,943	0,927	1,02	1,01	1,038	1,036	0,665	0,71
K [-]	1,273	1,268	1,266	1,262	1,270	1,262	1,270	1,262
ϕ_y [1/mm]	3,50E-05	2,68E-05	3,48E-05	2,67E-05	4,36E-05	2,67E-05	4,36E-05	2,67E-05
α [-]	0,206	0,199	0,196	0,188	0,202	0,188	0,202	0,188
δy [mm]	7,224	5,337	9,811	7,227	12,693	7,227	12,693	7,227
$\delta y_{\text{coupled}}$ [mm]	7,078	5,179	9,063	6,637	11,843	6,736	8,849	5,290
Drift esperado	0,71%	0,52%	0,76%	0,55%	0,99%	0,56%	0,74%	0,44%

Tabla B. 2. Cálculo de curvatura y desplazamiento de fluencia según expresiones de Massone y Alfaro (2016) – Considerando carga axial máxima (suma de gravitacional y aporte de vigas por flexión)

	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3		Probeta 4	
	Muro izquierdo	Muro derecho	Muro izquierdo	Muro derecho	Muro izquierdo	Muro derecho	Muro izquierdo	Muro derecho
lw [m]	0,1	0,13	0,1	0,13	0,08	0,13	0,08	0,13
t [m]	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
hw [m]	1	1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
P [tonf]	1,267	1,307	1,900	1,960	1,777	1,837	2,832	2,892
Ag [m2]	0,004	0,0052	0,006	0,0078	0,0048	0,0078	0,0048	0,0078
ρ_b [-]	0,035	0,027	0,024	0,018	0,03	0,018	0,03	0,018
ho [m]	0,943	0,927	1,02	1,01	1,038	1,036	0,665	0,71
K [-]	1,460	1,416	1,453	1,410	1,489	1,401	1,619	1,481
ϕ_y [1/mm]	4,02E-05	3,00E-05	4,00E-05	2,98E-05	5,12E-05	2,96E-05	5,56E-05	3,13E-05
α [-]	0,206	0,199	0,196	0,188	0,202	0,188	0,202	0,188
δy [mm]	8,288	5,963	11,265	8,079	14,884	8,026	16,185	8,484
$\delta y_{\text{coupled}}$ [mm]	8,120	5,787	10,405	7,420	13,888	7,480	11,283	6,210
Drift esperado	0,81%	0,58%	0,87%	0,62%	1,16%	0,62%	0,94%	0,52%

Tabla B. 3. Cálculo de curvatura y desplazamiento de fluencia según expresiones de Priestley y otros (2007)

	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3		Probeta 4	
	Muro izquierdo	Muro derecho	Muro izquierdo	Muro derecho	Muro izquierdo	Muro derecho	Muro izquierdo	Muro derecho
β	0,457	0,457	0,555	0,555	0,561	0,561	0,686	0,686
Ht [m]	1,00	1,00	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
n [-]	6	6	9	9	9	9	9	9
lw [m]	0,10	0,13	0,10	0,13	0,08	0,13	0,08	0,13
ϕ_{yw} [1/mm]	5,09E-05	3,91E-05	5,09E-05	3,91E-05	6,36E-05	3,91E-05	6,36E-05	3,91E-05
C [-]	0,147	0,147	0,142	0,142	0,141	0,141	0,117	0,117
δy [mm]	7,475	5,750	10,391	7,993	12,914	7,947	10,691	6,579
Drift esperado [%]	0,75%	0,57%	0,87%	0,67%	1,08%	0,66%	0,89%	0,55%

Anexo C

Detalle de cálculo del máximo grado de acoplamiento teórico

Anexo C.1

Cálculo de gráfico Momento-curvatura de los muros mediante un análisis seccional. Se desprecia el efecto de la carga axial.

Tabla C.1. Parámetros utilizados

f'c [Mpa]	fy [Mpa]	Es [Mpa]	β_1	Ec [Mpa]	fcr [Mpa]	ey	eu	As =A's[mm ²]
28	550	200000	0,85	24870,06	3,280732	0,00275	0,003	28,27433

Tabla C.2. Cálculo de momento y curvatura de la sección del muro para los estados de fluencia y capacidad – Probeta 1

Muro izquierdo lw=10 cm, tw=4cm				Muro derecho lw=13 cm, tw=4cm			
h [mm]		100		h [mm]		130	
b [mm]		40		b [mm]		40	
d [mm]		90		d [mm]		120	
d' [mm]		10		d' [mm]		10	
FLUENCIA		CAPACIDAD		FLUENCIA		CAPACIDAD	
A	2735,71	A	809,2	A	2735,71	A	809,2
B	62203,53	B	1413,717	B	62203,53	B	1413,717
C	-	C	-169646	C	-	C	-169646
	3110176,73		-		4043229,75		-
y [mm]	24,21	c [mm]	13,63	y [mm]	28,72	c [mm]	13,63
ec	0,0010	es'	0,000799	ec	0,0009	es'	0,000799
es'	0,0006	Cc	11030,99	es'	0,0006	Cc	11030,99
fc	25,17	Cs'	4519,89	fc	21,52	Cs'	4519,89
f's	118,83			f's	112,80		
My [KNm]	1,27	Mn [KNm]	1,311775	My [KNm]	1,72	Mn [KNm]	1,778301
phi_y [1/mm]	4,18E-05	phi_n [1/mm]	2,20E-04	phi_y [1/mm]	3,01E-05	phi_n [1/mm]	2,20E-04

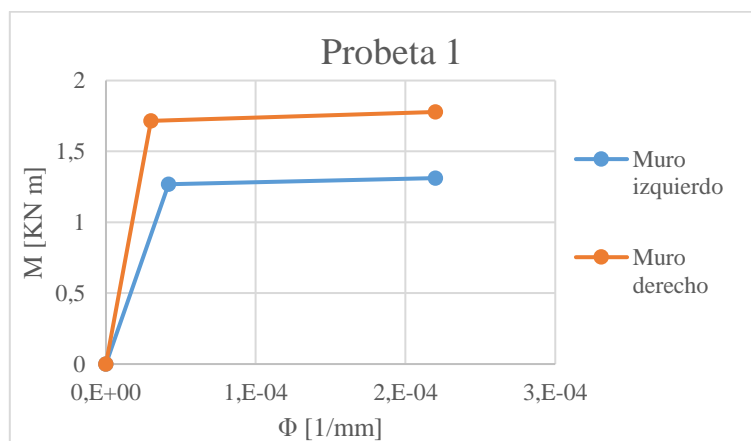


Figura C. 1. Momento-curvatura para los muros de la probeta 1

Tabla C.3. Cálculo de momento y curvatura de la sección del muro para los estados de fluencia y capacidad – Probeta 2

Muro izquierdo lw=10 cm, tw=6cm				Muro derecho lw=13 cm, tw=6cm			
h [mm]		100		h [mm]		130	
b [mm]		60		b [mm]		60	
d [mm]		90		d [mm]		120	
d' [mm]		10		d' [mm]		10	
FLUENCIA		CAPACIDAD		FLUENCIA		CAPACIDAD	
A	4103,56	A	1213,8	A	4103,56	A	1213,8
B	62203,53	B	1413,717	B	62203,53	B	1413,717
C	#####	C	-169646	C	#####	C	-169646
y [mm]	20,98	c [mm]	11,25	y [mm]	24,71	c [mm]	11,25
ec	0,0008	es'	0,000334	ec	0,0007	es'	0,000334
es'	0,0004	Cc	13660,33	es'	0,0004	Cc	13660,33
fc	20,78	Cs'	1890,56	fc	17,74	Cs'	1890,56
f's	87,45			f's	84,92		
My [KNm]	1,28	Mn [KNm]	1,337115	My [KNm]	1,73	Mn [KNm]	1,803642
phi_y [1/mm]	3,98E-05	phi_n [1/mm]	2,67E-04	phi_y [1/mm]	2,89E-05	phi_n [1/mm]	2,67E-04

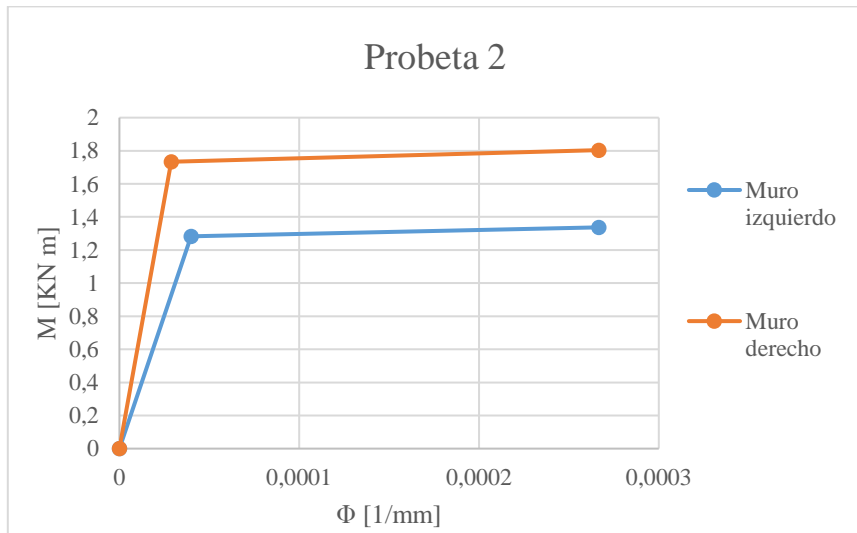


Figura C. 2. Momento-curvatura para los muros de la probeta 2

Tabla C.4. Cálculo de momento y curvatura de la sección del muro para los estados de fluencia y capacidad – Probetas 3 y 4

Muro izquierdo lw=8 cm, tw=6cm				Muro derecho lw=13 cm, tw=6cm			
h [mm]		80		h [mm]		130	
b [mm]		60		b [mm]		60	
d [mm]		70		d [mm]		120	
d' [mm]		10		d' [mm]		10	
FLUENCIA		CAPACIDAD		FLUENCIA		CAPACIDAD	
A	4103,56	A	1213,8	A	4103,56	A	1213,8
B	62203,53	B	1413,717	B	62203,53	B	1413,717
C	#####	C	-169646	C	#####	C	-169646
y [mm]	18,18	c [mm]	11,25	y [mm]	24,71	c [mm]	11,25
ec	0,0010	es'	0,000334	ec	0,0007	es'	0,000334
es'	0,0004	Cc	13660,33	es'	0,0004	Cc	13660,33
fc	24,00	Cs'	1890,56	fc	17,74	Cs'	1890,56
f's	86,88			f's	84,92		
My [KNm]	0,98	Mn [KNm]	1,026098	My [KNm]	1,73	Mn [KNm]	1,803642
phi_y [1/mm]	5,31E-05	phi_n [1/mm]	2,67E-04	phi_y [1/mm]	2,89E-05	phi_n [1/mm]	2,67E-04

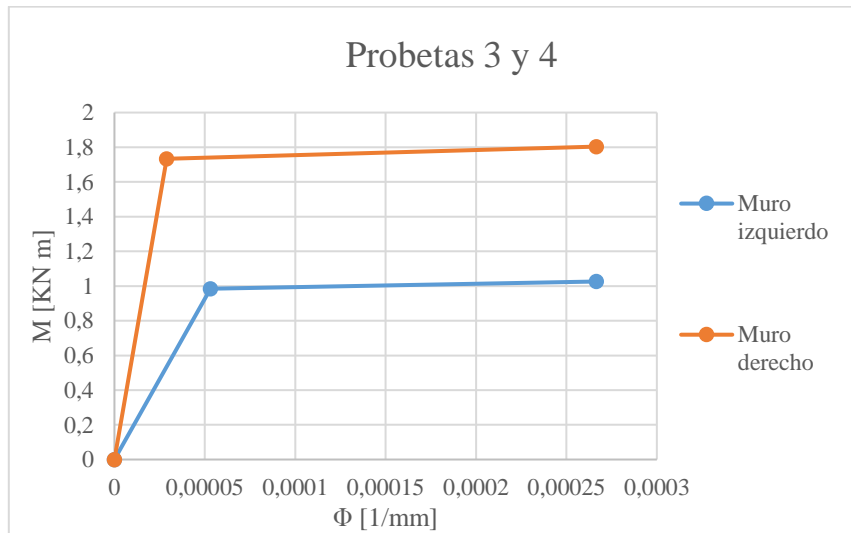


Figura C. 3. Momento-curvatura para los muros de las probetas 3 y 4

Anexo C.2

Tabla C.5. Cálculo de fuerza de corte debida a flexión de las vigas.

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4
h [mm]	30	30	30	40
b [mm]	40	60	60	60
h' [mm]	14	14	14	24
L [mm]	120	120	130	130
Pu1 [KN]	2,26	2,26	2,09	3,58

Anexo C.3

Tabla C.6. Cálculo del grado de acoplamiento

		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4
n	[-]	6	9	9	9
Pu1	[KN]	2,26	2,26	2,09	3,58
T	[KN]	13,58	20,37	18,80	32,23
L	[mm]	235,00	235,00	235,00	235,00
MCB	[KN m]	3,19	4,79	4,42	7,57
M1	[KN m]	1,27	1,28	0,98	0,98
M2	[KN m]	1,72	1,73	1,73	1,73
M total	[KN m]	6,17	7,80	7,14	10,29
β	[%]	51,68%	61,33%	61,91%	73,59%

Anexo D

Desplazamiento por corte y desplazamiento total entre los extremos de las vigas.

Tabla D.1. Desplazamiento de corte y total entre los extremos de las vigas – Sentido positivo – Probeta 3

Drift [%]	Viga 2 piso			Viga 4 piso			Viga 6 piso			Viga 8 piso		
	δ_{corte}	δ_{total}	$\delta c/\delta_{\text{total}}$ [%]	δ_{corte}	δ_{total}	$\delta c/\delta_{\text{total}}$ [%]	δ_{corte}	δ_{total}	$\delta c/\delta_{\text{total}}$ [%]	δ_{corte}	δ_{total}	$\delta c/\delta_{\text{total}}$ [%]
0,15	-0,013	8,487	0,152	-0,007	8,174	0,088	-0,005	8,227	0,058	-0,008	8,371	0,092
0,20	-0,019	8,543	0,217	-0,005	8,197	0,062	-0,003	8,279	0,039	-0,003	8,408	0,033
0,30	-0,032	8,628	0,375	-0,008	8,225	0,098	-0,002	8,373	0,029	-0,004	8,481	0,051
0,40	-0,038	8,709	0,438	-0,006	8,239	0,075	-0,010	8,453	0,114	-0,004	8,532	0,050
0,50	-0,058	8,835	0,654	-0,006	8,277	0,074	-0,002	8,561	0,026	-0,007	8,631	0,081
0,75	-0,076	9,038	0,840	-0,012	8,299	0,150	-0,009	8,704	0,108	-0,003	8,717	0,035
1,00	-0,103	9,200	1,119	-0,019	8,347	0,230	-0,013	8,892	0,142	-0,005	8,842	0,053
1,25	-0,123	9,407	1,306	-0,026	8,427	0,311	-0,001	9,080	0,015	-0,010	8,957	0,110
1,60	-0,167	9,671	1,731	-0,010	8,542	0,116	-0,007	9,321	0,072	-0,010	9,039	0,114
2,00	-0,185	10,001	1,854	-0,028	8,687	0,321	-0,006	9,554	0,066	-0,010	9,166	0,107
2,50	-0,238	10,443	2,274	-0,052	8,900	0,586	0,006	9,912	0,065	-0,001	9,276	0,012
3,20	-0,297	11,004	2,699	-0,063	9,143	0,688	0,017	10,433	0,168	0,002	9,534	0,025
4,00	-0,381	11,545	3,297	-0,091	9,423	0,968	0,020	11,127	0,183	0,015	9,822	0,150
6,00	-0,500	13,081	3,821	-0,094	10,579	0,893	0,051	12,752	0,403	0,115	9,119	1,257
8,00	-0,662	13,212	5,013	-0,178	11,541	1,544	0,073	13,984	0,523	0,227	11,579	1,962

Tabla D.2. Desplazamiento de corte y total entre los extremos de las vigas – Sentido positivo – Probeta 4

Drift [%]	2 piso						4 piso						6 piso						8 piso					
	Viga izquierda			Viga derecha			Viga izquierda			Viga derecha			Viga izquierda			Viga derecha			Viga izquierda			Viga derecha		
	δ_{corte}	δ_{total}	$\delta_{\text{c}}/\delta_{\text{total}}$ [%]	δ_{corte}	δ_{total}	$\delta_{\text{c}}/\delta_{\text{t}}$ [%]	δ_{corte}	δ_{total}	$\delta_{\text{c}}/\delta_{\text{t}}$ [%]	δ_{corte}	δ_{total}	$\delta_{\text{c}}/\delta_{\text{t}}$ [%]	δ_{corte}	δ_{total}	$\delta_{\text{c}}/\delta_{\text{t}}$ [%]	δ_{corte}	δ_{total}	$\delta_{\text{c}}/\delta_{\text{t}}$ [%]	δ_{corte}	δ_{total}	$\delta_{\text{c}}/\delta_{\text{t}}$ [%]	δ_{corte}	δ_{total}	$\delta_{\text{c}}/\delta_{\text{t}}$ [%]
0,15	-0,008	2,378	0,326	-0,003	2,380	0,116	-0,002	2,269	0,075	-0,011	2,514	0,420	-0,001	2,272	0,060	-0,004	2,483	0,176	0,001	2,514	0,058	-0,004	2,527	0,142
0,20	-0,015	2,373	0,636	-0,004	2,375	0,182	-0,008	2,273	0,345	-0,011	2,508	0,429	-0,001	2,267	0,043	-0,008	2,476	0,328	-0,002	2,512	0,085	-0,001	2,514	0,056
0,30	-0,015	2,372	0,621	-0,003	2,381	0,139	-0,012	2,277	0,539	-0,010	2,504	0,414	-0,003	2,260	0,149	-0,019	2,473	0,765	-0,003	2,504	0,116	-0,005	2,514	0,208
0,40	-0,016	2,360	0,680	-0,008	2,394	0,347	-0,019	2,288	0,829	-0,016	2,507	0,645	-0,003	2,260	0,152	-0,017	2,480	0,666	-0,001	2,500	0,054	-0,005	2,516	0,203
0,50	-0,021	2,354	0,912	-0,015	2,412	0,604	-0,028	2,293	1,240	-0,014	2,505	0,559	-0,006	2,253	0,269	-0,019	2,467	0,781	-0,006	2,486	0,255	-0,008	2,506	0,329
0,75	-0,025	2,347	1,071	-0,022	2,430	0,918	-0,036	2,285	1,583	-0,025	2,506	0,998	-0,013	2,251	0,579	-0,029	2,445	1,175	-0,006	2,471	0,234	-0,010	2,503	0,388
1,00	-0,041	2,346	1,745	-0,030	2,439	1,233	-0,062	2,327	2,685	-0,029	2,521	1,163	-0,017	2,245	0,736	-0,039	2,422	1,621	-0,006	2,458	0,230	-0,013	2,493	0,514
1,25	-0,056	2,345	2,408	-0,041	2,444	1,688	-0,072	2,331	3,110	-0,035	2,537	1,388	-0,019	2,246	0,866	-0,043	2,415	1,785	-0,007	2,456	0,293	-0,014	2,503	0,574
1,60	-0,071	2,338	3,036	-0,044	2,432	1,801	-0,084	2,348	3,586	-0,039	2,529	1,549	-0,024	2,237	1,081	-0,048	2,395	1,998	-0,010	2,445	0,413	-0,019	2,508	0,738
2,00	-0,085	2,300	3,709	-0,054	2,409	2,240	-0,092	2,324	3,945	-0,038	2,505	1,497	-0,029	2,228	1,310	-0,051	2,383	2,144	-0,012	2,422	0,492	-0,020	2,504	0,812
2,50	-0,097	2,268	4,282	-0,072	2,434	2,964	-0,095	2,321	4,088	-0,032	2,496	1,272	-0,036	2,233	1,595	-0,061	2,396	2,527	-0,018	2,446	0,719	-0,029	2,553	1,152
3,20	-0,116	2,211	5,245	-0,087	2,436	3,562	-0,098	2,313	4,254	-0,027	2,490	1,104	-0,042	2,227	1,880	-0,065	2,402	2,707	-0,021	2,448	0,863	-0,034	2,573	1,315
4,00	-0,146	2,184	6,707	-0,101	2,483	4,076	-0,099	2,312	4,299	-0,020	2,484	0,801	-0,048	2,231	2,169	-0,074	2,404	3,061	-0,027	2,441	1,104	-0,039	2,576	1,521
6,00	-0,219	2,004	10,943	-0,146	2,538	5,739	-0,131	2,407	5,445	-0,008	2,558	0,316	-0,058	2,296	2,520	-0,082	2,486	3,300	-0,031	2,540	1,207	-0,044	2,709	1,621
8,00	-0,227	2,068	10,986	-0,161	2,785	5,776	-0,130	2,595	4,998	-0,010	2,791	0,374	-0,050	2,490	1,989	-0,068	2,685	2,530	-0,025	2,789	0,912	-0,036	2,955	1,218