

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

**ESTUDIO EXPERIMENTAL Y MODELAMIENTO EN ELEMENTOS  
FINITOS DE MUROS ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO CON  
DISCONTINUIDADES TIPO BANDERA.**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA SÍSMICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

SEBASTIÁN ALEXANDER DÍAZ OLIVARES

PROFESOR GUÍA:

LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RICARDO HERRERA MARDONES

FABIAN ROJAS BARRALES

MATÍAS HUBE GINESTAR

SANTIAGO DE CHILE

2016

Resumen De La Tesis Para Optar Al Grado  
De Magister, Mención Ingeniería Sísmica  
Sebastián Alexander Díaz Olivares

Estudio Experimental y Modelamiento en Elementos Finitos de Muros Esbeltos de  
Hormigón Armado con Discontinuidades Tipo Bandera.

El terremoto del Maule de 2010 ocurrido en Chile dejó un gran número de edificios de las construcciones modernas con daños, éstos debido a requerimientos arquitectónicos, poseen discontinuidades del tipo bandera. Un muro bandera se produce cuando hay una extensión de la longitud del muro para los pisos superiores, es decir, a partir de cierta altura el largo del muro cambia, generando una abertura en los bordes de los edificios. El nivel de discontinuidad en la base no ha sido tratado experimentalmente y por lo tanto es necesario observar su impacto estructural. En esta investigación, se estudia experimental y analíticamente el comportamiento de muros esbeltos de hormigón armado tipo bandera frente a una carga axial constante y un desplazamiento lateral cíclico, para así poder comparar los resultados obtenidos con modelos de elementos finitos o modelos predictivos utilizados en trabajos anteriores. Para lograr llevar a cabo el estudio experimental, se dispone del laboratorio de estructuras recién construido que contempla un muro y losa de reacción, al que se diseñó y construyó un sistema restricción lateral y carga axial. Se construyen cuatro probetas de hormigón armado las cuales fueron diseñadas con una altura al punto de aplicación de la carga lateral de  $2.8m$ , un espesor de muro de  $15cm$  y una longitud de  $90cm$ . Todos los ensayos son realizados bajo las mismas condiciones de carga axial constante y carga lateral cíclica aplicada a nivel de techo. Para la obtención de las deformaciones principales, se han instrumentado todos los muros a ensayar con strain gages, LVDT y fotogrametría. Los resultados experimentales muestran que el impacto de la abertura es relativamente bajo, dado que todos los muros tienen capacidad y deformaciones de techo similar, sin embargo la utilización de discontinuidad acelera la degradación, demostrando que los muros banderas, en especial el de mayor discontinuidad, fallan antes que el rectangular. Los modelos en elementos finitos realizados son capaces de capturar de buena forma la respuesta, mostrando la degradación y falla obtenida en los ensayos al incorporar un modelo de acero con pandeo, además el mayor efecto de discontinuidad tipo bandera se obtiene ejecutando modelos de muros con mayor relación de aspecto (edificios altos) con aberturas pequeñas, debido a la alta concentración de daño en la discontinuidad.

# Dedicatoria

*A Mis Padres Les Dedico Este Trabajo De 9 Años De Lucha Constante,  
De Lágrimas De Sangre, Donde Jamás Perdieron La Fe En Mi,  
Y Gracias A Esto Hoy Puedo Entender Que  
Las Cosas Que Más Cuestan Son Las Que Más Se Quieren.*

*Gracias Por Tanto.*

# Agradecimientos

Primero que todo quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de vivir los mejores años de mi vida en la Universidad, conociendo a personas realmente increíbles, llenas de alegría, buena onda, genialidad, prendidos y apañadores hasta las últimas instancias. Creo que lo más difícil de hacer en esta tesis es agradecer a todos mis amigos y personas que pasaron en este largo caminar, porque no quiero dejar a nadie fuera y no hay espacio para resumir 9 años, pero se que si estas leyendo esto, de seguro eres uno de mis amigos mas importantes. Gracias por darme las mejores experiencias que valoraré y atesoraré por el resto de mi vida, traspasando a mis futuras descendencias todas mis aventuras, malos ratos, esfuerzos, lagrimas y momento inspiradores para llegar a ser la gran persona que hoy en día soy.

Quiero darle las más infinitas gracias a toda mi familia, por estar siempre ahí en todos mis momentos buenos y malos, por darme muchas veces el empujón necesario para seguir adelante, por demostrarme que somos una hermosa familia y que siempre nos apoyaremos en todas las decisiones o situaciones futuras. Muchas gracias mamita por tanto amor y preocupación, por aceptar y querer a mis amigos de la U como si fueran mis hermanos, también perdone todas las noches que tuvo que trasnochar porque me quedaba estudiando o a veces carreteando fuera de la casa, pero me esforcé al máximo para que siempre se sintiera la mujer mas orgullosa y chocha de su hijo menor. A mi papá le doy las gracias por darme los mejores valores, apoyarme en todo, y solo le puedo decir que me siento orgulloso que sea mi papá.

Agradezco a mis profesores guías Massone y Fabian por brindarme toda su ayuda y disposición en este proceso y también agradezco a un grande como Beltran, por enseñarme que en la U hay más que solo estudiar.

Un agradecimiento especial al equipo Muros compuesto por Don Peter, Víctor y Aru que dieron todo el apoyo y aguante para sacar adelante los ensayos, al igual que Otu y Jorge. También debo agradecer a mi compañero y amigo Ignacio, que trabajamos por más de dos años y medio en este proyecto, dando la vida en largas maratones de tesis, trabajar todo el día en el laboratorio, reir con las manitos calientes nivel Aru, y todo lo que tuvimos que pasar para al fin poder entregar este enorme trabajo realizado, gracias Nachin.

Gracias a mis más grandes amigos y compañeros de la U, donde cada uno apporto lo suyo: Edy, Saez, Marín, FF, Sheriff Cartes, Panchita, Emilichin, Nicoq, Xinoq, Doppinger, Jym, Mayo, al Mati, Fabbito, Fabio, etc. Finalmente quiero y debo darle las gracias a Roxana por ser quien más me contuvo y aguanto estos últimos dos años del Magister, cuando todo se tornó realmente difícil, estuviste ahí dándome todo el amor y comprensión que tu gran corazón pudo entregarme. Solo espero que me alcance la vida para amarte y retribuirte todo lo que me has dado, gracias por tanto y por todo mi amor.

# Tabla de Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Antecedentes Generales . . . . .	1
1.1.1	Antecedentes Experimentales . . . . .	2
1.1.2	Antecedentes Numéricos . . . . .	3
1.1.3	Propuesta de Estudio . . . . .	6
1.2	Objetivos . . . . .	7
1.2.1	Objetivos Generales . . . . .	7
1.2.2	Objetivos Específicos . . . . .	7
1.3	Organización del Informe . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Modelación Numérica</b>	<b>11</b>
2.1	SAFEToolbox . . . . .	11
2.2	Propiedades de los materiales . . . . .	12
2.2.1	Hormigón . . . . .	13
2.2.2	Acero Con Pandeo . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Estudio Experimental</b>	<b>25</b>
3.1	Introducción . . . . .	25
3.2	Laboratorio de Estructuras y Su Equipamiento . . . . .	26
3.2.1	Marco de Acero . . . . .	27
3.2.2	Actuador . . . . .	29
3.2.3	Gatos Hidráulicos . . . . .	30
3.2.4	Celda de Carga . . . . .	31

3.2.5	Bombas Hidráulicas . . . . .	32
3.3	Diseño y Fabricación de Probetas . . . . .	33
3.3.1	Resistencia Materiales . . . . .	34
3.3.2	Armadura de Refuerzo de Probetas . . . . .	35
3.4	Instrumentación . . . . .	39
3.4.1	Strain Gages . . . . .	39
3.4.2	LVDT . . . . .	41
3.4.3	Fotogrametría . . . . .	44
3.5	Montaje . . . . .	44
3.5.1	Sistema de Carga Axial . . . . .	45
3.5.2	Sistema de Carga Lateral . . . . .	47
3.5.3	Sistema de Restricción Lateral . . . . .	49
3.5.4	Sistema de Postensado . . . . .	50
3.5.5	Grilla Para Fotogrametría . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Resultados Experimentales</b>	<b>52</b>
4.1	Introducción . . . . .	52
4.2	Adquisición Y Corrección De Datos Obtenidos . . . . .	53
4.3	Resultados Experimentales . . . . .	55
4.4	Comparación Entre Ensayos . . . . .	66
4.4.1	Efecto De La Discontinuidad . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Estudios Analíticos</b>	<b>69</b>
5.1	Introducción . . . . .	69
5.2	Estudio De Deformaciones . . . . .	70
5.2.1	Resultados Teóricos . . . . .	70
5.3	Modelamiento . . . . .	71
5.4	Resultados Analíticos . . . . .	80
5.5	Deformaciones De Tracción Máximas . . . . .	84
<b>6</b>	<b>Análisis Paramétrico</b>	<b>91</b>
6.1	Introducción . . . . .	91
6.2	Efecto Utilización Pedestal Elástico . . . . .	91

6.3	Muro Con Armadura Continua En Borde Discontinuo . . . . .	93
6.4	Muro 2 Con Carga Axial Excéntrica . . . . .	94
6.5	Modelo De Flexión Pura . . . . .	96
6.5.1	Comparación Modelo Flexión Más Corte Vs Flexión Pura . . . . .	97
6.5.2	Efecto De La Discontinuidad . . . . .	100
6.6	Muros Más Altos . . . . .	103
6.6.1	Comparación Modelo Flexión Más Corte Vs Flexión Pura . . . . .	104
6.6.2	Efecto De La Discontinuidad . . . . .	110
6.7	Comparación Resultados Con Modelo Analítico . . . . .	113
6.7.1	Deformaciones Elásticas . . . . .	113
6.7.2	Largo de rótula plástica . . . . .	121
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>126</b>
7.1	Resumen . . . . .	126
7.2	Conclusiones y Recomendaciones . . . . .	127
	<b>Bibliografía</b>	<b>132</b>
	<b>Anexos</b>	<b>135</b>
<b>A</b>	<b>Capítulo 3</b>	<b>136</b>
A.1	Curvas Carga vs Deformación Acero . . . . .	136
A.2	Detalle Planos Probetas de Hormigón Armado . . . . .	139
A.3	Detalle Instalación Strain Gages . . . . .	141
A.4	Detalle Sistema Carga Axial . . . . .	142
<b>B</b>	<b>Capítulo 4</b>	<b>143</b>
B.1	Adquisición Y Corrección De Datos Obtenidos . . . . .	143
<b>C</b>	<b>Capítulo 5</b>	<b>145</b>
C.1	Resultados Analíticos . . . . .	145
<b>D</b>	<b>Capítulo 6</b>	<b>147</b>
D.1	Efecto De La Discontinuidad Para Muro 2 . . . . .	147

D.2	Determinación desplazamiento de fluencia a partir de los ensayos . . . . .	152
D.3	Determinación desplazamiento de fluencia a partir de los modelos . . . . .	154



# Índice de Tablas

3.1	Resumen dimensiones para cada muro de hormigón armado a ensayar. . . . .	34
3.2	Resistencia crítica del hormigón a compresión. . . . .	35
3.3	Resistencia y deformación unitaria para barras de acero a tracción (curvas Carga vs Deformación se encuentran en el Anexo A). . . . .	35
3.4	Resumen cuantías de refuerzo utilizadas en las probetas. . . . .	36
4.1	Resumen máxima diferencia entre LVDT de control vs desplazamiento corregido. Todos los resultados ocurrieron al 4% de drift. . . . .	54
4.2	Resumen degradación en cada Especimen. . . . .	68
5.1	Resumen Carga Axial $P_0$ , Momento y Corte Nominal. . . . .	71
5.2	Propiedades utilizadas en la modelación de cada Especimen. . . . .	73
5.3	Resumen Cuantías Utilizadas. . . . .	74
5.4	Resumen Mesh Elementos Finitos. . . . .	76
6.1	Resumen falla de muros para distintas configuraciones. . . . .	107
6.2	Resumen desplazamiento de fluencia utilizando los registros de LVDT unidos o por separado. . . . .	116
6.3	Parámetros utilizados en cálculo de desplazamiento de fluencia. . . . .	118
6.4	Resumen desplazamiento de fluencia de los distintos análisis realizados. . . . .	119
6.5	Parámetros utilizados en el cálculo de largo de rótula plástica. . . . .	123
6.6	Resumen largo de rótula plástica para un $Drift = 1.35\%$ . . . . .	123
6.7	Resumen largo de rótula plástica para un $Drift = 2\%$ . . . . .	124
6.8	Resumen largo de rótula plástica para un $Drift = 3\%$ . . . . .	124

# Índice de Ilustraciones

1.1.1	Registros fotográficos de daños en muros de hormigón armado tipo bandera después del terremoto de 2010. . . . .	2
1.1.2	Curvaturas muro rectangular vs bandera con aberturas de 20% del largo. . .	4
2.1.1	Sección Membrana Rectangular y Grados de libertad asociados. . . . .	12
2.2.2	Distribución de tensiones en la sección de hormigón armado. . . . .	13
2.2.3	Modelo para envoltente del hormigón a compresión. . . . .	14
2.2.4	Modelo para envoltente del hormigón a tracción. . . . .	15
2.2.5	Modelo para el comportamiento cíclico del hormigón. . . . .	16
2.2.6	Modelo de reducción o amplificación de la capacidad del hormigón. . . . .	17
2.2.7	Modelo hormigón confinado. . . . .	18
2.2.8	Modelo reducción de capacidad por daño. . . . .	19
2.2.9	Modelación del pandeo de las barras de refuerzo e imperfección inicial. . . . .	21
2.2.10	Curva monotónica del acero. . . . .	21
2.2.11	Modelo cíclico del acero. . . . .	22
2.2.12	Comparación modelo numérico del acero con pandeo vs la respuesta del material, para una relación de esbeltez de $L/d_b = 14$ . . . . .	23
3.2.1	Plano general Laboratorio de Estructuras. . . . .	26
3.2.2	Cuadrante del laboratorio de estructuras destinado para los ensayos. . . . .	27
3.2.3	Marco de Acero. . . . .	28
3.2.4	Actuador. . . . .	29
3.2.5	Gato Hidráulico. . . . .	30
3.2.6	Celda de Carga. . . . .	31

3.2.7	Bombas Hidráulicas utilizadas en los ensayos . . . . .	32
3.3.8	Esquema Muro 1 y 2 (Unidades en <i>mm</i> ). Detalle Pedestal y Viga en Anexo A	37
3.3.9	Esquema Muro 3 y 4 (Unidades en <i>mm</i> ). Detalle Pedestal y Viga en Anexo A	38
3.4.10	Instalación de un Strain Gages. . . . .	40
3.4.11	Esquema General instalación Strain Gages (Unidades en <i>mm</i> ). . . . .	40
3.4.12	Instalación final Strain Gages. . . . .	41
3.4.13	Instalación LVDT. . . . .	42
3.4.14	Esquema general disposición LVDT (Unidades en <i>mm</i> ) . . . . .	43
3.5.15	Montaje General Ensayo. . . . .	45
3.5.16	Sistema de Carga Axial. . . . .	46
3.5.17	Montaje del Sistema de Carga Lateral. . . . .	47
3.5.18	Drift de Carga Establecido. . . . .	48
3.5.19	Sistema de Restricción Lateral. . . . .	49
3.5.20	Sistema de Postensado. . . . .	50
3.5.21	Patrón de manchas generado para Ensayo 1. . . . .	51
4.2.1	Disposición LVDT externos. . . . .	53
4.2.2	Comparación Desplazamiento superior LVDT de control vs Desplazamiento Corregido para muro 2. . . . .	54
4.3.3	Resultados Experimentales Muro 1. . . . .	56
4.3.4	Agrietamiento Muro 1. . . . .	57
4.3.5	Falla Muro 1. . . . .	57
4.3.6	Resultados Experimentales Muro 2. . . . .	58
4.3.7	Agrietamiento Muro 2. . . . .	59
4.3.8	Falla Muro 2. . . . .	60
4.3.9	Resultados Experimentales Muro 3. . . . .	61
4.3.10	Agrietamiento Muro 3, lado discontinuo. . . . .	62
4.3.11	Falla Muro 3. . . . .	62
4.3.12	Resultados Experimentales Muro 4. . . . .	63
4.3.13	Agrietamiento Muro 4 al final de la barra de refuerzo discontinua. . . . .	64
4.3.14	Falla Muro 4. . . . .	65

4.4.15	Localización drift y carga cuando el muro comienza a degradar, además de su falla. . . . .	68
5.3.1	Curva analítica para el Hormigón. . . . .	72
5.3.2	Curva analítica para el Acero vs Curva Acero Ensayado. . . . .	72
5.3.3	Definición zonas de interés, Caso base y bandera. . . . .	74
5.3.4	Distribución de elementos finitos para cada modelo. . . . .	76
5.3.5	Distribución carga axial y lateral en nodos superiores. . . . .	77
5.3.6	Resultados obtenido para Muro 2 utilizando Acero sin Pandeo . . . . .	78
5.3.7	Resultados obtenido para Muro 2 utilizando Acero Con Pandeo . . . . .	78
5.3.8	Carga Axial aplicada a cada muro al inicio del ensayo. . . . .	79
5.4.9	Curva Carga vs Desplazamiento Muro 1. . . . .	80
5.4.10	Curva Carga vs Desplazamiento Muro 2. . . . .	81
5.4.11	Curva Carga vs Desplazamiento Muro 3. . . . .	82
5.4.12	Curva Carga vs Desplazamiento Muro 4. . . . .	83
5.5.13	Puntos de cuadratura seleccionados. . . . .	84
5.5.14	Deformaciones de tracción máximas Muro 2. . . . .	85
5.5.15	Deformaciones de tracción máximas Muro 1. . . . .	86
5.5.16	Deformaciones de tracción máximas Muro 2. . . . .	87
5.5.17	Deformaciones de tracción máximas Muro 3. . . . .	88
5.5.18	Deformaciones de tracción máximas Muro 4. . . . .	89
5.5.19	Deformaciones de tracción máximas Muro 4 para drift del 3% por fotogrametría. . . . .	90
6.2.1	Comparación curvas de deformación de tracción máxima para muro 3 con distinto módulo de elasticidad. . . . .	92
6.3.2	Comparación Curva Carga vs Desplazamiento con distinto largo de refuerzo. . . . .	93
6.3.3	Comparación deformación de tracción máxima con distinto largo de refuerzo. . . . .	94
6.4.4	Curva analítica para el Hormigón. . . . .	95
6.4.5	Resultados obtenidos para modelo muro 2 con carga excéntrica o centrada. . . . .	96
6.5.6	Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Muro 1. . . . .	97
6.5.7	Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Muro 2. . . . .	98
6.5.8	Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Muro 3. . . . .	98

6.5.9	Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Muro 4. . . . .	99
6.5.10	Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Muro 1 y Muro 4 con largo de refuerzo: 2800mm. . . . .	99
6.5.11	Perfil de deformaciones, Sentido Positivo. . . . .	101
6.5.12	Perfil de deformaciones, Sentido Negativo. . . . .	101
6.5.13	Perfil de deformaciones, Sentido Positivo. . . . .	102
6.5.14	Perfil de deformaciones, Sentido Negativo. . . . .	102
6.6.15	Esquema Muro Modelado Ensayo, Muro Más Alto y Muro Más Angosto. Unidades en mm . . . . .	103
6.6.16	Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Muro 1 Más Alto. . . . .	104
6.6.17	Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Muro 1 Más Angosto. . . . .	105
6.6.18	Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Muro 3 Más Alto. . . . .	106
6.6.19	Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Muro 3 Más Angosto. . . . .	106
6.6.20	Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Modelo Flexión Más Corte Muro Más Alto. . . . .	107
6.6.21	Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Modelo Flexión Pura Muro Más Alto. . . . .	108
6.6.22	Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Modelo Flexión Más Corte Muro Angosto. . . . .	108
6.6.23	Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Modelo Flexión Pura Muro Angosto. . . . .	109
6.6.24	Perfil de deformaciones, Sentido Positivo. . . . .	110
6.6.25	Perfil de deformaciones, Sentido Negativo. . . . .	111
6.6.26	Perfil de deformaciones, Sentido Positivo. . . . .	111
6.6.27	Perfil de deformaciones, Sentido Negativo. . . . .	112
6.7.28	LVDT seleccionados para buscar en sus registros la primera fluencia. . . . .	114
6.7.29	Determinación desplazamiento de fluencia Muro 1. . . . .	115
6.7.30	Zona considerada para buscar la primera fluencia del refuerzo. . . . .	116
6.7.31	Elemento que fluye primero en modelo (f+c). . . . .	117
6.7.32	Disposición medidas utilizadas para expresiones de Ahumada [1]. . . . .	118
6.7.33	Resultados obtenido para las curvaturas de los muros modelados. . . . .	122

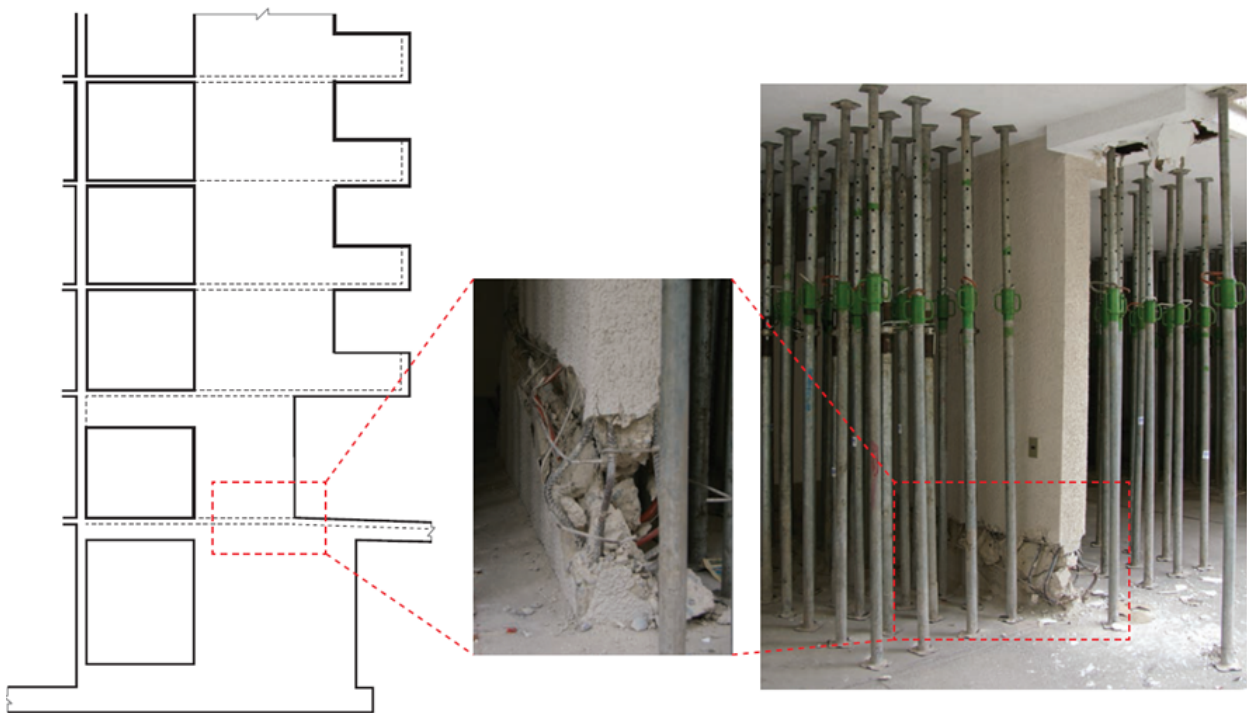
A.1.1	Curvas Carga vs Deformación Unitaria, Barra 8mm. . . . .	136
A.1.2	Curvas Carga vs Deformación Unitaria, Barra 10mm. . . . .	137
A.1.3	Curvas Carga vs Deformación Unitaria, Barra 12mm. . . . .	137
A.1.4	Curvas Carga vs Deformación Unitaria, Barra 16mm. . . . .	138
A.1.5	Curvas Carga vs Deformación Unitaria, Barra 18mm. . . . .	138
A.2.6	Detalle refuerzo Viga. . . . .	139
A.2.7	Detalle Refuerzo Pedestal. . . . .	140
A.3.8	Detalle refuerzo Viga. . . . .	141
A.4.9	Sistema de Carga Axial. . . . .	142
B.1.1	Comparación Desplazamiento superior LVDT de control vs Desplazamiento Corregido para muro 1. . . . .	143
B.1.2	Comparación Desplazamiento superior LVDT de control vs Desplazamiento Corregido para muro 3. . . . .	144
B.1.3	Comparación Desplazamiento superior LVDT de control vs Desplazamiento Corregido para muro 4. . . . .	144
D.1.1	Perfil de deformaciones, Sentido Positivo. . . . .	148
D.1.2	Perfil de deformaciones, Sentido Negativo. . . . .	149
D.1.3	Perfil de deformaciones, Sentido Positivo. . . . .	150
D.1.4	Perfil de deformaciones, Sentido Negativo. . . . .	151
D.2.5	Determinación desplazamiento de fluencia Muro 2. . . . .	152
D.2.6	Determinación desplazamiento de fluencia Muro 3. . . . .	153
D.2.7	Determinación desplazamiento de fluencia Muro 4. . . . .	153
D.3.8	Elemento que fluye primero en modelo (f). . . . .	154
D.3.9	Elemento que fluye primero en modelo (f+c) para casos de mayor esbeltez. . . . .	155
D.3.10	Elemento que fluye primero en modelo (f) para casos de mayor esbeltez. . . . .	156

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes Generales

Chile concentra un alto número de terremotos a lo largo de su historia. Uno de los más fuertes en los últimos años fue en el sur del país, específicamente en la región del Maule, en febrero de 2010 (8.8 Mw). Varios edificios de las construcciones modernas presentan daños en los muros de hormigón armado (HA) (aplastamiento del hormigón, pandeo y fractura de refuerzo de acero); esto se debió al poco o nulo confinamiento utilizado en el diseño, como también la carga axial relativamente alta, el diseño de los muros esbeltos, así como, las discontinuidades en los muros. Debido a requerimientos arquitectónicos, la longitud de los muros cambia entre los pisos destinados a estacionamiento y los pisos superiores, provocando una extensión del muro para los pisos superiores, generando una abertura en los bordes del edificio, configuración denominada comúnmente como muros bandera. En la Figura 1.1.1 se muestran ejemplos de los daños registrados después del evento sísmico extraídos de Manriquez [11] para la configuración constructiva tipo bandera.



**Figura 1.1.1:** Registros fotográficos de daños en muros de hormigón armado tipo bandera después del terremoto de 2010.

### 1.1.1. Antecedentes Experimentales

Los estudios disponibles sobre discontinuidades en la base de muros esbeltos escasean, donde a la fecha no se han realizado ensayos de muros tipo bandera, motivación suficiente para la realización de una investigación que cuantifique el impacto del uso de este tipo de configuración. Autores como Taylor [22] demuestran un importante impacto de las deformaciones verticales a lo largo del muro para configuraciones tipo compuertas, configuración a menudo necesaria para proporcionar espacio para puertas o ventanas, disminuyendo el grado de precisión en la predicción de la respuesta calculada mediante la hipótesis niveles de grandes drift de techo. Si bien el autor propone métodos para el diseño adecuado estas configuraciones, no se profundiza en las deformaciones basales. Los ensayos realizados constan de dos probetas de hormigón, las cuales se basaron en las dimensiones del trabajo de Thomsen [23] y Ali [2] para una posterior comparación de los datos y diseños utilizados de manera más directa.

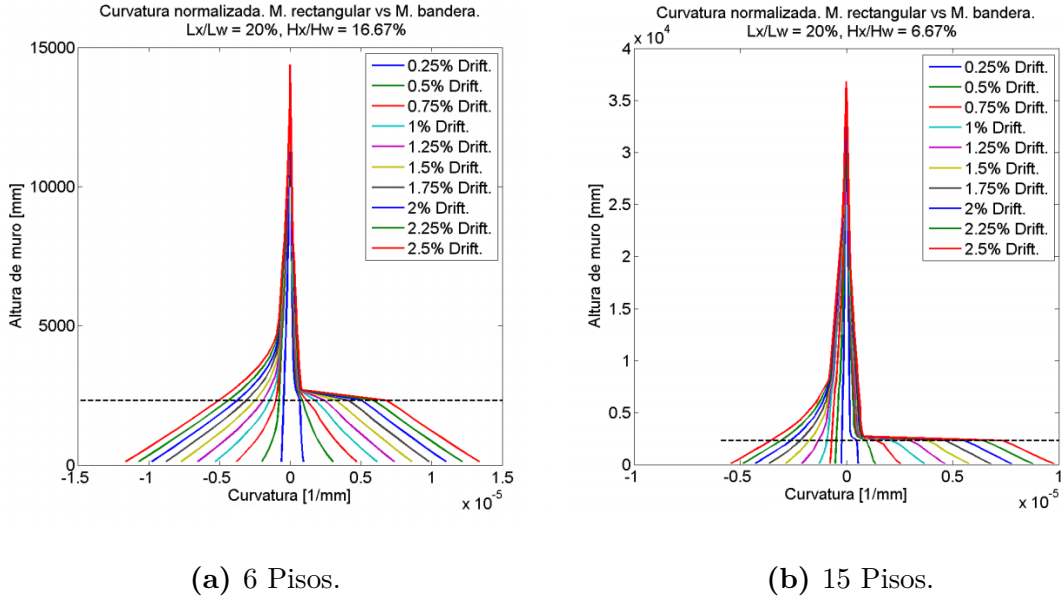


Los principales datos adquiridos son que si la abertura se encuentra cerca del centro del muro, se reducirá ligeramente la capacidad de momento; sin embargo, la resistencia al corte se puede reducir de manera significativa. Por el contrario, una abertura cerca del borde puede tener un impacto mayor tanto de corte y flexión, dependiendo del tamaño de la abertura.

Los resultados experimentales muestran que los muros estructurales con aberturas en la base presentan un comportamiento de histéresis estable y ductilidad significativa. Con la adquisición de datos se pudo determinar que el perfil de deformaciones en la base presenta una desviación de un comportamiento lineal mayor que el observado para muros sin discontinuidades de Thomsen and Wallace [23] y Ali and Wight [2].

### **1.1.2. Antecedentes Numéricos**

Hoy en día los modelos de elementos finitos (FEM) son muy versátiles y cada vez se van potenciando mas en su perfeccionamiento dado su gran potencial y precisión en la resolución de problemas no-lineales, es por eso que el autor Ahumada [1] estudia con estos modelos FEM el comportamiento de muros esbeltos de hormigón armado con aberturas en la base utilizando un análisis no lineal estático (pushover), cuantificando los efectos del corte en las deformaciones de la zona de concentración de daño y desarrollando un modelo matemático que relacione el nivel de abertura con las deformaciones basales. Para los modelos FEM se utilizan elementos tipo membrana, cubriendo unicamente la respuesta en el plano de los elementos, donde cada elemento posee cuatro nodos y un total de 12 grados de libertad (3 por cada nodo: desplazamiento horizontal, vertical y giro en el plano). Los elementos consideran adherencia completa entre capas de hormigón ortotrópico y acero, modelados con leyes constitutivas biaxiales. Para todas las pruebas realizadas utilizó cargas bajo control de desplazamientos para la solución de los problemas no lineales. Algunos resultados de los modelos FEM se pueden apreciar en la Figura 1.1.2 extraída de Massone [14], donde se muestran las curvaturas calculadas en cada capa de elementos finitos, comparando el muro rectangular (cuadrante negativo) con el muro bandera (cuadrante positivo).



**Figura 1.1.2:** Curvaturas muro rectangular vs bandera con aberturas de 20 % del largo.

Para ambos casos en estudio (menor o mayor número de pisos), se observa que las curvaturas tienden a concentrarse al nivel de la discontinuidad, corroborando el comportamiento más rígido sobre la abertura, dado que las deformaciones no son significativas en comparación a la zona inferior.

En la parte analítica se determinó que el modelo para el desplazamiento de fluencia puede ser descrito por dos ecuaciones, donde la ecuación 1.1 es válida para un muro donde todo el daño se concentra en la base, mientras que la ecuación 1.2 es el de mayor efectividad en todo el rango analizado dado que distribuye el efecto de agrietamiento y daño en la altura. Las ecuaciones antes descritas tienen la siguiente forma:

**Modelo de curvatura concentrada en la base:**

$$d_y = \phi_y h_x (h_w - \frac{h_x}{2}) \quad (1.1)$$

**Modelo de curvatura distribuida en la altura:**

$$d_y = \phi_y h_w^2 \rho_b^{0.14} [0.4 - \lambda(1 - \lambda)(1 - 3\eta)] \quad (1.2)$$

Dónde:

$$\phi_y = K \frac{\epsilon_y}{l_w} = \text{curvatura de fluencia.}$$

$$K = 1.25 + 1.69 \frac{P}{A_g f'_c} + 0.65 \rho_b.$$

$P$  = carga axial.

$\rho_b$  = cuantía de refuerzo.

$A_g$  = área bruta de la sección.

$\epsilon_y$  = Deformación de fluencia del acero de borde.

$\lambda = \frac{l_x}{l_w}$  = largo de la abertura relativo al largo del muro.

$\eta = \frac{h_x}{h_w}$  = altura de la abertura relativa a la altura del muro.

Adicionalmente el autor propone que la longitud de rótula plástica se ve incrementada con el nivel de desplazamiento plástico alcanzado, mientras que la cuantía de refuerzo de borde y el endurecimiento tienen menor relevancia, obteniendo así la ecuación 1.3:

$$l_p = (0.2l_w + 0.05z) \left(1 - \frac{1.5P}{f'_c A_g}\right) (6.7 \Delta_p^{0.3}) \quad (1.3)$$

Dónde:

$$z = M/V$$

$$\Delta_p = \frac{(\delta_u - \delta_y)}{h_w} = \text{deriva plástica}$$

Estimaciones de gran utilidad al momento del diseño de muros, ya que se puede conocer las zonas donde se concentraran los mayores daños y así poder reforzar adecuadamente.

### 1.1.3. Propuesta de Estudio

En este trabajo de tesis se propone realizar cuatro ensayos de muros esbeltos de hormigón armado con distintos grados de discontinuidad tipo bandera en la base, esto con el fin de obtener información experimental para poder generar y contrastar con un modelo de elementos finitos (FEM), similar a los ya mencionados [1, 19], validando con la información obtenida por los sistemas de adquisición de datos e instrumentación adecuada. Adicionalmente, se estudiará el efecto de la altura y la longitud de la discontinuidad con respecto a la longitud de la rótula plástica y la máxima compresión y esfuerzos de tracción en el límite de la pared que puede conducir a daños, y se comparará con expresiones desarrolladas por Ahumada [1]. Adicionalmente con los modelos de elementos finitos validados con los ensayos, se realizará un análisis paramétrico, verificando distintas configuraciones o consideraciones en el diseño, dentro de las más importante, estudiar el efecto del corte generando modelos de flexión pura para así comparar con los resultados obtenidos tanto experimental como numéricamente. También otro caso de interés es cuantificar el impacto de este tipo de discontinuidad para muros más esbeltos, logrando de esta forma dar recomendaciones para el diseño estructural.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivos Generales

El objetivo principal de esta tesis, es cuantificar el impacto del nivel de discontinuidad en la base de muros esbeltos de hormigón armado, en específico como varía la capacidad vs deformación entre cada configuración estudiada, además de la localización e inicio del daño, donde se espera una variación en la distribución de plasticidad en la altura entre uno y otro caso según lo descrito en estudios anteriores [1, 13, 14]. Por lo tanto se espera que el muro con la abertura menor tenga un daño anticipado comparado con el muro que tenga la abertura más alta. Adicionalmente se espera que la discontinuidad no tenga problema de daño al corte en la zona de la abertura. Además a través de un modelo en elementos finitos se describirán las respuestas obtenidas en los ensayos, para así poder extrapolar el modelo a estudios de interés. Todo esto se realiza para reducir los problemas observados en los últimos eventos sísmicos ocurridos en nuestro país para este tipo de configuración estructural, mejorando criterios utilizados en la actualidad para el diseño estructural, y también tener la oportunidad de hacer propios criterios o recomendaciones para el diseño.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

1. Diseñar y construir cuatro probetas de hormigón armado para ser ensayadas en el nuevo laboratorio de estructuras, para obtener información necesario para la realización de esta investigación.
2. Desarrollar modelos de elementos finitos basados en los trabajos realizados por Ahumada [1], los cuales se van a comparar con los resultados experimentales.
3. Con los modelos validados, se estudiarán los efectos de utilizar distintos tipos de refuerzo o configuración de muros, ya sea aumentando o disminuyendo el refuerzo de borde, como también triplicando la altura de los muros modelos o disminuyendo el largo del muro

por la mitad, afectando directamente la concentración de los daños en la base.

4. Validar expresiones analíticas propuestas por Ahumada [1] para el cálculo y estimación de desplazamiento elástico para muros con y sin discontinuidades en la base, utilizando los resultados obtenidos de los ensayos y modelos de elementos finitos.
5. Validar expresiones analíticas propuestas por Ahumada [1] para el cálculo y estimación de rótula plástica para muros con y sin discontinuidades en la base, utilizando los resultados obtenidos de los ensayos y modelos de elementos finitos.
6. Se espera obtener una variación en la distribución de plasticidad en la altura, entre uno y otro caso según lo descrito en los trabajos de modelación realizados anteriormente por Ahumada [1]. Por lo tanto se espera observar un inicio adelantado de la fluencia en los muros con abertura comparado al muro rectangular, donde en las aberturas de menor altura, la plasticidad se va a concentrar en la discontinuidad aumentando de forma importante la curvatura, y por ende las deformaciones.

## **1.3. Organización del Informe**

### **Capítulo 1: Introducción**

En este capítulo se da a conocer el trabajo a realizar en esta tesis, proporcionando antecedentes históricos y técnicos que motivan el estudio del impacto de las discontinuidades en la base para muros esbeltos de hormigón armado. Se da a conocer tanto el objetivo general como específicos de esta tesis.

### **Capítulo 2: Modelación Numérica**

En este capítulo se presenta el programa SAFEtoolbox, con las principales características, tipos de materiales y modelación de ellos, para un mejor diseño en elementos finitos de muros esbeltos de hormigón armado.

### **Capítulo 3: Estudio Experimental**

En este capítulo se presenta todo el procedimiento a realizar antes de poder ensayar las probetas, desde el diseño de elementos de carga, como también los criterios utilizados para el diseño y construcción de las mismas probetas. Además se presenta la metodología para los ensayos como los ciclos y nivel de desplazamiento de techo, además de todo el sistema de instrumentación utilizado.

### **Capítulo 4: Resultados Experimentales**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de cada ensayo, como su posterior procesamiento y comparación entre ellos, entregando una medida del impacto de utilizar la configuración tipo bandera. Adicionalmente se analizan los resultados con lo predicho por Ahumada [1].

### **Capítulo 5: Estudios Analíticos**

En este capítulo se presentan los resultados analíticos de los modelos de elementos finitos realizando una comparación de los datos obtenidos con los resultados de los ensayos del capítulo anterior. Se analiza en profundidad su forma de falla y se estudian las deformaciones de tracción máxima para comprender de mejor manera el daño obtenido.

### **Capítulo 6: Análisis Paramétrico**

En este capítulo con los resultados del modelo validado, se extienden los análisis a diferentes casos de estudio, como muros con mas o menos armadura, muros a flexión pura y su impacto, como también el estudio de muros más alto o angostos, estudiando su perfil de deformación a nivel de la base, para así cuantificar el impacto de utilizar discontinuidades.

## Capítulo 7: Discusión y Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones a partir de los resultados obtenidos de los capítulos 4, 5 y 6. También se proporcionan consideraciones para futuros diseños estructurales.



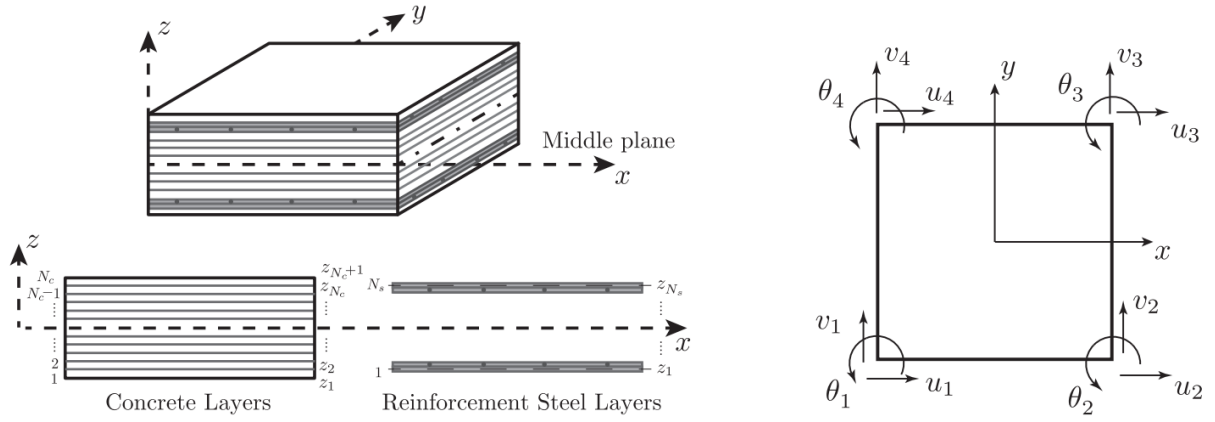
# Capítulo 2

## Modelación Numérica

### 2.1. SAFEToolbox

Es un programa de análisis estructural desarrollado por Rojas [19], el cual consta con una serie de herramientas utilizadas por el software Matlab para la modelación y análisis no lineal de elementos finitos en muros de hormigón armado. Actualmente se encuentran disponibles elementos tipo cascaron o "Shell" planos y elementos tipo membrana de cuatro nodos en capas, que bajo ciertas leyes constitutivas de los materiales de hormigón y acero, se puede representar de buena forma el comportamiento no lineal de los modelos. Adicionalmente el programa dispone de algoritmos de solución para problemas no lineales ya sea por control de desplazamiento o por control de fuerzas.

En este trabajo de tesis se utilizan los elementos tipo membrana de cuatro nodos con un total de 12 grados de libertad (desplazamientos horizontales, verticales y giros en el plano para cada uno de los nodos), tal como se muestra en la Figura 2.1.1 extraída del trabajo de investigación realizado por Rojas [20], donde se obtienen un mayor detalle de lo antes mencionado. En la Figura 2.1.1 se observa el elemento membrana constituido por capas de hormigón y acero, además de sus 12 grados de libertad.



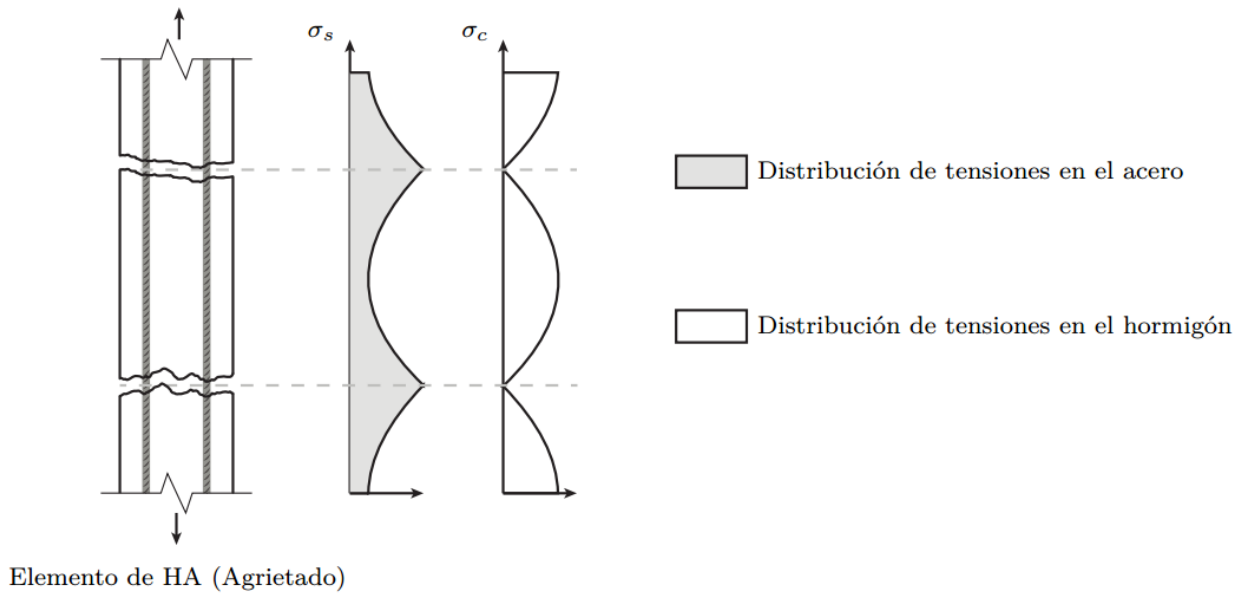
**Figura 2.1.1:** Sección Membrana Rectangular y Grados de libertad asociados.

Adicionalmente se utiliza una interpolación de campo combinado de 9 puntos de cuadratura por elemento para las deformaciones ocurridas dentro de éstos. El algoritmo de solución utilizado es cargas bajo control de desplazamientos, con carga puntual en el techo. Adicionalmente se incorpora el "Factor de Convergencia de Carga", desarrollado por Peña [18], el cual reduce los problemas de convergencia que se presentan en el análisis no lineal.

## 2.2. Propiedades de los materiales

Para la modelación de los muros esbeltos de hormigón armado, se utilizarán las leyes constitutivas de los materiales realizadas por diversos autores, detallando a continuación cada uno de los parámetros utilizados en la construcciones de cada una de las curvas a utilizar.

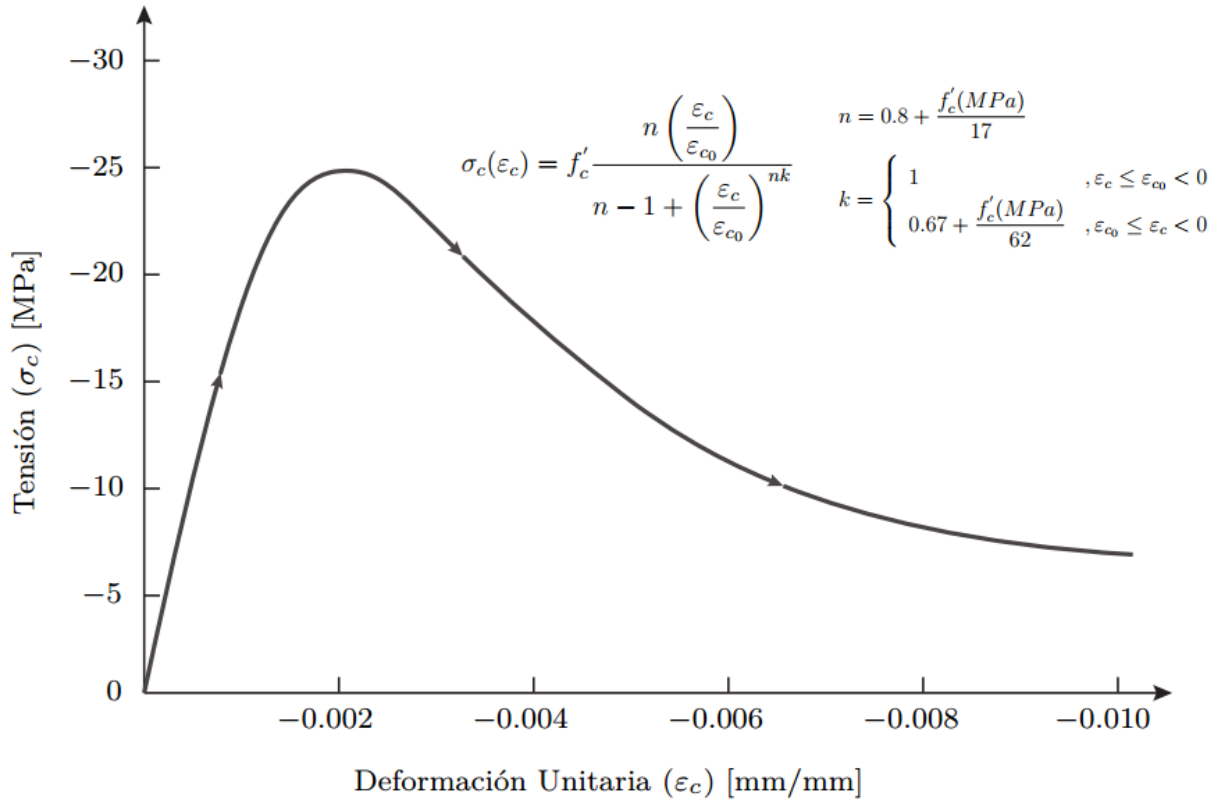
Tanto el hormigón como el acero son capaces de representar la interacción entre ellos en el momento del agrietamiento como se puede apreciar en la Figura 2.2.2, ya que su formulación se rige según las leyes de Belarbi y Hsu [3].



**Figura 2.2.2:** Distribución de tensiones en la sección de hormigón armado.

### 2.2.1. Hormigón

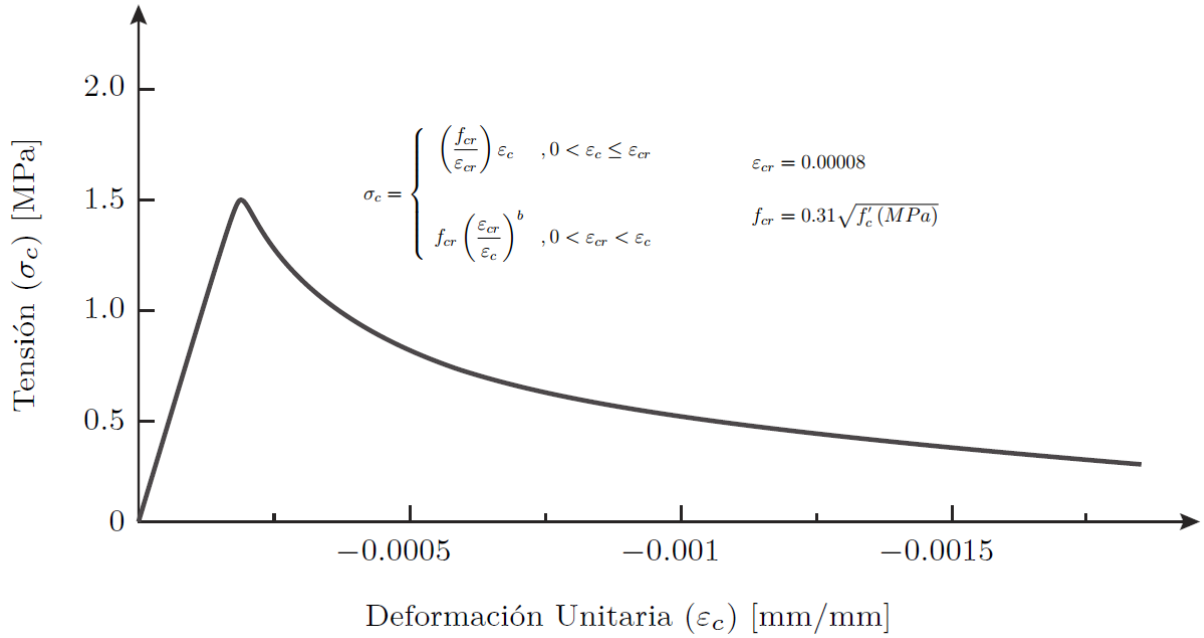
El modelo para la ley constitutiva uniaxial cíclica que se emplea en esta investigación es la desarrollada por Massone [12]. La implementación de este modelo trabaja en función de la envolvente de compresión basada en la curva de Thorenfeldt [24], la cual se puede apreciar en la Figura 2.2.3,



**Figura 2.2.3:** Modelo para envolvente del hormigón a compresión.

Donde  $\varepsilon_{c0}$  y  $f'_c$  son la deformación unitaria y tensión crítica del hormigón en compresión respectivamente, mientras que  $n$  y  $k$  son parámetros de ajuste de la curva, los cuales fueron calibrados por Collins y Porasz [4].

El modelo para la envolvente del hormigón a tracción esta basado en la curva de Belarbi y Hsu [3], la cual se puede apreciar en la Figura 2.2.4,

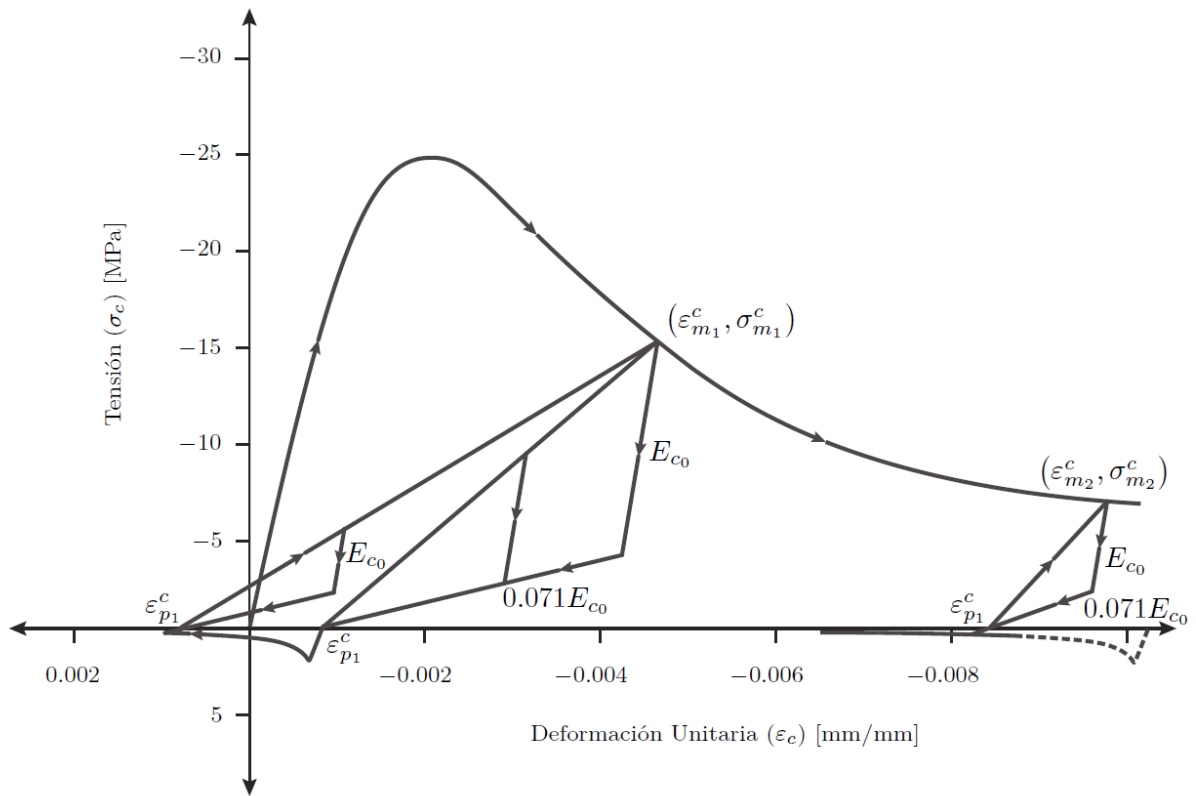


**Figura 2.2.4:** Modelo para envoltente del hormigón a tracción.

Donde  $\varepsilon_{cr}$  y  $f_{cr}$  son la deformación unitaria y tensión de rotura del hormigón en tracción respectivamente, mientras que  $b$  es una constante que depende de la condición de confinamiento, cuyos valores se muestran en la ecuación 2.1

$$b = \begin{cases} 0.4 & , \text{para hormigón confinado según Belarbi y Hsu [3]} \\ 0.6 & , \text{para hormigón no confinado según Rojas [19]} \end{cases} \quad (2.1)$$

El modelo cíclico para el hormigón, como se mencionó anteriormente, esta basado en la curva de Massone [12], la cual se puede apreciar en la Figura 2.2.5,



**Figura 2.2.5:** Modelo para el comportamiento cíclico del hormigón.

Donde al interior de la envolvente, se define por zonas de carga y descarga lineales. Estas zonas dependen de la deformación plástica remanente tanto a la compresión como tracción, las cuales están definidas por las ecuaciones 2.2 y 2.3 respectivamente,

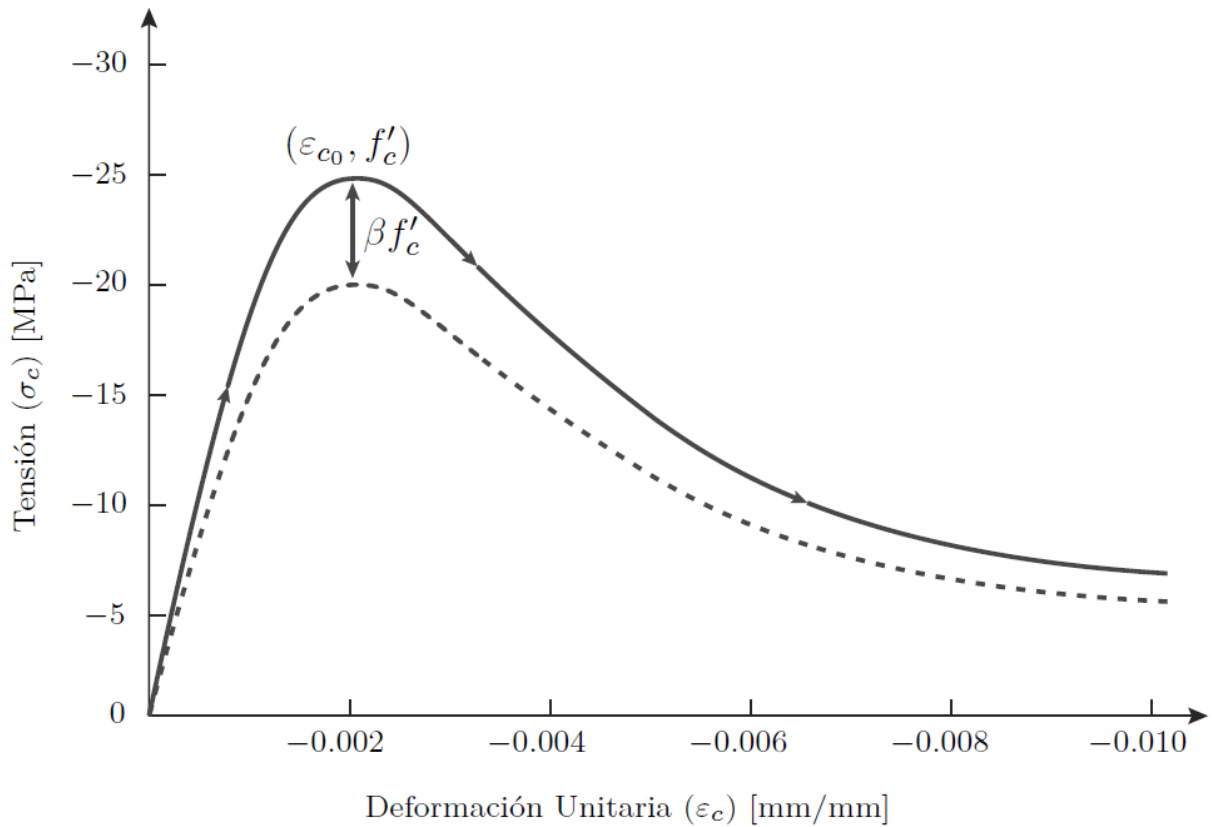
$$\varepsilon_p^c = \varepsilon_m^c \left( 1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon_m^c}{\varepsilon_{c0}}\right)^{\alpha_c}} \right) \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_p^t = \varepsilon_m^t \left( 1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon_m^t}{\varepsilon_{c0}}\right)^{\alpha_t}} \right) \quad (2.3)$$

Donde  $\varepsilon_m^c$  y  $\varepsilon_m^t$  son las máximas deformaciones a compresión y tracción alcanzadas por ciclo

respectivamente, mientras que los coeficientes  $\alpha_c$  y  $\alpha_t$  según Rojas [19] tienen los siguientes valores:  $\alpha_c = 0.32$  y  $\alpha_t = 0.08$ .

Adicionalmente el modelo de hormigón posee tres consideraciones que modifican directamente su capacidad en todo su dominio, como se puede apreciar en la Figura 2.2.6. Estas consideraciones son: confinamiento, daño por carga cíclica y degradación por tracción en la dirección transversal.



**Figura 2.2.6:** Modelo de reducción o amplificación de la capacidad del hormigón.

## Confinamiento

El confinamiento se logra utilizando estribos en los elementos de borde, lo cual produce un aumento en la resistencia a compresión del hormigón, como también una mayor capacidad de deformación (ductilidad), esto se puede apreciar en la Figura 2.2.7, cuya curva fue determinada por Saatcioglu y Razvi [21],

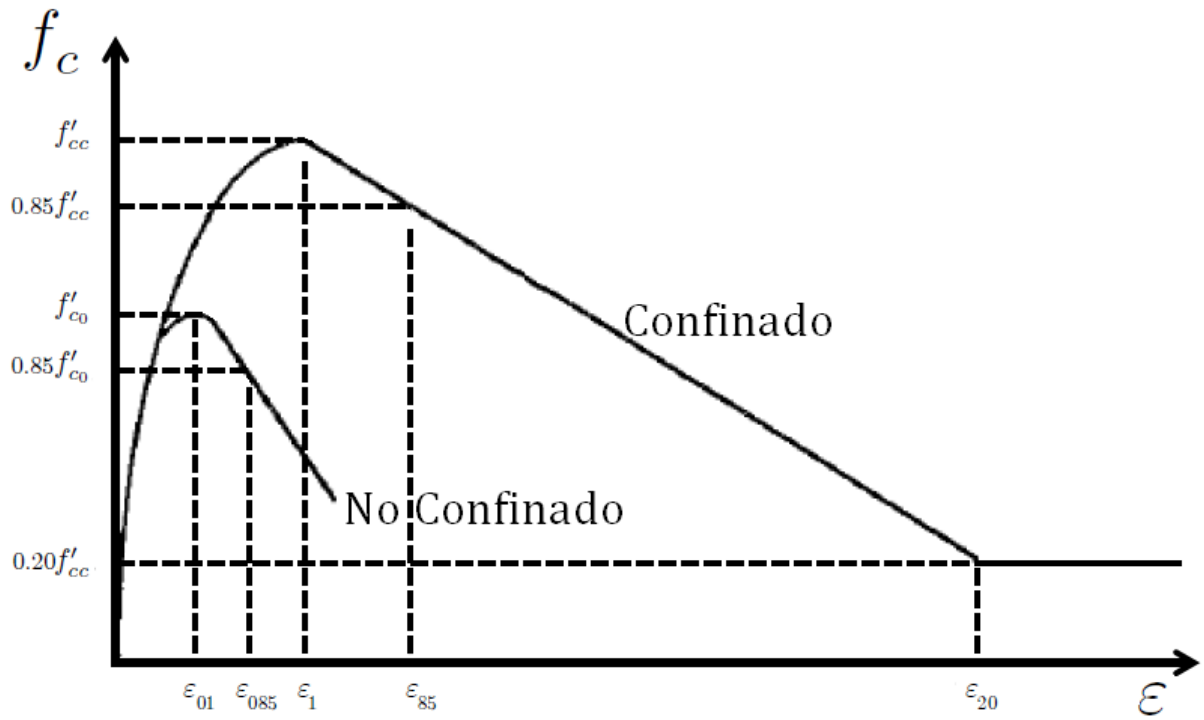


Figura 2.2.7: Modelo hormigón confinado.

La capacidad del hormigón se determinan según las ecuaciones 2.4 y 2.5.

$$\beta_c = 1 + K \quad (2.4)$$

$$K = \frac{k_1 f_{le}}{f'_c} \quad (2.5)$$

Donde:

$$k_1 = 6.7(f_{le})^{-0.67} \quad (2.6)$$

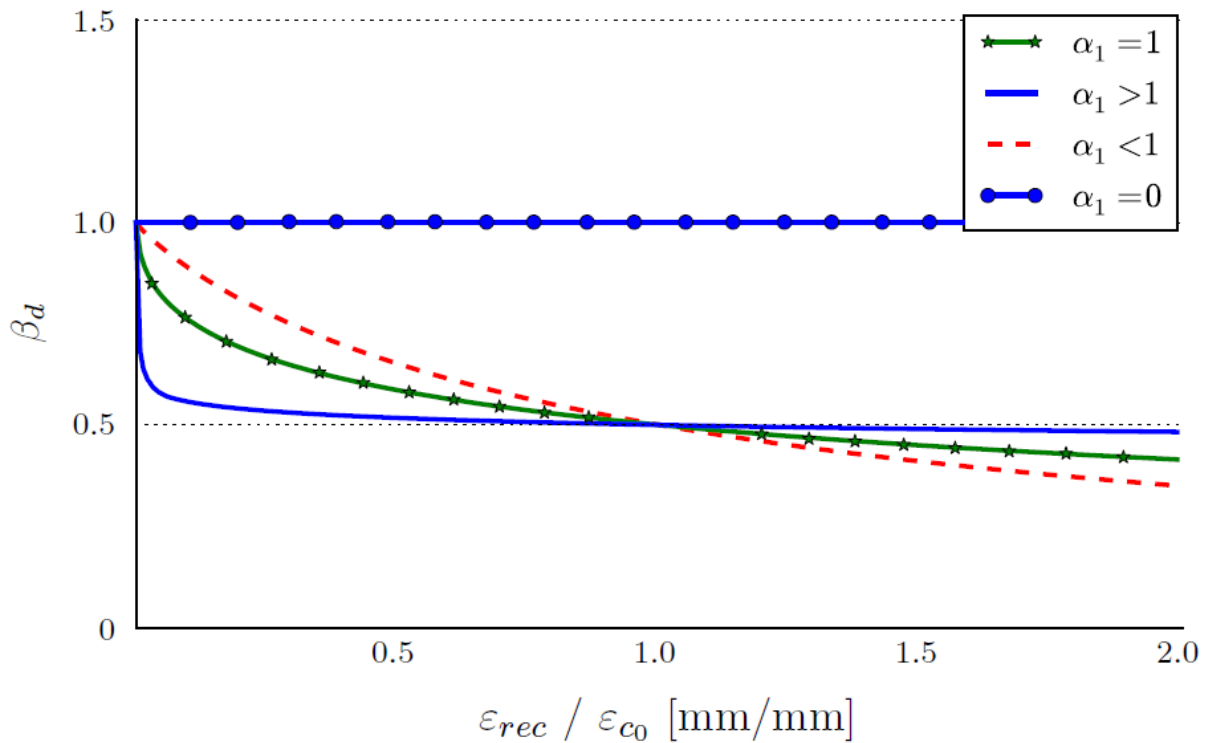


## Daño por carga cíclica

El deterioro del hormigón debido a los ciclos de carga y descarga se encuentra en la investigación de Palermo y Vecchio [17], los cuales proponen la ecuación 2.7,

$$\beta_d = \frac{1}{1 + \alpha_1 \left( \frac{\varepsilon_{rec}}{\varepsilon_{c0}} \right)^{\alpha_2}} \quad (2.7)$$

Donde  $\varepsilon_{rec}$  es la diferencia entre la máxima deformación unitaria a compresión y tracción durante los ciclos de carga y descarga, mientras que las constantes  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  controlan la magnitud y forma en que se aplica el daño respectivamente. En la Figura 2.2.8 del trabajo realizado por Peña [18], se puede apreciar la reducción de la capacidad del hormigón, donde se escoge un  $\alpha_2 = 0.5$  fijo y se hace variar  $\alpha_1$ ,



**Figura 2.2.8:** Modelo reducción de capacidad por daño.

## Degradación por tracción en la dirección transversal

Este tipo de reducción en la capacidad del hormigón se debe a tracciones presentes en la dirección principal perpendicular, cuyo valor se determina según la ecuación 2.8, propuesta por Belarbi y Hsu [3],

$$\beta_s = \frac{k}{\sqrt{1 + k_\theta \cdot \varepsilon_{tracción}}} \quad (2.8)$$

Donde  $\varepsilon_{tracción}$  es la deformación unitaria de tracción en la dirección perpendicular, mientras que los coeficientes  $k$  y  $k_\theta$  quedan definidos por las ecuaciones 2.9 y 2.10,

$$k = \begin{cases} 0.9 & , \text{según Belarbi y Hsu [3]} \\ 1.0 & , \text{para resultados más estables según Rojas [19]} \end{cases} \quad (2.9)$$

$$k_\theta = \begin{cases} 250 & , \text{para carga secuencial} \\ 400 & , \text{para carga proporcional} \end{cases} \quad (2.10)$$

### 2.2.2. Acero Con Pandeo

La ley constitutiva uniaxial del acero cíclico utilizada en esta tesis, corresponde a la desarrollada por Massone [15], la cual trabaja a partir de la envolvente de tracción y compresión monótonica del acero. El modelo de pandeo considera plasticidad concentrada, la cual se modela con 4 rótulas plásticas (Massone [16]) distribuidas a lo largo de la barra como: una en cada extremidad y dos a media altura de la longitud libre de la barra. Este modelo es capaz de representar el comportamiento de una barra susceptible de pandearse bajo cargas axiales e imperfecciones iniciales, asumiendo que el posible pandeo ocurre entre estribos consecutivos. En la Figura 2.2.9 se muestra el modelo utilizado para las barras con pandeo.

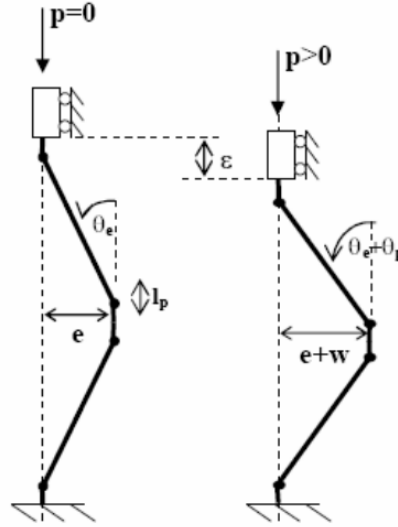


Figura 2.2.9: Modelación del pandeo de las barras de refuerzo e imperfección inicial.

En la Figura 2.2.10 se presenta la curva monótonica del acero a tracción desarrollada por Massone [16],

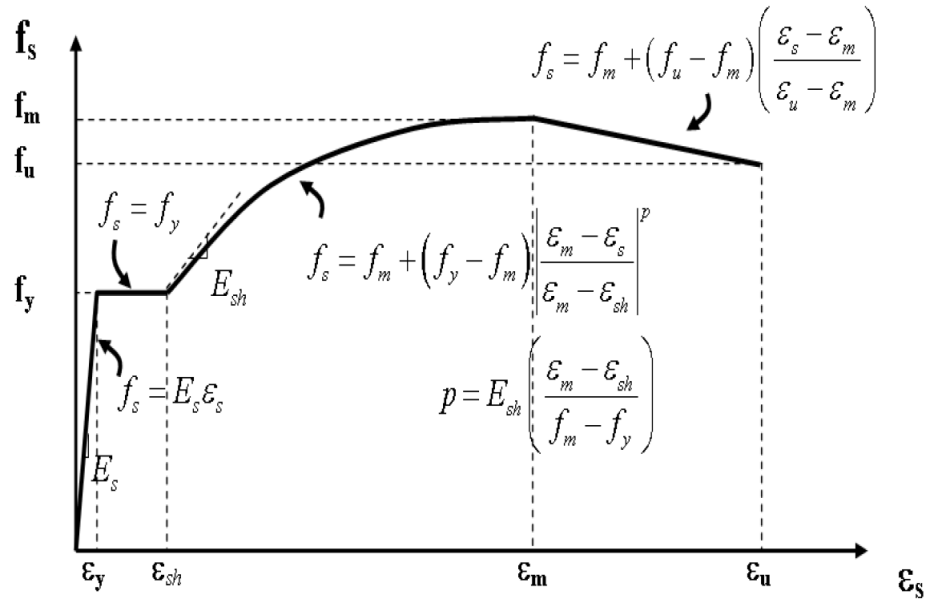


Figura 2.2.10: Curva monótonica del acero.

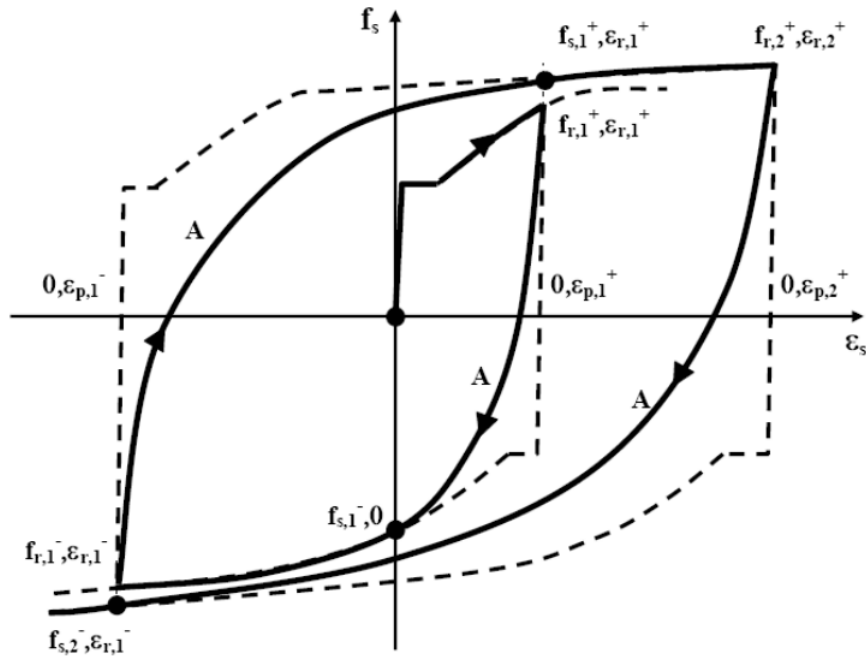
Las deformaciones y tensiones en compresión pueden ser determinadas por las ecuaciones 2.11 y 2.11 respectivamente, las cuales fueron desarrolladas por Dodd y Restrepo [8] a partir de las deformaciones y tensiones del acero a tracción,

$$\varepsilon_{s,c} = -\frac{\varepsilon_{s,t}}{1 + \varepsilon_{s,t}} \quad (2.11)$$

$$f_{s,c} = -f_{s,t}(1 + \varepsilon_{s,t})^2 \quad (2.12)$$

Donde  $\varepsilon_{s,c}$  y  $f_{s,c}$  son las deformaciones y tensiones en compresión (negativa) para las correspondientes deformación  $\varepsilon_{s,t}$  y tensión  $f_{s,t}$  en tracción (positiva).

Conocido el comportamiento monótonico del acero, tanto a tracción como compresión, en la Figura 2.2.11 se define el modelo cíclico del acero,



**Figura 2.2.11:** Modelo cíclico del acero.

El modelo cíclico mantiene como envolvente las curvas del acero a tracción y compresión definidas anteriormente, unidas por una curva *A* como se aprecia en la Figura 2.2.11, la cual considera una reducción de la capacidad (Bauschinger) para cada ciclo que realiza. Lo anterior se logra realizando equilibrio seccional utilizando tanto las propiedades de los materiales como la deformada, para así obtener el pandeo de las barras. En la Figura 2.2.12 extraída del trabajo de Massone [15], se muestra el resultado de esta modelación.

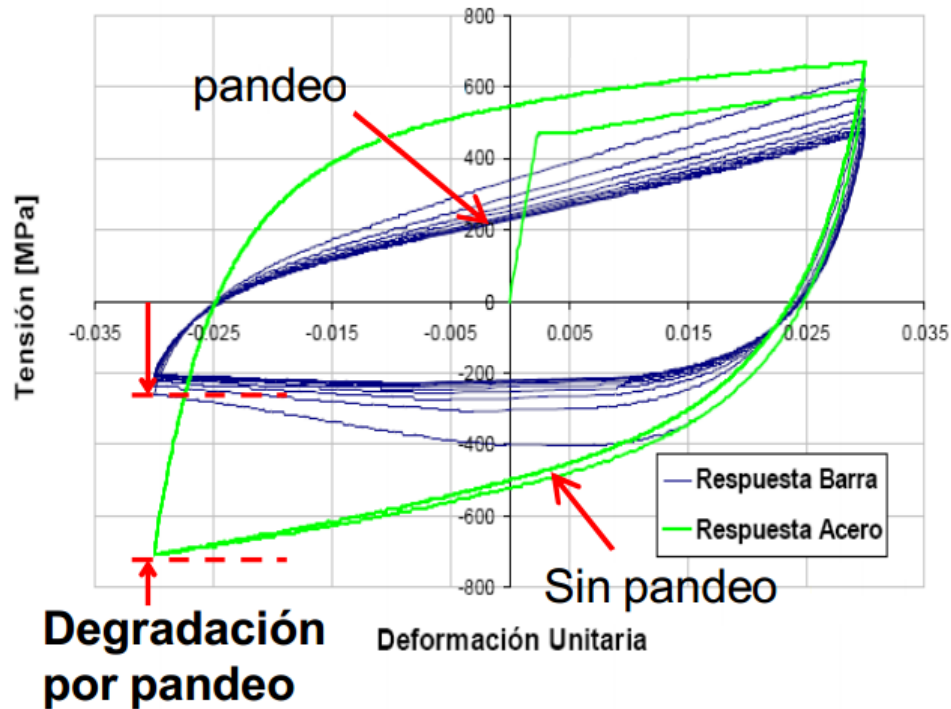


Figura 2.2.12: Comparación modelo numérico del acero con pandeo vs la respuesta del material, para una relación de esbeltez de  $L/d_b = 14$ .

Adicionalmente el modelo de acero considera el efecto de fluencia aparente desarrollado por Belarbi y Hsu [3], esto significa una reducción de la tensión de fluencia  $f_y$  y el coeficiente  $b$  de endurecimiento debido a que las barras de acero están embebidas en el hormigón. Este comportamiento queda descrito por las ecuaciones 2.13, 2.14 y 2.15,

$$f_n = (0.93 - 2B)f_y \quad (2.13)$$

$$b_n = 0.02 + 0.25B \quad (2.14)$$

$$B = \frac{1}{\rho_l} \left( \frac{f_{cr}}{f_y} \right)^{1.5} \quad (2.15)$$

Donde  $f_n$  es la tensión de fluencia aparente,  $b_n$  el coeficiente de endurecimiento aparente,  $\rho_l$  la cuantía longitudinal del acero y  $f_{cr}$  la tensión de rotura del hormigón.

# Capítulo 3

## Estudio Experimental

### 3.1. Introducción

Para lograr llevar a cabo todos los procesos a lo largo de este trabajo de investigación, se ha dispuesto de un grupo de trabajo de 3 personas, el cual consta de dos alumnos de magister en su etapa de desarrollo de tesis y un ingeniero civil a cargo de llevar un control de las actividades diarias, como también el cumplimiento de metas y fechas establecidas por la comisión, con el fin de obtener resultados adecuados y en un tiempo razonable a lo esperado; en conjunto se trabajó con dos encargados del laboratorio de estructuras, los cuales brindan todo su apoyo y conocimiento tanto en actividades de construcción como en la parte teórica y relacionada a la instrumentación y adquisición de datos. Cabe destacar que si bien se trabaja en conjunto con otro alumno de magister en toda la preparación del laboratorio y probetas a ensayar, los temas a desarrollar una vez obtenido los resultados experimentales, apuntan en distintas direcciones.

## 3.2. Laboratorio de Estructuras y Su Equipamiento

El laboratorio de estructuras recién construido el año 2016 se ubica en las inmediaciones de la Universidad de Chile, más específicamente en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Su construcción contempla una superficie total de más de  $200m^2$ , el que posee un muro de reacción de dimensiones  $3.7m \times 3.95m \times 1.4m$  (*Alto x Largo x espesor*) y una losa de reacción de dimensiones  $18.45m \times 9.7m \times 0.6m$  (*Largo x Ancho x espesor*). Ambas construcciones disponen de perforaciones espaciadas cada  $40cm$  en sus direcciones principales, además fueron diseñadas para soportar cargas de  $100tonf$  aplicadas en la parte superior del muro y  $100tonf$  aplicadas en el centro de la losa. La finalidad de este laboratorio es permitir la correcta realización de ensayos tanto para este trabajo de tesis como para futuros estudios. En la Figura 3.2.1 se presenta un plano general del laboratorio, mientras que en la Figura 3.2.2 se muestra el espacio destinado ya construido para la realización de los ensayos.

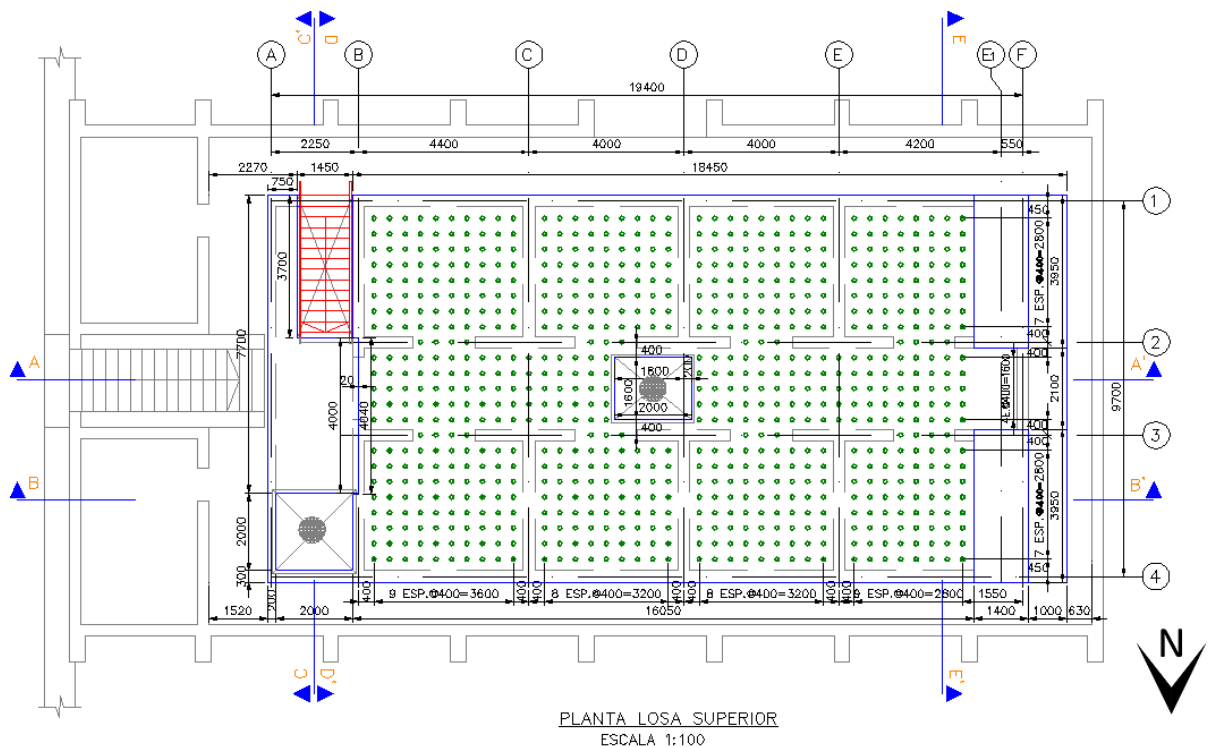


Figura 3.2.1: Plano general Laboratorio de Estructuras.





**Figura 3.2.2:** Cuadrante del laboratorio de estructuras destinado para los ensayos.

Adicionalmente y dado las grandes dimensiones de los ensayos a realizar, se requiere una serie de estructuras y herramientas adicionales, las cuales se detallan a continuación.

### **3.2.1. Marco de Acero**

Se construyó un marco de acero con la finalidad de poder izar y trasladar las probetas o cualquier elemento de gran tamaño o peso dentro del laboratorio. Sus dimensiones aproximadas en planta de  $2.66m$  de largo y  $2.01m$  de ancho, mientras que su altura total es de  $4.87m$ , gracias a un tecele instalado en su parte superior posee una capacidad de levante de  $5tonf$ . El sistema dispone de dos puntales laterales, los cuales pueden ser ubicados en dos posiciones: la primera posición a  $3.2m$  de altura esta destinada para poder aplicar la restricción lateral a la probeta de hormigón armado, mientras que la segunda posición unos  $50cm$

más arriba aproximadamente, esta destinada para poder desplazar y posicionar el marco en el laboratorio sin toparse con la altura de las probetas, cumpliendo así su finalidad de izar los muros a ensayar. Adicionalmente el marco de acero posee cuatro ruedas, una en cada una de sus columnas, lo cual permite su movilidad y así ser posicionado en cualquier parte del laboratorio, abriendo un amplio espectro de utilidades. En la Figura 3.2.3 se muestra el marco de acero al momento de ser ingreso al laboratorio.



**Figura 3.2.3:** Marco de Acero.

### 3.2.2. Actuador

Se dispone de un actuador con su sistema de control, que funciona a través de un mecanismo hidráulico, permitiendo que el pistón se expanda o contraiga un máximo de  $600\text{mm}$  y un mínimo de  $130\text{mm}$  respectivamente. El sistema de control permite regular la presión con que circula el fluido para accionar el actuador, permitiendo aumentar o disminuir su capacidad, donde las cargas o deformaciones aplicadas son registradas por una celda de carga propia del actuador, la cual alcanza un valor máximo de capacidad de empuje superior a  $100\text{ton.f}$ . Para una correcta aplicación de la carga, el actuador debe trabajar como una biela, por lo cual se manda a construir una rotula faltante para así permitir que aplique solo carga longitudinal al muro a la altura del techo. En la Figura 3.2.4 se muestra el actuador.



Figura 3.2.4: Actuador.

### 3.2.3. Gatos Hidráulicos

Para efectos de los ensayos se disponen de cuatro gatos hidráulicos además de su sistema propio de control, los cuales serán utilizados para diferentes funciones, tanto postensado o carga axial, además de facilitar el destensado de ser necesario. Mediante el sistema de control se podrá aplicar la carga tanto para postensado o como carga axial, dado que cada gato hidráulico tiene una capacidad de  $150\text{tonf}$  a  $1000\text{Psi}$ . Para la aplicación de las cargas, se dispondrán de barras de acero con hilo de  $15\text{mm}$  hasta  $32\text{mm}$  de diámetro, las cuales pasarán a través del gato para poder ser ancladas en la parte superior mediante un sistema de placa de acero más tuerca, mientras que en el extremo inferior, la barra pasará a través del muro de hormigón armado ya sea para anclar la rótula al muro de reacción o a través del pedestal para aplicación de la carga axial, donde será anclada en la parte inferior con el mismo sistema de placa más tuerca. Para lograr llegar a la carga deseada, el sistema de control hará circular aceite por las mangueras hasta la cantidad de gatos a utilizar para darles la orden de extenderse o comprimirse. En la Figura 3.2.5 se aprecia uno de los gatos hidráulicos a utilizar.



Figura 3.2.5: Gato Hidráulico.

### 3.2.4. Celda de Carga

Para medir la carga aplicada por los gatos hidráulicos se utilizó una celda de carga disponible en el departamento de Ingeniería Civil, la cual registra las diferencias de voltaje al aplicarle cierta deformación o carga sobre esta. Para poder cuantificar los valores obtenidos, la celda tuvo que ser calibrada con ayuda de una Máquina Universal la cual mide carga y desplazamientos, obteniendo así la relación carga aplicada con los volt medidos,  $1[kgf] = 18966 \cdot Volt - 1.8334$ . Finalmente la celda de carga es conectada a un computador y con la ayuda del software Labview se registran los voltajes, además incorporando la relación anterior en la interfase del Labview, se puede monitorear en tiempo real la carga que está siendo aplicada a través de los gatos hidráulicos. En la Figura 3.2.6 se muestra la celda utilizada en los ensayos.



**Figura 3.2.6:** Celda de Carga.

### 3.2.5. Bombas Hidráulicas

Tanto el sistema de control del actuador como el de los gatos hidráulicos consta de una bomba hidráulica cuya función es regular la presión del aceite interno, para así convertirlo en una extensión o compresión del actuador o gato hidráulico. Ambas bombas cuentan con dos mangueras que controlan la entrada y salida del aceite. En la Figura 3.2.7 se presentan las bombas hidráulicas utilizadas en los ensayos.



(a) Bomba para Actuador



(b) Bomba para Gatos Hidráulicos

**Figura 3.2.7:** Bombas Hidráulicas utilizadas en los ensayos

### 3.3. Diseño y Fabricación de Probetas

En este trabajo de tesis se diseñan y construyen cuatro probetas de hormigón armado, donde se dispone de una rectangular que será el caso base, mientras que las otras tres restantes tendrán distinto grado de discontinuidad en la base, para así tener una mayor versatilidad de casos de estudios. El diseño de la primera probeta o muro base, nos permitirá generar el diseño de los muros tipo bandera. Para su diseño, primero se definió las dimensiones a trabajar, es decir,  $2.65m$  de altura,  $0.9m$  de largo y  $15cm$  de espesor, esto debido a las capacidades de ensayo que nos permite el laboratorio. Con las dimensiones del muro, se dispuso una cuantía nominal de refuerzo longitudinal del 5% considerando el cabezal del muro igual al 10% de su largo, y se definió el nivel de carga axial nominal a aplicar igual a  $0.1f'_cA_g$ , considerando  $f'_c = 25MPa$ . Con lo anterior se utilizó el diagrama de interacción P-M [9], para así poder determinar la resistencia a flexión y corte (dividiendo el momento nominal por la altura del muro) para la probeta en estudio. Con todo lo anterior y utilizando cuantía mínima nominal para el refuerzo transversal de  $\rho_{min} = 0.25\%$  tanto vertical como horizontal, se realizó un modelo computacional en SAP2000, para obtener la deformación unitaria de la fibra más comprimida de hormigón, donde de forma paralela se utilizó la ecuación simplificada de la línea neutra de Massone [13] para tener una mayor confiabilidad de los datos obtenidos y así poder confinar horizontal y verticalmente de forma más correcta y precisa el muro. Finalmente se comprobó el desplazamiento máximo solicitado para el ensayo donde se obtiene la falla deseada. En este punto también se diseña la viga de transferencia de hormigón armado cuyas dimensiones en corte son de  $30cm$  de alto y  $40cm$  de ancho, mientras que su largo será el ancho máximo de cada muro según la Tabla 3.1 donde se dispuso de armadura mínima y se prosiguió a comprobar que no presentara problemas de flexión o corte. Finalmente los muros tipos banderas se arman extendiendo la armadura longitudinal y transversal según corresponda a la parte proporcional extra de muro, esto se puede apreciar en la Figura 3.3.8 para su mayor entendimiento. Las dimensiones finales de las cuatro probetas se resumen en la Tabla 3.1, mientras que los refuerzos reales utilizados se detallarán en la sección 3.3.2.

**Tabla 3.1:** Resumen dimensiones para cada muro de hormigón armado a ensayar.

	Alto [mm]	Ancho [mm]	Abertura <i>alto x ancho</i> [mm x mm]
Especimen 1	2650	900	-----
Especimen 2	2650	1150	300 x 250
Especimen 3	2650	1400	300 x 500
Especimen 4	2650	1150	600 x 250

Adicionalmente, para todos los muros a ensayar, se les construye un pedestal cuyas dimensiones en planta es de  $1.4m$  de largo y  $70cm$  de ancho, mientras que su altura es de  $40cm$ . Este pedestal dispone de ocho perforaciones equidistantes que sirven para poder anclar el muro a la losa de reacción.

### 3.3.1. Resistencia Materiales

Todos los materiales utilizados en la confección de las probetas están normados y son utilizados regularmente en las construcciones Chilenas, los cuales son: (1) Hormigón  $H-30$ :  $25MPa$  resistencia a la compresión nominal; (2) Acero  $A630-420H$ :  $420MPa$  tensión de fluencia nominal. En las Tablas 3.2 y 3.3 se resumen los valores de resistencia medidos para cada material respectivamente al momento del ensayo además de su desviación estándar ( $\sigma$ ), donde se ensayaron tres cilindros de hormigón por muro, los cuales fueron confeccionados al momento del hormigonado de las probetas el día 20/06/2015. Cabe destacar que por la proximidad de los últimos tres ensayos, se decidió considerar el promedio de los nueve cilindros ensayados, para obtener una muestra mas representativa, así también simplificar los cálculos para la modelación, es así como para los tres últimos ensayos se utiliza una tensión crítica del hormigón igual a  $38.3MPa$  como valor representativo. Para el acero se ensayaron solo dos barras de cada dimensión utilizada en la confección de los muros ya que todas eran de una misma partida de fabricación. Las barras de acero utilizadas para el confinamiento  $\phi_6mm$  son  $A440-280H$ :  $280MPa$  tensión de fluencia nominal, estas no fueron ensayadas dado que no son un elemento representativo, además no se fracturaron durante el ensayo, por lo cual nos quedaremos con los valores nominales.



**Tabla 3.2:** Resistencia crítica del hormigón a compresión.

Tiempo de fraguado	Fecha ensayo	$f'_{c1}$ [MPa]	$f'_{c2}$ [MPa]	$f'_{c3}$ [MPa]	$f'_{c_{promedio}}$ [MPa]	$\sigma_{fc}$ [MPa]
16 días	06/07/2015	22.8	- - -	- - -	22.8	- - -
30 días	20/07/2015	27.3	27.9	- - -	27.6	0.30
Ensayo muro 1 (222 días)	28/01/2016	32.7	33.2	33.2	33.0	0.24
Ensayo muro 2 (262 días)	08/03/2016	39.1	41.7	40.4	40.4	1.06
Ensayo muro 3 (270 días)	16/03/2016	35.5	34.7	38.6	36.3	1.68
Ensayo muro 4 (276 días)	22/03/2016	40.2	41.1	33.7	38.3	3.30

**Tabla 3.3:** Resistencia y deformación unitaria para barras de acero a tracción (curvas Carga vs Deformación se encuentran en el Anexo A).

Diámetro [mm]	$f_{y1}$ [MPa]	$f_{y2}$ [MPa]	$f_{y_{promedio}}$ [MPa]	$\sigma_{fy}$ [MPa]	$\varepsilon_{y1}$	$\varepsilon_{y2}$	$\varepsilon_{y_{promedio}}$	$\sigma_{\varepsilon_y}$
$\phi_8$	493.6	491.4	492.5	1.1	2.6	2.9	2.8	0.2
$\phi_{10}$	481.9	473.1	477.5	4.4	2.9	2.3	2.6	0.3
$\phi_{12}$	463.4	479.0	471.2	7.8	2.6	2.6	2.6	0.0
$\phi_{16}$	497.2	494.5	495.9	1.4	2.5	2.7	2.6	0.1
$\phi_{18}$	463.6	467.4	465.5	1.9	2.5	2.5	2.5	0.0

### 3.3.2. Armadura de Refuerzo de Probetas

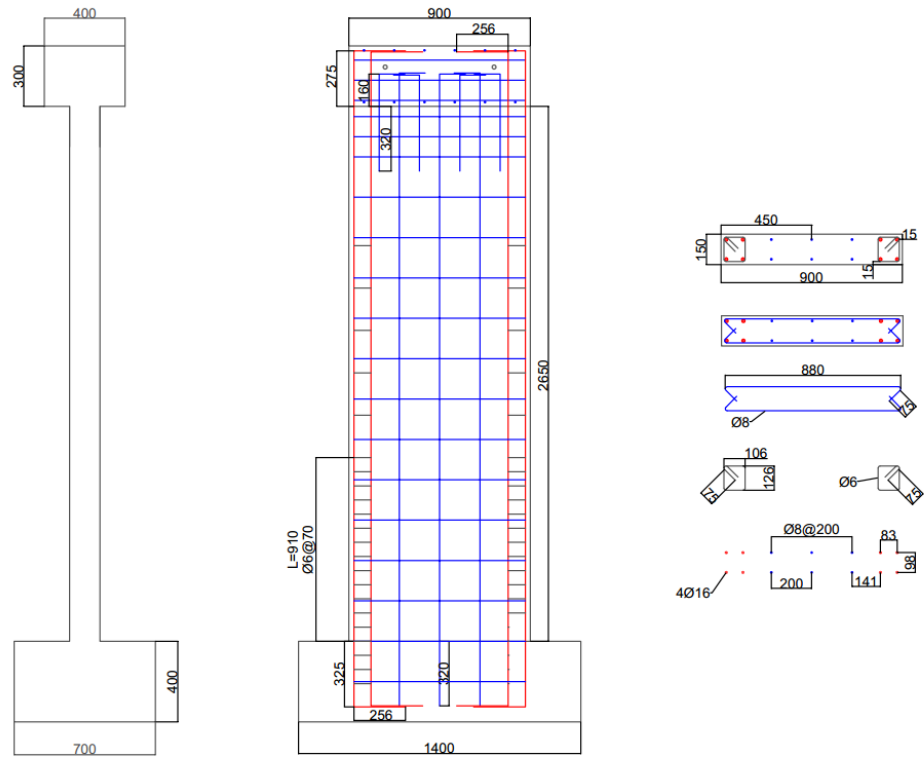
En las Figuras 3.3.8 y 3.3.9 se pueden observar las cuatro probetas de muros de hormigón armado a ensayar. Para poder verificar el nivel de discontinuidad en la base de estos muros tipo bandera, se prosiguió a diseñar un primer muro con una longitud de  $90cm$  (Figura 3.3.8a), donde se extenderá progresivamente el largo del muro a partir de una cierta altura para las tres muestras restantes. Para dos de las probetas se ha extendido el muro sobre una longitud de  $25cm$  y  $50cm$ , a una altura de  $30cm$  (Figura 3.3.8b y 3.3.9a respectivamente), mientras que para la última probeta se ha aumentado la longitud en  $25cm$  pero su altura aumentó a  $60cm$  (Figura 3.3.9b).

Para todos los muros a ensayar, se dispuso de  $4\phi_{16}$  como refuerzo de borde, esto debido a que por factibilidad de construcción se decidió utilizar menos barras pero de mayor tamaño para tener mayor espaciamiento y facilitar su construcción. Para el confinamiento se utilizó estribos  $\phi_6@70mm$  en un largo total de un metro, esto es determinado por la norma Chile ACI 318-08 [6], primero determinando si se debe confinar según la sección 21.9.6.2, mientras que para el espaciamiento utilizado se calculó según los criterios 21.6.4.2 a 21.6.4.4. Para los

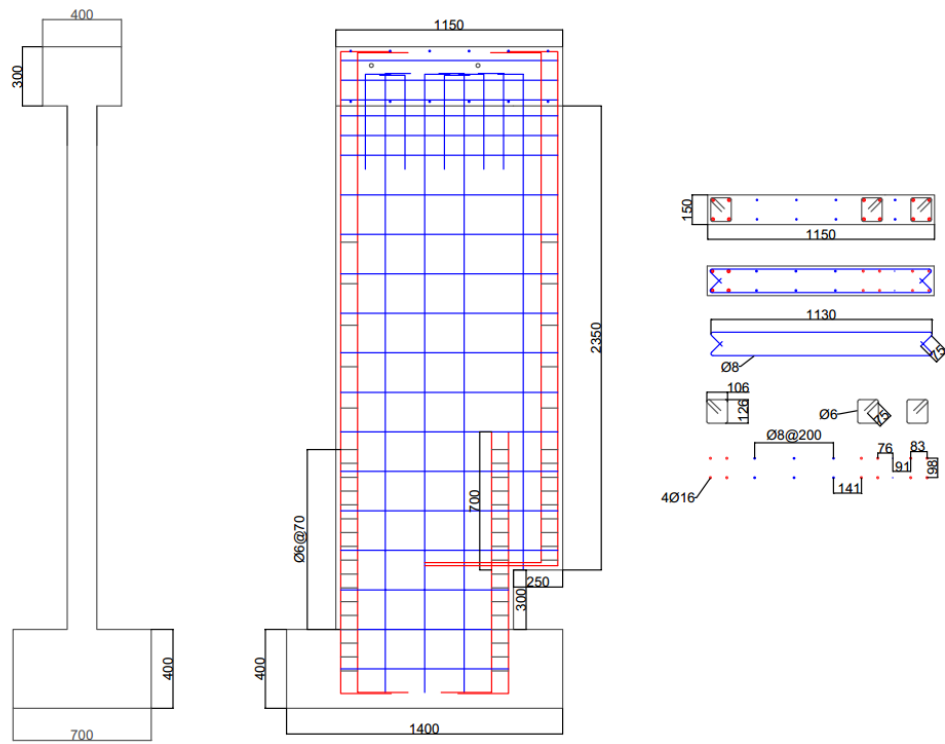
muros tipo bandera, se decidió como criterio de diseño, extender la armadura de borde de la bandera (donde esta la abertura) en un revés (pasando de vertical a horizontal) hasta el centro del muro (parte rectangular), lo que da una distancia mayor al largo de desarrollo que corresponde a  $l_d = 640mm$  aproximadamente según las secciones 12.2.2 y 12.5.2 [6], esto con la finalidad de evitar problemas con la transferencia del corte en la discontinuidad. Adicionalmente la armadura de borde se extiende un largo de desarrollo en vertical tanto para el pedestal como la viga de hormigón armado en la parte superior, para aumentar su anclaje y no sufrir daño adicional no deseado según las secciones antes mencionadas. Para la parte central de los muros, se dispuso de una doble malla de acero, con cuantía mínima de  $\rho = 0.25\%$ , la cual resulta en  $\phi_8@200mm$  para ambas direcciones. También como criterio de diseño se dispuso el doble armadura de corte en la parte superior del muro, esto para evitar daños en la viga de transferencia, que los daños en el muro se centren en la base y poder modelar un techo elástico. En la Tabla 3.4 se resumen las cuantías de refuerzo tanto verticales y horizontales utilizadas, comparando con los valores nominales de diseño.

**Tabla 3.4:** Resumen cuantías de refuerzo utilizadas en las probetas.

Refuerzo	$\rho_{nominal}$	$\rho_{real}$	Armadura Utilizada	$l_d$ (sin gancho - con gancho)
Borde	5.00 %	4.00 %	$4\phi_{16}$	$640mm - 325mm$
Central vertical	0.25 %	0.32 %	$\phi_8@200mm$	$320mm - 160mm$
Central horizontal	0.25 %	0.34 %	$\phi_8@200mm$	No aplica
Confinamiento	0.54 %	0.54 %	$\phi_6@70mm$	No aplica

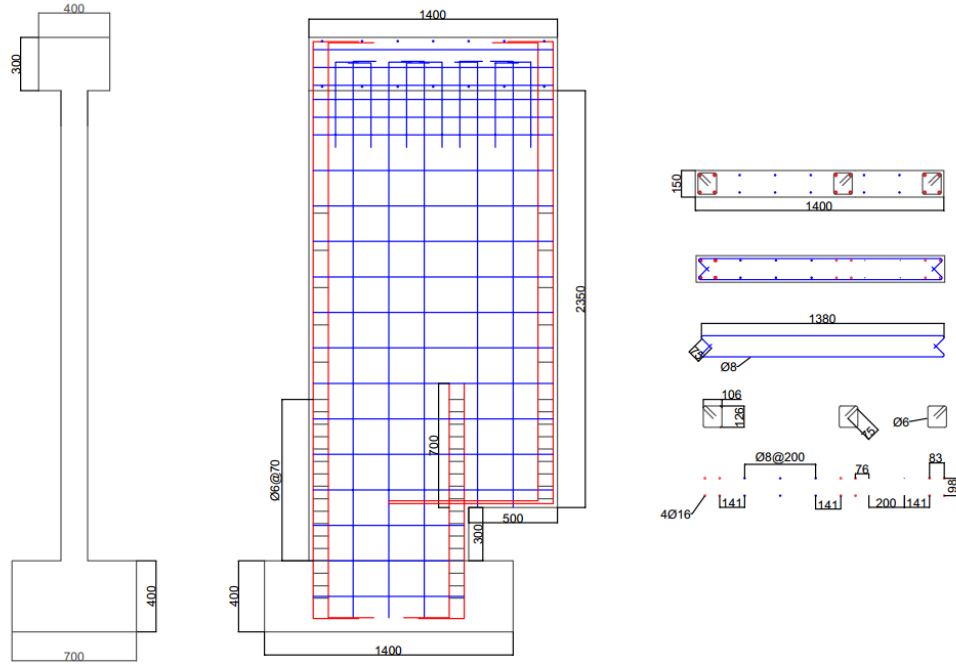


(a) Especimen 1

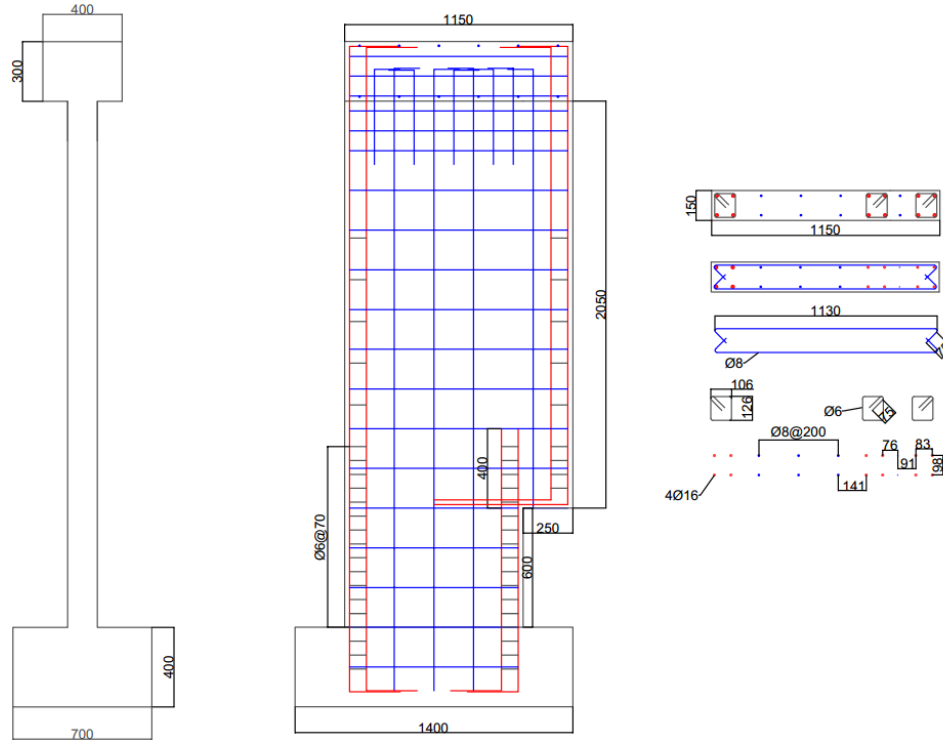


(b) Especimen 2

**Figura 3.3.8:** Esquema Muro 1 y 2 (Unidades en *mm*). Detalle Pedestal y Viga en Anexo A



(a) Especimen 3



(b) Especimen 4

Figura 3.3.9: Esquema Muro 3 y 4 (Unidades en mm). Detalle Pedestal y Viga en Anexo A

## 3.4. Instrumentación

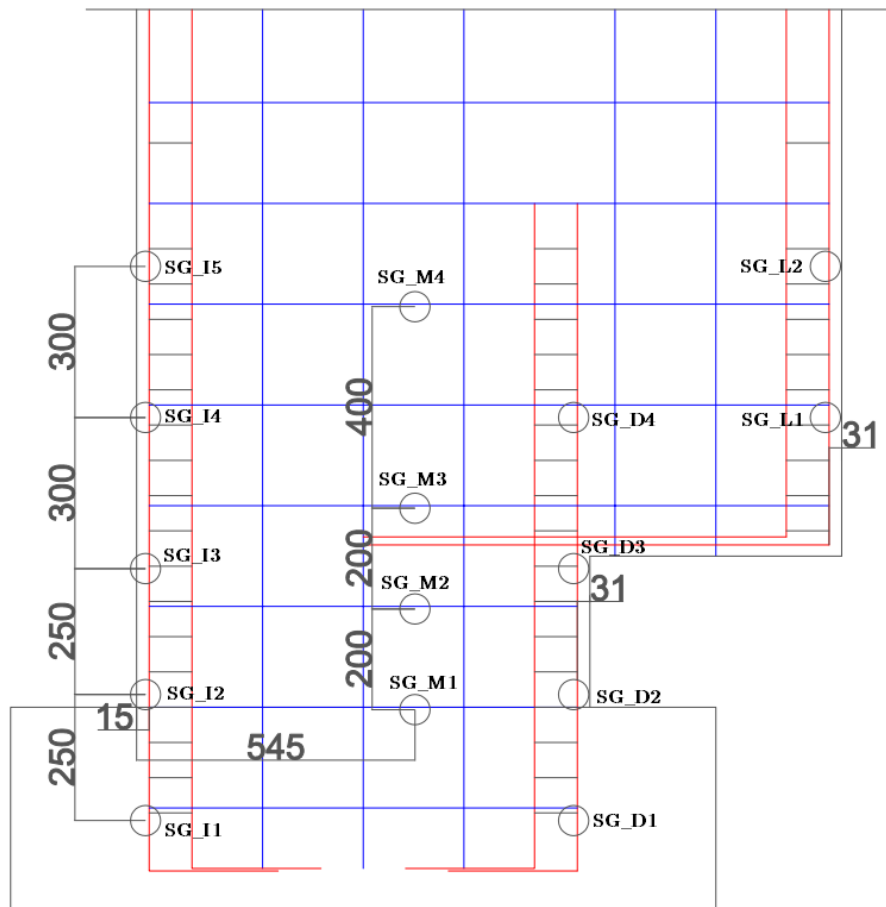
Para un correcto procesamiento de datos, es necesario recopilar toda la información de importancia para los cuatro muros a ensayar, esto significa poder registrar todas las cargas aplicadas tanto de la carga lateral como de la carga axial, lo cual se logra con las celdas de carga antes mencionadas. Adicionalmente es necesario poder adquirir datos de deformación y desplazamientos en las barras de refuerzo y en el muro respectivamente, es así como se dispone de tres métodos de medición, que se presentan a continuación.

### 3.4.1. Strain Gages

Los strain gages son sensores capaces de medir deformaciones a lo largo del sensor. Los utilizados en este proyecto son proporcionados por HMB y su serial es *KLY4107120305*. Estos sensores son instalados en los refuerzos estructurales durante la construcción de las probetas, antes de ser hormigonadas. Se instalaron aproximadamente un total de 15 Strain Gages por muro, distribuyendo cinco sensores en cada armadura de borde y el resto fueron instalados en las armaduras transversales. Para su instalación, se pulió la zona de la armadura hasta obtener una superficie blanca, luego con adhesivos especiales se fijo en el sector deseado. Adicionalmente se debió hacer una extensión del cable para poder ser conectados a un sistema de adquisición de datos al momento del ensayo y también se debió aislar con silicona y cubiertas especiales para que al momento de hormigonar ni los cables ni el sensor sufrieran algún tipo de daño o contaminación. En la Figura 3.4.10 se muestra uno de los Strain Gages instalados, mientras que en las Figura 3.4.11 y 3.4.12 se presenta el esquema final.



**Figura 3.4.10:** Instalación de un Strain Gages.



**Figura 3.4.11:** Esquema General instalación Strain Gages (Unidades en *mm*).



**Figura 3.4.12:** Instalación final Strain Gages.

La instalación final de todos los Strain Gages para todos los muros esta disponible en el Anexo A.

### **3.4.2. LVDT**

Los LVDT son sensores capaces de medir desplazamientos, contando con un cuerpo cilíndrico capaz de medir variaciones de voltaje inducidas por un core o complemento metálico, que al ingresar o salir del cuerpo cilíndrico principal produce las variaciones eléctricas. En esta investigación se utilizan LVDT DC-DC marca Macro Sensors, de medidas de 1 hasta 20 pulgadas dependiendo el lugar de interés o la medida a controlar. Para la implementación de los LVDT al muro, se agregan barras de hilo sin fin  $\phi_8mm$  embebidas al muro a  $65mm$  del borde, para así evitar un posible pandeo o desangulación de los instrumentos debido a las altas deformaciones o posibles daños que se producen, donde a diferencia de los Strain

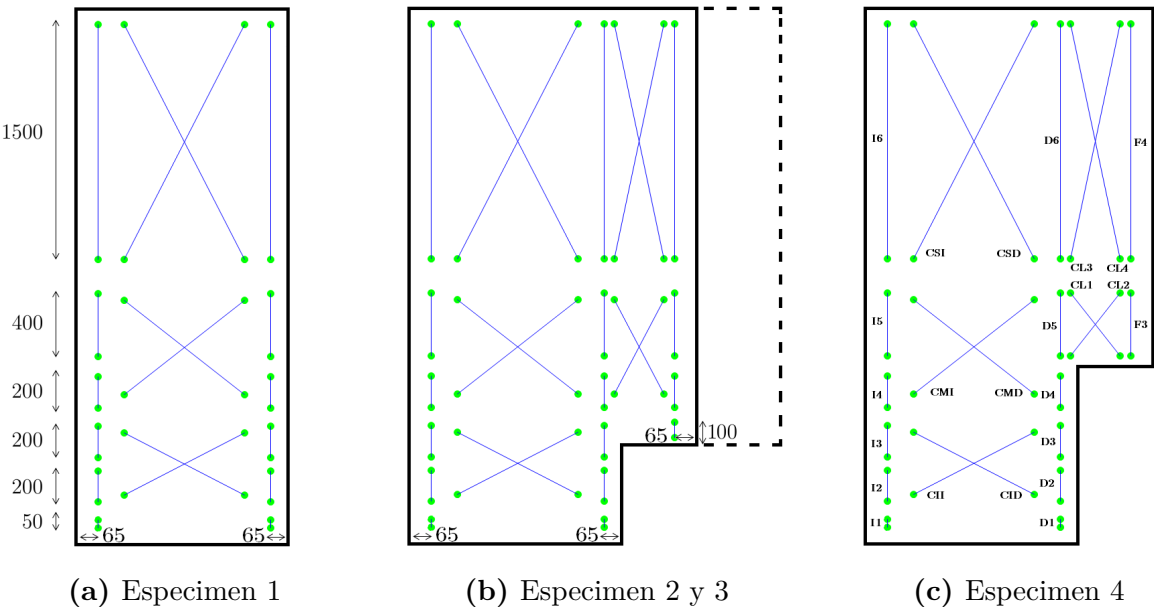
Gages, estos quedan instalados por fuera del muro. Con estas barras instaladas, se diseña un sistema de sujeción de los LVDT, el cual consta de una caja de madera que se inserta a través de los hilos sin fin, para así sujetar los instrumentos destinados a medir deformaciones verticales o en diagonal. Cabe destacar que para las cajas de los LVDT de corte se instalaron dos resortes en cada extremo, esto se debe a que los sensores debían estar calibrados con una pretensión, para así poder trabajar de forma correcta al comenzar a deformarse el muro en ambas direcciones del ensayo. En la Figura 3.4.13 se muestran algunos LVDT ya instalados con su respectiva sujeción.



**Figura 3.4.13:** Instalación LVDT.



Para los ensayos a realizar, los LVDT se dispondrán en una sola cara del Especimen. Se instalarán 12 LVDT para medir flexión y 6 de corte para el caso rectangular, mientras que para las otras probetas estas cantidades varían entre 14 a 16 para flexión y 10 de corte. Los LVDT destinados a medir flexión se instalan en los elementos de borde, donde en la base del muro estarán más próximos entre sí, ya que se dispondrán cada  $200\text{mm}$  y a mayor altura del muro estarán distanciados cada  $1500\text{mm}$ . Adicionalmente cada muro dispondrá de 5 LVDT adicionales, los cuales estarán ubicados: uno en el actuador destinado a controlar las deformaciones aplicadas, dos en una estructura de acero cuya función es poder medir los desplazamientos de techo y así corroborar con los obtenidos por el actuador debido a que la columna funciona como posición absoluta con respecto al ensayo, además se mide el deslizamiento horizontal de la probeta desde el pedestal. Los últimos dos LVDT se ubican de forma vertical en la fundación, para poder medir el giro que se produzca dada la carga lateral aplicada. En la Figura 3.4.14 se muestra un esquema general de la instalación para todas las probetas. Cabe destacar que para los muros 2 y 3 en la Figura 3.4.14b, la disposición de los LVDT en altura es la misma, dado que para ambas probetas, los instrumentos deben partir desde el borde de la bandera.



**Figura 3.4.14:** Esquema general disposición LVDT (Unidades en  $\text{mm}$ )

### 3.4.3. Fotogrametría

El sistema de fotogrametría consiste en capturar imágenes durante todo el ensayo, a un tiempo constante de disparo, para así las imágenes ser procesadas y obtener deformaciones unitarias y desplazamientos en toda la zona de interés, tanto de forma global como local. Para lograr este procedimiento, una de las caras del muro debe ser pintada con cal hidráulica, tornándola de color blanco, para luego dibujar puntos de color negro en posiciones y de tamaños aleatorios. La captura de imagen se realiza con dos cámaras fotográficas distintas, una enfocando la totalidad del muro para resultados globales, mientras que la restante se centra solo en la mitad inferior del muro para así poder capturar el daño local y que por teoría se encuentra dentro de esta zona. Las cámaras utilizadas para medir el daño global y local son de modelo EOS Rebel Canon T3i y EOS Rebel Canon T5 respectivamente. En el trabajo realizado por Manriquez [10] se encuentra con mayor detalle la instalación y valores relevantes de las cámaras, además del procesamiento realizado para adquirir toda la información de interés.

## 3.5. Montaje

Para la ejecución del ensayo, el muro debe ser anclado a la losa de reacción, para luego aplicarle la carga axial constante, que simula el peso propio axial que recibe un edificio real. Adicionalmente se debe izar y anclar el actuador para lograr la correcta aplicación de la carga lateral cíclica a nivel de techo de las probetas. Finalmente antes de proceder con el protocolo de carga, se debe instalar el sistema de restricción lateral que evitará o reducirá cualquier deformación fuera del plano. Todos los procedimientos antes mencionados se detallan a continuación. En la Figura 3.5.15 se presenta el montaje general del ensayo.



Figura 3.5.15: Montaje General Ensayo.

### 3.5.1. Sistema de Carga Axial

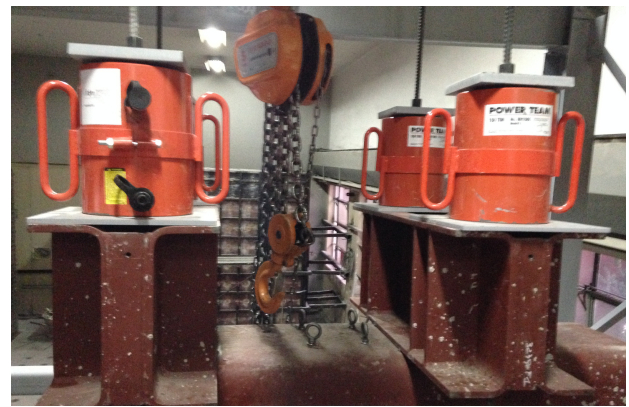
#### Diseño del Sistema

Se comienza diseñando parte del sistema de carga axial, donde se calculan perfiles de acero que permitirán la correcta transferencia del esfuerzo aplicado por los gatos hidráulicos al muro. Estos perfiles están diseñados como lo exige la norma AICS 360 – 10 [7], cuya carga de diseño es de  $120\text{tonf}$ . El sistema contempla tres elementos estructurales de acero, primero una viga cajón que tendrá una longitud de  $1500\text{mm}$ , este criterio es considerado para hacer un sistema versátil y que no solo funcione para este set de ensayos, sino para posteriores estudios. La determinación de sección así como del espesor de este perfil, se calculó y determinó con la

ayuda de software computacionales, con los cuales se pudo modelar de una forma mas precisa la distribución de cargas de corte y su posterior diseño por carga última respectivamente. Finalmente las dimensiones obtenidas son  $20mm$  de espesor y las dimensiones en el plano transversal son  $400mm$  de largo y  $250mm$  de alto; adicional a esta viga, se instalaran dos elementos estructurales, donde cada uno es una doble canal de  $14mm$  de espesor con cuatro atiesadores y cuyas dimensiones en el plano transversal son  $320mm$  de largo y  $350mm$  de alto, mientras que su longitud será de  $900mm$ . En el Anexo A se detalla el plano. Adicionalmente se mandan a cortar dos planchas de acero de  $800mm \times 300mm \times 10mm$ , la finalidad de estas, es ser instaladas por ambos costados entre la viga de hormigón armado y el sistema de carga axial, esto para evitar el posible deslizamiento que pueda ocurrir al momento de realizar los ensayos, dado que la carga lateral será aplicada en la viga de hormigón y quizás el solo contacto entre elementos (viga de hormigón con sistema de carga axial) no es suficiente. Sobre cada viga doble canal, se instalan dos gatos hidráulicos, por donde pasaran barras de  $\phi_{15}$  instalando en la parte superior una placa y golilla que sirven de tope, mientras que en el extremo inferior, la barra pasa a través de perforaciones dispuestas para el sistema de carga axial, instalando nuevamente otra placa y golilla para que sean el tope inferior, cerrando el anclaje para poder aplicar la carga axial. En la Figura 3.5.16 se muestra el sistema de carga axial utilizado para todos los ensayos.



(a) Vista 3D.



(b) Vista en Elevación.

**Figura 3.5.16:** Sistema de Carga Axial.

La fuerza axial aplicada en todos los ensayos corresponde a  $0.1f'_cA_g$ , donde  $A_g$  corresponde al área en la base del muro, la cual es común para las cuatro probetas, obteniendo un valor aproximado de  $36tonf$ , lo que se traduce en que cada gato hidráulico efectúe una carga de  $9tonf$  en las barras carga axial. Es importante mencionar que la bomba hidráulica regula la presión del aceite a lo largo de todo el ensayo, logrando que la carga axial se mantenga constante o con pequeñas fluctuaciones a lo largo de todo el ensayo.

### 3.5.2. Sistema de Carga Lateral

#### Instalación Actuador

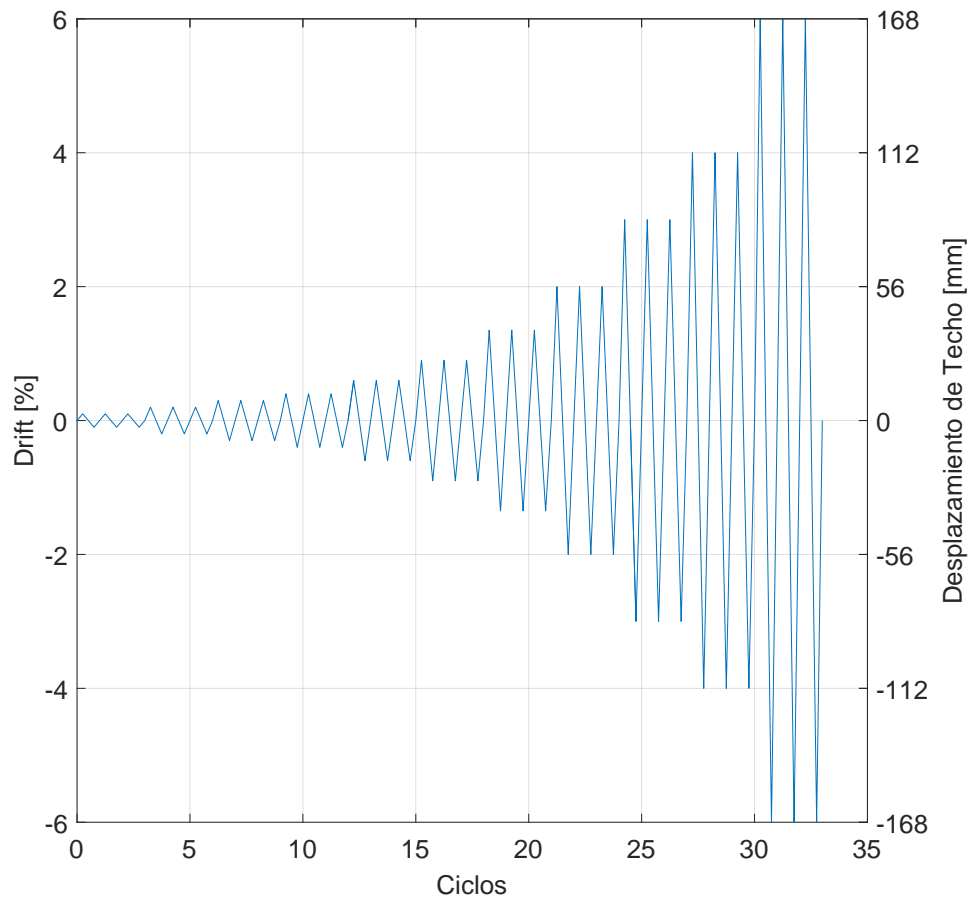
La carga lateral es realizada por el actuador descrito en este capítulo. La carga es aplicada al nivel del techo de la probeta, es decir, el actuador debe ser instalado en el muro de reacción a una altura de 3.2 metros, conectando la rótula trasera en el muro de reacción donde la espera un sistema de sujeción previamente instalado y postensado al muro de reacción, mientras que la rótula del pistón se instala en la cara de la viga de hormigón armado donde también es recibida por un sistema de sujeción previamente instalado y postensado. En la Figura 3.5.17 se presenta el montaje del actuador.



**Figura 3.5.17:** Montaje del Sistema de Carga Lateral.

## Protocolo de Carga

El actuador se programa para generar desplazamientos cíclicos en las probetas. La máxima abertura de su pistón es de  $515\text{mm}$  a una velocidad máxima de  $112\text{mm}/\text{min}$ . Para cada nivel de carga se realizan tres ciclos, tomando como punto neutro la posición inicial del pistón. Cada ciclo se define con un peak de extensión y contracción en el movimiento del actuador, volviendo a su posición de origen. Para contemplar los efectos de esta condición, se definen dos niveles de carga en el rango elástico, el tercer nivel correspondiente al estado de fluencia, y en adelante secuencias en rango plástico que terminan en la rotura del elemento. Los Drift de carga establecidos por ACI T1.1-01 [5] son 0.1 %, 0.2 %, 0.3 %, 0.4 %, 0.6 %, 0.9 %, 1.35 %, 2 %, 3 %, 4 % y 6 %. La Figura 3.5.18 representa el movimiento descrito.



**Figura 3.5.18:** Drift de Carga Establecido.

### 3.5.3. Sistema de Restricción Lateral

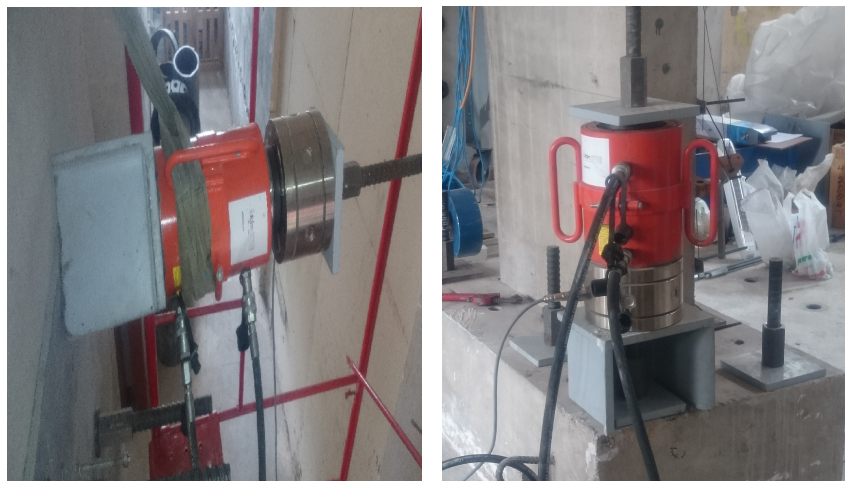
El sistema de restricción lateral utiliza el marco de acero antes descrito, donde a cada puntal se le realiza dos perforaciones, por las cuales pasarán dos barras huecas de  $\phi_{40mm}$  de diámetro exterior, con una esfera de acero soldada en su punta para proporcionar así una condición de deslizamiento al estar en contacto las cuatro barras huecas con la probeta. Junto con lo anterior, se instala una placa de acero en ambas superficies de contacto de las esferas soldadas, las cuales se engrasan para facilitar aún mas el deslizamiento. Todas las barras son ancladas a los puntales utilizando el sistema de placa y tuerca para evitar que se salgan. Adicionalmente se han diseñado cuatro topes triangulares de acero que permitirán al marco de acero anclarse a la losa de reacción, completando de esta forma el sistema de restricción lateral. En la Figura 3.5.19 se presenta el montaje del sistema.



**Figura 3.5.19:** Sistema de Restricción Lateral.

### 3.5.4. Sistema de Postensado

Se ha diseñado un sistema de postensado para todas las barras de anclaje, tanto verticales para la fundación, como horizontales que son para la rótula del actuador que irá fijada en el muro de reacción y la otra rótula instalada en la viga de hormigón armado. Para lograr esto se diseñó un sillín de acero, capaz de soportar incluso una carga de compresión de  $19\text{tonf}$ , esto dejando algún grado de seguridad al trabajar, ya que se instalará uno de los gatos hidráulicos sobre este sillín, para luego pasar la barra a postensar por dentro del sillín y gato hidráulico, de esta forma saldrá un extremo bajo la losa (en el caso vertical) donde se pondrá nuevamente una placa de acero, golilla y tuerca para poder anclar en la parte inferior, mientras que en la parte superior el gato hidráulico comenzará a abrirse mediante el sistema de control, aplastando el sillín pero la barra se comenzará a tensar, mientras esto ocurra, el sillín tiene un espacio donde previamente se instaló una tuerca, la cual se ira girando para ir presionando y acortando la barra que está siendo estirada, esto para poder mantener la tensión ya aplicada por el gato hidráulico. Este mismo sistema se aplicará para las barras horizontales, con la dificultad que tanto el sillín como gato hidráulico que son de un peso considerable, se tendrán que maniobrar en altura. Para las barras que serán ancladas en la fundación se les dará una tensión de  $10\text{tonf}$ , mientras que para las barras horizontales de  $32\text{mm}$  y  $16\text{mm}$  se aplicará  $10\text{tonf}$  y  $7\text{tonf}$  respectivamente. En la Figura 3.5.20 se muestra un ejemplo de postensado en los anclajes de la fundación.



(a) Postensado Horizontal.

(b) Postensado Vertical.

**Figura 3.5.20:** Sistema de Postensado.



### 3.5.5. Grilla Para Fotogrametría

Para una detección adecuada del desplazamiento por fotogrametría se debe añadir una textura de puntos aleatorios a la cara del muro libre. Se aplican dos capas de cal hidráulica para brindar un fondo blanco que mejora el contraste de colores. Solo para el espécimen uno los puntos son generados con esmalte al agua de color negro, para todos los demás ensayos se utiliza una matriz de puntos aleatorios pintados con spray negro. Todos los espacios que quedan poco definidos se repasan con esmalte al agua. En la Figura 3.5.21 se muestra el patrón de manchas para fotogrametría.



**Figura 3.5.21:** Patrón de manchas generado para Ensayo 1.

# Capítulo 4

## Resultados Experimentales

### 4.1. Introducción

En el presente capítulo se entregan los resultados de los ensayos realizados, mostrando y describiendo su comportamiento ante una carga cíclica. También se estudiará y analizará el impacto por la utilización de discontinuidades a través de curvas carga versus desplazamiento. Adicionalmente se presentarán fotografías de los muros al momento de su falla para comprender de mejor manera el tipo de daño observado. Se analizará en detalle las principales diferencias obtenidas, además de comparar con las predicciones teóricas realizadas, cuantificando la real importancia de este tipo de configuración en estudio.

Es importante recordar que todos los muros han sido ensayado bajo las mismas condiciones de carga axial y lateral, además de la utilización de los mismos materiales de construcción. Adicionalmente para todos los muros se utilizó la siguiente nomenclatura: el sentido negativo es cuando la fibra del hormigón más comprimida se encuentra cerca del muro de reacción, mientras que el sentido positivo la fibra más comprimida se encuentra cerca de la columna utilizada como cero absoluto para los LVDT de control, o en el caso de los muros bandera, el sentido positivo es cuando la fibra cercana a la discontinuidad esta comprimida. Para un

mayor entendimiento, en todos los resultados obtenidos se dispondrá de una imagen del muro ensayado con el sentido de aplicación de la carga.

## 4.2. Adquisición Y Corrección De Datos Obtenidos

Los datos son procesados y almacenados en un computador conectado al sistema de adquisición, donde se guardarán los desplazamientos medidos por LVDT, deformaciones unitarias de strain gages, así como las cargas aplicadas por el sistema del actuador o de carga axial. Por las dimensiones del ensayo, se espera que ocurra un deslizamiento y/o rotación del pedestal, es por esto que se instalan sensores externos al muro a ensayar, con la finalidad de poder corregir el desplazamiento capturado por el LVDT de control (LVDT superior). En la Figura 4.2.1 se muestra la disposición de los sensores para corregir los desplazamientos del LVDT de control, además de la ecuación 4.1 que muestra como se corrigió el desplazamiento ( $\Delta$ ).

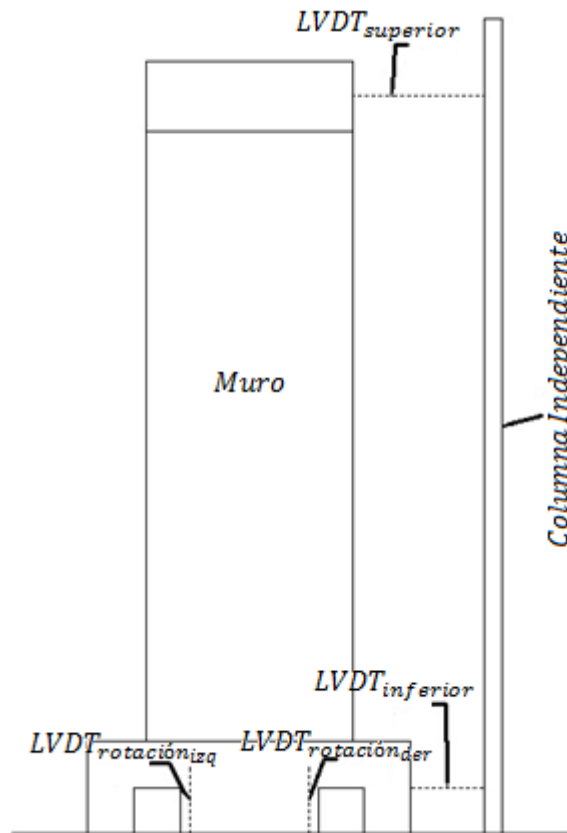


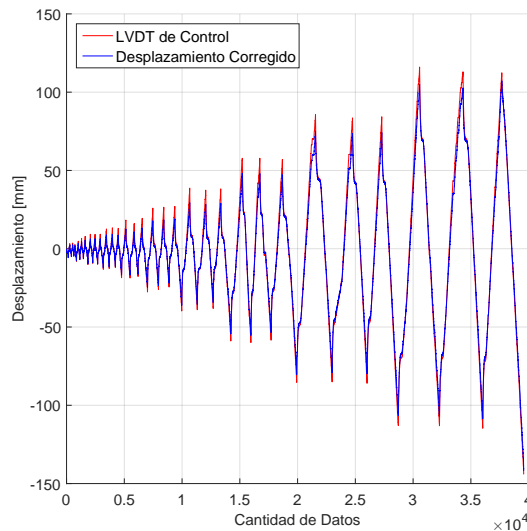
Figura 4.2.1: Disposición LVDT externos.

$$\Delta_{corregido} = \Delta_{superior} - \Delta_{inferior} - \frac{(\Delta_{rotacin_{der}} - \Delta_{rotacin_{izq}})\Delta H}{\Delta L} \quad (4.1)$$

Con los datos adquiridos y utilizando la ecuación 4.1, obtenemos el desplazamiento corregido para los cuatro ensayos, en la Figura 4.2.2 se aprecia de mejor manera cuanto afecta el deslizamiento y rotación del pedestal para controlar el desplazamiento de techo a lo largo de todo el ensayo para el muro 2. En el Anexo B se encuentra el resto de los ensayos. En la Tabla 4.1 se presentan las máximas diferencias, además del porcentaje de corrección realizado a cada ensayo.

**Tabla 4.1:** Resumen máxima diferencia entre LVDT de control vs desplazamiento corregido. Todos los resultados ocurrieron al 4% de drift.

	Diferencia [mm]	Corrección [%]
Ensayo 1	6.1	5.4
Ensayo 2	10.1	8.7
Ensayo 3	7.6	6.8
Ensayo 4	6.8	6.8



**Figura 4.2.2:** Comparación Desplazamiento superior LVDT de control vs Desplazamiento Corregido para muro 2.

El sistema de anclaje posee correcciones de 0.01% hasta valores de 28% para el muro 2, sin embargo estos porcentajes ocurren al inicio del ensayo (primeros ciclos), lo cual podemos atribuir que se debe a un acomodamiento de los instrumentos o de las mismas probetas o

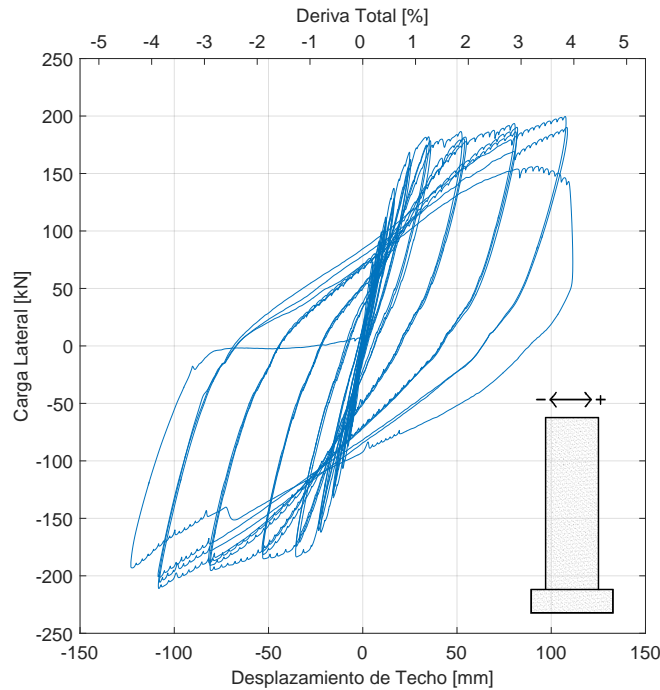
sistemas de carga, dado que a pesar de ser valores grandes, el nivel de corrección no supera al milímetro. Sin embargo los valores entregados en la Tabla 4.1 para diferencias máximas, son desplazamientos más considerables, pero porcentualmente tienen valores bajos, por el cual el sistema de anclaje funciona de forma aceptable. Es importante observar que todos los desplazamientos máximos de corrección ocurren en el drift del 4% y en el sentido positivo, esto se debe a que por factibilidad del laboratorio no se pudieron usar los ocho anclajes disponibles del pedestal, dejando 2 libres en el sentido negativo del muro (sector más cercano al muro de reacción), esto provocó que cuando el actuador empujara el muro en sentido positivo (alejándolo del muro de reacción), los dos anclajes en esa zona no trabajaran de forma optima, produciendo los resultados antes mencionados, recomendando de esta forma, realizar ensayos con un anclaje simétrico para reducir este tipo de errores.

### **4.3. Resultados Experimentales**

Todos los muros fueron ensayados bajo las mismas condiciones, tanto carga axial como desplazamiento lateral, además de poseer las mismas armaduras de borde, diferenciándose únicamente por el nivel de discontinuidad en la base. Es así como la capacidad del muro es similar para los cuatro ensayos, donde las mayores diferencias solo son apreciable para deformaciones de gran tamaño (4% de drift y mayor). A continuación se detallaran cada uno de los ensayos con la respuesta obtenida, los daños progresivos durante el ensayo y finalmente las formas de falla obtenidas.

## Especimen 1: Muro rectangular o caso base

En la Figura 4.3.3a se presenta la histéresis obtenido del ensayo, mientras que en la Figura 4.3.3b se muestra la fotografía del muro 1 al finalizar el ensayo.



(a) Curva Carga vs Desplazamiento Muro 1.



(b) Muro 1 al final del ensayo.

**Figura 4.3.3:** Resultados Experimentales Muro 1.

Inicialmente se puede apreciar que para ambas direcciones la rigidez inicial del muro es similar, mientras que para el final del ensayo el muro se comporta levemente más rígido en la dirección negativa. Las primeras grietas que se pueden distinguir en el muro ocurren en el tercer ciclo del 0.4% en la dirección negativa, donde se puede apreciar una concentración de ellas en la base del muro. A partir del drift del 2% se pueden apreciar grandes grietas en los costados de los bordes del muro pero no alcanza a ocurrir desprendimiento, como se puede apreciar en la Figura 4.3.4a. En el primer ciclo del 3% en la dirección negativa, el muro comienza a perder recubrimiento, principalmente en los cabezales de la probeta, tal como se muestra en la Figura 4.3.4b, mientras que las grietas diagonales ya se extienden hasta más de la mitad del muro.



(a) Daño al 2 % en zona traccionada para carga lateral negativa.



(b) Daño al 3 % en zona traccionada para carga lateral negativa.

**Figura 4.3.4:** Agrietamiento Muro 1.

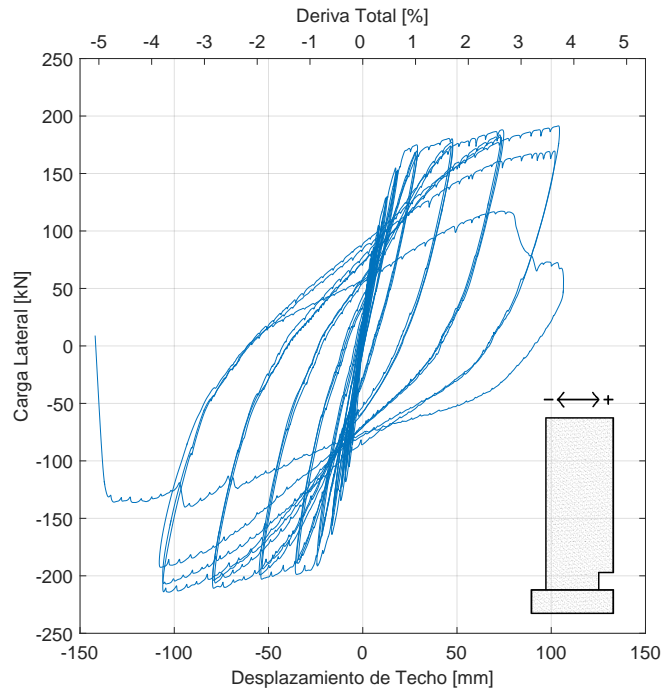
Finalmente la degradación del hormigón ocurre en el tercer ciclo del 4 % de drift en el sentido positivo, donde las barras ya sufren un pandeo considerable y el hormigón en los bordes está completamente aplastado, tal como se muestra en la Figura 4.3.5. Sin embargo se prosiguió a continuar el ensayo, tratando de llevarlo al 6 % de drift en el sentido negativo, donde tan solo se alcanzó a llegar a un drift del 4.5 % ya que el continuar con el ensayo resultó ser peligroso, pero de ser posible, el muro habría sufrido fractura de refuerzo de borde debido al pandeo.



**Figura 4.3.5:** Falla Muro 1.

## Especimen 2: Muro Con Discontinuidad de 250mm x 300mm

En la Figura 4.3.6a se presenta la histéresis obtenido del ensayo, mientras que en la Figura 4.3.6b se muestra la fotografía del muro 2 al finalizar el ensayo.



(a) Curva Carga vs Desplazamiento Muro 2.



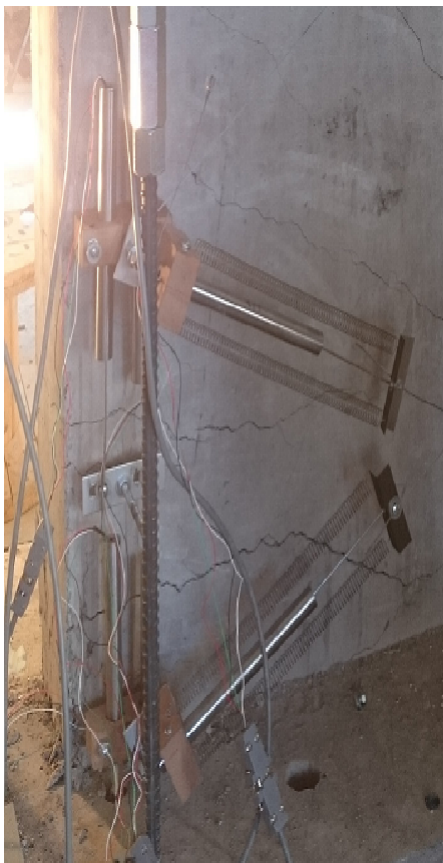
(b) Muro 2 al final del ensayo.

**Figura 4.3.6:** Resultados Experimentales Muro 2.

De manera similar a la probeta 1, se puede apreciar que para ambas direcciones la rigidez inicial del muro es similar, aunque para este caso, se comienza a detectar tempranamente que el muro se comporta más rígido en la dirección negativa, esto se puede observar a partir del 1 % de drift alcanzando una carga mayor al 10 % que en su otra dirección. Esta asimetría puede ser responsable en primera instancia a una aplicación excéntrica de la carga axial, ya que esto produce un momento adicional en la base favoreciendo en alcanzar los drift del protocolo con menor carga lateral, y dado que la dirección positiva llega a los drift establecidos aplicando una menor carga lateral, se puede considerar como efectivo este fenómeno. Lo anterior es comprobado a través de modelos de elementos finitos en el Capítulo 6. Cabe destacar que este efecto también es apreciable en el muro rectangular, pero no es tan grande como en este caso. Continuando con el ensayo, los primeros daños al igual que la primera fluencia



son alcanzados antes en comparación al muro 1. Las primeras grietas se aprecian de mejor manera que el muro 1 en el primer ciclo del drift 0.3 % en la dirección, las cuales aparecen en el sector de la base, específicamente cerca de la discontinuidad, debido a la alta concentración de deformaciones en esta zona. Las grietas observadas son en diagonal y van desde la base hasta la altura de la discontinuidad, donde a medida que se aumenta el drift, estas diagonales alcanzan a llegar casi hasta la mitad del muro. Similar al caso anterior, para drift del 2 % se observan grietas considerables en los costados del borde del muro pero sin desprendimiento, tal como lo muestra la Figura 4.3.7a. En el primer ciclo del 3% de drift en la dirección negativa, el muro comienza a perder recubrimiento, en este caso notoriamente en el cabezal de la abertura, Figura 4.3.7b, ya que por esta discontinuidad se concentraran los esfuerzo. Para las grietas diagonales, se aprecian desde la parte baja del muro y se extienden hasta un poco más arriba a la altura de la abertura.



(a) Daño al 2 %, lado continuo.



(b) Daño al 3 %, lado discontinuo.

**Figura 4.3.7:** Agrietamiento Muro 2.

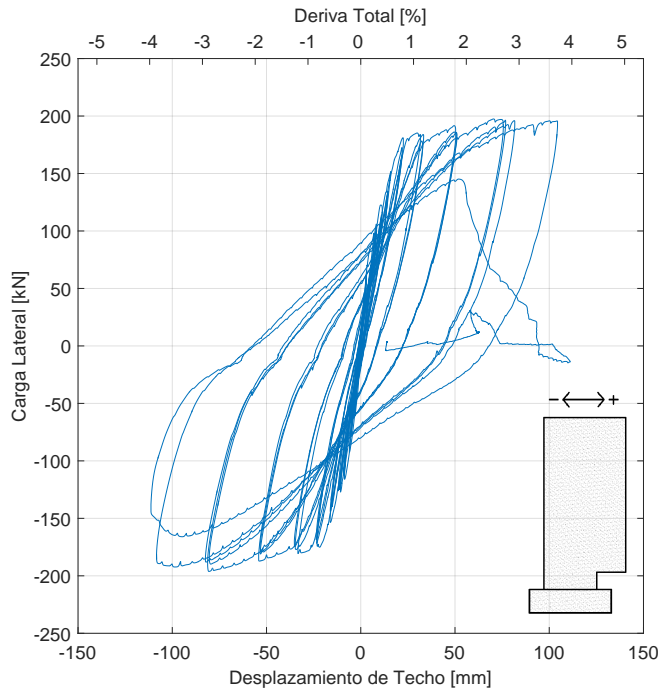
Finalmente la degradación del hormigón ocurre en el tercer ciclo del 4% de drift en el sentido positivo, donde las barras ya sufren un pandeo considerable y el hormigón en los bordes está completamente aplastado, tal como se presenta en la Figura 4.3.8. Si bien se intentó hacer llegar a un drift mayor en sentido negativo, no fue posible ya que al empujar el muro en dicha dirección, algunas de las barras de borde en la discontinuidad se fracturan, teniendo así que detener el ensayo. Para este muro, la degradación fue anticipada en comparación al primer ensayo, debido a la discontinuidad presente, dado que concentra mayores deformaciones, agrietando y aplastando de forma más rápida el hormigón en los bordes, sufriendo un pandeo en las barras de refuerzo longitudinal anticipado.



**Figura 4.3.8:** Falla Muro 2.

### Especimen 3: Muro Con Discontinuidad de 500mm x 300mm

En la Figura 4.3.9a se presenta la histéresis obtenido del ensayo, mientras que en la Figura 4.3.9b se muestra la fotografía del muro 3 al finalizar el ensayo.



(a) Curva Carga vs Desplazamiento Muro 3.



(b) Muro 3 al final del ensayo.

**Figura 4.3.9:** Resultados Experimentales Muro 3.

Al igual que los casos anteriores se puede apreciar que para ambas direcciones la rigidez inicial del muro es similar, con la diferencia que este comportamiento se mantiene hasta el final del ensayo. Es probable que estas diferencias se deban a variables aleatorias tanto en la construcción de cada probeta, así como la misma manipulación de ellas dentro del laboratorio. Las primeras grietas que se pueden distinguir ocurren en el primer ciclo del 0.3% de drift en la dirección negativa, donde se puede apreciar una concentración de ellas en la parte inferior de la probeta, las cuales se desarrollan desde la base hasta cerca de la altura de la discontinuidad. Similar a la probeta 2, los primeros daños al igual que la primera fluencia son alcanzados antes que en el caso base. En el segundo ciclo del 3% en la dirección positiva, el muro comienza a perder recubrimiento, principalmente en el cabezal cerca de la abertura ya que nuevamente por la discontinuidad, encontraremos una concentración de los esfuerzos

cercano a este punto, tal como se aprecia en la Figura 4.3.10. Para las grietas diagonales, estas se aprecian desde la parte baja del muro y se extienden hasta cerca del centro.



**Figura 4.3.10:** Agrietamiento Muro 3, lado discontinuo.

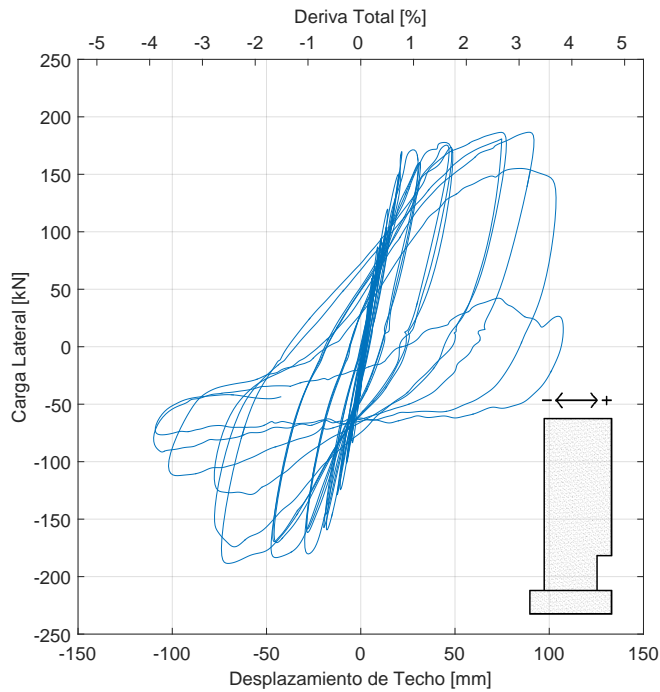
Finalmente la degradación del hormigón ocurre en el segundo ciclo del 4% de drift en el sentido positivo, donde las barras ya sufren un pandeo considerable y el hormigón en los bordes está completamente aplastado, como podemos comprobar en la Figura 4.3.11. En este último ciclo las barras de refuerzo ubicadas en la discontinuidad se fracturaron y el muro degradó rápidamente, teniendo que detenerse el ensayo. Este ensayo posee un tipo de falla de frágil, debido que una vez alcanzada la degradación, el muro rápidamente decae su resistencia y las barras de refuerzo se cortan, mientras que si comparamos con el muro 2, si bien las barras de la discontinuidad también se cortan, estas alcanzan a realizar los tres ciclos y en cada uno su degradación no es tan considerable.



**Figura 4.3.11:** Falla Muro 3.

#### Especimen 4: Muro Con Discontinuidad de 250mm x 600mm

En la Figura 4.3.12a se presenta la histéresis obtenido del ensayo, la cual tuvo que ser filtrada y procesa más que los muros anteriores debido a problemas de ruido, mientras que en la Figura 4.3.12b se muestra la fotografía del muro 4 al finalizar el ensayo.



(a) Curva Carga vs Desplazamiento Muro 4.

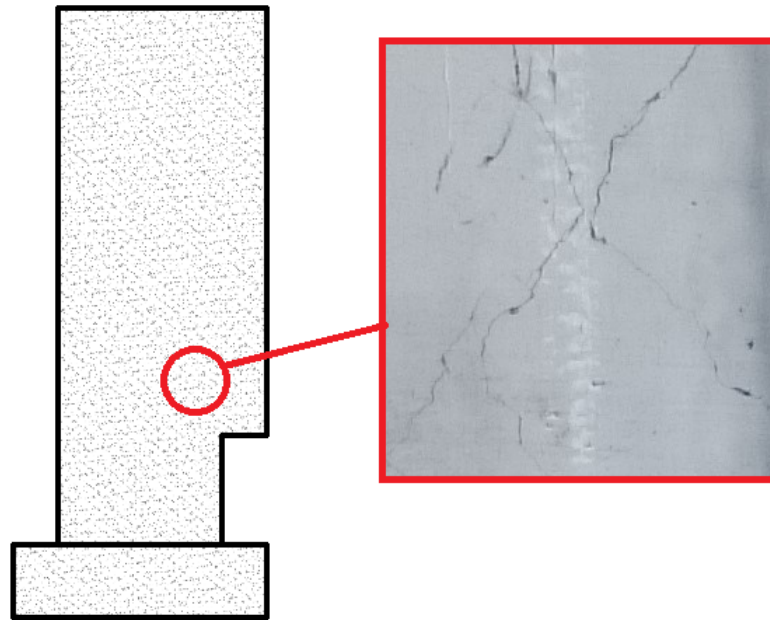


(b) Muro 4 al final del ensayo.

**Figura 4.3.12:** Resultados Experimentales Muro 4.

Al igual que los casos anteriores se puede apreciar que para ambas direcciones la rigidez inicial es similar. Las primeras grietas que se pueden distinguir ocurren un poco más tarde que los muros 2 y 3, donde se puede apreciar una concentración de ellas en la parte inferior de la probeta. En el tercer ciclo del 0.3% de drift en el sentido negativo comienza a aparecer una concentración de deformaciones a la altura del metro, justo donde termina la barra de refuerzo de borde en la discontinuidad. Con el transcurso de los siguientes ciclos, esta concentración se empieza a intensificar, donde para el 2% de drift ya aparecen grietas importantes en esta ubicación al metro de altura, de manera diagonal, partiendo desde la parte superior de la discontinuidad y extendiéndose más arriba de la mitad del muro. De forma paralela también se pueden observar grietas diagonales a nivel de base, aunque no son tan notorias como en

esta altura. En la Figura 4.3.13 se aprecian las grietas en el sector donde termina el refuerzo de borde en la discontinuidad.



**Figura 4.3.13:** Agrietamiento Muro 4 al final de la barra de refuerzo discontinua.

En el primer ciclo del 4 % hay desprendimiento del hormigón en esta ubicación, diferenciándose totalmente a los ensayos anteriores, dado que en estos últimos todo el daño se centró en la base, además de tener barras de refuerzo horizontal pandeadas a nivel del metro de altura. El daño presente en esta zona, se debe al no correcto anclaje del refuerzo de borde, dado que no se alcanzó el largo de desarrollo, provocando que el refuerzo deslizara y concentrara mayor deformación en este punto, desprendiendo más rápidamente el hormigón, dejando expuesto tanto el refuerzo de borde como el vertical y horizontal destinado al corte. Una vez expuesto el refuerzo vertical de corte, este se comenzó a pandear, mientras que el refuerzo de borde en la discontinuidad continuó deslizándose y desprendiendo hormigón en la zona. El ensayo se detuvo en el tercer ciclo del 4 % de drift en el sentido negativo ya que la capacidad de hormigón se había reducido notablemente, esto debido al pandeo de barras verticales de corte, como el exceso de desprendimiento del hormigón y al constante deslizamiento del refuerzo. La Figura 4.3.14 muestra el estado final del muro ensayado.



**Figura 4.3.14:** Falla Muro 4.

## 4.4. Comparación Entre Ensayos

### 4.4.1. Efecto De La Discontinuidad

Con los datos recopilados anteriormente, podemos cuantificar el real impacto de utilizar muros con discontinuidades en las construcciones Chilenas. Las cuatro probetas ensayadas poseen respuestas globales similares en:

1. Capacidad: Las cuatro probetas alcanzan cargas laterales del orden de  $20tonf$ . Esto se reafirma con el hecho que todas están reforzadas de igual manera en los bordes (misma cuantía) y la capacidad final de un muro está determinada por su armadura de refuerzo.
2. Deformación para probetas bandera: Dejando de lado el ultimo ensayo al poseer un tipo de falla distinto al resto, los especímenes 2 y 3 alcanzan deformaciones del 4% de drift que es equivalente a  $112mm$  en ambas direcciones. Si bien el muro 2 alcanza a realizar mas ciclos que el muro 3, la deformación alcanzada es la misma.
3. Misma deriva de fluencia: Para todos los muros tipo bandera, las primeras grietas aparecen en algún ciclo cercano al 0.3% de drift, donde las grietas se asocian a que ya hay barras fluyendo mientras que para el muro rectangular las primeras grietas se observan pasado el 0.4% de drift, comprobando así que esta última probeta tiene mejor respuesta cíclica. Esto se va a corroborar en detalle en el capítulo siguiente.

Mientras que se diferencian en:

1. Nivel de degradación: Cada ensayo comienza a degradar en algún ciclo diferente, esto se debe al impacto de utilizar abertura, ya que este tipo de discontinuidad concentra deformaciones en la zona, produciendo una aceleración en el daño del hormigón, demostrando que todos los muros banderas fallan antes en comparación al muro rectangular y que es lo ocurrido en los ensayos. Si bien el muro 4 tiene un tipo de falla distinto al resto y no se puede comparar directamente con los otros ensayos, en los primeros ciclos

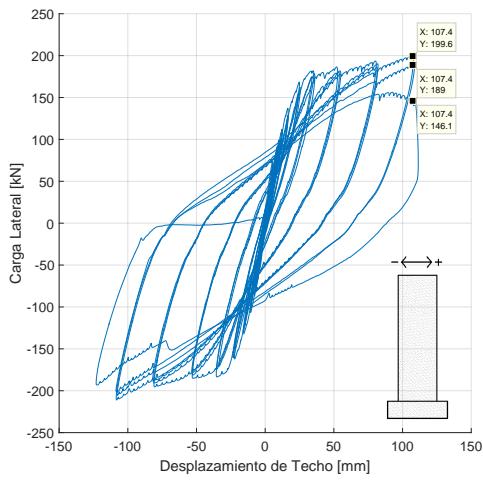


al menos, antes de comenzar la concentración de deformaciones a la altura del término de armadura de refuerzo del borde interno discontinuo, este muro tiene un comportamiento mas similar al muro rectangular, mostrando grietas más tarde en comparación a los otros dos muros banderas.

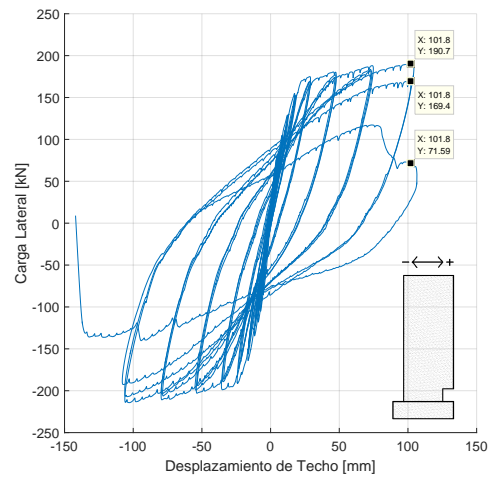
2. Tipo de falla: Si bien todos los muros sufren daños de grietas, desprendimiento del hormigón o hasta barras de refuerzo que se pandean, el tipo de falla final es distinto, donde el Especimen 3 tiene un tipo de falla frágil, ya que esta no alcanza a degradar notoriamente, para luego fallar en un instante. Si comparamos esta falla con el muro 2, este último si bien sufre pandeo y fractura de algunas barras de refuerzo, degrada de forma mas lenta y no alcanza a ser una falla frágil. El muro rectangular sufre pandeo local pero por motivos de seguridad no se alcanzó a deformar el muro hasta su ruptura. Como se había mencionado antes, el muro 4 sufrió otro tipo de falla localizada donde terminan las barras de refuerzo del borde interno discontinuo, esto se debió al deslizamiento de las barras al no estar bien ancladas, debido a que el largo de desarrollo para la armadura de borde es de  $640\text{mm}$  y el muro quedó anclado con un largo de  $400\text{mm}$ , produciendo que todas las deformaciones se concentraran en esta zona, presenciando pandeo en la armadura de refuerzo vertical (doble malla). En la Tabla 4.2 se resume el ciclo y drift donde ocurre la degradación junto con su carga y reducción de capacidad asociada, donde se seleccionó el peak del primer ciclo donde se inicia la degradación (4% de drift para los tres primeros Especimen, mientras que 3% para el último muro) y posterior se mide en el mismo desplazamiento para los siguientes ciclos para mantener consistencia en cuantificar la degradación. Adicionalmente en la Figura 4.4.15 están los valores que se presentan en la Tabla 4.2. Cabe destacar que para todas las probetas, el ensayo se realizó hasta donde la situación lo permitió, es decir, para el muro 1 el ensayo se detuvo cuando se efectuaba el primer ciclo del 6% a mitad de camino, debido a que el muro se estaba saliendo del plano. Los Especimen 2 y 3 se ensayaron hasta que se cortaron las barras, mientras que el último ensayo se ejecutó hasta que las condiciones fueran seguras, ya que la aparición del daño en la altura afecto la estabilidad lateral.

**Tabla 4.2:** Resumen degradación en cada Especimen.

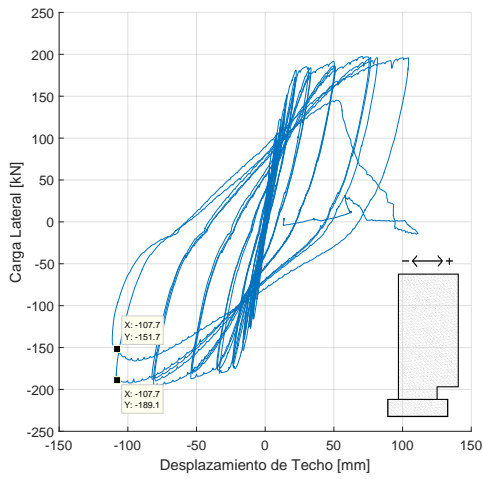
	Degradación		
	Ciclo	Carga [kN]	Degradación Carga [%]
Especimen 1	1°, 4 %(+)	199.6	- -
	2°, 4 %(+)	189.0	5.3
	3°, 4 %(+)	146.1	22.7
Especimen 2	1°, 4 %(+)	190.7	- - -
	3°, 4 %(+)	71.6	57.7
Especimen 3	1°, 4 %(-)	-189.1	- - -
	2°, 4 %(-)	-151.7	19.8
Especimen 4	1°, 3 %(-)	-188.5	- - -
	2°, 3 %(-)	-170.5	9.5
	3°, 3 %(-)	-127	25.5



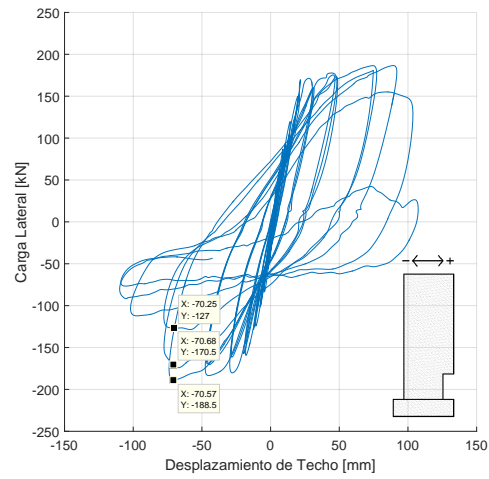
(a) Muro 1.



(b) Muro 2.



(c) Muro 3.



(d) Muro 4.

**Figura 4.4.15:** Localización drift y carga cuando el muro comienza a degradar, además de su falla.

# Capítulo 5

## Estudios Analíticos

### 5.1. Introducción

En el presente capítulo se entregan los resultados de modelos en elementos finitos (FEM), mostrando y describiendo su comportamiento ante una carga cíclica lateral a nivel de techo. También se estudiará y analizará el efecto que produce la utilización de discontinuidad a través de curvas carga versus desplazamiento, perfil de deformación unitaria en la interfaz muro-pedestal, como también deformaciones unitarias verticales de tracción en la altura para representar de mejor manera el daño en los modelos y así poder comparar con los ensayos realizados. Adicionalmente se presentarán fotografías locales de los muros al momento de sus daños más importante para poder corroborar la dirección y tipo de falla mostrada por los modelos numéricos.

Es importante recordar que todos los modelos han sido ejecutados bajo las mismas condiciones de carga axial (ubicación) aunque la magnitud aplicada se extrajo de la celda de carga ubicado en el gato hidráulico de carga axial, lo cual varía de lo teórico propuesto, mientras que para la carga lateral se utilizaron los desplazamientos reales corregidos por deslizamiento y giro del pedestal, para así modelar de manera más exacta los esfuerzos y desplazamientos aplicados en

el ensayo. Para todos los modelos se utilizaron las mismas propiedades de hormigón y acero con efecto de pandeo incorporado. Además para todos los muros se mantuvo la nomenclatura de dirección de desplazamiento como en el ensayo: sentido negativo para la fibra de hormigón más comprimida cerca del muro de reacción, mientras que el sentido positivo la fibra más comprimida se encuentra cerca de la columna utilizada como cero absoluto para los LVDT de control, o en el caso de los muros bandera, el sentido positivo es cuando la fibra cercana a la discontinuidad esta comprimida. A continuación se detallarán los resultados obtenidos.

## **5.2. Estudio De Deformaciones**

### **5.2.1. Resultados Teóricos**

Antes de la realización de los ensayos, se estimaron tanto su momento nominal, como los valores de largo de rótula plástica y su deriva de fluencia. A continuación se presentan los resultados mencionados.

#### **Cálculo Momento y Corte Nominal**

En el capítulo 3.3 se explicó la metodología para el diseño de las probetas a ensayar, donde a partir de las dimensiones elegidas para poder representar un muro esbelto y que además sea posible ensayar en las condiciones y espacios permitidos, del diagrama de interacción P-M [9] y utilizando como parámetros la tensión crítica del hormigón y fluencia del acero, se determinó el Momento nominal  $M_n$  y Corte nominal  $V_n$ , cuyos valores se presentan en la Tabla 5.1 para el valor nominal de diseño propuesto (10 % de Carga Axial ( $P_0$ ),  $f_c = 25MPa$  y  $f_y = 420MPa$ ), así como para cada uno de los ensayos realizados con sus tensiones reales según Tabla 3.2 y 3.3.

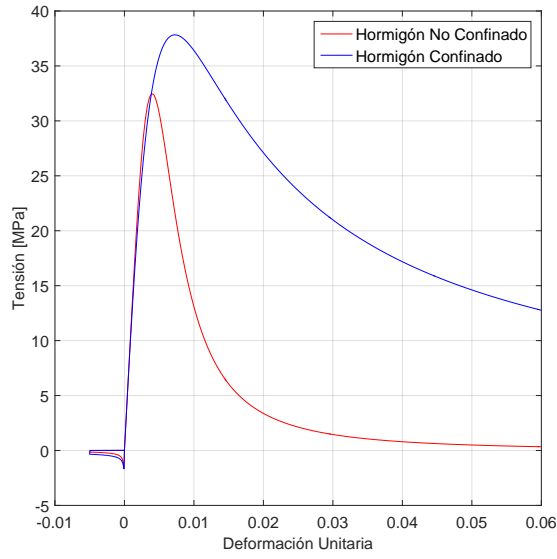
**Tabla 5.1:** Resumen Carga Axial  $P_0$ , Momento y Corte Nominal.

	$P_0$ [tonf]	$P_0/A_g f'_c$ [%]	$M_n$ [tonf·m]	$V_n$ [tonf]
Caso Nominal	34.4	10.00 %	33.2	11.8
Ensayo 1	36.9	8.12 %	40.1	14.3
Ensayo 2	37.2	7.10 %	36.3	13.0
Ensayo 3	37.1	7.10 %	36.2	12.9
Ensayo 4	37.4	7.10 %	36.8	13.1

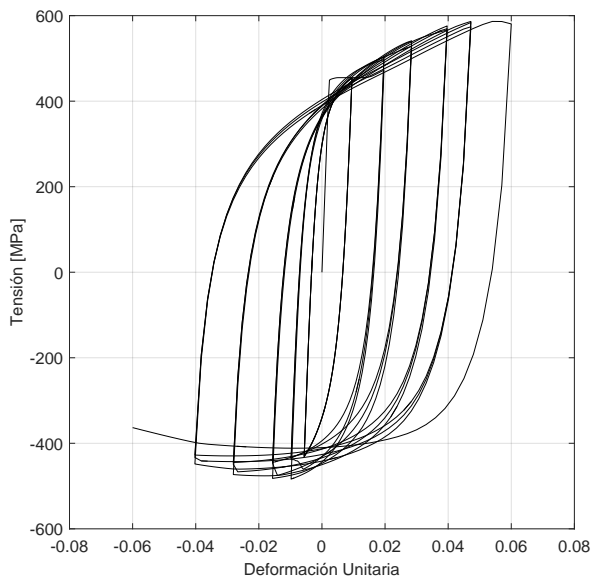
Como se mencionó anteriormente, las primeras grietas aparecen aproximadamente en el drift del 0.3 % para los muros banderas, mientras que el muro rectangular esta más cercano al 0.4 % de drift, donde el valor asociado a carga lateral es de aproximadamente  $12\text{tonf}$  para muros banderas, mientras que el muro rectangular es cercano a  $13.5\text{tonf}$ , estando dentro del rango de diseño estimado. Las cargas laterales antes mencionadas, fueron determinadas de los gráficos obtenidos carga vs desplazamiento (Figura 4.3.3a, 4.3.6a, 4.3.9a y 4.3.12a) determinando el desplazamiento aproximado en los drift donde aparecen las primeras grietas y buscando la carga asociada a dicho desplazamiento.

### 5.3. Modelamiento

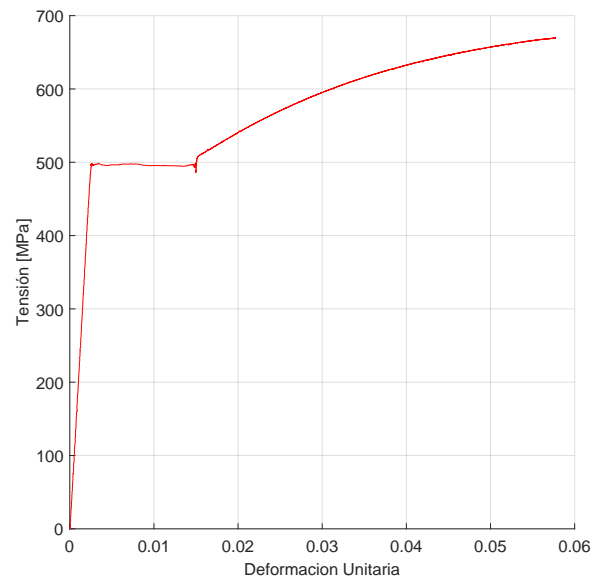
El modelo se realiza en el programa SAFEToolbox, utilizando elementos "Quad4N Optimizado", los cuales están formulados como elementos membrana de cuatro nodos y tres grados de libertad por nodo. A cada elemento finito se le asigna las propiedades de los materiales ensayados, cuyos valores se resumen en la Tabla 3.2 del Capítulo 3, donde a partir de los valores principales, se utilizan los modelos numéricos descritos en el Capítulo 2, obteniendo así las Figuras 5.3.1 y 5.3.2 para el hormigón y el acero respectivamente.



**Figura 5.3.1:** Curva analítica para el Hormigón.



**(a)** Modelo Pandeo.



**(b)** Ensayo barra de acero  $\phi_{16}mm$ .

**Figura 5.3.2:** Curva analítica para el Acero vs Curva Acero Ensayado.

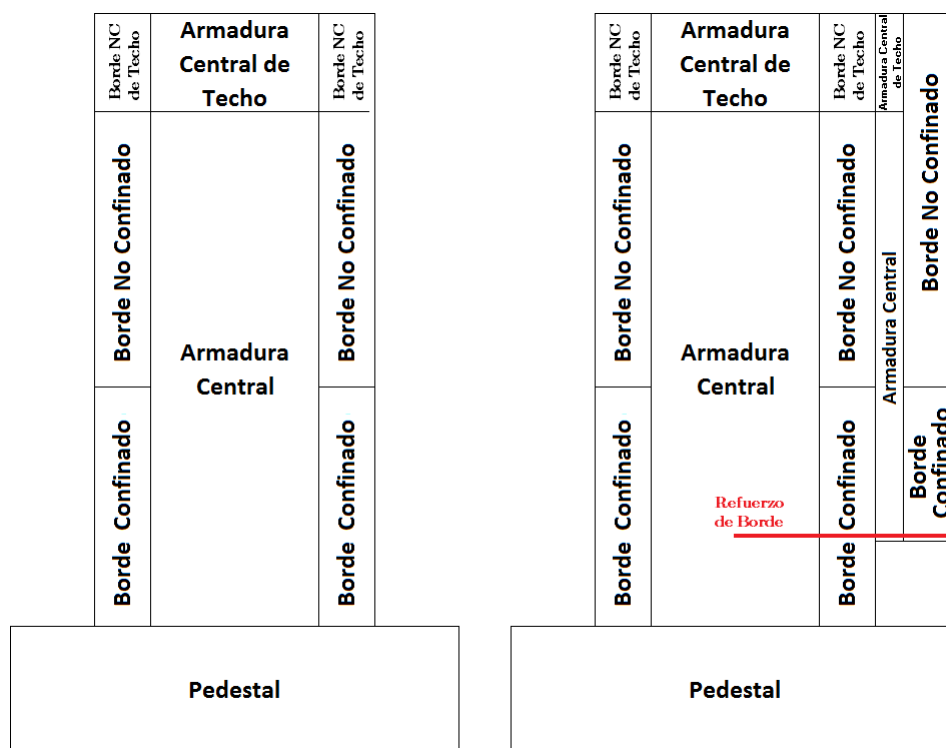
En la Tabla 5.2 se define cada uno de los materiales utilizados en la modelación de las probetas.

**Tabla 5.2:** Propiedades utilizadas en la modelación de cada Especimen.

	Especimen 1	Especimen 2	Especimen 3	Especimen 4
$E_s$	198800[MPa]			
$f_y$	495.9[MPa]			
$\nu$	0.2			
$\rho$	$2.5 \cdot 10^{-9}[N/mm^3]$			
$f_c$	33.0[MPa]	38.3[MPa]	38.3[MPa]	38.3[MPa]
$f_{cr}$	1.78[MPa]	1.92[MPa]	1.92[MPa]	1.92[MPa]
$E_c$	27000[MPa]	29090[MPa]	29090[MPa]	29090[MPa]
$\varepsilon_{cr}$	0.00008[mm/mm]			
$\varepsilon_c$	0.004[mm/mm]			
$\varepsilon_{c_{conf}}$	0.0073[mm/mm]	0.0070[mm/mm]	0.0070[mm/mm]	0.0070[mm/mm]
$K_{conf}$	1.16	1.15	1.15	1.15
$\alpha_1$	0.02			
$\alpha_2$	0.10			
$\alpha_{1_{conf}}$	0.02			
$\alpha_{2_{conf}}$	0.10			
$P_{Axial}$	361.5[kN]	364.9[kN]	363.8[kN]	366.9[kN]

Cabe destacar, que en las propiedades del acero, se utilizó el ensayo de las barras de  $\phi_{16}$ , ya que son el refuerzo principal y de mayor interés en el análisis, mientras que en el hormigón, al realizar los ensayos del material para determinar su resistencia a la compresión, no se midió su deformación límite  $\varepsilon_c$ , por lo cual se utilizaron los valores del trabajo de Thomsen [23]. Para todos los modelos bandera, se determinó usar un largo de refuerzo de borde, desde la base del muro hasta el tope del refuerzo en la discontinuidad igual a 700mm. Esto se debe esencialmente a que el largo de desarrollo de la armadura de borde desde la abertura hacia arriba es de 600mm aproximadamente, por lo cual considerar que solo se tiene un refuerzo efectivo trabajando igual a la mitad del largo de desarrollo (300mm), es totalmente aceptable, produciéndose de esta manera, la reducción de refuerzo total de 1000mm a 700mm.

La distribución de elementos esta basada en la configuración de refuerzos para los muros, detallando seis zonas de interés, las que se definen en la Figura 5.3.3 y se resumen en la Tabla 5.3.



**Figura 5.3.3:** Definición zonas de interés, Caso base y bandera.

**Tabla 5.3:** Resumen Cuantías Utilizadas.

	$\rho_{vertical}$	$\rho_{horizontal}$	$\rho_{horizontal}$ (con refuerzo de borde)
Armadura Central	0.32 %	0.34 %	5.70 %
Armadura Central de Techo	0.74 %	0.67 %	- - - -
Borde Confinado	3.97 %	0.75 %	6.12 %
Borde No Confinado	3.97 %	0.51 %	- - - -
Borde No Confinado de Techo	3.97 %	0.85 %	- - - -
Pedestal	Hormigón Elástico: $f_c = 45MPa$ y $E_c = 31529MPa$		

Dónde cada zona se detalla a continuación:

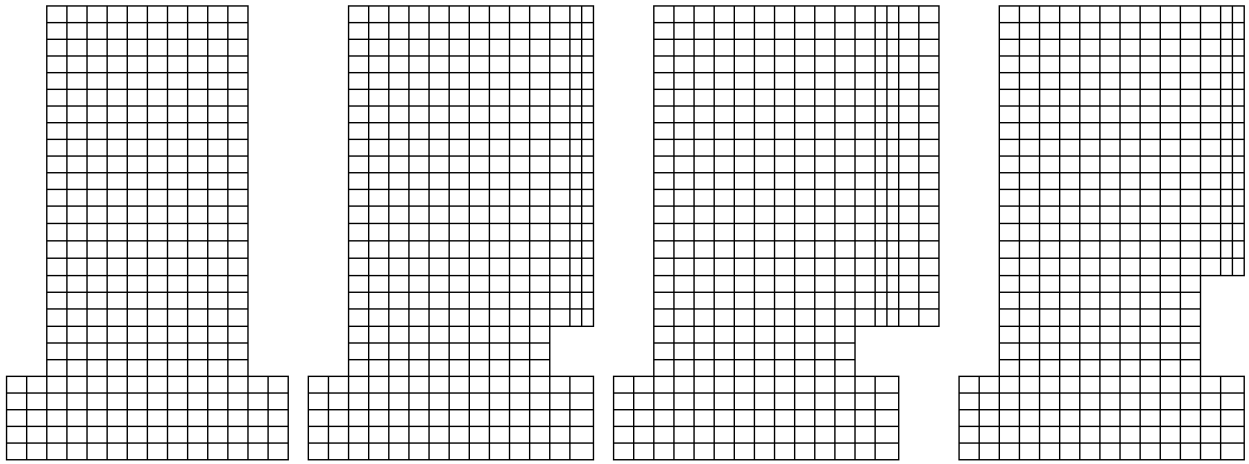
1. **Armadura Central:** Constituida por hormigón no confinado, a los elementos finitos de esta zona se le asignan la armadura de corte de las probetas, tanto vertical como horizontal.
2. **Armadura Central de Techo:** De manera similar a la zona anterior, para la armadura central de techo, se le asigna hormigón no confinado, mientras que la armadura de corte en este caso es del doble de la cuantía, según lo diseñado. Esta consideración se utiliza



para una correcta transmisión de las cargas y que no presente problemas en la parte superior del muro.

3. **Borde Confinado:** Para esta zona se le asigna hormigón confinado, además la cuantía de refuerzo longitudinal de borde, siendo esta última confinada el largo de un metro según los parámetros de diseño de las probetas, esto se logra agregando estribos, generando una cuantía adicional de acero en el sentido horizontal. Adicionalmente se le asigna tanto la cuantía vertical y horizontal correspondiente a la doble malla o armadura central.
4. **Borde No Confinado:** Esta zona es similar a la antes mencionada, con la diferencia que se utiliza hormigón no confinado, y los estribos se ubican a una distancia mínima por norma. Es importante considerar que esta zona cambia llegando al techo ya que la armadura central también cambiará.
5. **Borde No Confinado:** Esta zona es similar a la antes mencionada, con la diferencia que esta zona cambia llegando al techo ya que la armadura central también cambiará.
6. **Pedestal:** Constituido de hormigón elástico por simplicidad.

La geometría horizontal de los elementos finitos es seleccionada de manera tal de cubrir los elementos de borde con dos elementos finitos, mientras que la zona central será cubierta por seis elementos. Para la distribución vertical, los elementos finitos adquieren una altura tal que se logre una relación ancho-alto cercano a uno. Esto último no es del todo necesario, pero se busca maximizar el número de elementos que logren este criterio para reducir los problemas de convergencia y compatibilidad de elementos al realizar los análisis. En la Figura 5.3.4 se muestran la distribución o Mesh de elementos finitos utilizados para cada uno de los muros modelados donde el elemento más pequeño mide  $67.5\text{mm} \times 100\text{mm}$  en comparación al tamaño habitual que es  $100\text{-}200 \times 100\text{-}200$ , mientras que en la Tabla 5.4 está el resumen de la cantidad total de elementos utilizados para cada ensayo.



**Figura 5.3.4:** Distribución de elementos finitos para cada modelo.

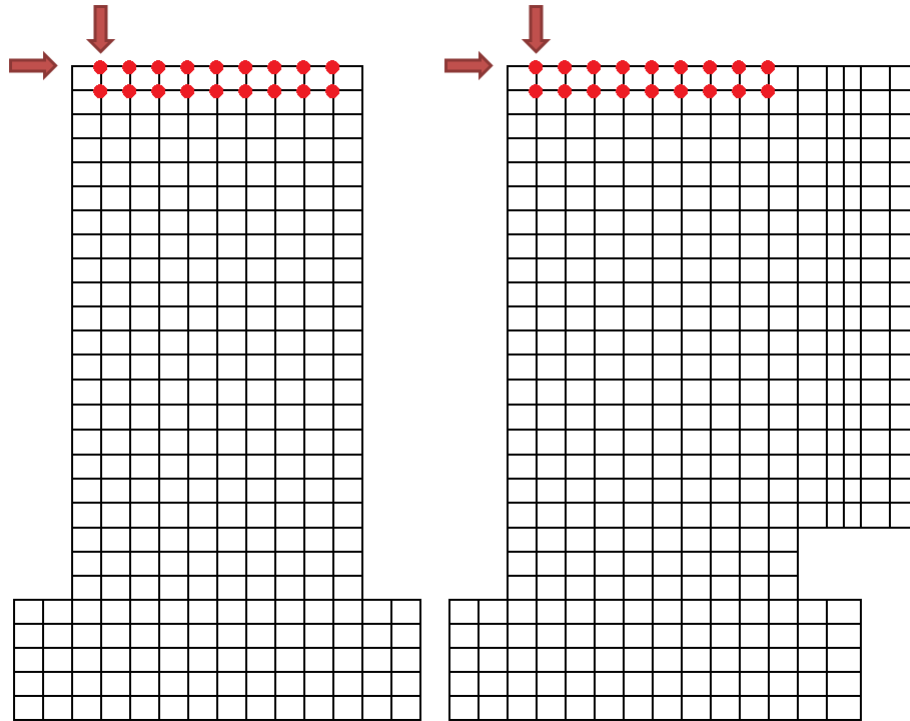
**Tabla 5.4:** Resumen Mesh Elementos Finitos.

	Elementos Totales
Muro 1	290
Muro 2	347
Muro 3	385
Muro 4	338

Es importante mencionar que el pedestal ha sido modelado como un elemento elástico por simplicidad, provocando un impacto en la interfase pedestal-muro, dado que las deformaciones unitarias en esta zona se ven reducidas por esta consideración. Por otra parte, la viga superior de hormigón, normalmente es modelada como un elemento elástico igual que el pedestal, pero para tener un diseño más real, se le asignaron los mismos refuerzos que las probetas, además de concentrar el peso de las alas de la viga en el centro, mejorando de esta manera la respuesta global. También es importante destacar la consideración del refuerzo de borde de la bandera que fue doblado hacia el interior del muro, el cual afecta las cuantías horizontales tanto de los elementos de borde confinados como la armadura central, tal como se muestra en la Tabla 5.3, dado que esto, nos permite modelar de mejor manera el traspaso de cargas a la base y evitar daños por corte.

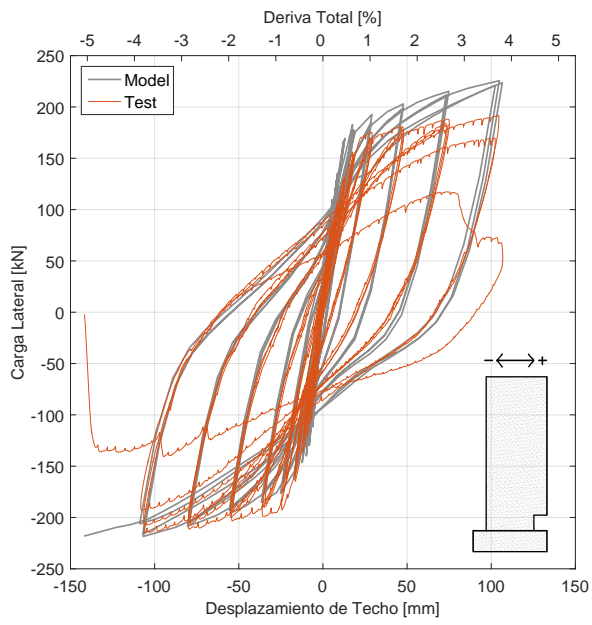
Para la aplicación de la carga axial se consideran los nodos centrales de la viga superior de hormigón del muro 1 y esto se replica para todos los demás ensayos. Se selecciona un total de 18 nodos, donde la carga axial aplicada en cada ensayo es distribuida en cada uno de

estos puntos. Por otra parte, para la aplicación de la carga lateral, se seleccionan los mismos puntos antes mencionados, y según la carga lateral del modelo, se distribuyen en estos nodos. En la Figura 5.3.5 se presenta un esquema de esta configuración.

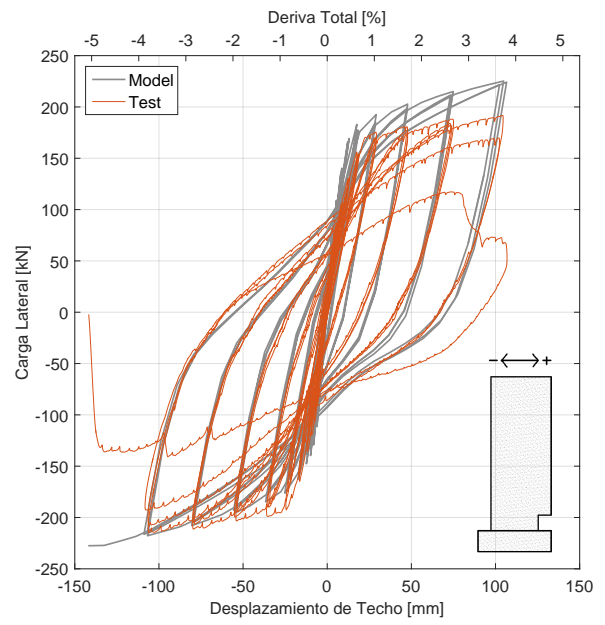


**Figura 5.3.5:** Distribución carga axial y lateral en nodos superiores.

Para la elección de los parámetros a utilizar en los modelos, se realizaron cuatro pruebas, tomando el muro 2 como caso de estudio, se ejecutan los dos primeros modelos que son con y sin daño en el hormigón, ambos utilizando un acero sin pandeo. Finalmente se ejecutan los últimos dos modelos que nuevamente se hace con y sin daño del hormigón, pero esta vez si se utiliza un acero con pandeo. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 5.3.6 y 5.3.7

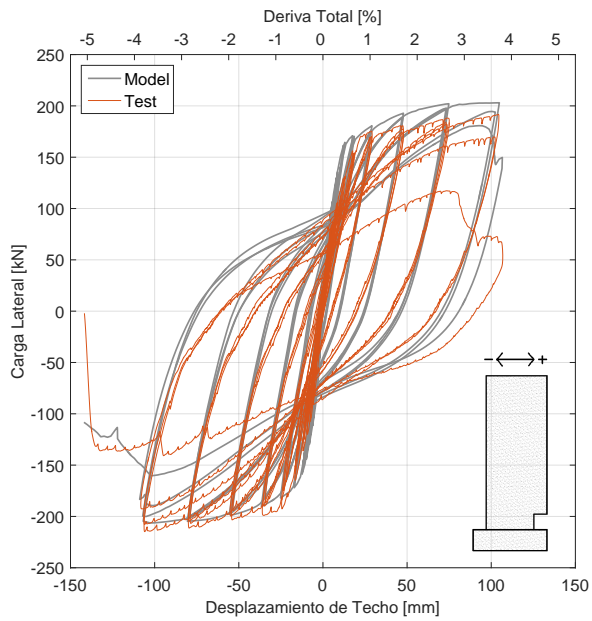


(a) Sin Daño del Hormigón

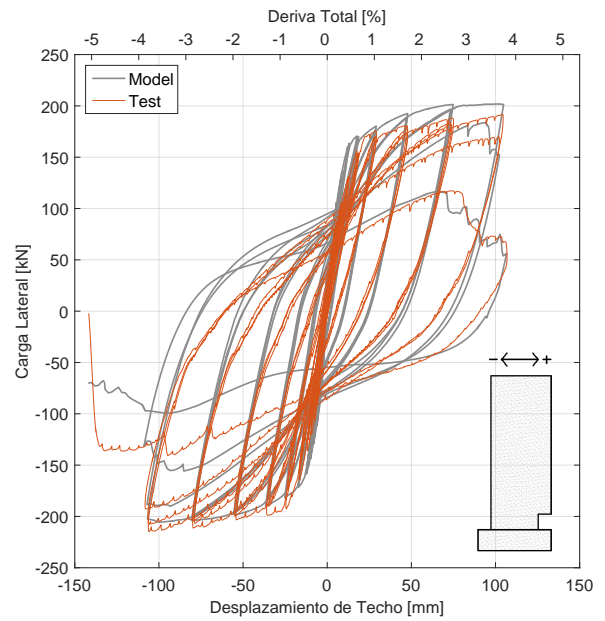


(b) Con Daño del Hormigón

**Figura 5.3.6:** Resultados obtenido para Muro 2 utilizando Acero sin Pandeo



(a) Sin Daño del Hormigón

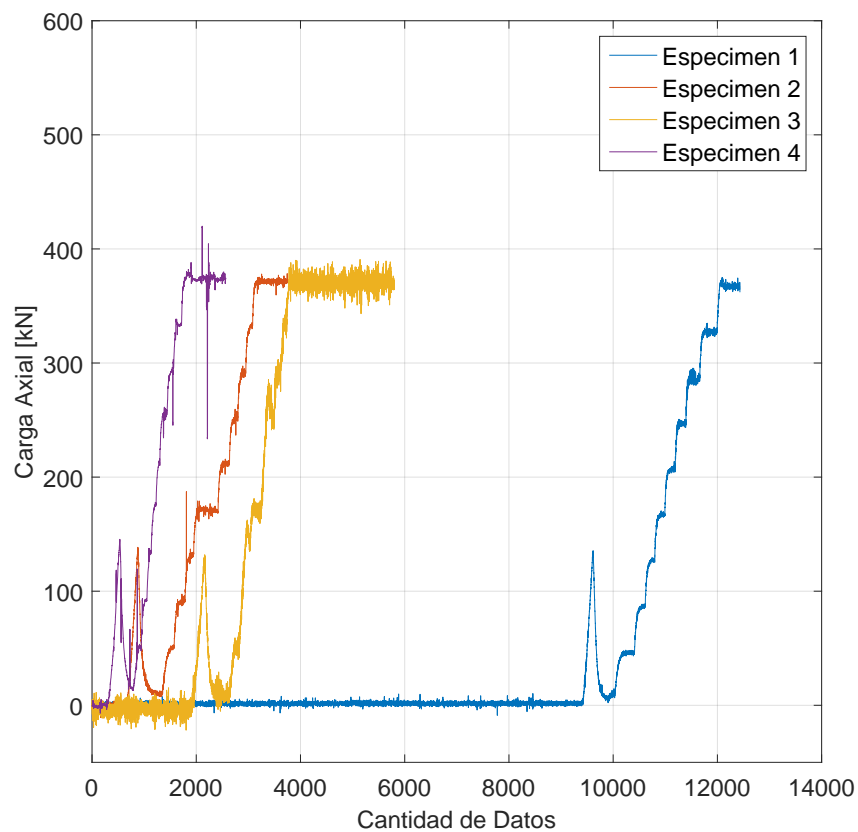


(b) Con Daño del Hormigón

**Figura 5.3.7:** Resultados obtenido para Muro 2 utilizando Acero Con Pandeo

De los resultados anteriores, podemos observar que la mejor respuesta se obtiene al combinar daño en el hormigón y pandeo del acero, esto se debe principalmente al acero con pandeo, dado que al no incorporar este efecto (Figura 5.3.6), la capacidad del muro crece indefinidamente, debido a que el modelo del acero al ser genérico, no incorpora ningún tipo de reducción de su capacidad, por lo cual jamás se llegaría a la falla obtenida en los ensayos. Mientras que la incorporación del daño del hormigón ayuda a aumentar la degradación hacia el final del ensayo, ajustando de mejor manera la respuesta en la curva carga vs desplazamiento.

Finalmente debemos aclarar que la aplicación de la carga axial esta controlada por los gatos hidráulicos, los cuales deben ir regulando el flujo de aceite durante todo el ensayo, lo que significa tener una carga axial aplicada constante pero con fluctuaciones. En la Figura 5.3.8 se muestra como aumenta la carga axial desde el inicio del ensayo hasta alcanzar la carga deseada a utilizar, donde utilizaremos el valor promedio final.



**Figura 5.3.8:** Carga Axial aplicada a cada muro al inicio del ensayo.

## 5.4. Resultados Analíticos

### Especimen 1: Muro rectangular o caso base

Los resultados obtenidos, muestran una buena aproximación del modelo a los resultados del ensayo, dado que posee una pequeña diferencia en su rigidez inicial, mientras que su capacidad y ductilidad se mantienen similares, además con la incorporación del daño en el hormigón, se logra una degradación mejor hacia el final del 4% de drift. El inicio de la degradación se debe a la alta concentración de deformaciones en la base según el campo de deformaciones (Anexo C), que es responsable de acelerar el daño producto del pandeo, lo que genera que el hormigón se abra y pierda rápidamente su capacidad de resistencia. Finalmente el modelo es capaz de detectar la falla tanto en el mismo sentido como en el momento en que ocurre. En la Figura 5.4.9 se muestran los resultados obtenidos.

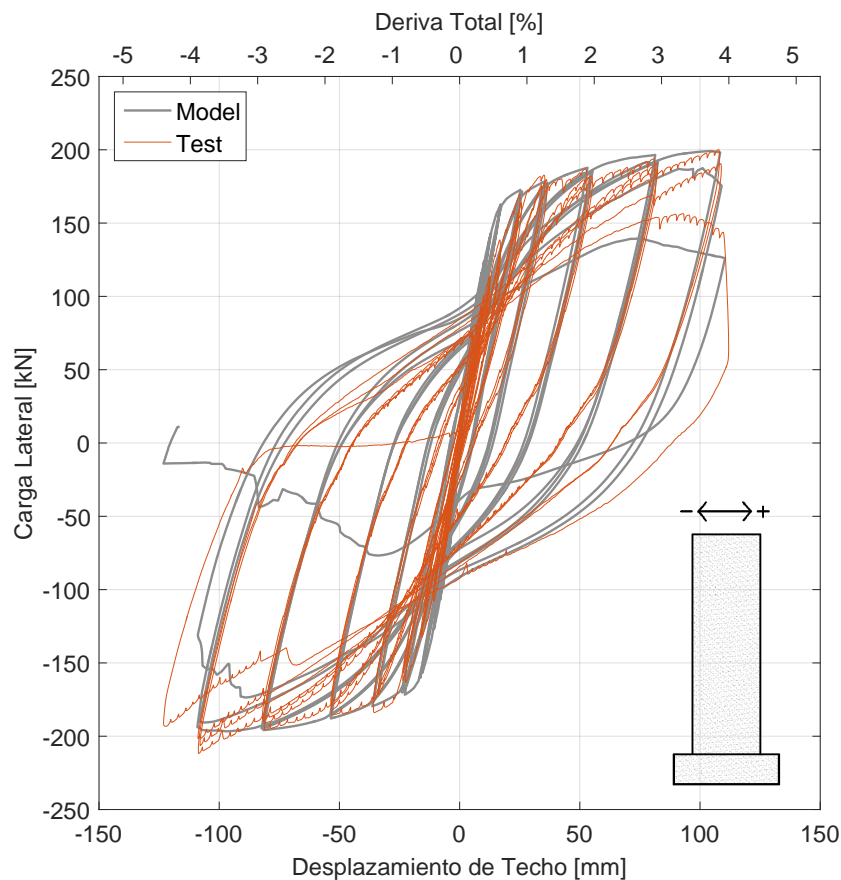
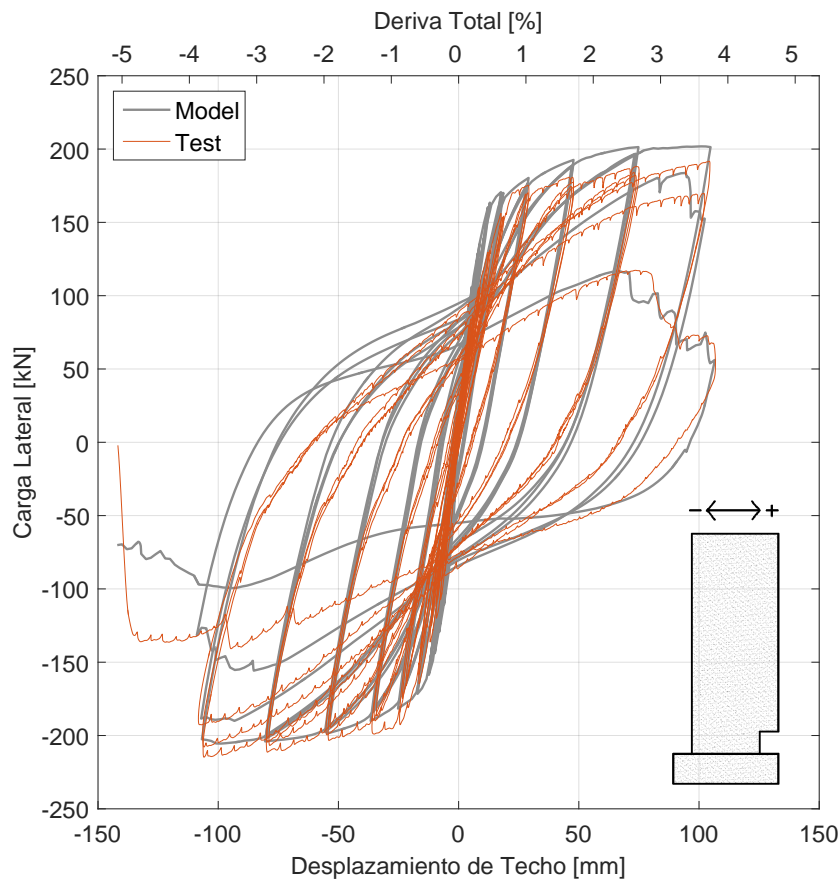


Figura 5.4.9: Curva Carga vs Desplazamiento Muro 1.

## Especimen 2: Muro Con Discontinuidad de 250mm x 300mm

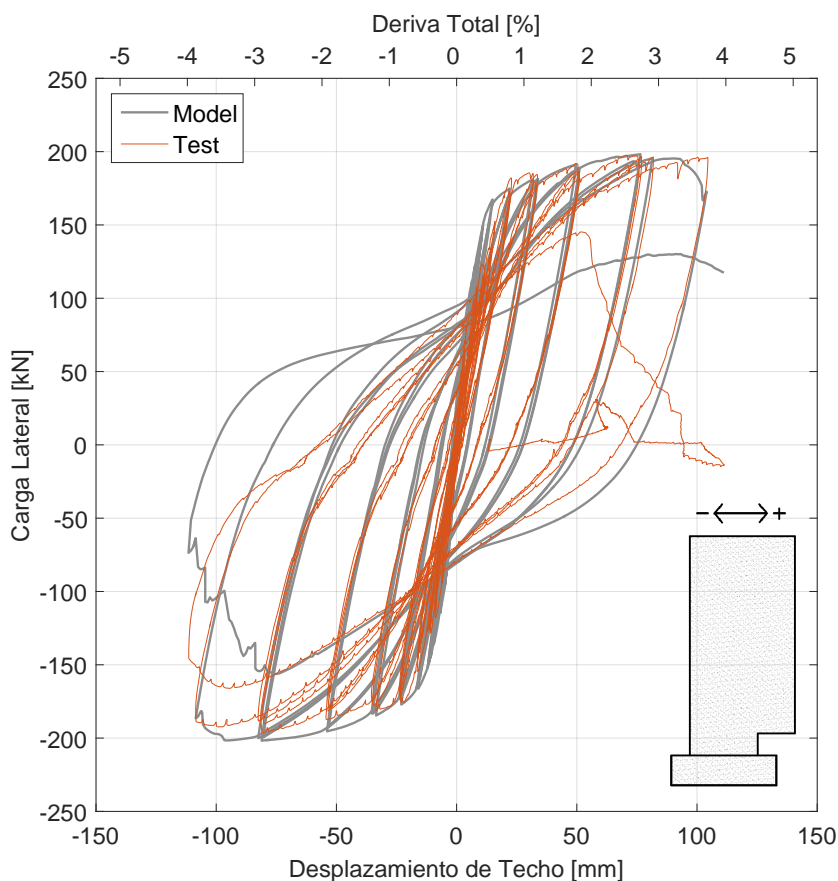
En este caso el modelo se acerca más a los resultados del ensayo, dado que posee una pequeña diferencia en su rigidez inicial, mientras que su capacidad y ductilidad se mantienen similares, además con la incorporación del daño en el hormigón, se logra una degradación mejor hacia el final del 4% de drift, captando de mejor forma la falla tanto en el mismo sentido como el momento en que ocurre. El inicio de la degradación se debe a la alta concentración de deformaciones en la base según el campo de deformaciones (Anexo C), en particular en la zona de la discontinuidad, concentrando grandes deformaciones y así acelerar el daño producto del pandeo, lo que genera que el hormigón se abra y pierda rápidamente su capacidad de resistencia. En la Figura 5.4.10 se muestran los resultados obtenidos.



**Figura 5.4.10:** Curva Carga vs Desplazamiento Muro 2.

### Especimen 3: Muro Con Discontinuidad de 500mm x 300mm

Similar a los casos anteriores, el modelo posee una buena aproximación a los resultados del ensayo, dado que posee una pequeña diferencia en su rigidez inicial, mientras que su capacidad y ductilidad se mantienen similares, además con la incorporación del daño en el hormigón, se logra una degradación mejor hacia el final del 4% de drift. Nuevamente la degradación se debe a la alta concentración de deformaciones en la base, en particular en la zona de la discontinuidad, tal como se puede apreciar en el campo de deformaciones (Anexo C), provocando que el hormigón se abra y se acelere su degradación como también ocurre con el pandeo. Además el modelo es capaz de detectar la falla frágil ocurrida en este ensayo, ya que decae rápidamente en el segundo ciclo del último drift de ensayo. En la Figura 5.4.11 se muestran los resultados obtenidos.



**Figura 5.4.11:** Curva Carga vs Desplazamiento Muro 3.



#### Especimen 4: Muro Con Discontinuidad de 250mm x 600mm

Los resultados obtenidos, muestran una buena aproximación del modelo a los resultados del ensayo, a pesar que este muro tuvo una falla distinta, el modelo es capaz de describirlo de buena forma. Posee una pequeña diferencia en su rigidez inicial, mientras que su capacidad y ductilidad se mantienen similares, además con la incorporación del daño en el hormigón, se logra una degradación mejor hacia el final del 3% de drift. Nuevamente el campo de concentración de deformaciones (Anexo C) nos muestra donde se concentrará el daño, en este caso a la altura del refuerzo de borde (700mm), donde provocará deformaciones muy grandes, el hormigón se abrirá y dado la barra discontinua, la capacidad del hormigón se vera afectada uy rápidamente. Finalmente el modelo es capaz de recrear el tipo de falla obtenida en el ensayo debido a las altas deformaciones en en la barra discontinua, a un agrietamiento excesivo del hormigón y dado que que estructuralmente el modelo no tiene nada a donde distribuir el exceso de carga y deformaciones. En la Figura 5.4.9 se muestran los resultados obtenidos.

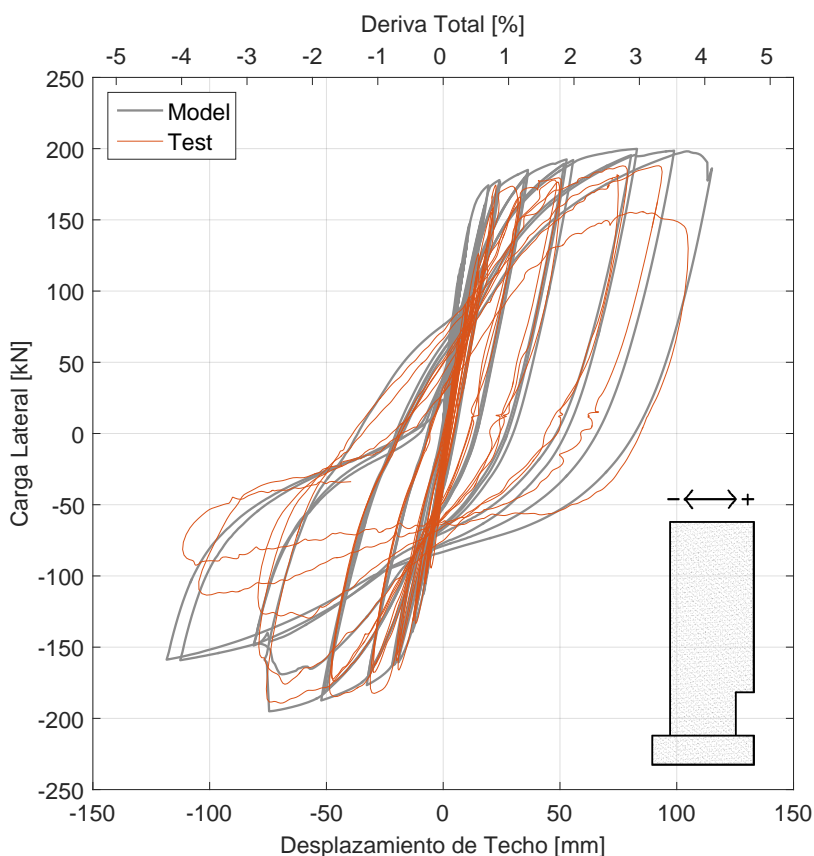
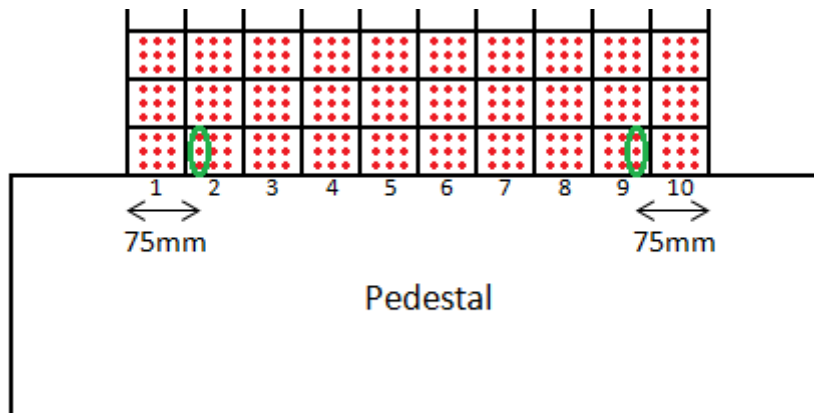


Figura 5.4.12: Curva Carga vs Desplazamiento Muro 4.

## 5.5. Deformaciones De Tracción Máximas

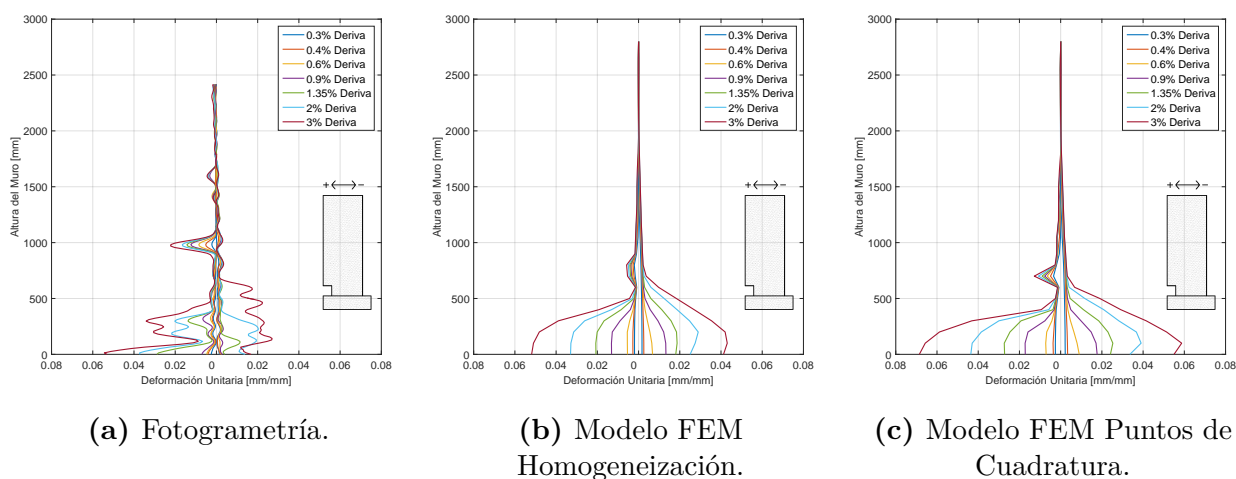
Para complementar los resultados obtenidos, se determinaron las deformaciones unitarias de tracci3n máximas en ambas direcciones, las cuales son comparadas con los resultados obtenidos por fotogrametría, trabajo realizado por Manriquez [10]. Para la obtenci3n de las deformaciones de tracci3n en el modelo, se utilizan los puntos de cuadratura, los cuales almacenan las deformaciones reales de los modelos ejecutados. En la Figura 5.5.13 se muestra un ejemplo de la distribuci3n de los puntos de cuadratura en cada elemento finito, donde para poder comparar las deformaciones de tracci3n con fotogrametría, se debe seleccionar la primera columna del segundo elemento y la última columna del noveno elemento, para luego promediar las deformaciones verticales obtenidas en estos tres puntos y así obtener la deformaci3n de tracci3n máxima para ambas posiciones. Este procedimiento se realiza para todos los elementos superiores en la misma posici3n antes mencionada. Se consideran estos puntos de cuadratura dado que fotogrametría al capturar las imágenes debe descontar una porci3n de secci3n lateral debido a que se cruzan las barras del sistema de carga axial, desplazando todas las medidas hacia el interior del muro  $65mm$  para el primer ensayo, mientras que para todo el resto un total de  $75mm$ , esto es para poder tener una mayor precisi3n en el procesamientos de las fotografías.



**Figura 5.5.13:** Puntos de cuadratura seleccionados.

Si bien los puntos de cuadratura muestran las deformaciones reales obtenidas en el modelo, existe un procedimiento de homogeneizaci3n de las deformaciones, el cual consiste en hacer

una interpolación de las deformaciones ocurridas en cada punto de cuadratura hacia los nodos mas cercano de cada elemento, produciendo un suavizado de las mediciones, un procedimiento similar al que realiza fotogrametría. Si bien en este trabajo de tesis se utilizó para todos los efectos los puntos de cuadratura, en la Figura 5.5.14 se hace una comparación entre los métodos de calcular deformaciones de tracción por punto de cuadratura, por homogeneización y utilizando fotogrametría para el muro 2, lo cual demuestra que el método de interpolación entrega resultados más cercanos a fotogrametría.

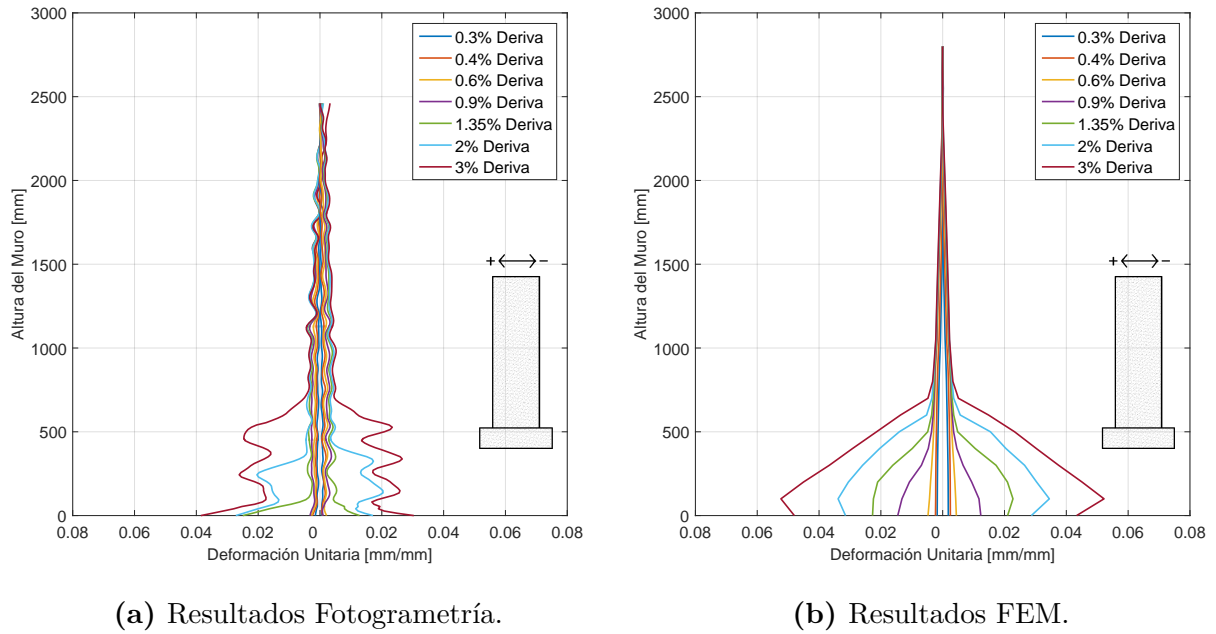


**Figura 5.5.14:** Deformaciones de tracción máximas Muro 2.

Es importante destacar, que fotogrametría obtuvo los datos desde el lado contrario del sistema de referencia, es decir, se tuvo que invertir los resultados de los modelos para que coincidieran con fotogrametría. Adicionalmente para los resultados entregados por los modelos, en ambos casos (puntos de cuadratura y homogeneización) ocurre una reducción de las deformaciones de tracción justo en la base, esto se debe posiblemente a la utilización de un pedestal elástico, el cual aporta una mayor rigidez que la real, proporcionando una restricción que impide que se expanda y deforme de manera adecuada. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los muros modelados, comparando las deformaciones de tracción máxima según fotogrametría y puntos de cuadratura.

## Especimen 1: Muro rectangular o caso base

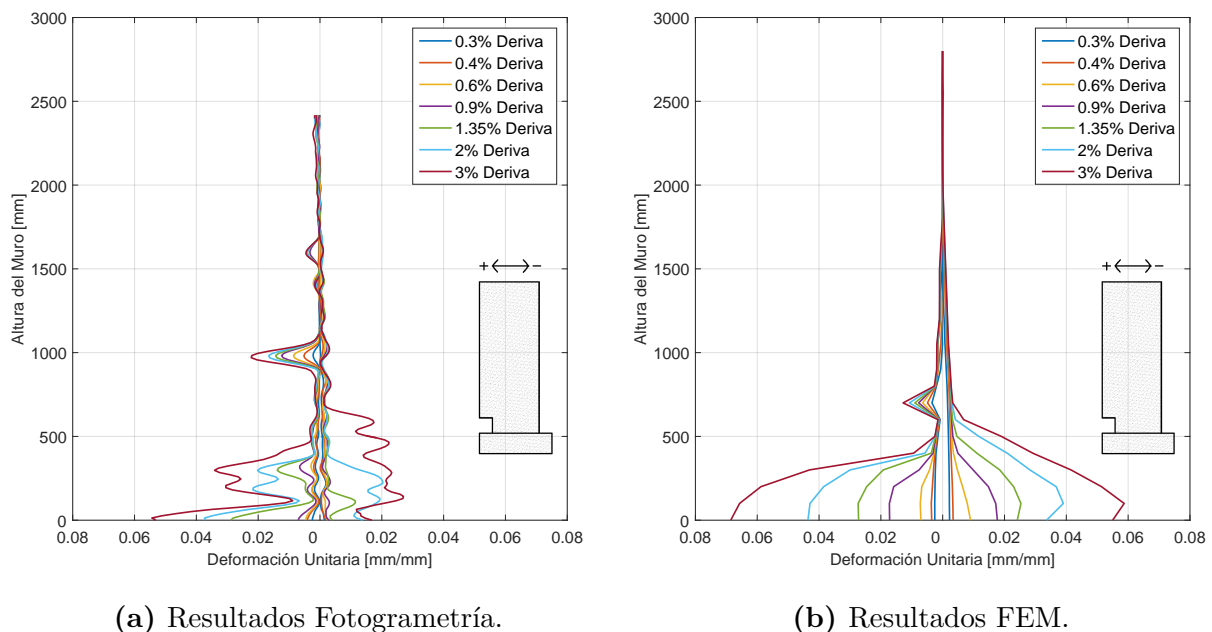
Los resultados obtenidos muestran una excelente aproximación del modelo FEM a los resultados experimentales de fotogrametría. Podemos apreciar una clara simetría en ambos resultados, además de una forma cónica en la base, ratificando que el daño en muros esbeltos se centra en la base. En la Figura 5.5.15 se muestran los resultados.



**Figura 5.5.15:** Deformaciones de tracción máximas Muro 1.

## Especimen 2: Muro Con Discontinuidad de 250mm x 300mm

Podemos apreciar una asimetría en la forma de las deformaciones de tracción y esto se cumple en ambos resultados, esto se debe a la discontinuidad, ya que concentra mayores deformaciones en esta zona. El modelo de elementos finitos concentra de mayor manera las deformaciones en la base, mientras que fotogrametría no solo hace esto, sino que también es capaz de detectar de mejor manera otras deformaciones y daños locales, como es el caso del peak que aparece en el sentido de la discontinuidad, demostrando así las limitaciones del modelo de elementos finitos, ya que si se realizan pruebas con un refuerzo de borde mas corto, este comienza a demostrar una mayor concentración de deformaciones en la zona como lo hace fotogrametría, con el problema que las deformaciones obtenidas se ubican mucho más abajo de donde realmente aparecen. Adicionalmente podemos observar un comportamiento similar en el lado continuo del muro para ambos resultados con el caso rectangular, si bien las magnitudes entre fotogrametría y FEM varían, no ocurre así cuando se comparan los resultados del muro 1 y 2 usando el mismo sistema. En la Figura 5.5.16 se muestran los resultados.



**Figura 5.5.16:** Deformaciones de tracción máximas Muro 2.

### Especimen 3: Muro Con Discontinuidad de 500mm x 300mm

Similar al caso anterior, podemos apreciar una asimetría en la forma de las deformaciones de tracción y esto se cumple en ambos resultados, esto se debe a la discontinuidad, ya que concentra mayores deformaciones en esta zona. El modelo de elementos finitos concentra nuevamente de mayor manera las deformaciones en la base, mientras que fotogrametría no en este caso posee deformaciones mas uniformes en la base, además del peak que aparece en el sentido de la discontinuidad. Esta reducción de magnitud de deformaciones en fotogrametría se debe a la utilización de fotos globales, ya que los datos obtenidos utilizando fotos locales, muestran un claro incremento en las deformaciones en comparación al muro 2, coincidiendo de esta forma, el supuesto de que las deformaciones y daños se concentran aun más entre mayor sea el largo de la abertura. Nuevamente podemos observar un comportamiento similar en el lado continuo del muro para ambos resultados con el caso rectangular. En la Figura 5.5.17 se muestran los resultados.

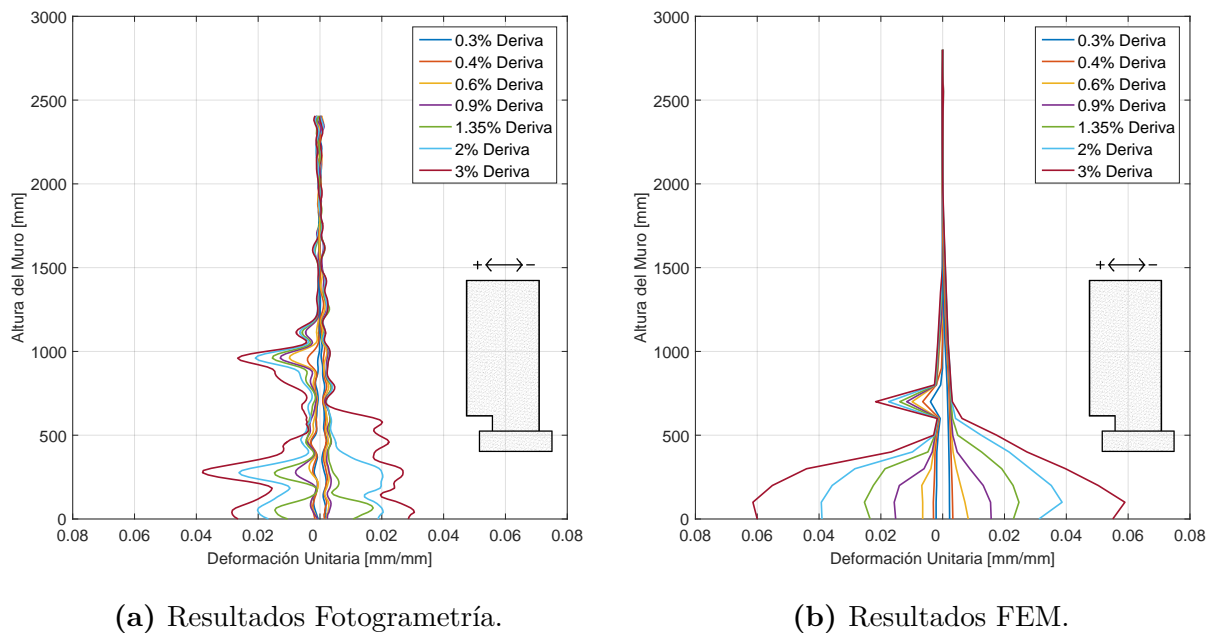
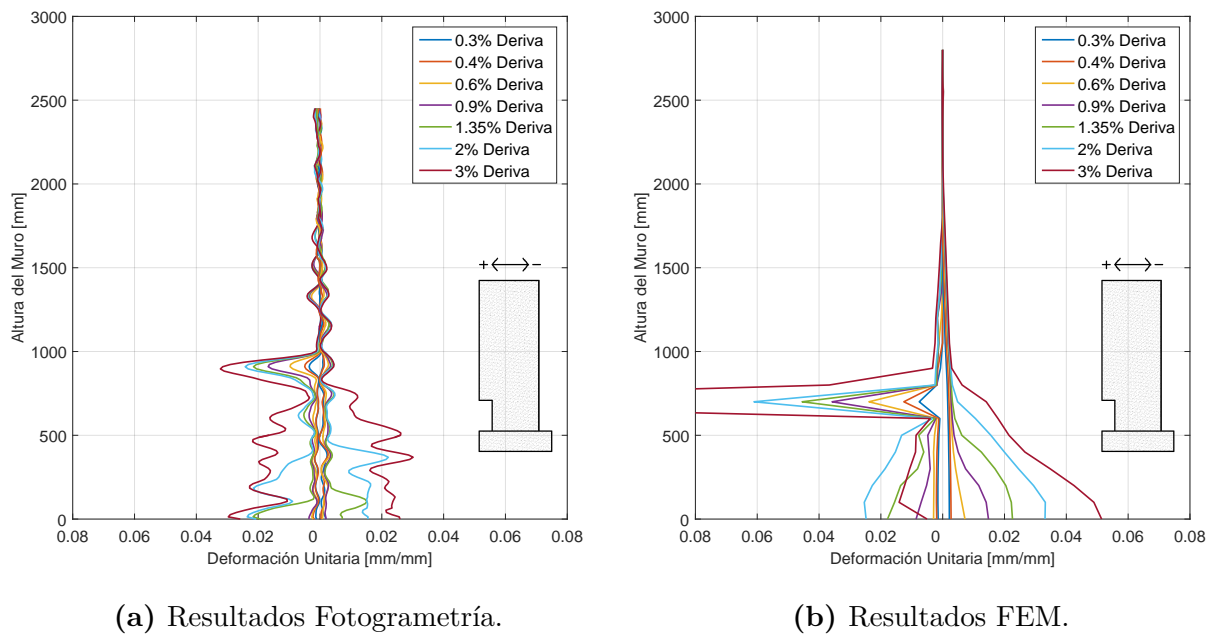


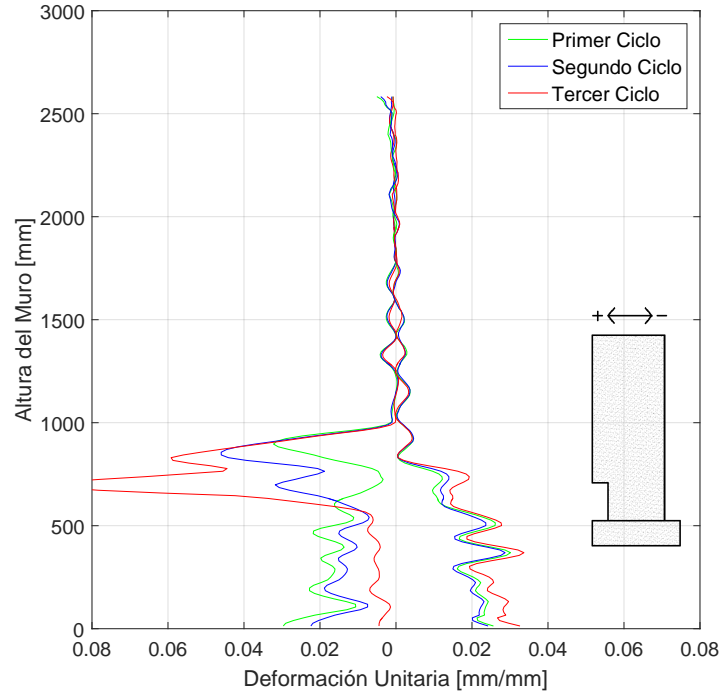
Figura 5.5.17: Deformaciones de tracción máximas Muro 3.

#### Especimen 4: Muro Con Discontinuidad de 250mm x 600mm

Si bien el último ensayo tuvo una falla distinta a la esperada, el modelo de elementos finitos si logra captar de buena forma esta concentración de deformaciones, produciéndose un peak ya al momento de la falla total. Si bien fotogrametría capta esta deformación, si podemos apreciar que para todos los niveles de drift, el peak de deformaciones en la barra que deslizó es mayor que todas las deformaciones en la base, situación que también ocurre con el modelo FEM. Nuevamente podemos observar un comportamiento similar en el lado continuo del muro para ambos resultados con el caso rectangular. En la Figura 5.5.18 se muestran los resultados, además en la Figura 5.5.19 se muestra lo que ocurre en cada ciclo del 3% de drift por fotogrametría donde la deformación de tracción aumenta considerablemente, lo que demuestra que el modelo FEM predice un alto daño en el primer ciclo, mientras que fotogrametría muestra como empieza aumentar el daño por cada repetición de drift.



**Figura 5.5.18:** Deformaciones de tracción máximas Muro 4.



**Figura 5.5.19:** Deformaciones de tracción máximas Muro 4 para drift del 3% por fotogrametría.



# Capítulo 6

## Análisis Paramétrico

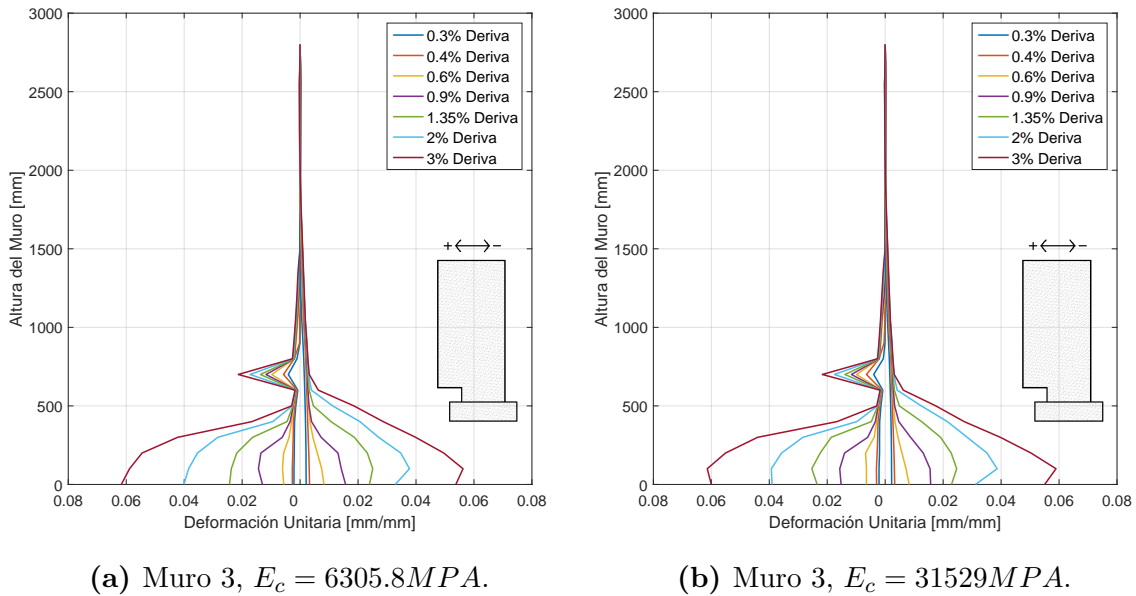
### 6.1. Introducción

En el Capítulo anterior, se validó el modelo de elementos finitos propuesto para esta tesis, con lo cual, podemos realizar estudios adicionales desde mejorar los resultados ya obtenidos, comprobar con configuraciones de análisis utilizadas por Ahumada [1] (flexión pura), variar refuerzos de armaduras y el impacto que producirá, así como también extender el modelo FEM a muros de mayor altura acercando aún más los resultados a la realidad de las construcciones Chilenas. A continuación presentaremos todos los casos posibles de estudio.

### 6.2. Efecto Utilización Pedestal Elástico

Los modelos de elementos finitos realizados en el Capítulo anterior, consideran un pedestal elástico para simplificar los análisis y tiempos de respuesta en la ejecución de los modelos. Sin embargo, realizar esta consideración no es tan representativa del ensayo, dado que el pedestal se desplaza y tiene un aporte en la corrección de los desplazamientos, además los pedestales

poseen grietas al finalizar los ensayos, por lo cual ratifican el aporte en las deformaciones de la base para todos los ensayos, es por esta razón que se ejecutó el muro 3 con un módulo elástico igual a la quinta parte antes utilizado, para reducir su rigidez y facilitar las deformaciones en la base, recordando que en las Figuras de deformaciones máximas de tracción, ocurría una pequeña reducción de las deformaciones a nivel de interfase muro-pedestal. A continuación en la Figura 6.2.1 se comparan las deformaciones de tracción máximas entre un modelo con la quinta parte del modulo elástico y otro con los parámetros normales.



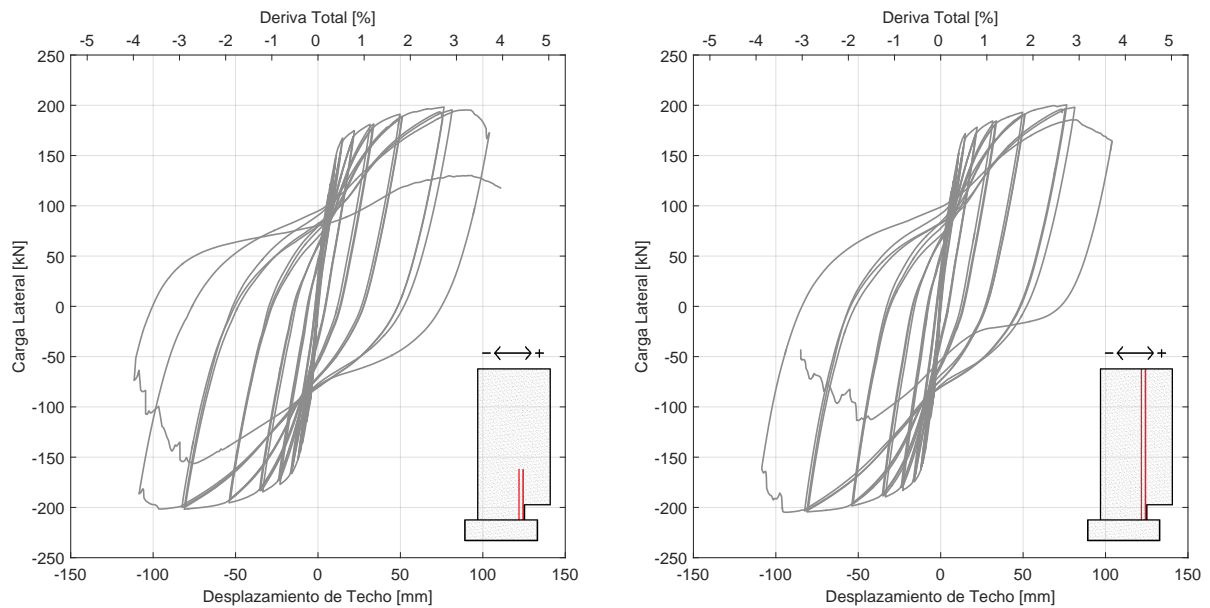
**Figura 6.2.1:** Comparación curvas de deformación de tracción máxima para muro 3 con distinto módulo de elasticidad.

Finalmente podemos concluir que la utilización de un pedestal elástico es una buena simplificación para los análisis numéricos, dado que simplifica la modelación además de reducir los tiempos de ejecución de los elementos finitos, sin embargo proporciona una rigidez adicional provocando una reducción en las deformaciones de tracción máximas a nivel de la interfaz muro-pedestal (Figura 6.2.1b) al considerar una rigidez mayor a la real de utilizar un pedestal con el mismo hormigón utilizado en las probetas pero con las armaduras reales dispuestas. En la Figura 6.2.1a se muestra el resultado de usar un hormigón con menor módulo de elasticidad, reduciendo la rigidez que proporcionaba la simplificación, lo cual se ve traducido en un aumento de las deformaciones de tracción máxima en especial en el sector de la abertura, lo que se traduce en un mayor daño del modelo y un inicio anticipado de la degradación.

### 6.3. Muro Con Armadura Continua En Borde Discontinuo

Los muros banderas ensayados en este trabajo, por criterio en el diseño, poseen una armadura de borde en la zona discontinuidad (internamente) de largo igual a  $1000\text{mm}$ , cuya dimensión fue determinada por un criterio impuesto que se decidió extender la armadura tres veces la altura de la abertura aproximadamente (la altura menor es de  $300\text{mm}$ ). Este criterio trajo problemas en el muro 4 al no quedar bien empotrada o con un largo de desarrollo suficiente, ya que la discontinuidad de ese caso le quitó largo de empotramiento. Es por este motivo, que se desea estudiar cual habría sido el impacto de utilizar la armadura de borde continua hasta el techo. El resultado obtenido se presenta en la Figura 6.3.2b.

#### Especimen 3: Muro Con Discontinuidad de $500\text{mm} \times 300\text{mm}$



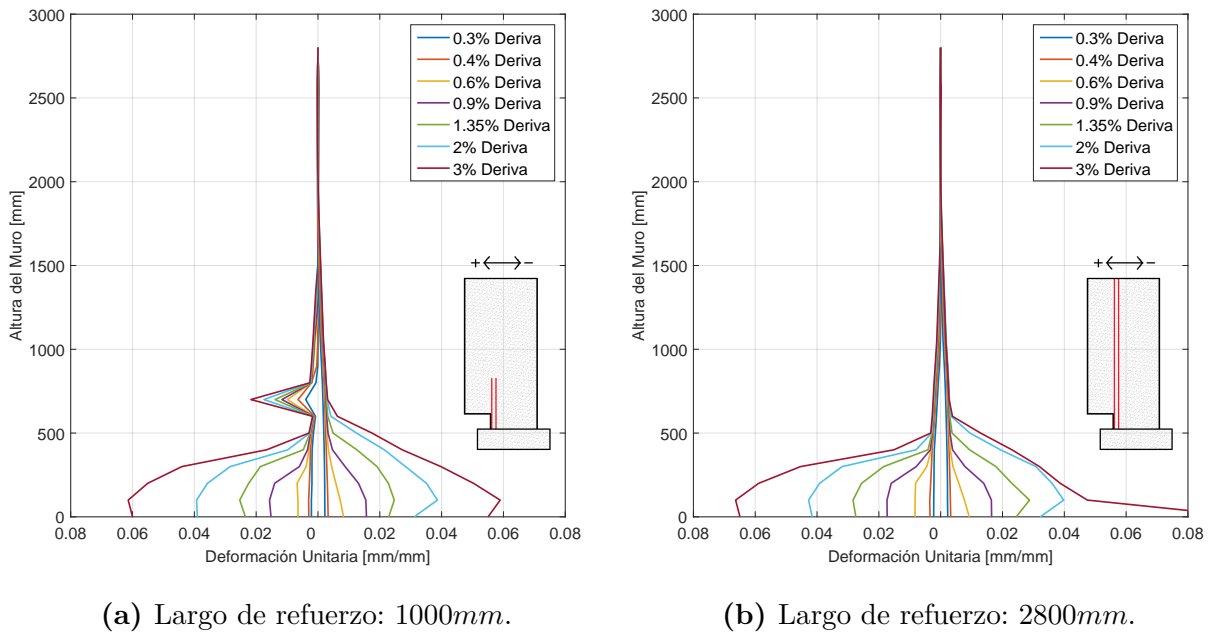
(a) Largo de refuerzo:  $1000\text{mm}$ .

(b) Largo de refuerzo:  $2800\text{mm}$ .

**Figura 6.3.2:** Comparación Curva Carga vs Desplazamiento con distinto largo de refuerzo.

Donde podemos apreciar que el modelo degrada antes, en el primer ciclo del 4% de deriva en el sentido positivo, para luego perder toda su capacidad al inicio del segundo ciclo en

sentido negativo. Con lo anterior podemos concluir que la utilización de un refuerzo bien anclado o dispuesto hasta el techo del muro, ayuda a la concentración de deformaciones en la base, haciendo desaparecer todo tipo de deformación intermedia debido a la concentración de deformaciones por el traspaso de la carga en refuerzo discontinuo. Lo anterior que reflejado en la Figura 6.3.3, donde podemos apreciar que la última deformación de tracción al 3% de drift en el sentido positivo (hacia la izquierda) se le produce un peak de deformación (Figura 6.3.3b), esto se debe a la mayor degradación presente en este modelo.

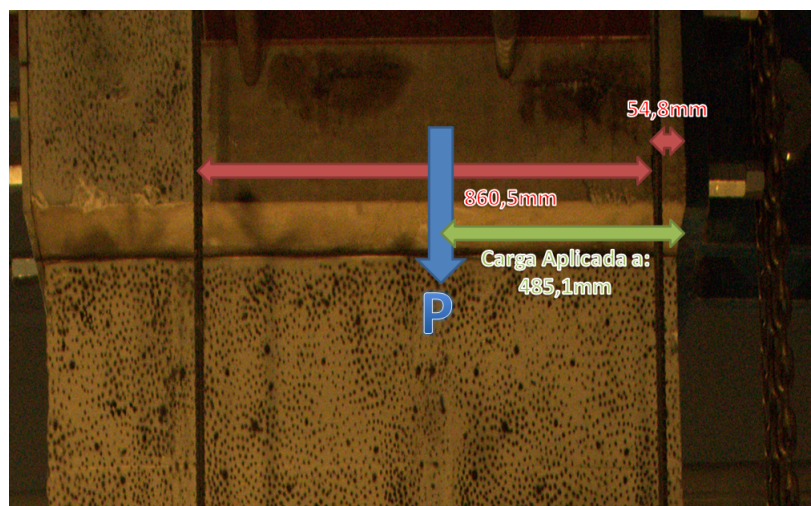


**Figura 6.3.3:** Comparación deformación de tracción máxima con distinto largo de refuerzo.

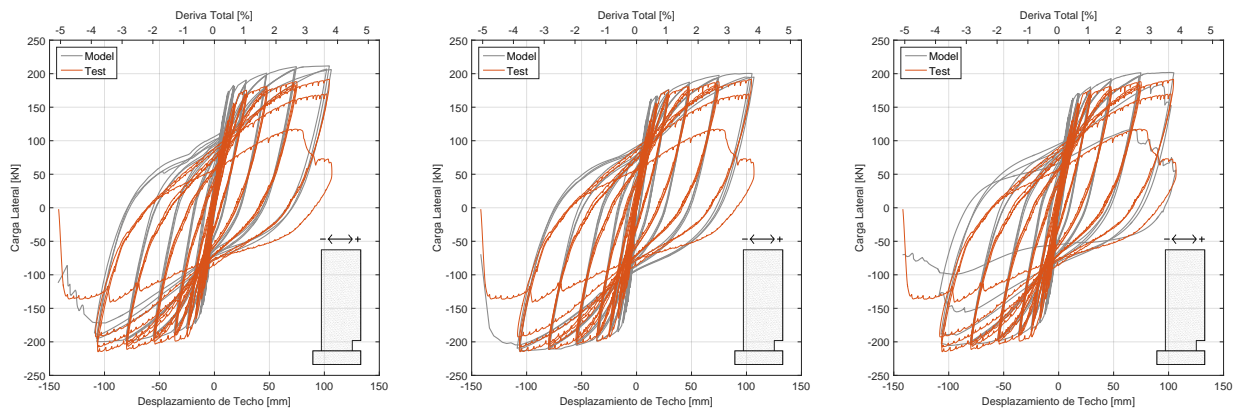
## 6.4. Muro 2 Con Carga Axial Excéntrica

Tal como se pudo apreciar en los datos obtenidos del ensayo 2, la curva carga vs desplazamiento se encuentra desplazada hacia abajo, demostrando que para alcanzar las deformaciones en el sentido positivo o de la abertura, requiere de menos carga mientras que en el sentido contrario ocurre el caso inverso. En primera instancia se discutió la posibilidad de que la aplicación de carga axial no fuera totalmente centrada en la base, esto debido a posibles imperfecciones constructivas en la cara superior de la viga de contacto o que el mismo sistema

de carga axial quedase desplazado en alguna de las direcciones, razón por la cual se midió la posición final de las barras de carga axial antes de iniciar la carga axial, para verificar en que posición quedaron, donde el centro de la carga axial quedo desplazada  $3\text{cm}$  hacia el centro, como se puede apreciar en la Figura 6.4.4, donde el centro es señalado a  $485\text{mm}$  mientras que debería estar aplicada a  $450\text{mm}$ . Para verificar a que se debe la excentricidad se realizaron dos modelos adicionales al muro 2, los cuales consisten en desplazar el punto de aplicación de la carga axial un total de  $3.4\text{cm}$  centímetros tanto para el lado derecho como el lado izquierdo, cuyo valor esta determinado de la Figura 5.3.5, donde para aplicar la carga excéntrica se considerarán solo 16 de los 18 nodos mostrados en la Figura, es decir no se tomaran los dos nodos del extremo izquierdo para obtener una carga excéntrica en el sentido derecho, y de forma análoga no se tomarán los dos nodos de la derecha para obtener una carga excéntrica hacia la izquierda, de esta forma, en la Figura 6.4.5 se muestran los resultados obtenidos.



**Figura 6.4.4:** Curva analítica para el Hormigón.



(a) Modelo Con Carga Excéntrica, 3cm Izquierda.

(b) Modelo Con Carga Excéntrica, 3cm Derecha.

(c) Modelo Con Carga Céntrica.

**Figura 6.4.5:** Resultados obtenidos para modelo muro 2 con carga excéntrica o centrada.

De los resultados anteriores, podemos concluir que una carga excéntrica si afecta a la respuesta global del muro, produciendo un corrimiento en su capacidad ya sea en la dirección positiva (carga excéntrica a la izquierda Figura 6.4.5a) o en su dirección negativa (carga excéntrica a la derecha Figura 6.4.5b). El valor promedio de aumento de capacidad es aproximadamente  $10kN$ , que si nos fijamos en la Figura 6.4.5c sería equivalente correr todo el ensayo (línea naranja)  $10kN$  hacía arriba, produciendo que tanto el modelo como ensayo cuadren de mucho mejor manera en sus capacidades, además de tener una respuesta simétrica.

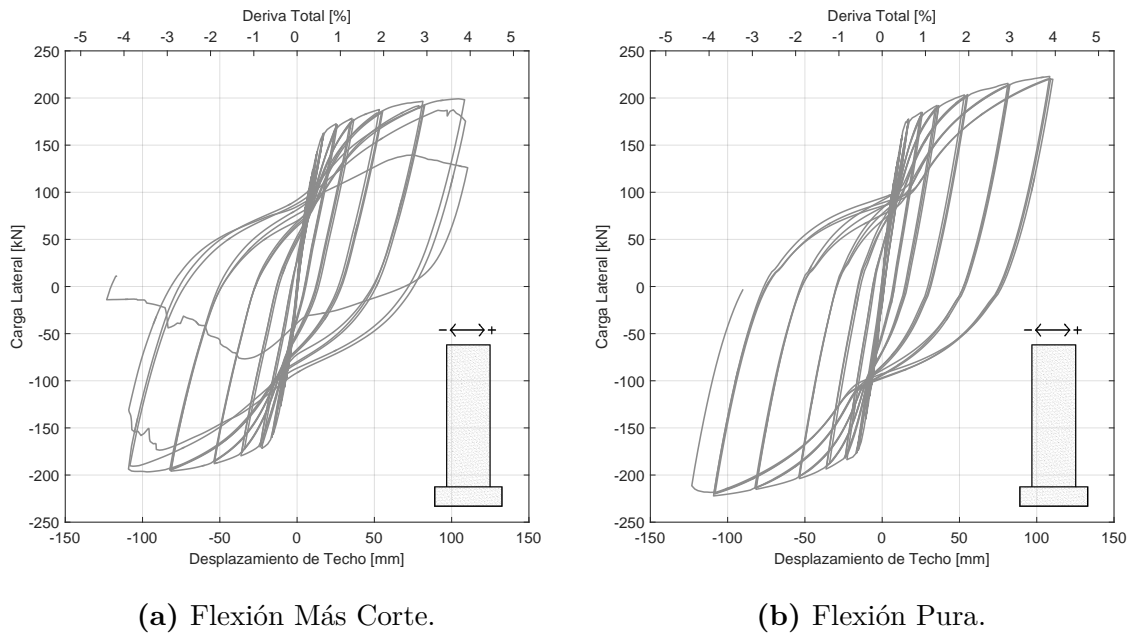
## 6.5. Modelo De Flexión Pura

En el trabajo de investigación de Ahumada [1], para sus modelos FEM utiliza vigas rígidas entre cada capa de elementos finitos, para poder modelar de forma correcta la hipótesis de Bernoulli. Esta consideración produce una restricción en las deformaciones y en la extensión de las grietas diagonales en la altura, teniendo impacto tanto en las compresiones como tracciones máximas. Este efecto es diferente para los muros tipo bandera, debido a que como hemos visto en este trabajo de tesis, las mayores deformaciones se concentran en la zona de la abertura, y la utilización de vigas rígidas imposibilitan la extensión de éstas, provocando mayores deformaciones, traducido en una degradación acelerada de los muros

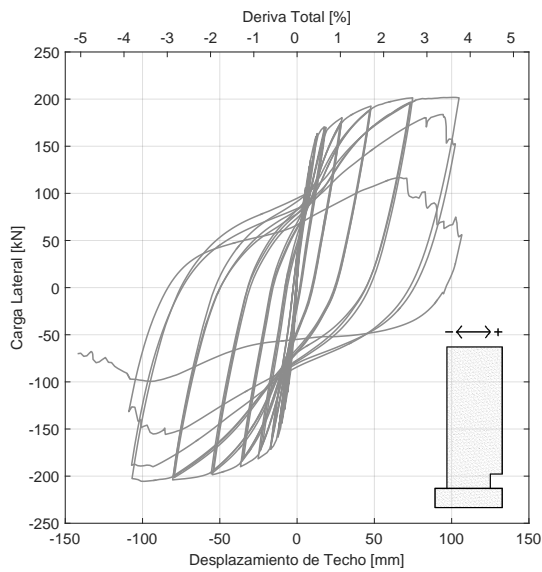
con discontinuidades. A continuación se detallan los resultados comparando con los modelos utilizados en el Capítulo anterior, que consideran el efecto de flexión y corte al mismo tiempo.

### 6.5.1. Comparación Modelo Flexión Más Corte Vs Flexión Pura

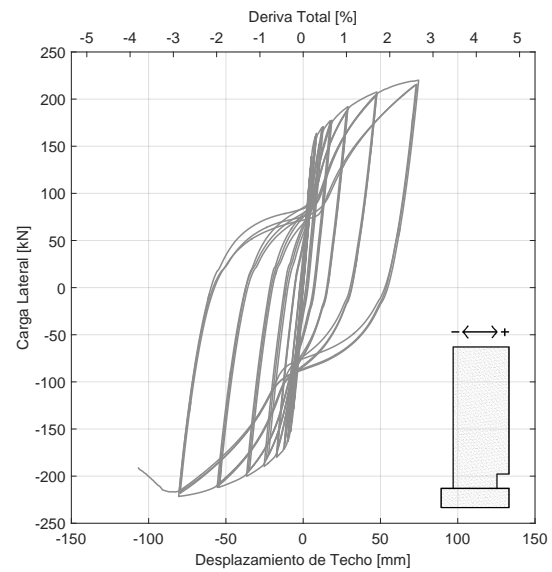
En la Figura 6.5.6b se muestra el resultado de la utilización de vigas rígidas entre capas de elementos finitos, donde se puede apreciar una mejor respuesta en el muro rectangular a flexión pura, ya que esta no alcanza a degradar, dado que se reducen las deformaciones de compresión máxima, agrietando en menor grado al hormigón y haciendo que pierda menos recubrimiento. Luego en las Figura 6.5.7b y 6.5.8b se muestra el resultado para el muro 2 y 3, donde para el caso con abertura las deformaciones a compresión aumentan por la concentración que ocurre al restringir las grietas diagonales en la zona discontinua, provocando una degradación acelerada al inicio del primer ciclo al 4 % de drift en sentido negativo, destacando una mayor degradación para el Especimen 3, haciendo fallar el muro mucho antes que el modelo completo (flexión más corte), ya que esto se produce en el primer ciclo del 4 % de deriva en sentido positivo.



**Figura 6.5.6:** Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Muro 1.

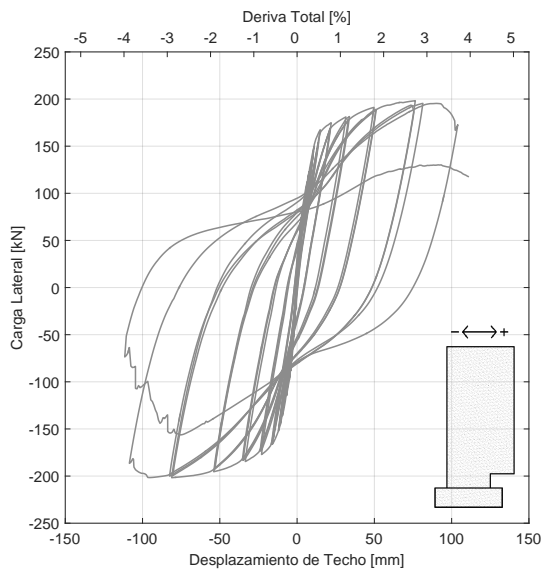


(a) Flexión Más Corte.

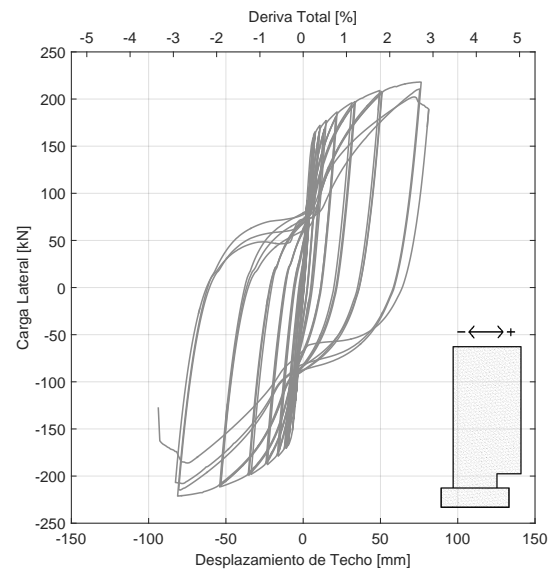


(b) Flexión Pura.

**Figura 6.5.7:** Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Muro 2.



(a) Flexión Más Corte.



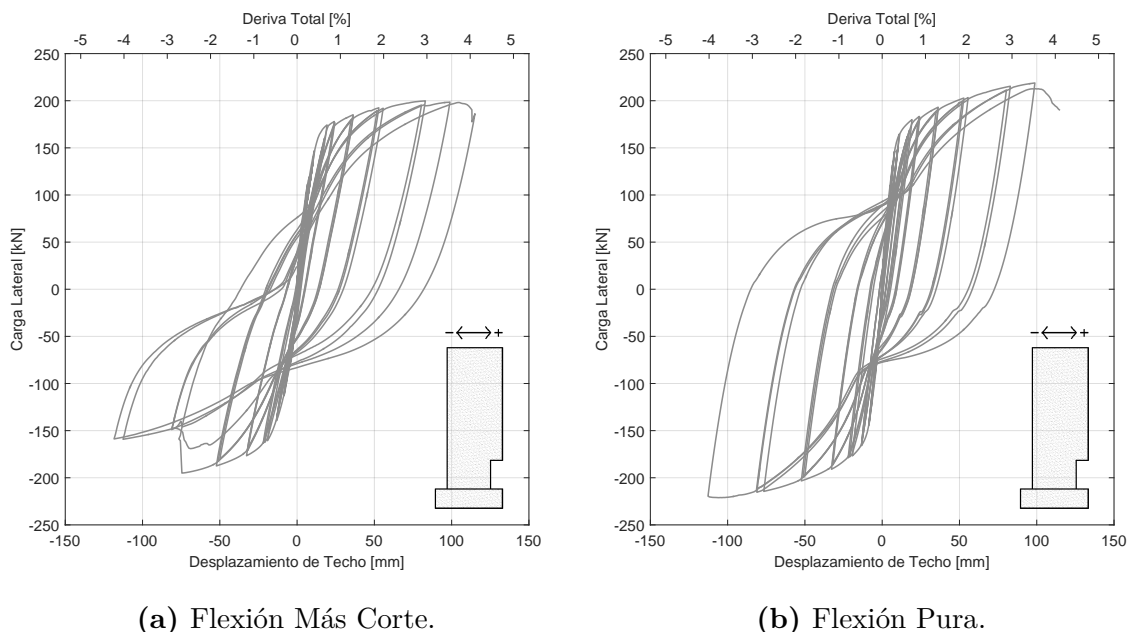
(b) Flexión Pura.

**Figura 6.5.8:** Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Muro 3.

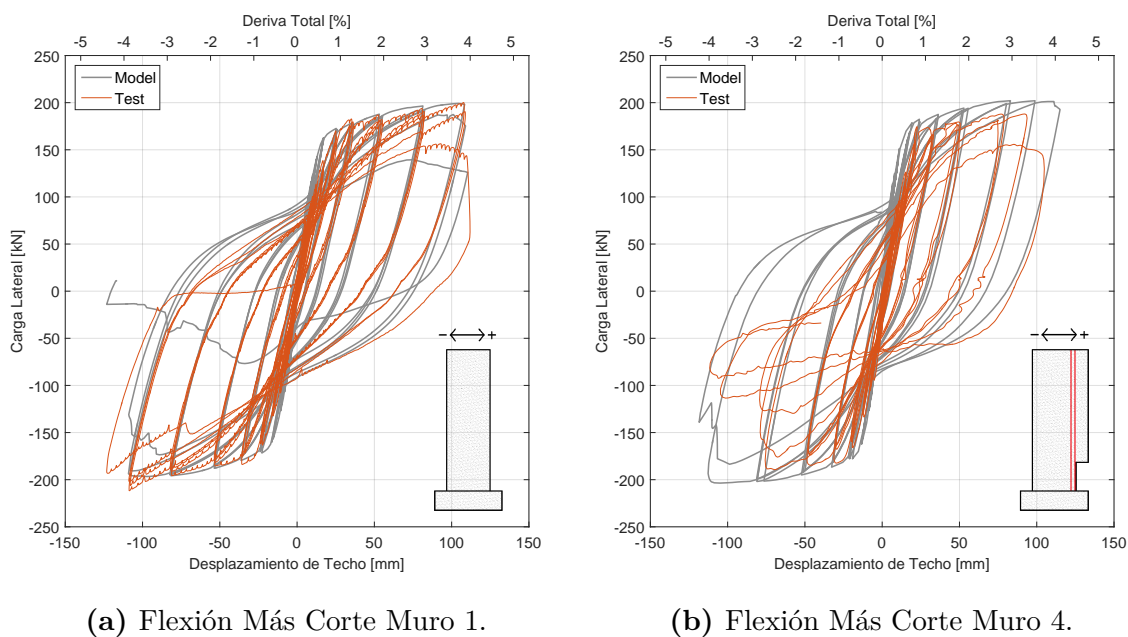
Finalmente para el último muro, la Figura 6.5.9b se observa un mejor comportamiento en la respuesta para el modelo de flexión pura en comparación al completo. Según los análisis y propuestas realizadas por Ahumada [1], los muros que poseen una abertura más alta, tienen a comportarse más como un muro rectangular, lo que podría explicar el mejor comportamiento



y mayor capacidad que tiene este modelo. Si bien es cierto que el último ensayo falló de forma distinta, en el caso de que la armadura hubiese estado bien anclada, se habría obtenido una respuesta según la Figura 6.5.10b, con un comportamiento más similar al muro rectangular Figura 6.5.10a y al modelo de flexión pura Figura 6.5.9b.



**Figura 6.5.9:** Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Muro 4.



**Figura 6.5.10:** Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Muro 1 y Muro 4 con largo de refuerzo: 2800mm.

### 6.5.2. Efecto De La Discontinuidad

Para cuantificar el impacto de la discontinuidad, se estudiará el perfil de deformaciones en la base de los muros 1 y 3, ya que son los de mayor diferencia y el muro 2 es un caso intermedio cuyos resultados se encuentran en el Anexo D. Para la obtención del perfil de deformaciones en la base se utilizan los puntos de cuadratura, similar a la sección 5.5 del Capítulo anterior, donde se toma el mismo promedio en la altura de puntos de cuadratura, pero esta vez solo de la primera fila de elementos finitos, obteniendo un perfil de deformaciones a una altura de  $5\text{cm}$  con respecto a la interfaz pedestal-muro.

En el modelo de flexión ( $f$ ) en la zona traccionada las diferencias entre el muro 1 y 3 son importantes, del orden del 15 % de diferencia, esto se debe a que en el modelo a flexión de muros discontinuos crece más rápido las deformaciones, debido a que utilizar vigas rígidas evita que las grietas diagonales puedan desarrollarse en la altura, limitándolas en el espacio entre vigas rígidas dispuestas en el modelo, razón por la cual las predicciones de Ahumada [1] son conservadoras. El modelo utilizado en los análisis previos de esta tesis considera el efecto de corte ( $f+c$ ), lo que permite que las grietas diagonales puedan desarrollarse en la altura, haciendo que la base del muro no se dañe tan rápidamente, y por lo tanto, las curvas del modelo completo ( $f+c$ ) son muy similares tanto para el muro rectangular como el muro bandera, a excepción de la deformación de tracción en la zona discontinua para el muro 3 en el drift del 2 %, incremento que es responsable en la aceleración del daño producto del pandeo en el refuerzo de borde, generando que se distinga este efecto en el primer ciclo del 4 % de deriva de techo. Si nos centramos en la zona de compresión, podremos apreciar que las magnitudes son similares pero no es necesariamente responsable de iniciar el daño, en especial para muros discontinuos, ya que el perfil de deformaciones nos muestra que poseen compresiones más pequeñas que un muro rectangular. A continuación se presentan las Figuras 6.5.11 y 6.5.12 que muestran los perfiles de deformación para el muro rectangular y el con discontinuidad, destacando las altas tracciones presentes en ambos modelos, para luego presentar las Figuras 6.5.13 y 6.5.14 donde se aprecia de mejor manera la zona de compresión.

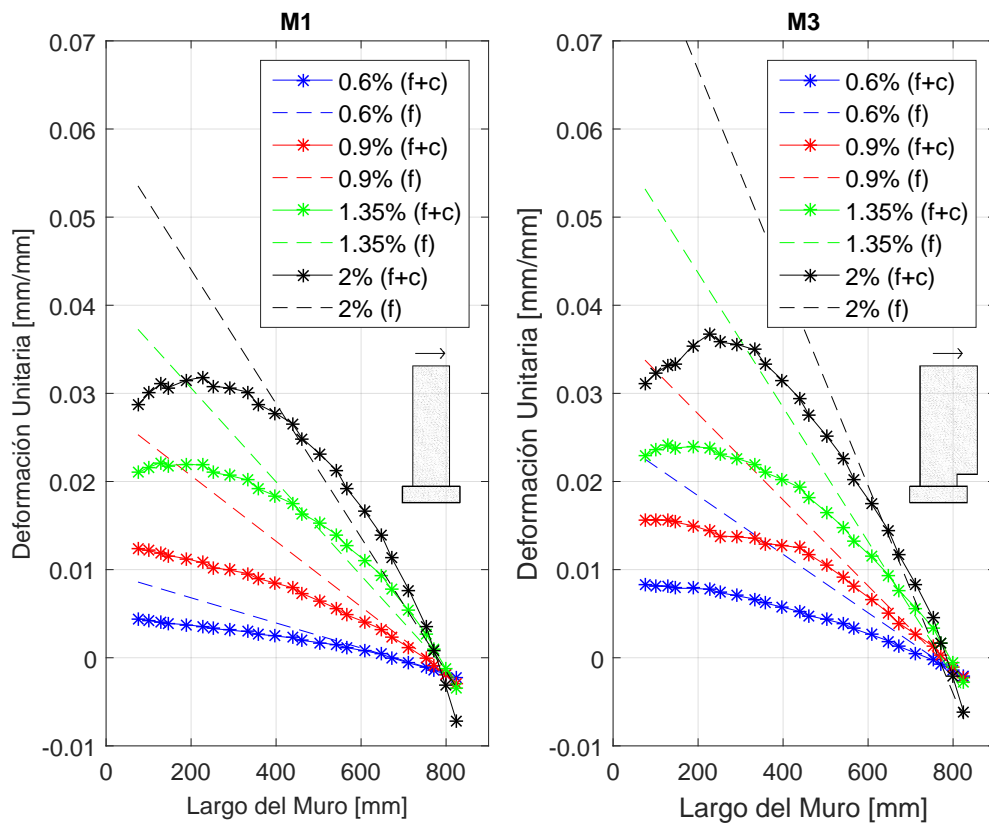


Figura 6.5.11: Perfil de deformaciones, Sentido Positivo.

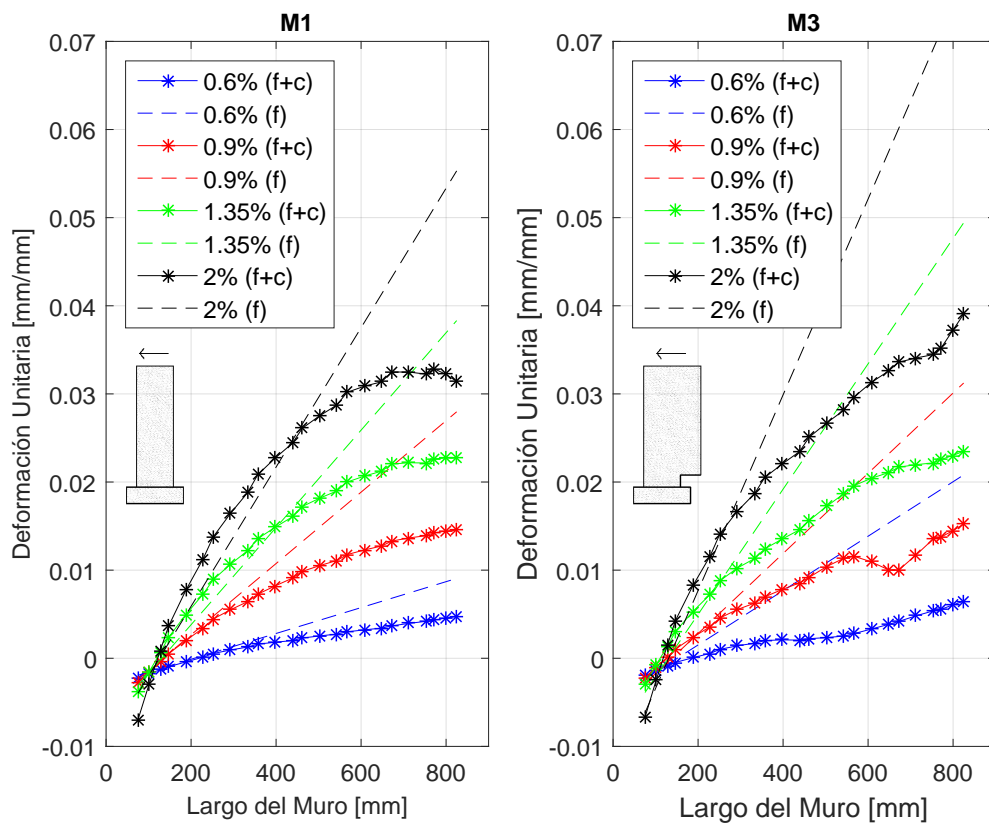
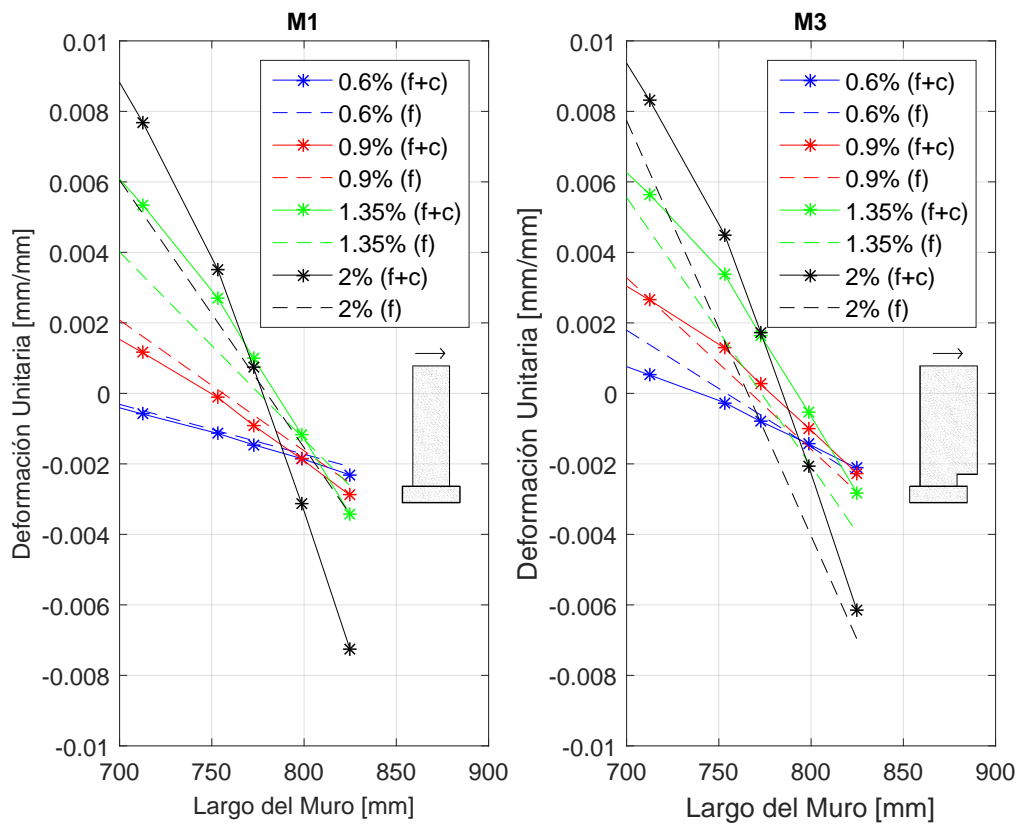
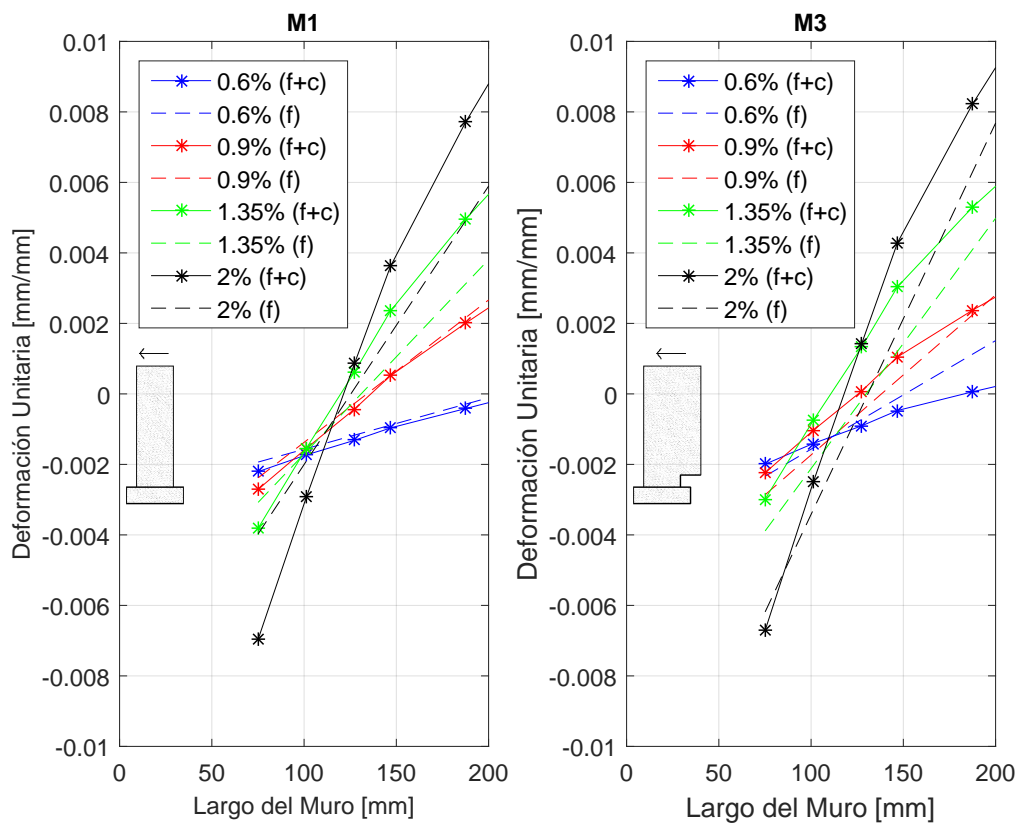


Figura 6.5.12: Perfil de deformaciones, Sentido Negativo.



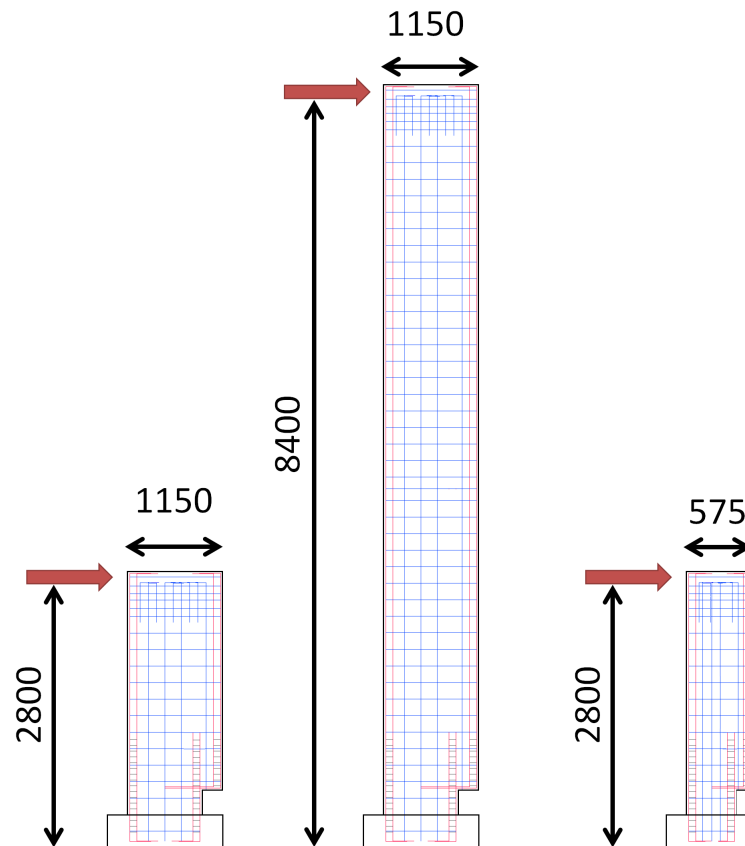
**Figura 6.5.13:** Perfil de deformaciones, Sentido Positivo.



**Figura 6.5.14:** Perfil de deformaciones, Sentido Negativo.

## 6.6. Muros Más Altos

Un estudio interesante de realizar son los muros más esbeltos, ya que en base a los análisis realizados por Ahumada [1] esto afecta directamente al nivel de daño, aumentando su concentración en la base para los muros con discontinuidades. Para una mayor comprensión y entendimiento de este fenómeno, se decidió triplicar la altura de los modelos, pasando de 2.8 a 8.4 metros de altura al punto de aplicación de la carga lateral, así como también dividir el largo del muro por la mitad, al igual que la bandera, pasando de  $900\text{mm}$  a  $450\text{mm}$  en la base y de  $250 - 500\text{mm}$  a  $125 - 250\text{mm}$  en la extensión de la bandera, respetando la distribución de los refuerzos de borde y corte en la altura. En la Figura 6.6.15 se muestra un esquema de los muros tanto modelados para el ensayo, como el más esbelto aumentando la altura o disminuyendo el ancho para realizar los análisis de las secciones posteriores.

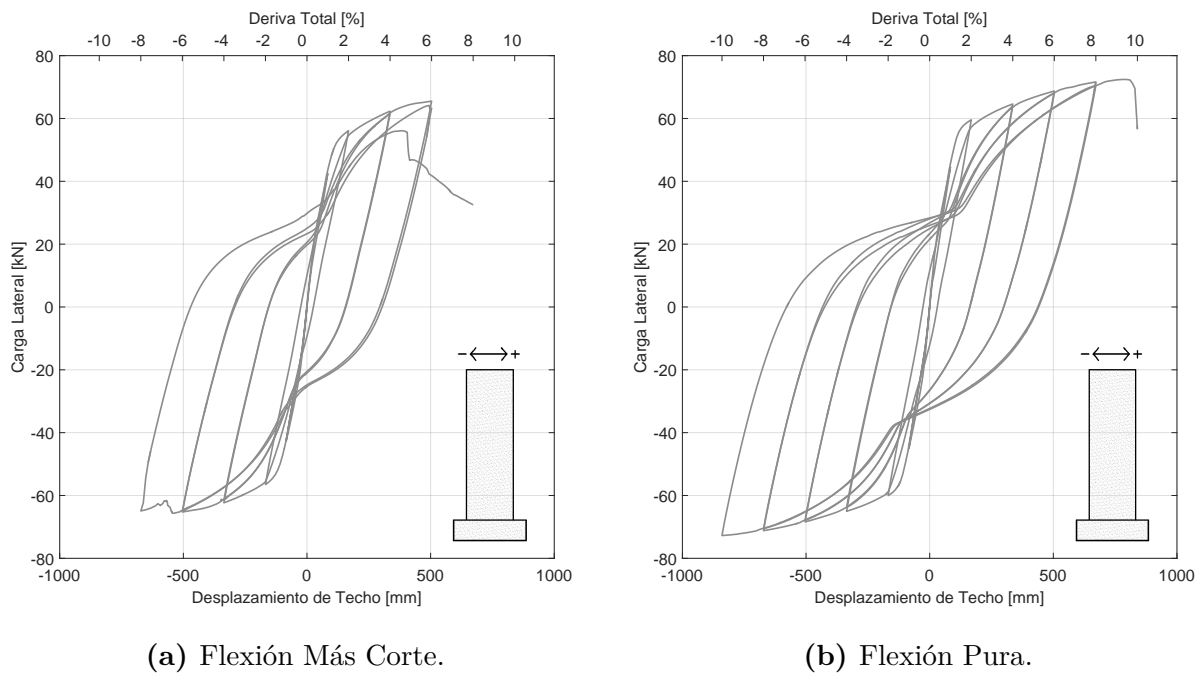


**Figura 6.6.15:** Esquema Muro Modelado Ensayo, Muro Más Alto y Muro Más Angosto.  
Unidades en *mm*

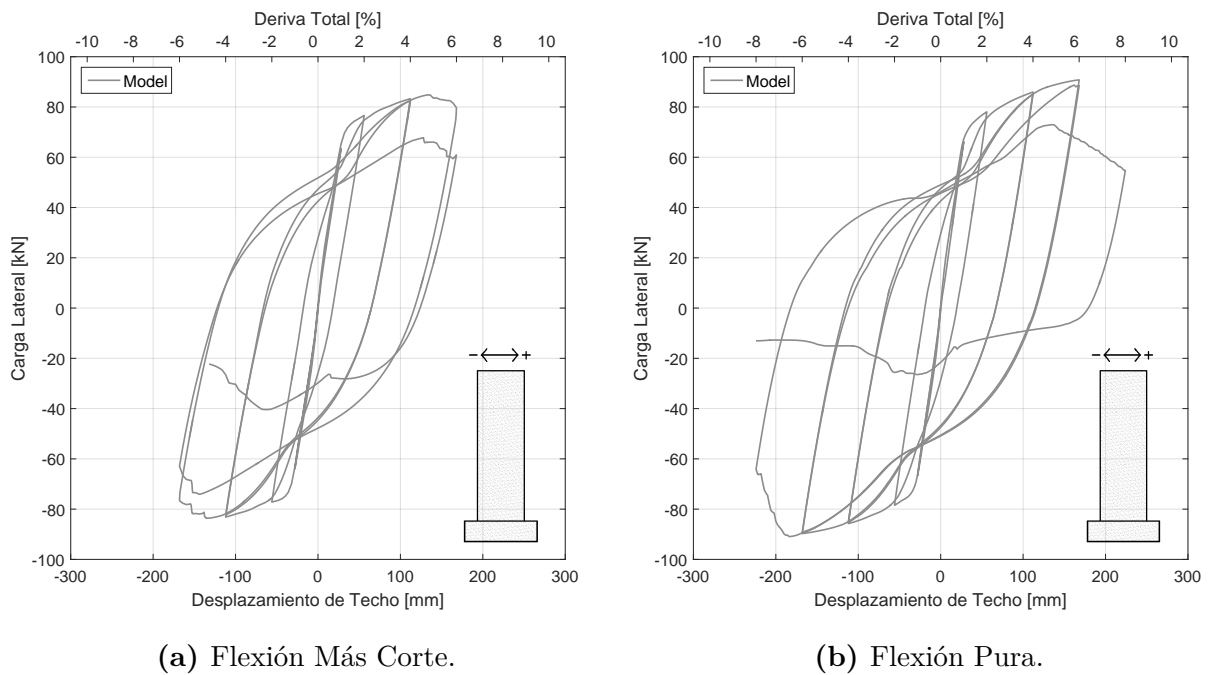
## 6.6.1. Comparación Modelo Flexión Más Corte Vs Flexión Pura

### Especimen 1: Muro rectangular o caso base

Los muros de hormigón armado, a partir de cierta esbeltez, comienzan a tener un comportamiento similar tanto para el modelo completo como a flexión pura, lo cual se ve aproximadamente reflejado en la Figura 6.6.16 y 6.6.16 comenzando la degradación en drift cercanos. La implementación de vigas rígidas en el muro rectangular, al igual que en el caso base antes analizado, aumenta su capacidad de deformación, donde para el muro más alto alcanza dos ciclos más de un drift superior (Figura 6.6.16b) en comparación a usar el modelo completo (Figura 6.6.16a), mientras que para el muro mas angosto, el modelo a flexión pura tiene mejor respuesta, alcanzando en este caso solo un ciclo de drift superior, dado que el modelo completo no alcanza a llegar al 8% de drift mientras el a flexión pura lo logra que degrada automáticamente. Nuevamente esto se puede explicar por la reducción de las compresiones, además que los muros mas esbeltos son más flexibles y restringiendo las grietas diagonales en la altura, obtenemos una mejor respuesta del muro.



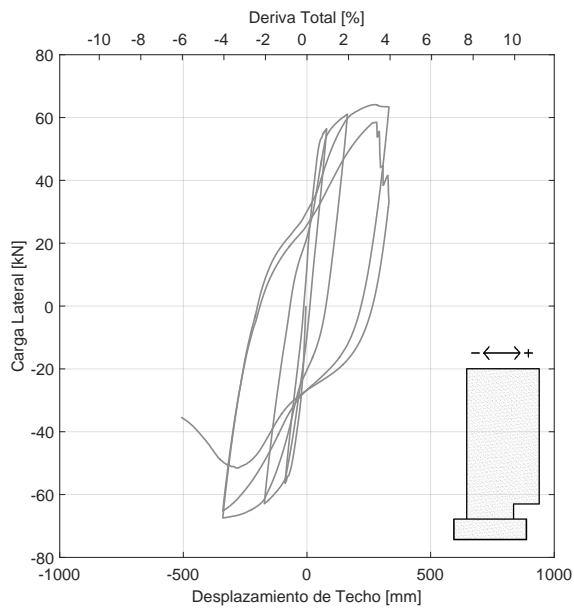
**Figura 6.6.16:** Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Muro 1 Más Alto.



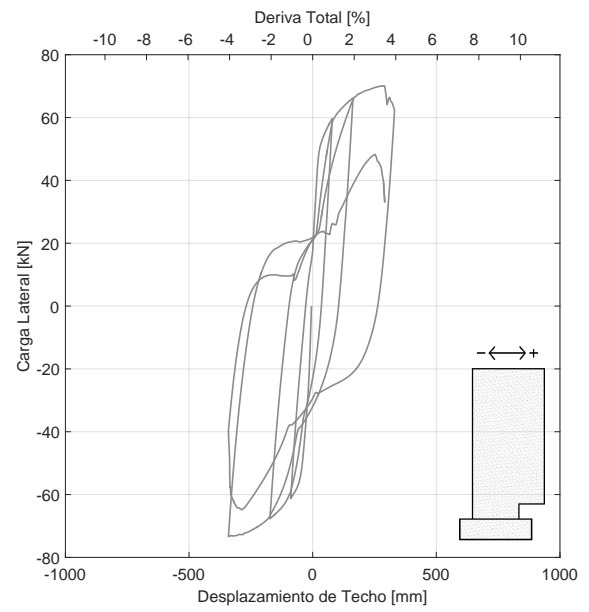
**Figura 6.6.17:** Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Muro 1 Más Angosto.

### Especimen 3: Muro Con Discontinuidad de 500mm x 300mm

Al igual que el caso rectangular, el muro bandera tiene un comportamiento similar tanto para el modelo completo como a flexión pura, lo cual se ve reflejado en la Figura 6.6.18 y 6.6.19, comenzando la degradación en drift parecidos. La implementación de vigas rígidas reduce su capacidad de deformación, degradando anticipadamente para el muro más alto (Figura 6.6.16b) en comparación a usar el modelo completo (Figura 6.6.16a). Sin embargo para los muros mas angostos, si bien se aumentó la esbeltez y degrada antes, no es tan drástico como el muro más alto dado que alcanza mayores drift, además de tener una respuesta similar al muro rectangular, esto se debe a que se ha alcanzado un nivel de deformaciones donde el efecto de flexión es más importante y hace que no se vea tanta diferencia entre usar uno u otro modelo. La degradación anticipada en ambos casos de muro bandera se explica nuevamente por las vigas rígidas que impiden el desarrollo de las grietas diagonales en la altura, provocando una concentración de las deformaciones en la discontinuidad.

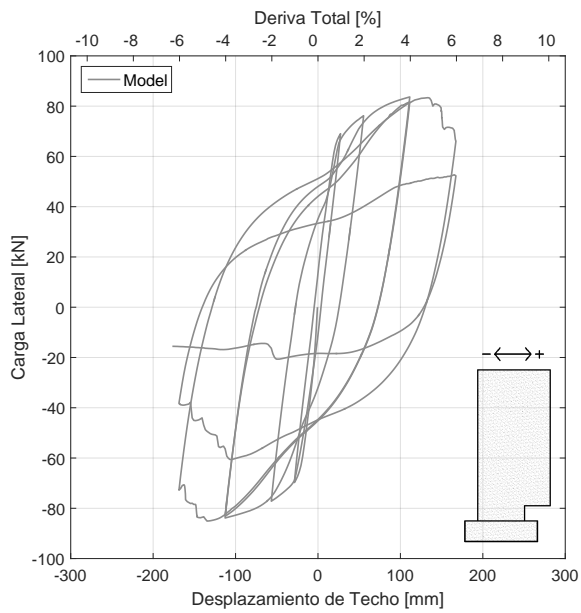


(a) Flexión Más Corte.

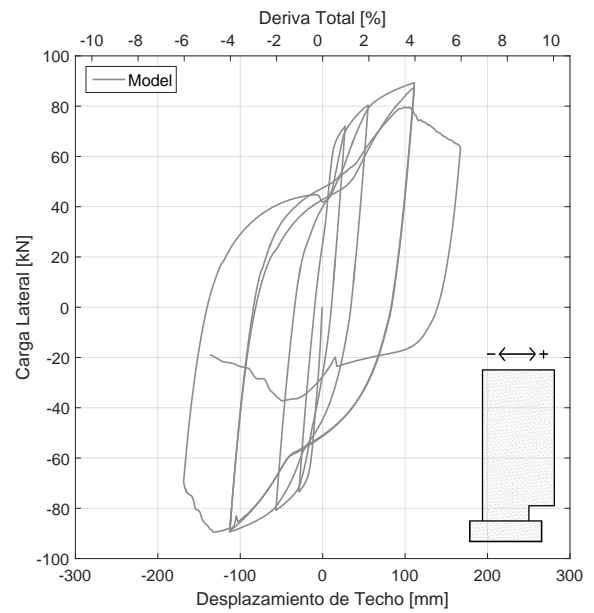


(b) Flexión Pura.

**Figura 6.6.18:** Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Muro 3 Más Alto.



(a) Flexión Más Corte.



(b) Flexión Pura.

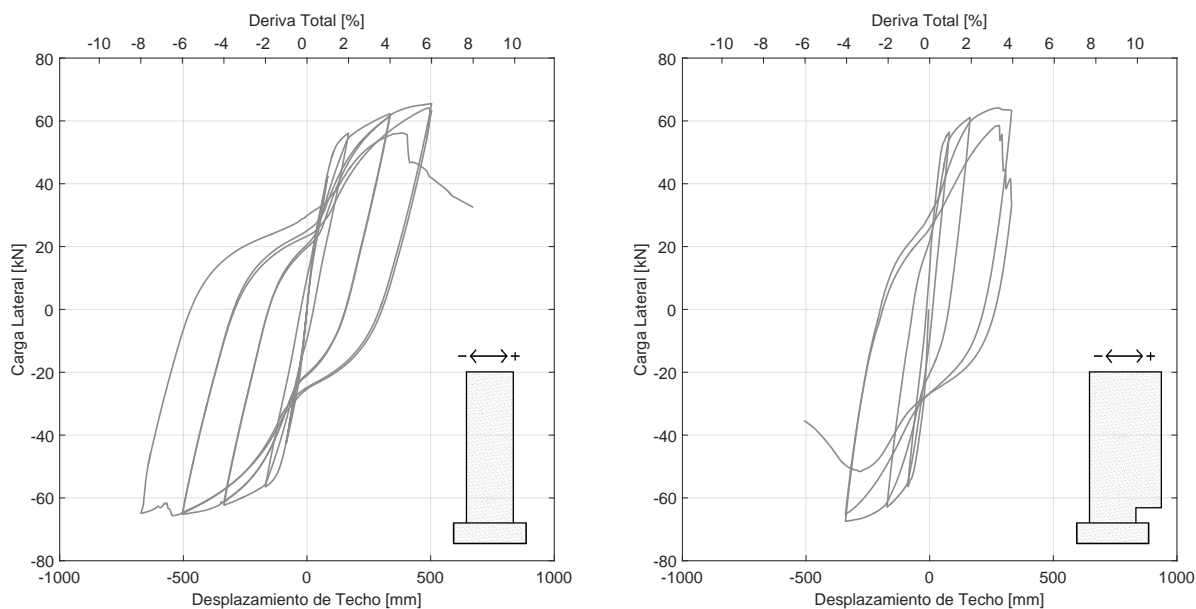
**Figura 6.6.19:** Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Muro 3 Más Angosto.



En las Figuras 6.6.20, 6.6.21, 6.6.22 y 6.6.23 se realiza una comparación entre muro rectangular y muro con discontinuidad para las diferentes combinaciones (modelo completo o a flexión pura, muro más alto o angosto) para facilitar la comprensión de que con cierto nivel de esbeltez, la respuesta de los muros comienza a parecerse, independiente de usar el modelo completo o a flexión pura (Figura 6.6.22 y 6.6.23), mientras que los muros con demasiada esbeltez la concentración de deformaciones en la discontinuidad se acentúa, produciendo diferencias de capacidad de drift cercana al 30 % (Figura 6.6.20 y 6.6.21). En la tabla 6.1 se muestra el resumen del drift en que fallan cada una de las pruebas realizadas.

**Tabla 6.1:** Resumen falla de muros para distintas configuraciones.

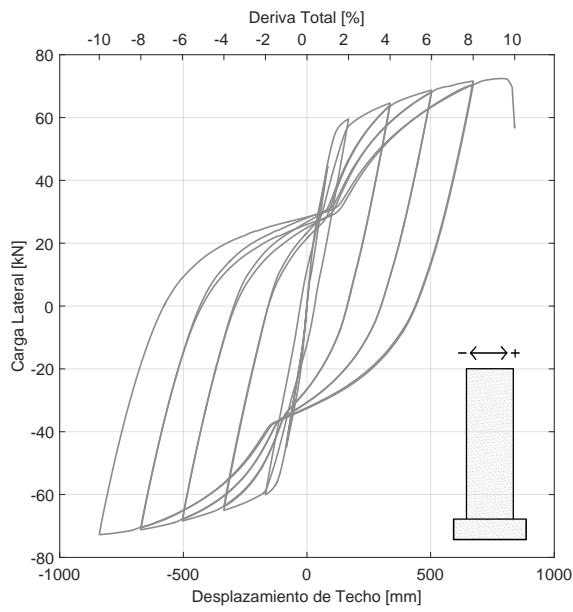
	Especimen 1	Especimen 3
Modelo Ensayo (f+c)	4.5 %	4 %
Modelo Ensayo (f)	4.5 %	4 %
Modelo Muro Más Alto (f+c)	8 %	6 %
Modelo Muro Más Alto (f)	10 %	4 %
Modelo Muro Más Angosto (f+c)	7 %	7 %
Modelo Muro Más Angosto (f)	8 %	6 %



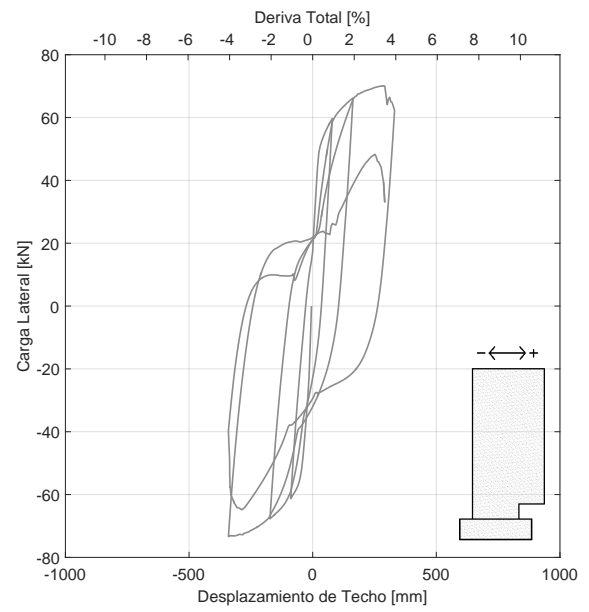
(a) Muro 1.

(b) Muro 3.

**Figura 6.6.20:** Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Modelo Flexión Más Corte Muro Más Alto.

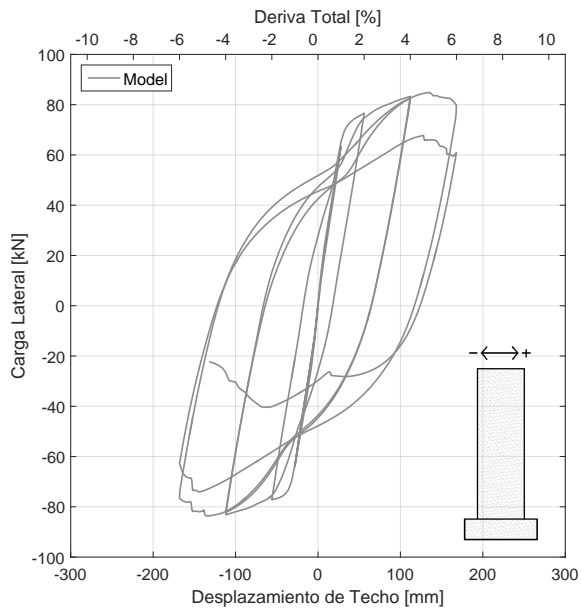


(a) Muro 1.

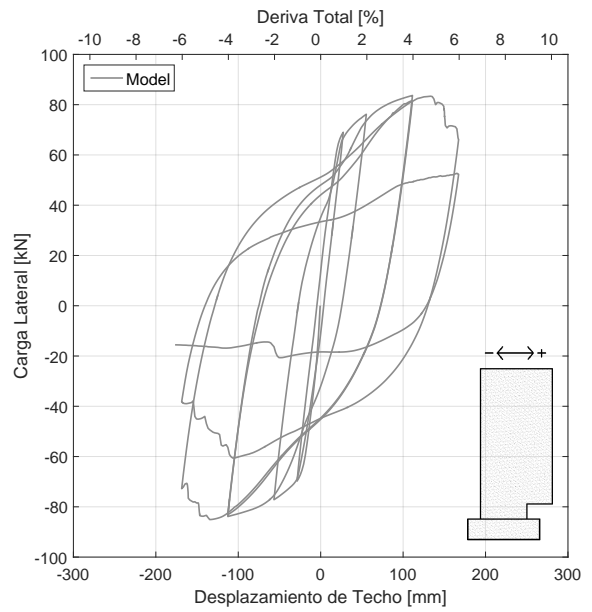


(b) Muro 3.

**Figura 6.6.21:** Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Modelo Flexión Pura Muro Más Alto.

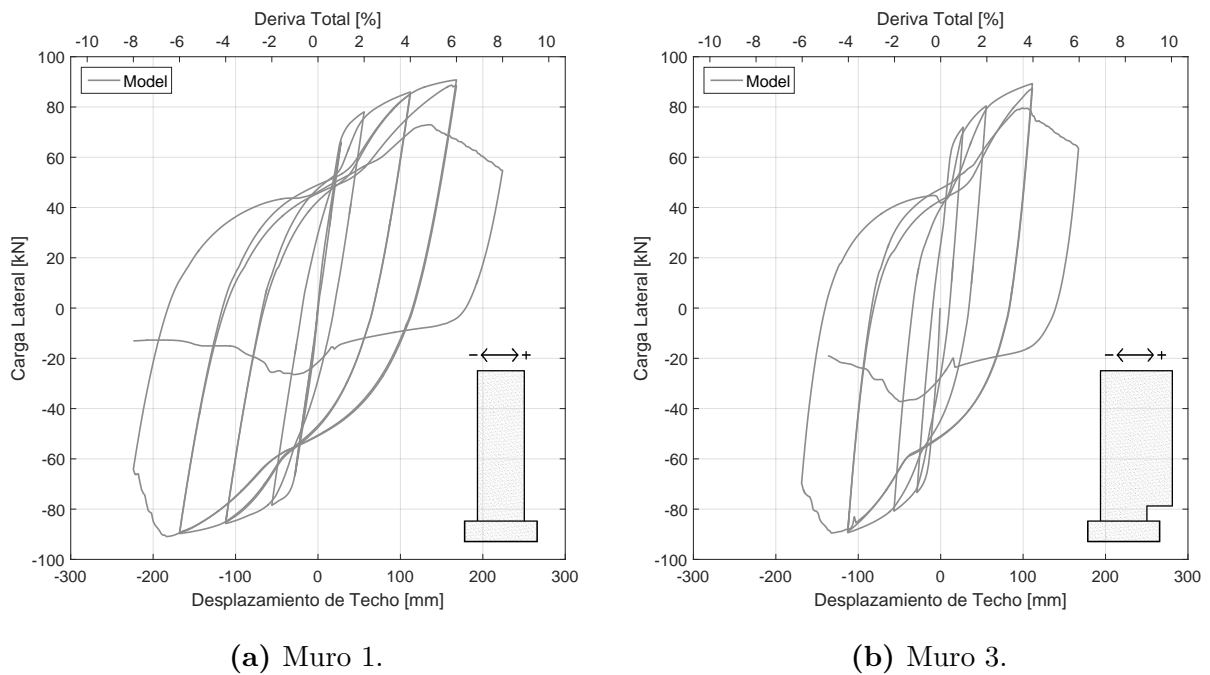


(a) Muro 1.



(b) Muro 3.

**Figura 6.6.22:** Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Modelo Flexión Más Corte Muro Angosto.



**Figura 6.6.23:** Comparación Curva Carga vs Desplazamiento Modelo Flexión Pura Muro Angosto.

Finalmente, con todos los datos antes mencionados, podemos concluir que para edificios con esbeltez baja (1:3) o inferiores a 9 pisos, la discontinuidad produce un impacto menor, si bien acelera la degradación, no es tan drástico como utilizar una esbeltez alta (1:9) o edificios de 20 pisos o superiores, donde los muros con discontinuidad degradan considerablemente antes que el muro rectangular, además utilizar un modelo de vigas rígidas o flexión pura, aumenta la concentración de deformaciones en la zona discontinua, provocando que el muro falle anticipadamente, similar a las predicciones de Ahumada [1] que son conservadoras.

## 6.6.2. Efecto De La Discontinuidad

En este caso el impacto de la discontinuidad de los muros más esbeltos para los modelos flexión más corte (f+c) versus flexión pura (f) es más grande, sobre un 40 % de diferencia, lo cual sigue haciendo al modelo de Ahumada [1] conservador. Los muros más altos y con discontinuidad tienen una menor capacidad que el muro rectangular (30–40 % de reducción), donde los perfiles de deformación muestran como se concentra más rápidamente en la base, en específico el modelo de flexión pura es el más conservador dado que produce un daño anticipado porque las grietas diagonales no pueden salir de la zona de la discontinuidad, efecto que también ocurre en los modelos menos esbeltos pero no con una diferencia tan marcada. A continuación se presentan las Figuras 6.6.24 y 6.6.25 que muestran los perfiles de deformación para el muro rectangular y el con discontinuidad, destacando las altas tracciones presentes en ambos modelos, para luego presentar las Figuras 6.6.26 y 6.6.27 donde se aprecia de mejor manera la zona de compresión.

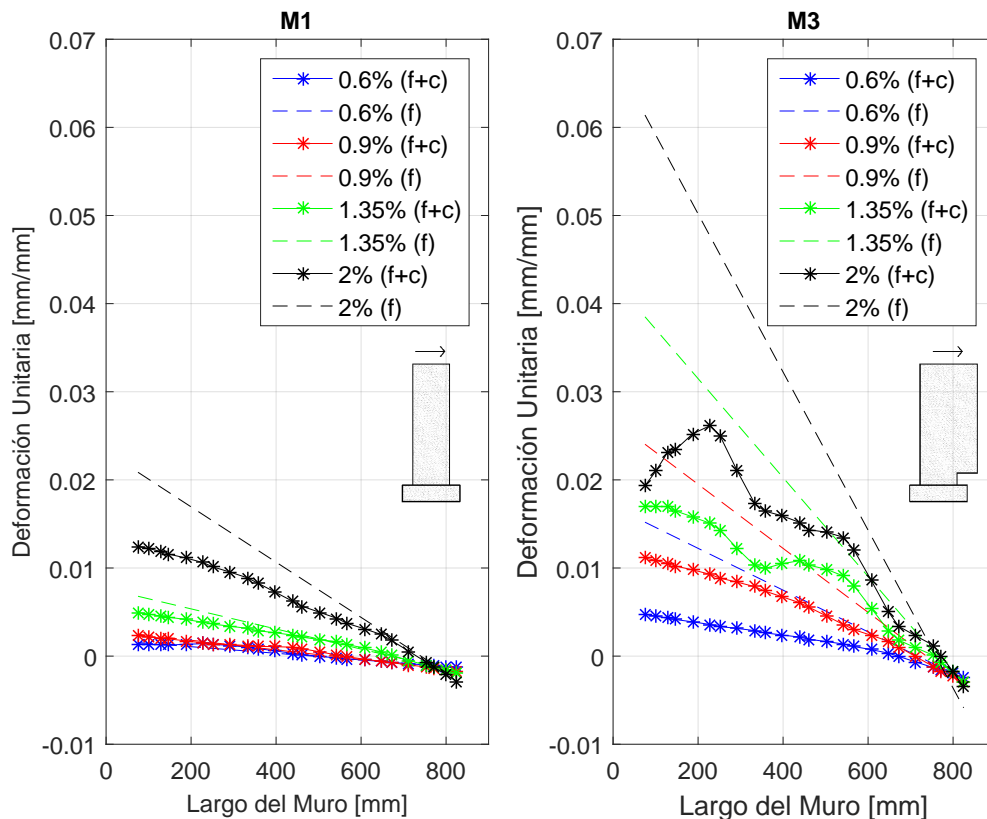


Figura 6.6.24: Perfil de deformaciones, Sentido Positivo.

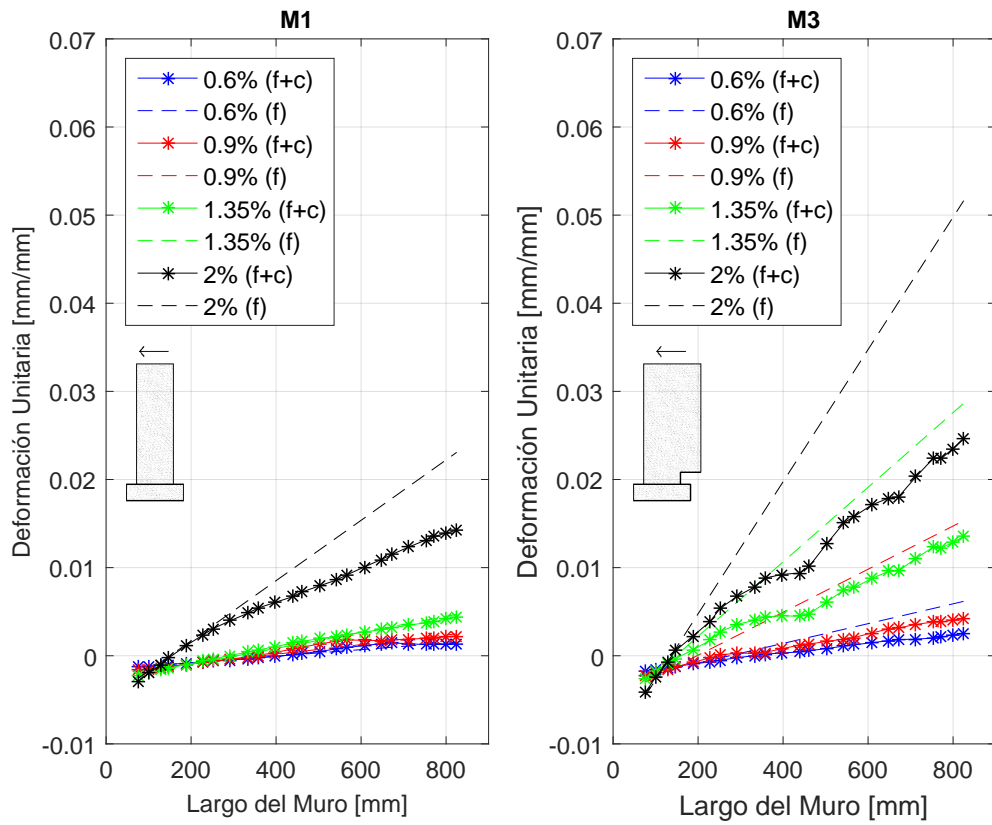


Figura 6.6.25: Perfil de deformaciones, Sentido Negativo.

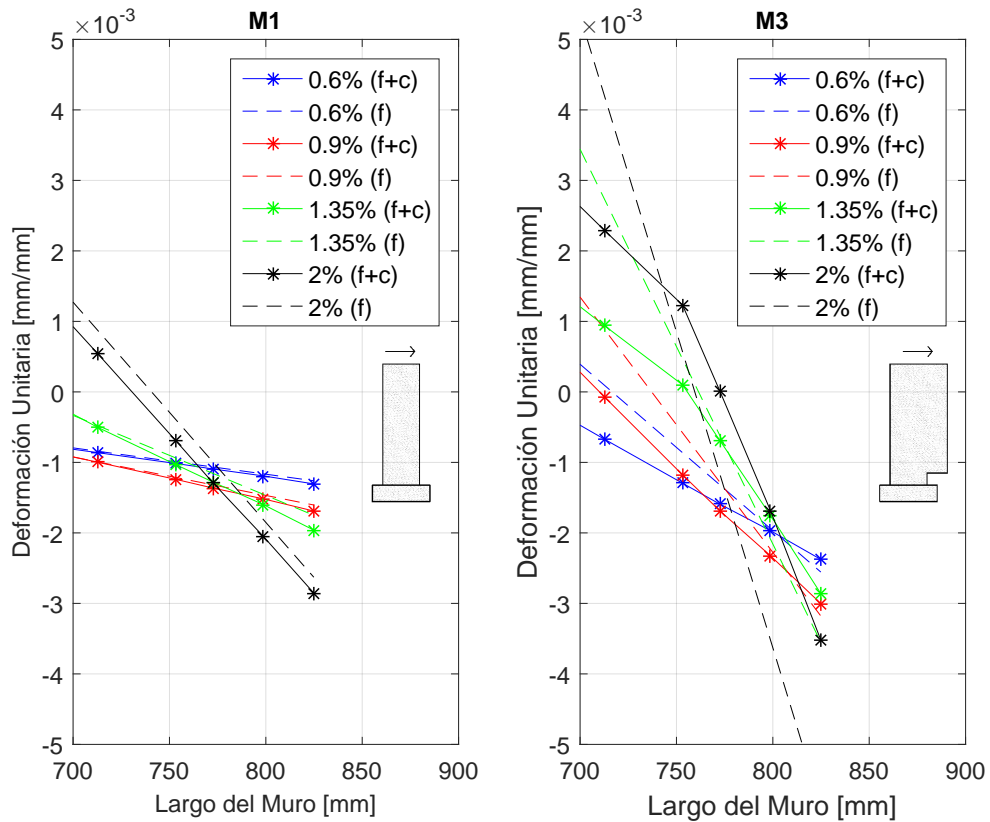
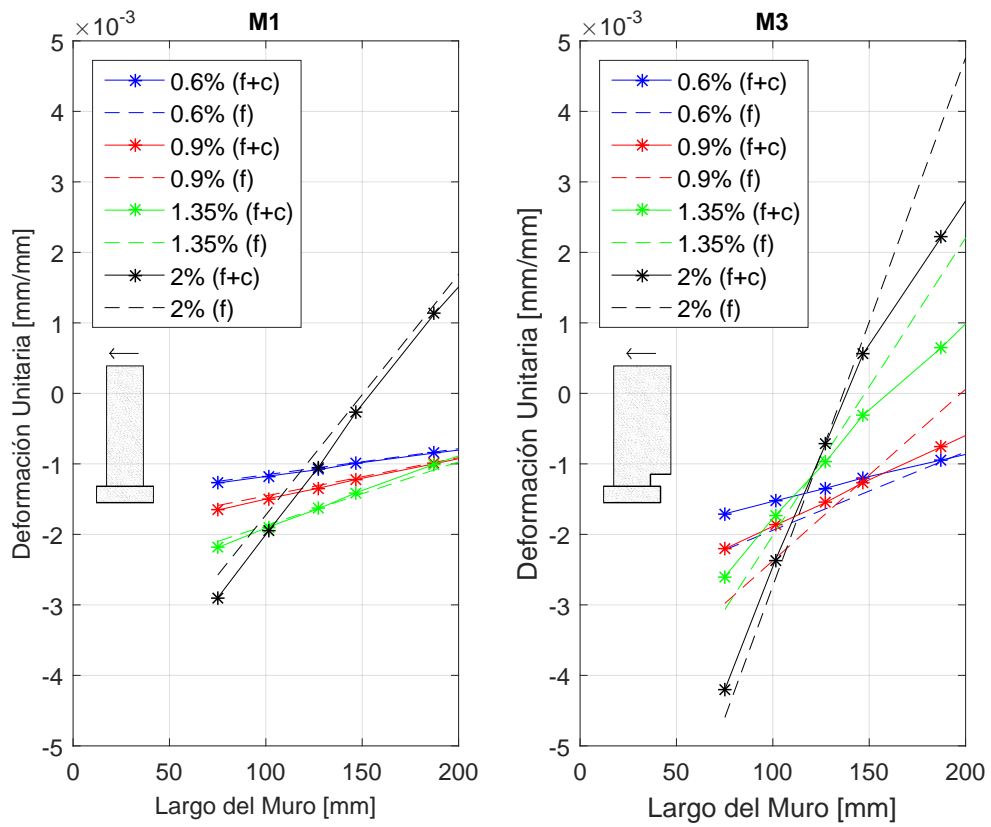


Figura 6.6.26: Perfil de deformaciones, Sentido Positivo.



**Figura 6.6.27:** Perfil de deformaciones, Sentido Negativo.

## 6.7. Comparación Resultados Con Modelo Analítico

### 6.7.1. Deformaciones Elásticas

A lo largo de este trabajo de tesis se han analizado los datos adquiridos tanto de los ensayos como de los modelos en elementos finitos realizados, además de su comparación entre ellos. Sin embargo se debe comparar y contrastar todo lo anterior con todo lo desarrollado analíticamente por Ahumada [1], para poder validar sus expresiones y la ubicación del daño para las configuraciones tratadas a lo largo de esta investigación.

Ahumada [1] analiza los efectos de corte en las deformaciones máximas tanto de compresión como tracción en la base de un muro rectangular, encontrando que la relación de aspecto tiene gran importancia en ambos casos, mientras que la deriva de techo toma importancia en la amplificación de compresión. Adicionalmente a través de análisis de flexión no lineal, propone un modelo que estima el desplazamiento de fluencia de muros con aberturas tipo bandera, que depende de las dimensiones de la abertura y la cuantía longitudinal de borde. También propone rangos de validez para tres modelos que estiman la curvatura última en el rango plástico de este tipo de muros. A continuación se detallaran cada una de las expresiones realizadas por el autor y su posterior comparación con lo tratado en esta tesis.

Ahumada [1] determinó el desplazamiento de fluencia mediante dos ecuaciones, donde la primera considera todo el daño y las grietas concentradas a nivel de la base, mientras que el segundo distribuye el daño en la altura, siendo esta última la de mayor efectividad. La ecuación 6.1 y 6.2 tienen la siguiente forma:

**Modelo de curvatura concentrada en la base (MCCB):**

$$d_y = \phi_y h_x (h_w - \frac{h_x}{2}) \quad (6.1)$$

### Modelo de curvatura distribuida en la altura (MCDA):

$$d_y = \phi_y h_w^2 \rho_b^{0.14} [0.4 - \lambda(1 - \lambda)(1 - 3\eta)] \quad (6.2)$$

Cabe destacar que el modelo de curvatura concentrada en la base (MCCB) esta diseñado para muros tipo bandera debido a la concentración de daño en la base, además de incorporar la discontinuidad, factores que no se ven reflejado en un muro sin discontinuidades, es por esta razón que para el muro rectangular debemos aplicar la ecuación 6.3 y 6.4 para determinar su desplazamiento de fluencia.

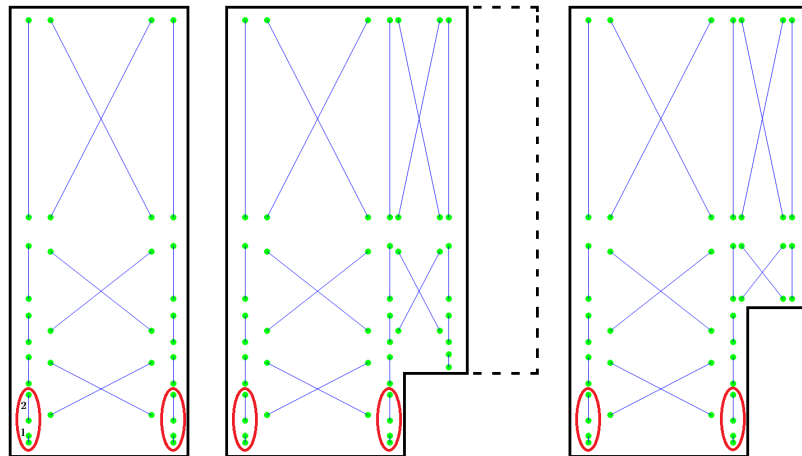
$$d_y = \alpha \phi_y h_w^2 \quad (6.3)$$

$$\alpha = 0.33 \rho_b^{0.14} \quad (6.4)$$

Por otra parte, se deben calcular los desplazamiento de fluencia tanto para los ensayo como los modelos de elementos finitos ejecutados. A continuación se presenta el procedimiento de cálculo utilizado para ambos casos.

### Determinación desplazamiento de fluencia a partir de los ensayos :

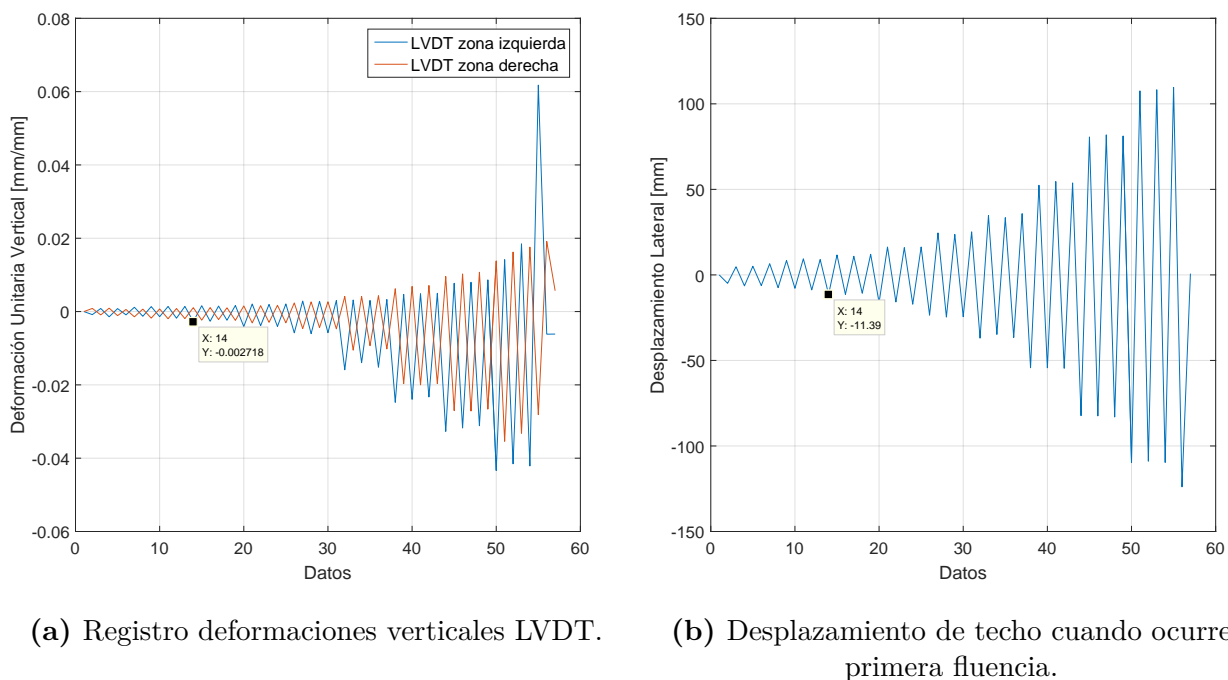
Para determinar en que desplazamiento de techo ocurre la primera fluencia en los refuerzos de borde, se utilizan los registros de los LVDT, en particular los dos instrumentos mas cercanos a la base del muro en ambos costados, como se muestra en la Figura 6.7.28.



**Figura 6.7.28:** LVDT seleccionados para buscar en sus registros la primera fluencia.



Se consideran los dos LVDT inferiores de cada extremo del muro, para poder abarcar un mayor largo ( $25\text{cm}$ ) y estar dentro de la zona de la discontinuidad en el caso de los muros bandera, sin embargo esta consideración provoca que se pierdan máximos completos, haciendo que los desplazamientos de fluencia se reduzcan como se mostrará a continuación. Con los LVDT seleccionados, se prosigue a sumar los registros de desplazamientos verticales para cada extremo y luego promediarlos por el largo en estudio ( $25\text{cm}$ ), con esto obtenemos la deformación vertical en ambos tramos. Luego con el registro obtenido, se busca el primer desplazamiento de techo que produce una deformación vertical mayor a la de fluencia ( $\varepsilon_y = 0.0026$ ), esto último se representa mejor en la Figura 6.7.29, donde se muestra en 6.7.29a el momento del registro donde ocurre la condición de primera fluencia, mientras en Figura 6.7.29b se presenta el desplazamiento de techo asociado. En el Anexo D se encuentran las Figuras donde se determina el desplazamiento de fluencia para los otros tres ensayos.



**Figura 6.7.29:** Determinación desplazamiento de fluencia Muro 1.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la utilización de un largo de  $25\text{cm}$  produce una reducción del desplazamiento, dado que no se consideran los máximos completos, es por esta razón que a modo de complementar la información, se realizó el mismo estudio pero considerando los registros del primer y segundo LVDT por separado, donde cada registro

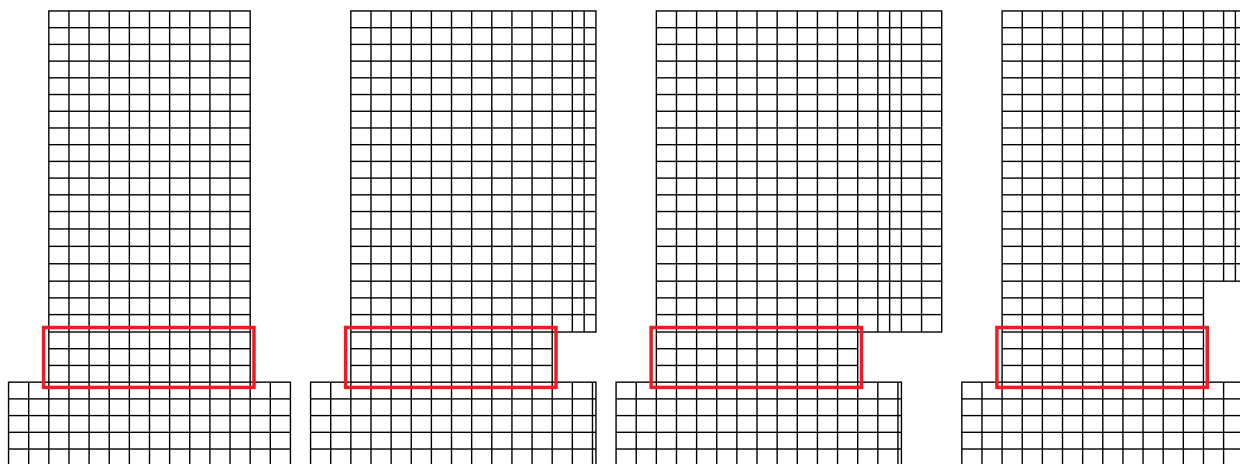
se promedia por  $5\text{cm}$  o  $20\text{cm}$  respectivamente, produciendo una reducción o aumento en las deformaciones según la zona en estudio. Los resultados de desplazamientos obtenidos se resumen en la Tabla 6.2.

**Tabla 6.2:** Resumen desplazamiento de fluencia utilizando los registros de LVDT unidos o por separado.

	Dos LVDT (0 a 25cm)	Primer LVDT (0 a 5cm)	Segundo LVDT (5 a 25cm)
Ensayo 1	11.4mm	4.8mm	23.5mm
Ensayo 2	8.6mm	4.7mm	15.8mm
Ensayo 3	7.5mm	3.2mm	12.0mm
Ensayo 4	9.2mm	3.2mm	22.7mm

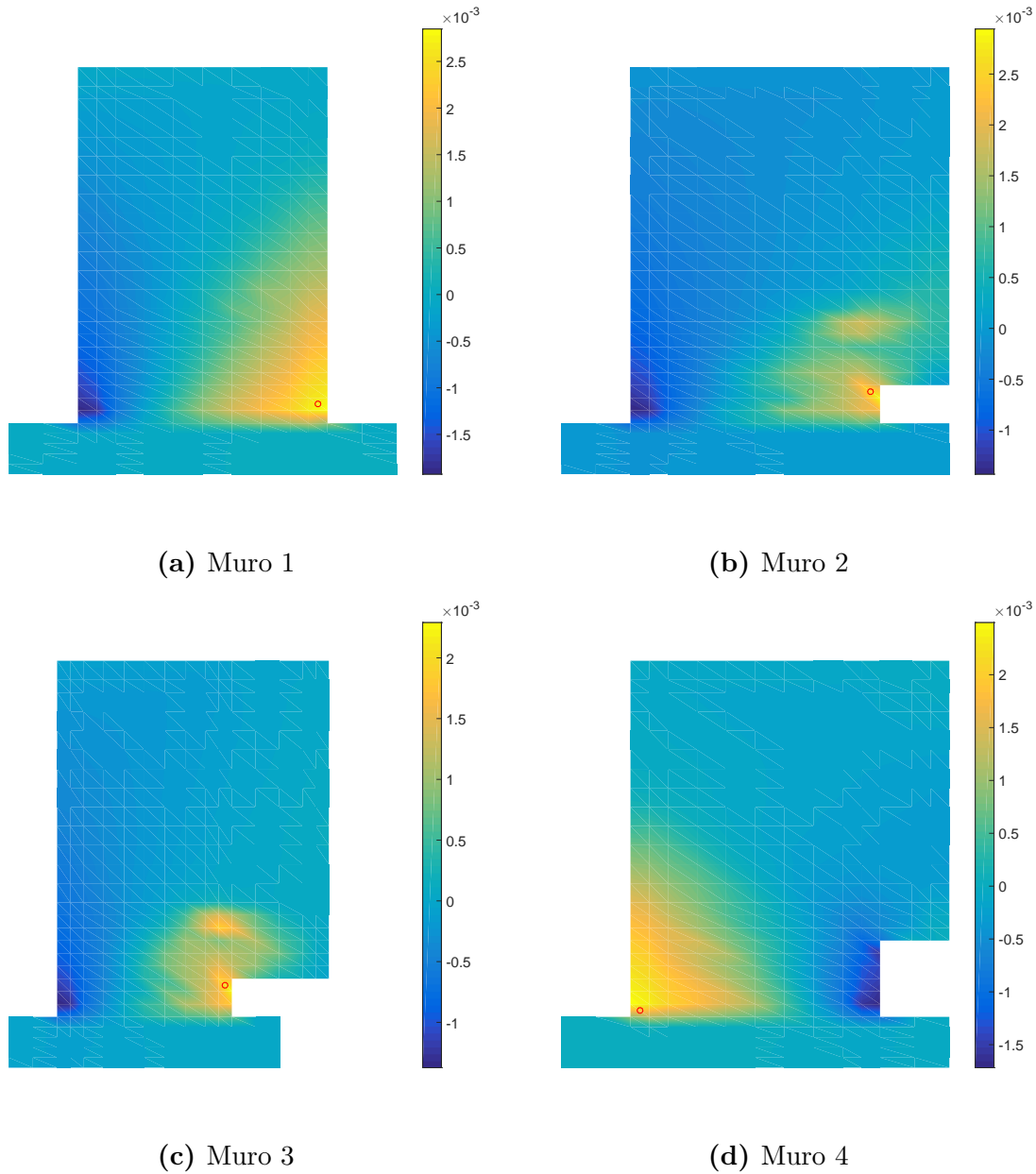
### Determinación desplazamiento de fluencia a partir de los modelos :

Para determinar en que instante del análisis realizado ocurre la primera fluencia, se busca en el registro de deformaciones verticales de los puntos de cuadratura cuando la deformación es superior a la fluencia del acero ( $\varepsilon_y = 0.0026$ ). Para ello se consideraron solo los elementos finitos ubicados dentro de una altura igual a  $30\text{cm}$ , de esta forma la deformación de fluencia encontrada queda en la zona de los LVDT antes considerados, además de evitar la concentración de deformaciones en la altura producto del refuerzo discontinuo, así se evitan errores de lectura y se comparan situaciones similares. En la Figura 6.7.30 se muestran los elementos finitos seleccionados donde se busca en que elemento e instante ocurre la primera fluencia.



**Figura 6.7.30:** Zona considerada para buscar la primera fluencia del refuerzo.

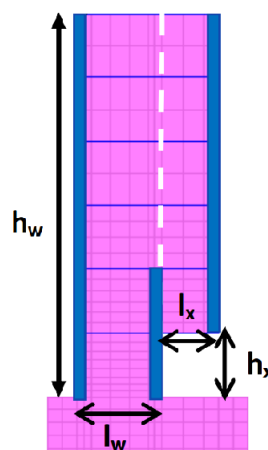
En las Figura 6.7.31a, 6.7.31b, 6.7.31c y 6.7.31d se muestra la ubicación de donde ocurre la primera fluencia para cada modelo utilizando flexión y corte en su análisis (f+c). Los casos adicionales se encuentran en el Anexo D. A partir de estos resultados podemos comprobar como aparece una zona con altas deformaciones verticales justo donde termina el refuerzo discontinuo (sobre la abertura) para los muros bandera, siendo acertado utilizar solo los primeros elementos para no considerar deformaciones producto de otro fenómeno que no sea fluencia.



**Figura 6.7.31:** Elemento que fluye primero en modelo (f+c).

## Comparación desplazamiento de fluencia :

En la Tabla 6.3 se presentan la evaluación de cada una de las variables que describen las ecuaciones 6.1 y 6.2 desarrolladas por Ahumada [1], con las propiedades de cada muro, donde para todos los casos se utilizó la misma fluencia del acero  $\varepsilon_y = 0.0026$ . Adicionalmente la Figura 6.7.32 muestra las dimensiones tomadas para todos los ensayos.



**Figura 6.7.32:** Disposición medidas utilizadas para expresiones de Ahumada [1].

**Tabla 6.3:** Parámetros utilizados en cálculo de desplazamiento de fluencia.

	$h_x$ [mm]	$l_x$ [mm]	$h_w$ [mm]	$l_w$ [mm]	$\rho_b$ [%]	$P/A_g f'_c$ [%]	$K$	$\phi_y$ [1/mm]
Muro 1	2800	0	2800	900	4	8.1	1.41	$4.09E^{-6}$
Muro 2	300	250	2800	900	4	7.1	1.41	$4.04E^{-6}$
Muro 3	300	500	2800	900	4	7.1	1.41	$4.04E^{-6}$
Muro 4	600	250	2800	900	4	7.1	1.41	$4.04E^{-6}$
Muro 1 Más Alto	2800	0	8400	900	4	8.1	1.41	$4.09E^{-6}$
Muro 3 Más Alto	300	250	8400	900	4	7.1	1.41	$4.04E^{-6}$
Muro 1 Más Angosto	2800	0	2800	450	4	8.1	1.41	$8.18E^{-6}$
Muro 3 Más Angosto	300	250	2800	450	4	7.1	1.41	$8.08E^{-6}$

Finalmente con todo lo anterior, se obtienen los desplazamientos de fluencia analíticamente, los cuales se resumen y compararan con los desplazamiento de fluencia determinados por el ensayo y los modelos ejecutados. La tabla 6.4 resume todos los resultados anteriores.

**Tabla 6.4:** Resumen desplazamiento de fluencia de los distintos análisis realizados.

	$d_{y(Ensayo)} [mm]$	$d_{y(MCCB)} [mm]$	$d_{y(MCDA)} [mm]$	$d_{yModelo(f+c)} [mm]$	$d_{yModelo(f)} [mm]$
Muro 1	11.4	6.8	8.2	15.5	12.5
Muro 2	8.6	3.2	5.3	9.9	8.2
Muro 3	7.5	3.2	4.7	8.6	7.0
Muro 4	9.2	6.1	6.6	12.5	8.2
Muro 1 Más Alto	- - -	60.8	73.5	108.7	98.8
Muro 3 Más Alto	- - -	10.0	32.6	44.0	44.4
Muro 1 Más Angosto	- - -	13.5	17.9	32.0	28.0
Muro 3 Más Angosto	- - -	6.4	10.2	16.6	14.8

De la Tabla 6.4 se comprueba la predicción realizada en el inicio de este trabajo de tesis, donde se espera que el muro con mayor largo de bandera (Especimen 3), degrade anticipadamente en comparación al caso rectangular, mientras que el Especimen 2 sea un caso intermedio y el último Especimen sea más parecido al caso rectangular. Esta situación se comprueba al revisar los desplazamientos de fluencia alcanzado, donde para el muro rectangular se debe desplazar más que el resto, mientras que el muro con mayor bandera es el que requiere de menor desplazamiento para que sus refuerzos de borde comiencen a fluir.

Por otra parte podemos observar que el cálculo del desplazamiento de fluencia por las expresiones propuestas por Ahumada [1] son conservadoras en comparación a los datos obtenidos de los ensayos, debido a que el autor utilizó modelos de flexión pura los cuales no permiten que el agrietamiento crezca en la altura, centrando su daño y deformaciones en la base, lo que provoca que las armaduras de borde en el primer piso alcancen la fluencia con menor desplazamiento de techo. Esto último se puede comprobar al observar los resultados de los modelos numéricos ejecutados, ya que la primera fluencia para el modelo de flexión pura (f) es alcanzada en desplazamientos de techo menores, en promedio un 15 % antes.

Si observamos las expresiones del autor, podremos apreciar que el modelo de curvatura centrada en la base (MCCB) es de comportamiento similar al modelo de flexión pura (f), dado que al no considerar distribución de daño en la altura, concentra todas las deformaciones a nivel de la base, lo que genera fluencia con menores desplazamientos de techo. Si bien las magnitudes de desplazamiento de fluencia tienen grandes diferencias, la consideración de incorporar el efecto del corte en el modelo (f+c) o el incorporar el modelo de curvatura

distribuida en la altura (MCDA), proporciona una mejor respuesta de diseño, dado que al comparar los resultados con los obtenidos por ensayos experimentales, estos presentan una diferencia en promedio del 33 % para la expresión MCDA, mientras que para el modelo completo (f+c) tienen una diferencia en promedio menor al 8 %, resultando mas confiable los modelos FEM ejecutados.

Cuando extendemos el análisis para muros con mayor nivel de esbeltez, los modelos en elementos finitos ejecutados mantienen un desplazamiento de fluencia promedio menor al 8 % al comparar un modelo completo (f+c) a uno de flexión pura (f), mientras que la expresiones propuestas por el autor aumentan hasta casi el 84 % al comparar los modelos MCCB y MCDA, esto se debe a que los muros esbeltos concentran más deformaciones a nivel de la base, tal como lo estudiamos en las secciones 6.5.2 y 6.6.2, acelerando la degradación y daño para los muros con discontinuidad y el incorporar elementos rígidos que evitan que las grietas se puedan desarrollar en la altura, o por ecuaciones limitar en la base todas las curvatura, las diferencias se acentúan, dejando en claro lo conservador de las expresiones para muros con discontinuidades. Por lo tanto, si extrapolamos los datos obtenidos, se hace importante realizar modelos de elementos finitos para estudiar sus capacidades de deformación, carga y primera fluencia para muros de gran altura y relación de esbeltez, superior a 1:6, lo que afectará directamente a edificios por sobre los 15 pisos de altura.

### 6.7.2. Largo de rótula plástica

Adicionalmente Ahumada [1] propuso que la longitud de rótula plástica se ve incrementada con el nivel de desplazamiento plástico alcanzado, mientras que la cuantía de refuerzo de borde y el endurecimiento tienen menor relevancia, obteniendo así la ecuación 6.5, donde la expresión correspondiente al modelo de curvatura concentrada en la base (MCCB) define el largo de la rótula plástica como un valor fijo e igual al alto de la abertura.

$$l_p = (0.2l_w + 0.05z)\left(1 - \frac{1.5P}{f'_c A_g}\right)(6.7\Delta_p^{0.3}) \leq h_x \quad (6.5)$$

Dónde:

$$z = M/V$$

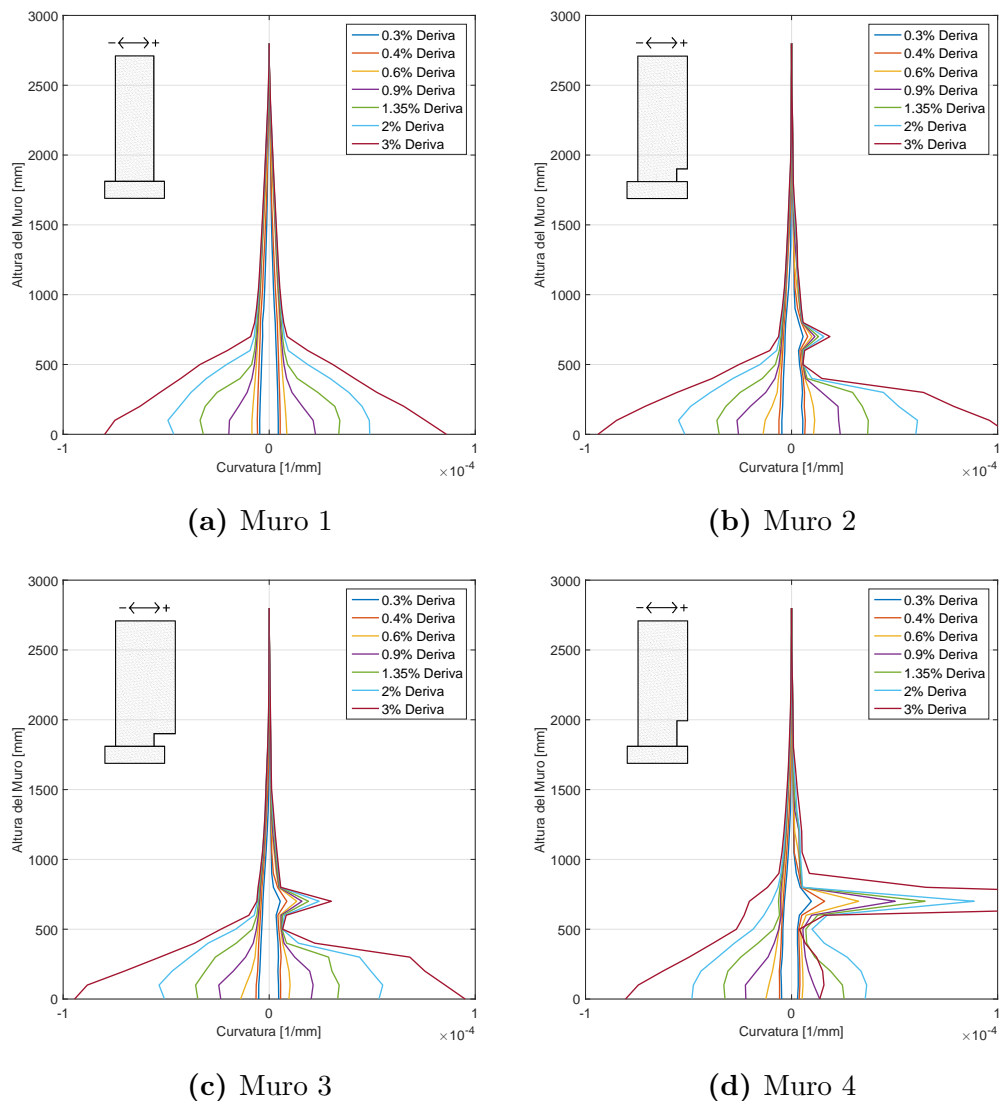
$$\Delta_p = \frac{(\delta_u - \delta_y)}{h_w} = \text{deriva plástica}$$

#### **Determinación largo rótula plástica a partir de los ensayos :**

Para determinar los largos de rótula plástica en primera instancia se utilizan los LVDT, sin embargo, no se puede determinar dado que se disponen de pocos puntos para realizar un análisis detallado, además se desconoce la distribución de curvatura en la base, no se captan los máximos ocurridos en la zona de la discontinuidad, dado que al estar tan separados se termina promediando la zona, ni menos se detecta la concentración de deformaciones y curvatura en la barra discontinua. Es por estas razones que en la determinación del largo de rótula plástica para los ensayos se utilizarán los datos adquiridos y procesados por Manriquez [10] con la ayuda de fotogrametría. Los resultados obtenidos por fotogrametría se presentan en la comparación de datos.

## Determinación largo rótula plástica a partir de los modelos :

Para poder determinar el largo de rótula plástica utilizando los resultados obtenidos en los modelos de elementos finitos, primero debemos determinar las curvaturas para cada muro en estudio. En la Figura 6.7.33 se muestran los resultados obtenidos para las cuatro probetas modeladas. Luego se utiliza el valor de la curvatura de fluencia  $\phi_y$  determinada en la sección anterior, donde con este valor se determina a que altura ocurre dicho valor para cada muro, para luego dividir por dos el valor encontrado dado que nos basamos en el modelo que limita el desarrollo del largo de rótula plástica hasta la altura de la abertura. Los resultados obtenidos se presentan en la comparación de datos.



**Figura 6.7.33:** Resultados obtenido para las curvaturas de los muros modelados.



## Comparación largo rótula plástica :

En la Tabla 6.5 se presentan la evaluación de cada una de las variables que describen la ecuación 6.5 para cada muro en estudio, donde utilizaremos el desplazamiento de fluencia  $d_y$  determinado por el modelo de curvatura distribuida en la altura (MCDA), mientras que las variables  $h_w$ ,  $l_w$  y  $P/A_g f'_c$  son las mismas utilizadas en la Tabla 6.3.

**Tabla 6.5:** Parámetros utilizados en el cálculo de largo de rótula plástica.

	$Z[mm]$	$d_y[mm]$	$d_{u_1}[mm]$	$d_{u_2}[mm]$	$d_{u_3}[mm]$	$\Delta_{p_1}[\%]$	$\Delta_{p_2}[\%]$	$\Delta_{p_3}[\%]$
Muro 1	2800	8.2	35.8	53.5	81.5	1.0	1.6	2.6
Muro 2	2800	5.3	32.8	51.2	77.6	1.0	1.6	2.6
Muro 3	2800	4.7	32.5	51.8	78.7	1.0	1.7	2.6
Muro 4	2800	6.6	33.6	51.8	79.5	1.0	1.6	2.6
Muro 1 Más Alto	8400	73.5	113.4	168.0	252.0	0.5	1.1	2.1
Muro 3 Más Alto	8400	32.6	113.4	168.0	252.0	1.0	1.6	2.6
Muro 1 Más Angosto	2800	17.9	37.8	56.0	84.0	0.7	1.4	2.4
Muro 3 Más Angosto	2800	10.2	37.8	56.0	84.0	1.0	1.6	2.6

Finalmente con todo lo anterior, se obtienen los largos de rótula plástica analíticamente, los cuales se resumen y compararan con los largos de rótula plástica determinados por fotogrametría y los modelos ejecutados. La Tabla 6.6, 6.7 y 6.8 resume todos los resultados anteriores según el drift aplicado.

**Tabla 6.6:** Resumen largo de rótula plástica para un  $Drift = 1.35\%$ .

	$l_{P(Fotogrametra)}[mm]$	$l_{P(MCDA)}[mm]$	$l_{PModelo(f+c)}[mm]$	$l_{PModelo(f)}[mm]$
Muro 1	130	471	596	555
Muro 2	390	300	468	150
Muro 3	400	300	460	149
Muro 4	132	476	511	291
Muro 1 Más Alto	- - -	709	1325	1325
Muro 3 Más Alto	- - -	300	550	148
Muro 1 Más Angosto	- - -	307	158	129
Muro 3 Más Angosto	- - -	300	148	127

**Tabla 6.7:** Resumen largo de rótula plástica para un  $Drift = 2\%$ .

	$l_{p(Fotogrametra)} [mm]$	$l_{p(MCDA)} [mm]$	$l_{pModelo(f+c)} [mm]$	$l_{pModelo(f)} [mm]$
Muro 1	375	546	632	594
Muro 2	390	300	488	150
Muro 3	400	300	489	149
Muro 4	410	555	577	296
Muro 1 Más Alto	- - -	919	1550	1528
Muro 3 Más Alto	- - -	300	600	150
Muro 1 Más Angosto	- - -	373	188	140
Muro 3 Más Angosto	- - -	300	173	179

**Tabla 6.8:** Resumen largo de rótula plástica para un  $Drift = 3\%$ .

	$l_{p(Fotogrametra)} [mm]$	$l_{p(MCDA)} [mm]$	$l_{pModelo(f+c)} [mm]$	$l_{pModelo(f)} [mm]$
Muro 1	700	631	657	627
Muro 2	465	300	508	150
Muro 3	526	300	507	150
Muro 4	725	600	664	299
Muro 1 Más Alto	- - -	1112	1700	1680
Muro 3 Más Alto	- - -	300	650	150
Muro 1 Más Angosto	- - -	440	196	144
Muro 3 Más Angosto	- - -	300	210	242

De las Tablas 6.6, 6.7 y 6.8 muestran como el modelo de flexión pura (f), el cual limita el crecimiento de las grietas en diagonal y en la altura, concentra todo el daño a nivel de la base, más específicamente bajo la altura de la abertura incluso más pequeña y esto se cumple para todos los drift y casos de esbeltez realizados, por lo tanto, los resultados de los modelos a flexión pura (f) concuerdan con lo realizado por Ahumada [1] de limitar el largo de rótula plástica hasta la altura de la bandera, donde a pesar de ser un criterio conservador, permite dar recomendaciones de diseño aceptables.

En grandes deformaciones (drift del 3%) el largo de la rótula es similar para el muro rectangular en el caso base (no aumentando esbeltez) tanto para fotogrametría como los modelos numéricos y analíticos. En particular si vemos el drift del 2% los modelos numéricos y analíticos siguen siendo similares, no así fotogrametría, debido que medir la curvatura de fluencia está dentro del rango de error, por lo cual puede considerar algún punto que no sea el correcto dentro de la distribución del daño en los ensayos. Otro aspecto importante de mencionar en

los datos obtenidos, es que la utilización de un refuerzo discontinuo produce una importante concentración de deformaciones a mediana altura y por sobre la abertura, factor que altera la determinación del largo de rótula plástica, debido a que un muro bien armado concentrará todo su daño a nivel de la base, pero incluso en los ensayos obtuvimos un tiempo de falla distinto por tener un bajo anclaje del refuerzo.

Un resultado interesante es observar el impacto de la esbeltez en el muro, donde para un muro rectangular más esbelto producto de aumentar su altura (1:9 en nuestro caso), los largos de rótula plástica aumentan considerablemente en comparación a las expresiones de Ahumada [1], lo que significa un daño más distribuido en la altura, produciendo que el muro degrade mucho más lento y explique porque tiene un mejor comportamiento que los muros ensayados. Además, en muros esbeltos se espera que la respuesta carga vs desplazamiento entre un muro rectangular y uno bandera, tanto para el modelo completo (f+c) como el de flexión pura (f), tengan respuesta similar pero esto no ocurre ya que el muro bandera degrada entre un 25 % a 60 % antes que el rectangular según se analice con modelo completo (f+c) o flexión pura (f) respectivamente. Por otra parte para el muro más esbelto producto de reducir su largo (1:6 en nuestro caso), los largos de rótula plástica deberían aumentar al comparar con el caso base siguiendo la lógica del caso anterior, sin embargo esto no ocurre y las rótulas se acortan, concentrando el daño a nivel de la base. Cabe destacar que a diferencia del caso anterior, las respuestas carga vs desplazamiento si son similares tanto para el modelo completo (f+c) como el de flexión pura (f), ya que el muro bandera degrada entre un 1 % a 25 % antes que el rectangular según se analice con modelo completo (f+c) o flexión pura (f) respectivamente. Esto se debe a que la relación de aspecto en la altura aumenta, pero a nivel de largo de base respecto al espesor del muro disminuye de 1:6 a 1:3, lo que genera una sección más compacta y que permite no distinguir el efecto de Bernoulli de las secciones planas, razón por la cual las respuestas globales son tan parecidas.

# Capítulo 7

## Conclusiones

### 7.1. Resumen

En esta investigación, se estudia experimental y analíticamente el comportamiento de muros esbeltos de hormigón armado tipo bandera frente a una carga axial constante y un desplazamiento lateral cíclico, para así poder comparar los resultados obtenidos con modelos de elementos finitos o modelos predictivos utilizados en trabajos anteriores, esto se debe a que el nivel de discontinuidad en la base no ha sido tratado experimentalmente y por lo tanto es necesario observar su impacto estructural. Para lograr llevar a cabo el estudio experimental, se dispone del laboratorio de estructuras recién construido que contempla un muro y losa de reacción, al que se diseñó y construyó un sistema de restricción lateral y carga axial. Se construyen cuatro probetas de hormigón armado las cuales fueron diseñadas con una altura al punto de aplicación de la carga lateral de  $2.8m$ , un espesor de muro de  $15cm$  y una longitud de  $90cm$ . Todos los ensayos son realizados bajo las mismas condiciones de carga axial constante y carga lateral cíclica aplicada a nivel de techo. Para la obtención de las deformaciones principales, se han instrumentado todos los muros a ensayar con strain gages, LVDT y fotogrametría. Finalmente se ejecutan modelos de elementos finitos para representar las respuestas obtenidas en los ensayos realizados, donde una vez validados los modelos se

extenderá su análisis paramétrico para todos los casos de interés en la ingeniería civil, siendo estos muros mas esbeltos debido al aumentar su altura o disminuir el largo del muro, además de estudiar el impacto de utilizar vigas rígidas en los modelos como si se dispusiera de losas en la realidad.

## 7.2. Conclusiones y Recomendaciones

El primero de los objetivos principales de esta tesis, es cuantificar el impacto de la discontinuidad para muros con relación de aspecto tres (muros ensayados), donde pudimos ver que esta configuración produce un impacto relativamente bajo, debido a que la capacidad de carga en todos los ensayos estuvo cercana a las  $20ton.f$ . Esto último se reafirma con el hecho que todas están reforzadas de igual manera en los bordes (misma cuantía) y la capacidad final de un muro está determinada por su armadura de refuerzo. Por otra parte, la principal diferencia en los resultados obtenidos radica en el nivel de degradación del muro bandera, donde si nos centramos principalmente en los ensayos, cada uno comienza a degradar en algún ciclo diferente del 4% de drift, donde el muro rectangular posee la mejor respuesta y el muro con la abertura mas ancha (Muro 3) es tiene la mayor degradación, esto se debe al tamaño de la abertura, ya que a mayor largo de la bandera, se concentran mayores deformaciones, produciendo una aceleración en el daño del hormigón, demostrando que todos los muros banderas fallan antes en comparación al muro rectangular y es lo ocurrido en los ensayos. Si bien el muro 4 tiene un tipo de falla distinto al resto y no se puede comparación directamente con los ensayos, en los primeros ciclos al menos, antes de comenzar la concentración de deformaciones en el refuerzo discontinuo, este muro tiene un comportamiento mas similar al muro rectangular, mostrando grietas más tarde en comparación a los otros dos muros banderas. El muro rectangular sufre pandeo local pero por motivos de seguridad no se alcanzó a ensayar hasta su ruptura, mientras que los muros 2 y 3 las barras de refuerzo sufren pandeo y ruptura ya al final del ensayo. Como se había mencionado antes, el muro 4 sufrió otro tipo de falla localizada justo en el extremo del refuerzo discontinuo, esto se debió al deslizamiento de las barras al no estar bien ancladas (bajo largo de desarrollo), produciendo que todas las

deformaciones se concentraran en esta zona, presenciando pandeo en la armadura de refuerzo vertical (doble malla).

Otro de los objetivos tanto principal como secundario, es desarrollar y validar un modelo de elementos finitos capaz de reproducir la respuesta de muro con discontinuidad. Con los datos de las probetas ensayadas, se pudo validar los modelos ejecutados, esto se aprecia en como el modelo muestra la degradación de los muros al utilizar un acero con pandeo y hormigón con daño, consideraciones que concuerdan con el tipo de daño y falla observado en los ensayos. Todos los modelos son capaces de captar de manera aceptable la rigidez inicial del ensayo, reproducir en forma precisa los desplazamientos realizados en cada ciclo durante el ensayo, además de captar la capacidad máxima de cada probeta, como así su degradación por cada ciclo del último drift de techo hasta el momento de alcanzar la falla. El modelo es capaz de obtener una correcta distribución de deformaciones unitarias en todo nivel del muro, aunque en esta tesis se trabajo principalmente al nivel de la base (interacción muro-pedestal), dado su alto nivel de concentración de deformaciones.

Para una correcta modelación del refuerzo discontinuo se debe implementar un modelo con adherencia, sin embargo por simplicidad se asumió que considerar la mitad del largo de desarrollo es un anclaje efectivo, obteniendo una buena respuesta dado que no se alteran los resultados globales obtenidos en los muros tipo bandera (no se ve afectado ni la resistencia ni la ductilidad de las probetas), mientras que esto si tiene un impacto en la concentración de deformaciones unitarias a la altura donde se cortan las barras. Si bien este criterio permite modelar incluso hasta de mejor manera el Muro 4 que tuvo un tipo de falla totalmente distinto, tiene limitaciones, como la concentración de deformaciones en la posición donde se cortó el refuerzo (60cm), mientras que fotogrametría captura esta concentración de deformaciones pero en la posición real del refuerzo discontinuo. Adicional a esta consideración también debemos destacar como la utilización de un refuerzo continuo en el Muro 3 produjo una mayor concentración de deformaciones en la base, dado que desapareció el peak intermedio, y esto produce una aceleración de su degradación.

Para los muros más esbeltos modelados ya sea triplicando la altura o disminuyendo a la mitad su largo, los resultados obtenidos demuestran que los muros más altos concentran mayor daño en la base, provocando una degradación mayor y antes de tiempo para los muros con discontinuidades. Esto último se estudio de forma completa en el Capítulo 6, donde se compararon muros mas alto tanto en su modelo Corte más Flexión (f+c) como a Flexión Pura (f), donde para el muro rectangular, el perfil de deformaciones es similar para drift pequeños, sin embargo para derivas de techo sobre el 2 % se comienzan a observar diferencias importantes, donde el modelo flexión mas corte (f+c) es un 10 % mayor en compresión que el modelo a flexión pura (f), mientras que para tracción el modelo a flexión pura (f) es un 60 % mayor al modelo completo (f+c) debido a la consideración de vigas rígidas que evitan que el agrietamiento crezca en la altura, concentrando mayores deformaciones. Por otra parte para el muro discontinuo, las deformaciones a compresión se comportan de forma inversa al caso rectangular dado que estas aumentan para el modelo de flexión pura (f) un 60 % en comparación a la compresión del modelo completo (f+c) para las compresiones en la zona de la discontinuidad, además las tracciones obtenidas en dicha zona para flexión pura (f) aumentan más del doble en comparación al modelo completo (f+c), donde nuevamente la utilización de vigas rígidas evitan que el daño se desarrolle en la altura, concentrando las deformaciones a nivel basal, y dado que el daño se aumenta al utilizar discontinuidad, los muros degradan anticipadamente.

El último de los objetivos secundarios se encuentra relacionado con la validación de las expresiones propuestas por Ahumada [1], las cuales analizan los efectos de corte en las deformaciones máximas tanto de compresión como tracción en la base de un muro rectangular, encontrando que la relación de aspecto tiene gran importancia en ambos casos, mientras que la deriva de techo toma importancia en la amplificación de compresión. Adicionalmente a través de análisis de flexión no lineal, propone un modelo que estima el desplazamiento de fluencia de muros con aberturas tipo bandera, que depende de las dimensiones de la abertura y la cuantía longitudinal de borde. También propone rangos de validez para tres modelos que estiman la curvatura última en el rango plástico de este tipo de muros. Si bien son conservadoras debido a las consideraciones utilizadas para llegar a ellas, estas demostraron ser un buen parámetro de partida y diseño de muros estructurales, no obstante cabe destacar que

las mayores diferencias se presentaron en los muros con baja relación de aspecto de esbeltez en la altura (1:3 con respecto al largo), como lo pudimos apreciar al comparar los resultados de las ecuaciones con los modelos o muros ensayados, donde las expresiones del autor para el desplazamiento de fluencia entregan los valores mas conservadores en comparación a los otros métodos (los valores por ensayo siempre estaban entre medio de lo determinado por el autor y lo calculado por los modelos de elementos finitos). Sin embargo para los muros más altos, las respuestas tenían bajas diferencias y permitían poder comparar de mejor manera y validar aún más, la extrapolación de los modelos ejecutados. La predicción realizada al inicio de este trabajo de tesis utilizando las expresiones de Ahumada [1] son conservadoras pero acertadas al momento de diseñar, dado que se esperaba que el muro con mayor largo de bandera (Especimen 3), degradara anticipadamente en comparación al caso rectangular, mientras que el Especimen 2 resultó ser un caso intermedio. Esta situación se comprueba al revisar los desplazamientos de fluencia alcanzado, donde para el muro rectangular se debe desplazar un 50% más que el resto, mientras que el muro con mayor bandera es el que requiere de menor desplazamiento para que sus refuerzos de borde comiencen a fluir. Para los muros con mayor altura, el desplazamiento de fluencia se ve aumentado al doble al comparar con los muros bandera, debido a que los muros más esbeltos aumentan la concentración de deformaciones a nivel de la base.

Cuando extendemos el análisis para muros con mayor nivel de esbeltez, los modelos en elementos finitos ejecutados mantienen un desplazamiento de fluencia promedio menor al 8% al comparar un modelo completo (f+c) a uno de flexión pura (f), mientras que la expresiones propuestas por el autor aumentan hasta casi el 84% al comparar los modelos de curvatura centrada en la base (MCCB) y el modelo de curvatura distribuida en la altura (MCDA), esto se debe a que los muros esbeltos concentran más deformaciones a nivel de la base, acelerando la degradación y daño para los muros con discontinuidad y el incorporar elementos rígidos que evitan que las grietas se puedan desarrollar en la altura, o por ecuaciones limitar en la base todas las curvatura, las diferencias se acentúan, dejando en claro lo conservador de las expresiones para muros con discontinuidades. Por lo tanto, si extrapolamos los datos obtenidos, se hace importante realizar modelos de elementos finitos para estudiar sus capacidades de deformación, carga y primera fluencia para muros de gran altura y relación de esbeltez,



superior a 1:6, lo que afectará directamente a edificios por sobre los 15 pisos de altura, tamaño de construcciones normalmente utilizado en Chile.

Un resultado interesante es observar el impacto de la esbeltez en el muro, donde para un muro rectangular más esbelto producto de aumentar su altura (1:9 en nuestro caso), los largos de rótula plástica aumentan considerablemente en comparación a las expresiones de Ahumada [1], lo que significa un daño más distribuido en la altura, produciendo que el muro degrade mucho más lento y explique porque tiene un mejor comportamiento que los muros ensayados. Además, en muros esbeltos se espera que la respuesta carga vs desplazamiento entre un muro rectangular y uno bandera, tanto para el modelo completo (f+c) como el de flexión pura (f), tengan respuesta similar pero esto no ocurre ya que el muro bandera degrada entre un 25 % a 60 % antes que el rectangular según se analice con modelo completo (f+c) o flexión pura (f) respectivamente. Por otra parte para el muro más esbelto producto de reducir su largo (1:6 en nuestro caso), los largos de rótula plástica deberían aumentar al comparar con el caso base siguiendo la lógica del caso anterior, sin embargo esto no ocurre y las rótulas se acortan, concentrando el daño a nivel de la base. Cabe destacar que a diferencia del caso anterior, las respuestas carga vs desplazamiento si son similares tanto para el modelo completo (f+c) como el de flexión pura (f), ya que el muro bandera degrada entre un 1 % a 25 % antes que el rectangular según se analice con modelo completo (f+c) o flexión pura (f) respectivamente. Esto se debe a que la relación de aspecto en la altura aumenta, pero a nivel de largo de base respecto al espesor del muro disminuye de 1:6 a 1:3, lo que genera una sección más compacta y que permite no distinguir el efecto de Bernoulli de las secciones planas, razón por la cual las respuestas globales son tan parecidas. Por lo tanto, limitar el largo de rótula plástica a la altura de la abertura, resulta ser un buen criterio de diseño aunque conservador.

# Bibliografía

- [1] M. Ahumada. Modelación en elementos finitos de muros esbeltos de hormigón armado con discontinuidades en la base. recomendaciones para el diseño. *Memoria para optar al título de ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 179p*, 2014.
- [2] A. Ali and J. Wight. Reinforced concrete structural walls with staggered opening configurations under reversed cyclic loading, report no. umce 90-05, dept. of civil eng'g., univ. of michigan. *Ann Arbor, Michigan*, pages 13–65, 1990.
- [3] A. Belarbi and T. Hsu. Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete. *Structural Journal*, 91(4):465–474, 1994.
- [4] M. Collins and A. Porasz. Shear design for high strength concrete. In *Proceedings of Workshop on Design Aspects of High Strength Concrete*, 1989.
- [5] ACI Committee. Acceptance criteria for moment frames based on structural testing and commentary, aci 374.1-05. 2005.
- [6] ACI Committee, American Concrete Institute, and International Organization for Standardization. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary. American Concrete Institute, 2008.
- [7] AISC Committee et al. Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-10). *American Institute of Steel Construction, Chicago-Illinois*, 2010.
- [8] L. Dodd and J. Restrepo-Posada. Model for predicting cyclic behavior of reinforcing steel. *Journal of Structural Engineering*, 121(3):433–445, 1995.
- [9] A. Larraín, F. Yañez, and C. Verdugo. Manual de calculo de hormigón armado. segunda edición en base al código ACI 318-05. *Gerdau Aza, Chile*, 2006.
- [10] I. Manriquez. Ensayo de muros bandera de hormigón armado con carga lateral cíclica

- medido por fotogrametría y comparado con modelo puntal tensor. Master's thesis, Universidad de Chile, 2016.
- [11] I. Manriquez, S. Diaz, L. Massone, F. Rojas, and R. Herrera. Analytical and experimental cyclic response of RC walls with setback discontinuities. *Paper N°3515 for 16th World Conference on Earthquake, 16WCEE 2017*, 2016.
- [12] L. Massone. *RC wall shear–flexure interaction: analytical and experimental responses*. PhD thesis, Phd dissertation. University of California, Los Angeles.
- [13] L. Massone and J. Alfaro. Displacement and curvature estimation for the design of reinforced concrete slender walls. *Artículo para Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, 2014.
- [14] L. Massone, J. Alfaro, M. Ahumada, and F. Rojas. Estimación del desplazamiento lateral y curvatura en muros esbeltos. *Paper N°29 para XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2015*, 2015.
- [15] L. Massone, J. Beltrán, C. Lacaze, and P. Rojas. Modelacion del pandeo de refuerzo longitudinal de elementos de hormigon armado. *Paper N°21 for 16th World Conference on Earthquake, 16WCEE 2017*, 2016.
- [16] L. Massone and D. Moroder. Buckling modeling of reinforcing bars with imperfections. *Engineering Structures*, 31(3):758–767, 2009.
- [17] D. Palermo and F. Vecchio. Compression field modeling of reinforced concrete subjected to reversed loading: formulation. *ACI Structural Journal*, 100(5):616–625, 2003.
- [18] E. Peña. Implementación del programa de elementos finitos safepy para análisis no lineal dinámico con factor de convergencia de carga. Master's thesis, Universidad de Chile, 2016.
- [19] F. Rojas. *Development of a nonlinear quadrilateral layered membrane element with drilling degrees of freedom and a nonlinear quadrilateral thin flat layered shell element for the modeling of reinforced concrete walls*. PhD thesis, Phd dissertation. Los Angeles, CA, USA, University of Southern California. 218p.
- [20] F. Rojas, J. Anderson, and L. Massone. A nonlinear quadrilateral layered membrane element with drilling degrees of freedom for the modeling of reinforced concrete walls. *Engineering Structures*, 124:521–538, 2016.
- [21] M. Saatcioglu and S. Razvi. Strength and ductility of confined concrete. *Journal of*

- Structural engineering*, 118(6):1590–1607, 1992.
- [22] C. Taylor, P. Cote, and J. Wallace. Design of slender reinforced concrete walls with openings. *Structural Journal*, 95(4):420–433, 1998.
- [23] J. Thomsen and J. Wallace. *Displacement based design of reinforced concrete structural walls: an experimental investigation of walls with rectangular and t-shaped cross-sections: a dissertation*. PhD thesis, Clarkson University, 1995.
- [24] E. Thorenfeldt, A. Tomaszewicz, and J. Jensen. Mechanical properties of high-strength concrete and application in design. In *Proceedings of the symposium utilization of high strength concrete*, pages 149–159. Tapir Trondheim Norway, 1987.

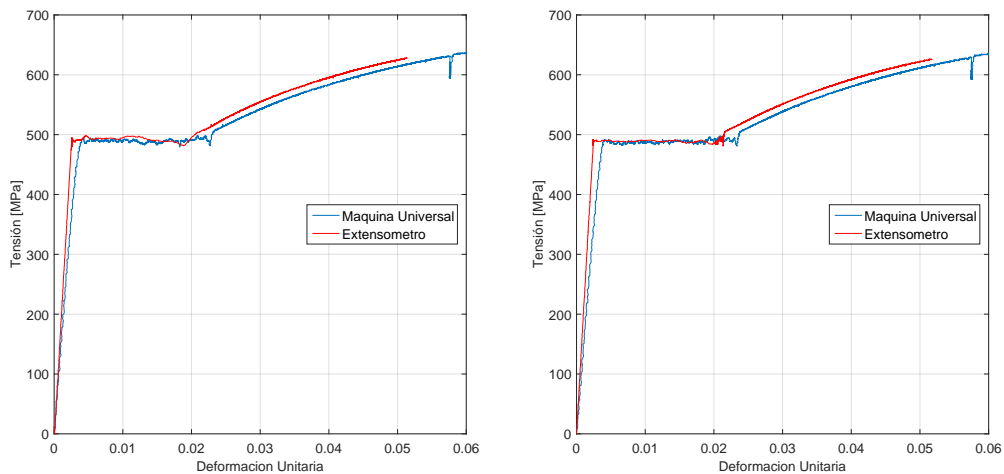
# Anexos

# Anexos A

## Capítulo 3

### A.1. Curvas Carga vs Deformación Acero

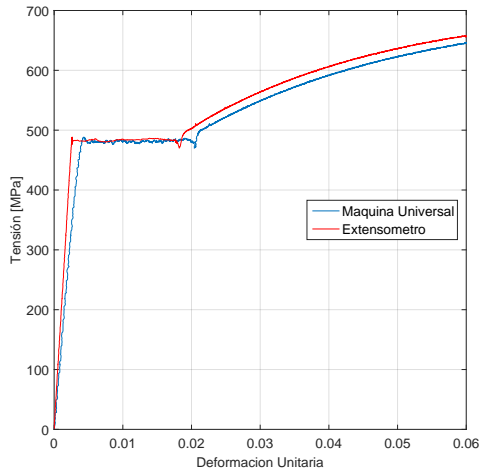
Las barras de acero fueron ensayadas en una maquina universal, siendo traccionadas hasta su rotura. Todos los ensayos fueron instrumentados por un extensómetro, debido a que las deformaciones obtenidas por la maquina universal no son del todo confiable. A continuación se presentan los resultados obtenidos para todas las barras ensayadas.



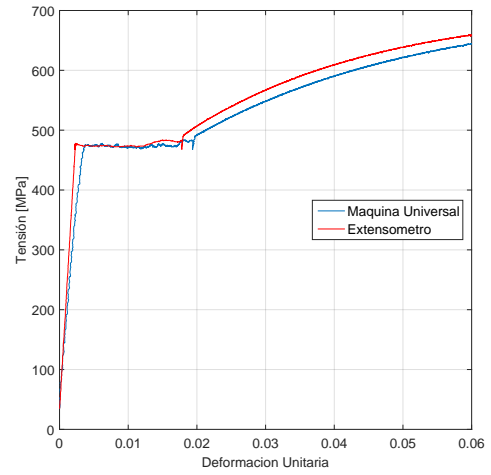
(a) Ensayo 1.

(b) Ensayo 2.

**Figura A.1.1:** Curvas Carga vs Deformación Unitaria, Barra 8mm.

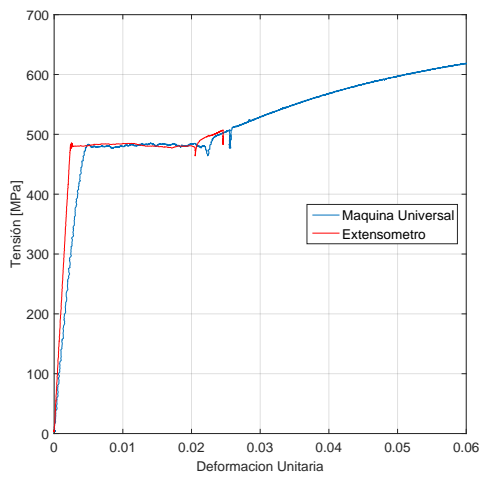


(a) Ensayo 1.

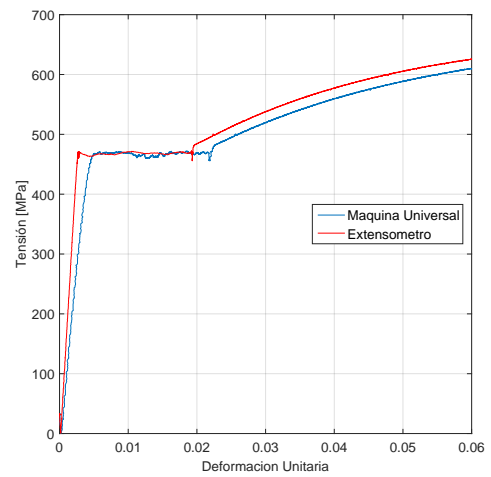


(b) Ensayo 2.

**Figura A.1.2:** Curvas Carga vs Deformación Unitaria, Barra 10mm.

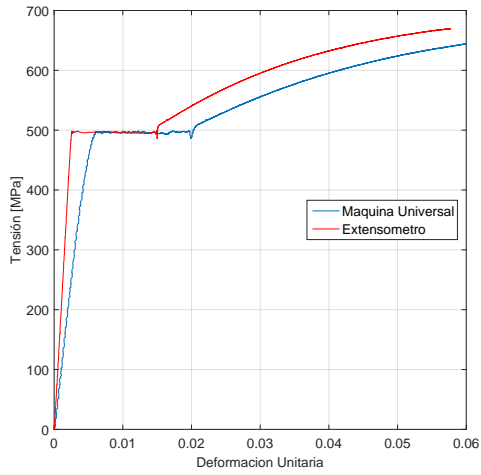


(a) Ensayo 1.

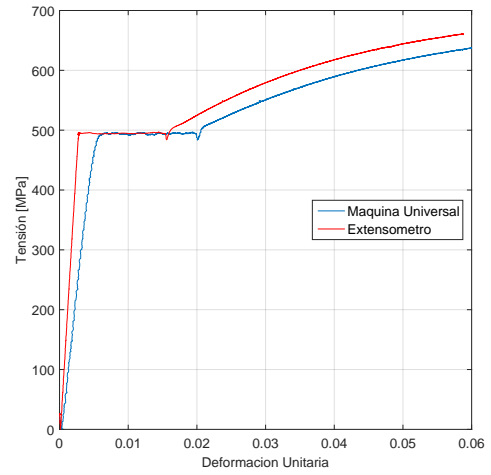


(b) Ensayo 2.

**Figura A.1.3:** Curvas Carga vs Deformación Unitaria, Barra 12mm.

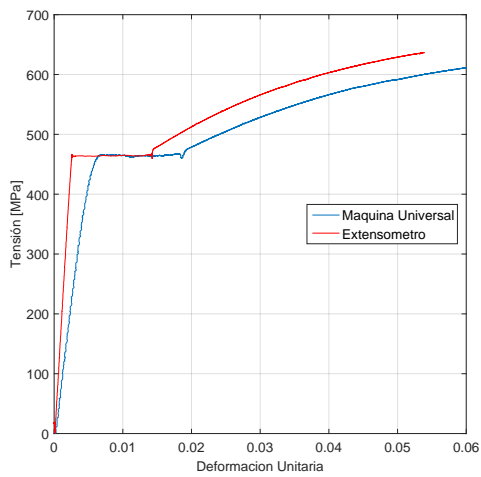


(a) Ensayo 1.

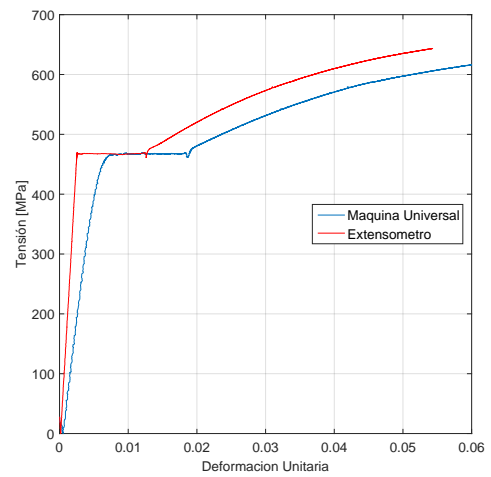


(b) Ensayo 2.

Figura A.1.4: Curvas Carga vs Deformación Unitaria, Barra 16mm.



(a) Ensayo 1.



(b) Ensayo 2.

Figura A.1.5: Curvas Carga vs Deformación Unitaria, Barra 18mm.



## A.2. Detalle Planos Probetas de Hormigón Armado

Para todas las probetas, se utilizó la misma disposición de armadura tanto para la viga de transmisión como el pedestal. En las Figuras A.2.6 y A.2.7 se muestra el detalle de los refuerzos para la viga y el pedestal respectivamente.

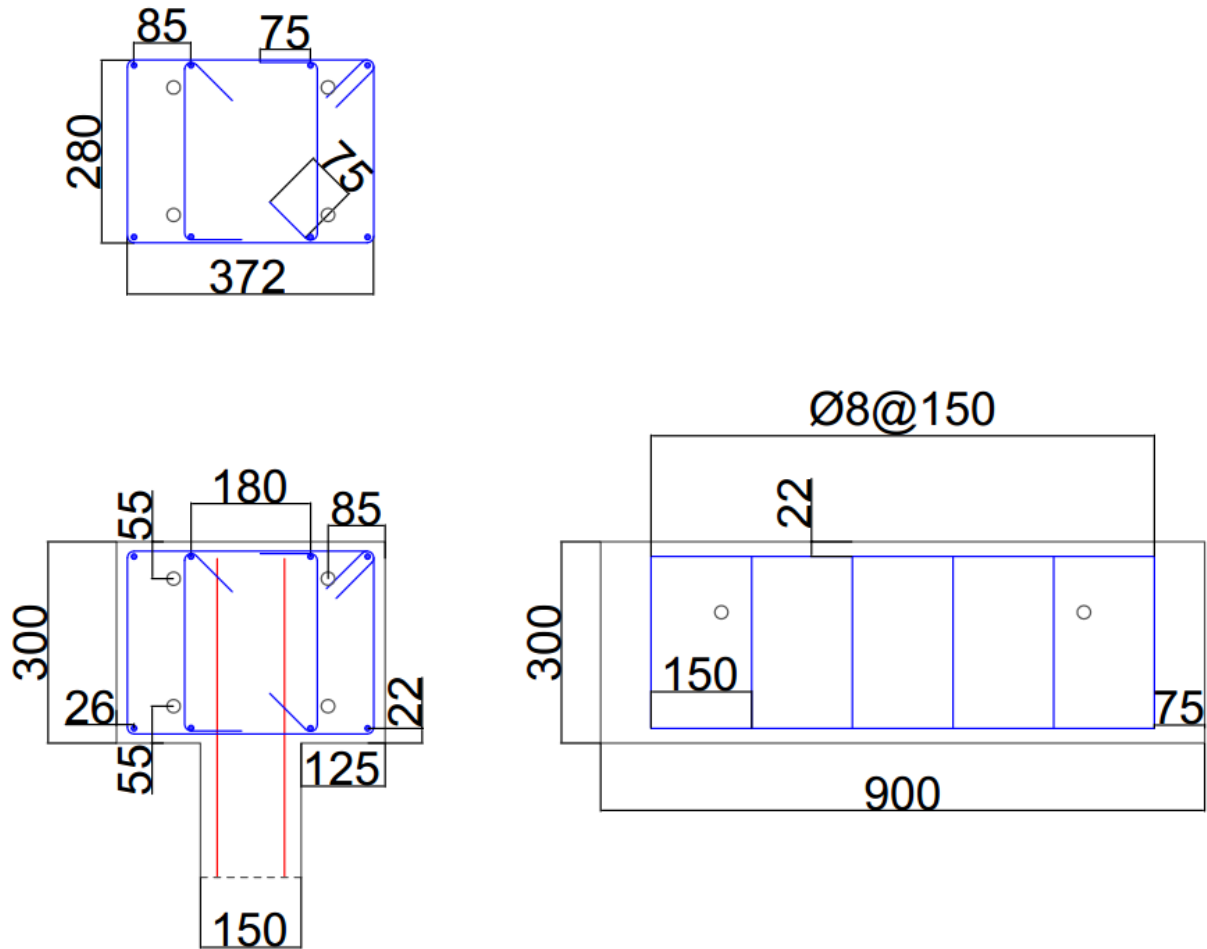
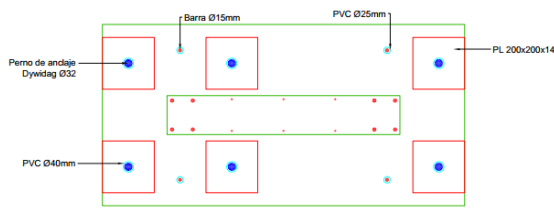
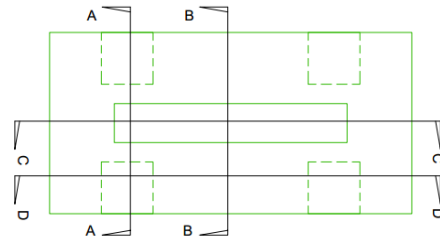


Figura A.2.6: Detalle refuerzo Viga.

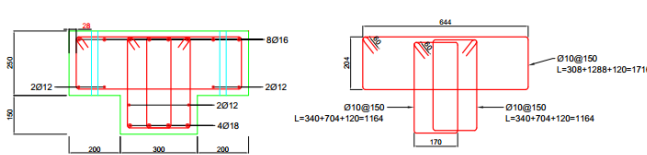
# Diseño de fundación para armadura de borde de muro de 4Ø16



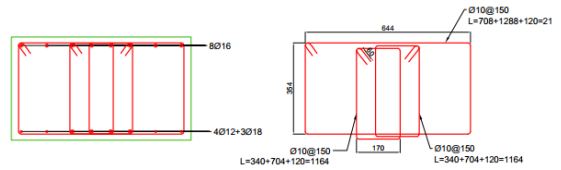
General



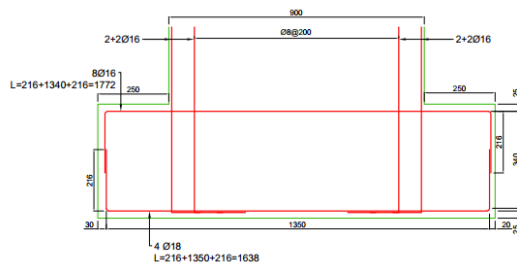
Hormigón



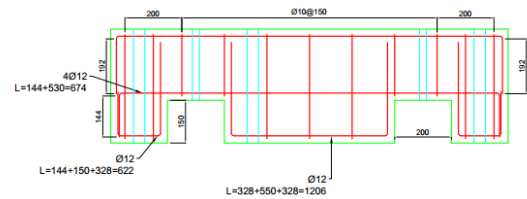
Corte A-A



Corte B-B



Corte C-C



Corte D-D

Figura A.2.7: Detalle Refuerzo Pedestal.

### A.3. Detalle Instalación Strain Gages

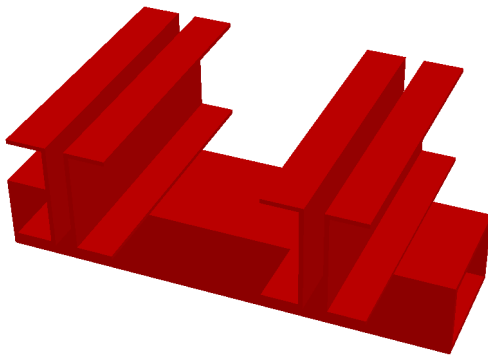
La ubicación exacta de cada Strain Gages para cada probeta, se presenta en la Figura A.3.8 extraída del trabajo de tesis de Manriquez [10], donde el nivel de altura  $0mm$  se ubica en la interfase Muro-Pedestal.

SG	PROBETA 1		PROBETA 2		PROBETA 3		PROBETA 4	
	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]
SG_I1	265	-215	265	-206	265	-152	265	-130
SG_I2	265	58	265	22	265	85	265	48
SG_I3	265	285	265	318	265	289	265	332
SG_I4	265	618	265	591	265	623	265	682
SG_I5	265	993	265	1005	265	1015	265	1035
SG_M1	795	146	795	59	795	84	795	195
SG_M2	795	365	795	255	795	294	795	390
SG_M3	795	547	795	434	795	498	795	603
SG_M4	795	962	795	858	795	871	795	1010
SG_D1	1119	-172	1119	-196	1119	-169	1119	-188
SG_D2	1119	56	1119	26	1119	107	1119	35
SG_D3	1119	272	1119	305	1119	325	1119	308
SG_D4	1119	610	1119	598	1119	663	1119	675
SG_D5	1119	993	---	---	---	---	---	---
SG_L1	---	---	1369	578	1619	629	---	---
SG_L2	---	---	1369	1013	1619	1012	1369	1083

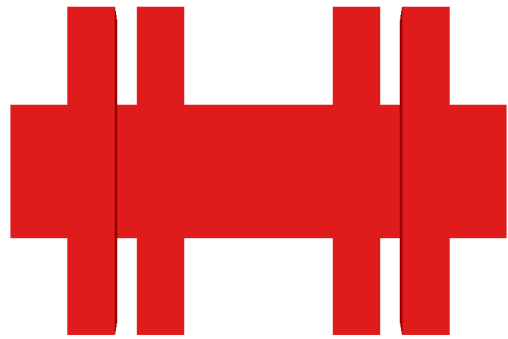
Figura A.3.8: Detalle refuerzo Viga.

## A.4. Detalle Sistema Carga Axial

En la Figura A.4.9 se puede apreciar el diseño del sistema de carga axial en distintas vista para poder tener una mejor noción de él.



(a) Vista 3D.



(b) Vista en Planta.



(c) Vista en Elevación.



(d) Vista de Perfil.

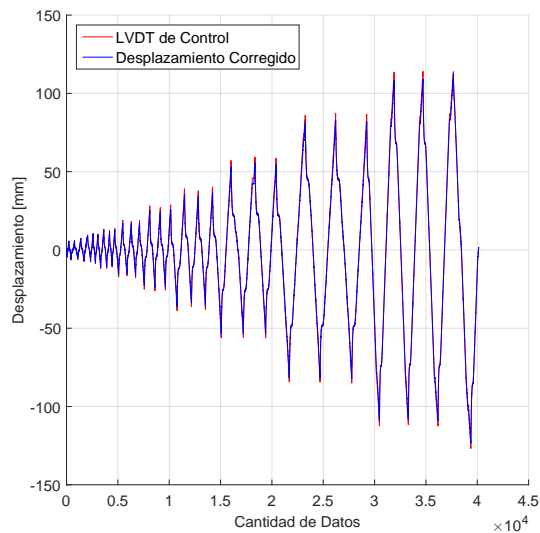
**Figura A.4.9:** Sistema de Carga Axial.

# Anexos B

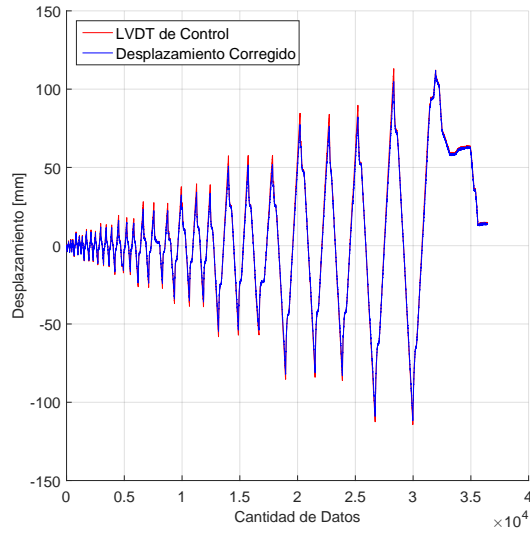
## Capítulo 4

### B.1. Adquisición Y Corrección De Datos Obtenidos

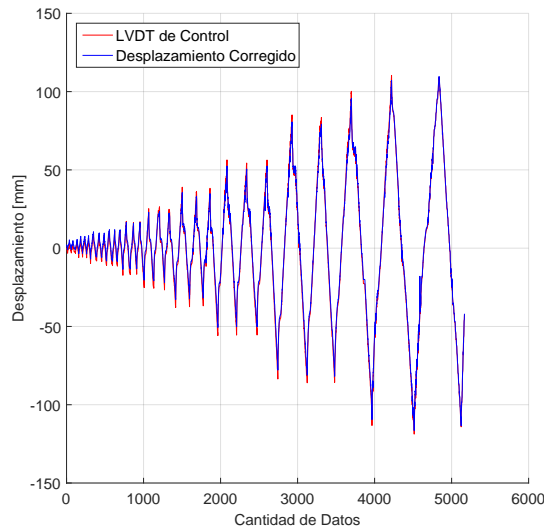
En las Figuras B.1.1, B.1.2 y B.1.3 se presenta la comparación del desplazamiento de control de los ensayo 1, 3 y 4, proporcionado por el LVDT superior, versus el desplazamiento corregido por el aporte que genera el pedestal debido a posible deslizamiento y/o rotación.



**Figura B.1.1:** Comparación Desplazamiento superior LVDT de control vs Desplazamiento Corregido para muro 1.



**Figura B.1.2:** Comparación Desplazamiento superior LVDT de control vs Desplazamiento Corregido para muro 3.

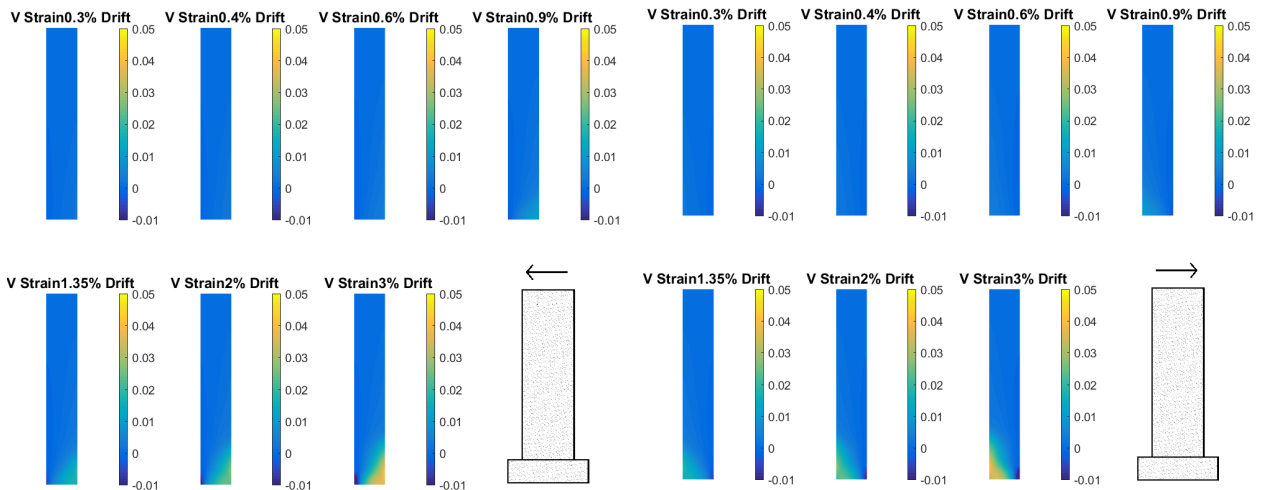


**Figura B.1.3:** Comparación Desplazamiento superior LVDT de control vs Desplazamiento Corregido para muro 4.

# Anexos C

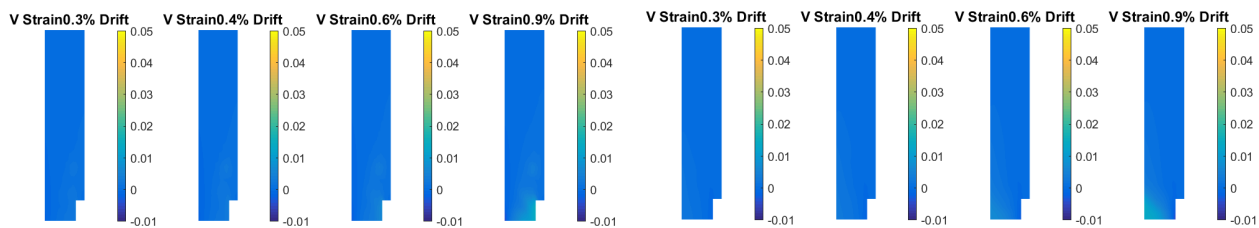
## Capítulo 5

### C.1. Resultados Analíticos



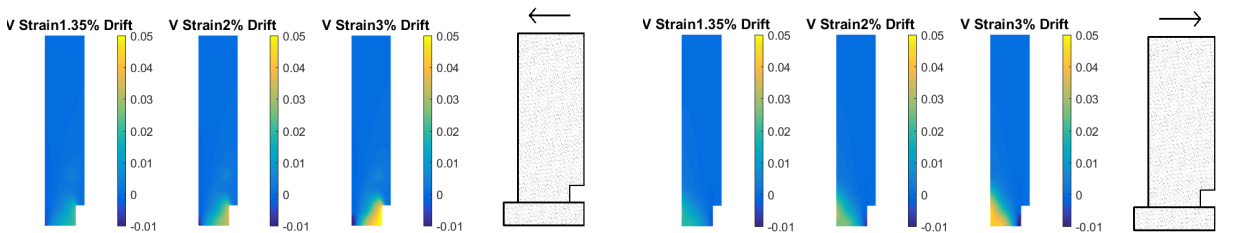
(a) Deformaciones Dirección Negativa Muro 1.

(b) Deformaciones Dirección Positiva Muro 1.



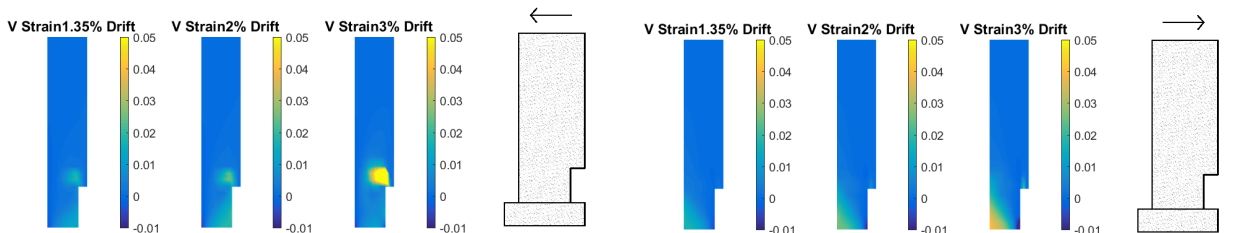
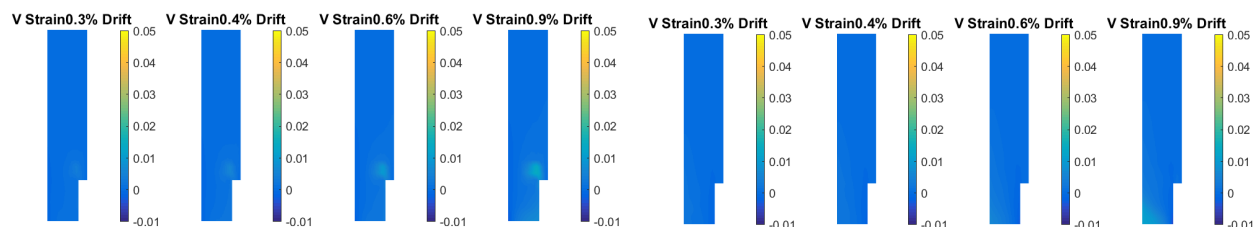
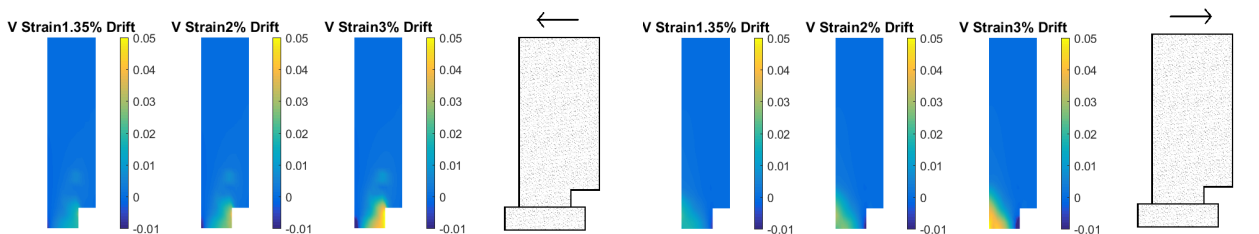
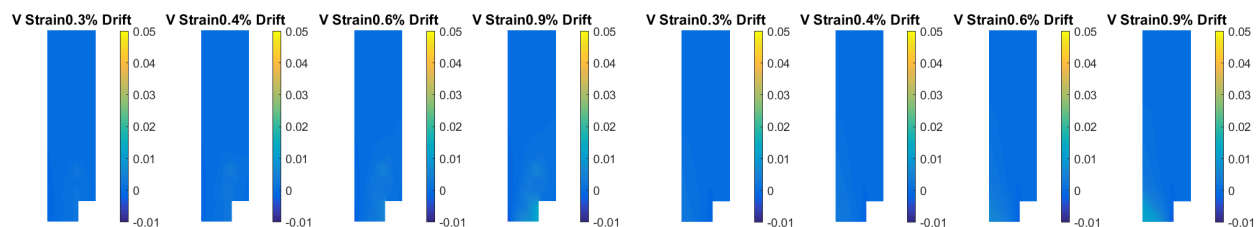
(a) Deformaciones Dirección Negativa Muro 2.

(b) Deformaciones Dirección Positiva Muro 2.



(a) Deformaciones Dirección Negativa Muro 3.

(b) Deformaciones Dirección Positiva Muro 3.



(a) Deformaciones Dirección Negativa Muro 4.

(b) Deformaciones Dirección Positiva Muro 4.



# Anexos D

## Capítulo 6

### D.1. Efecto De La Discontinuidad Para Muro 2

El muro 1 tiene un mayor daño por efecto de corte en borde comprimido ( $f+c$ ) en comparación al modelo de flexión pura ( $f$ ). Para el muro 2 el efecto es contrario, ya que las mayores compresiones ocurren para el modelo de flexión pura, esto se debe al agrietamiento en altura por grietas diagonales y la concentración de estas en la abertura. Lo anterior se ve reflejado en las Figuras D.1.1 y D.1.2.

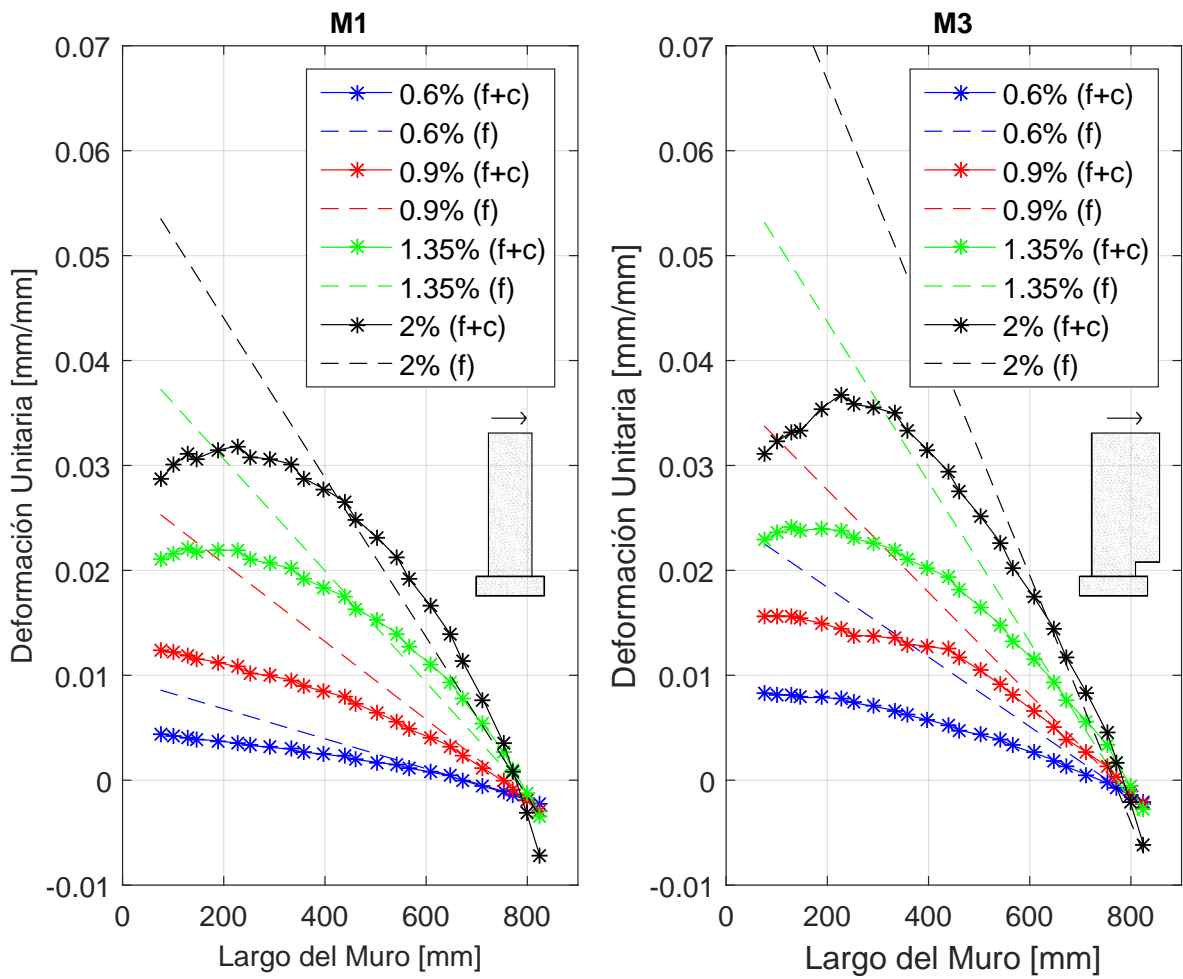
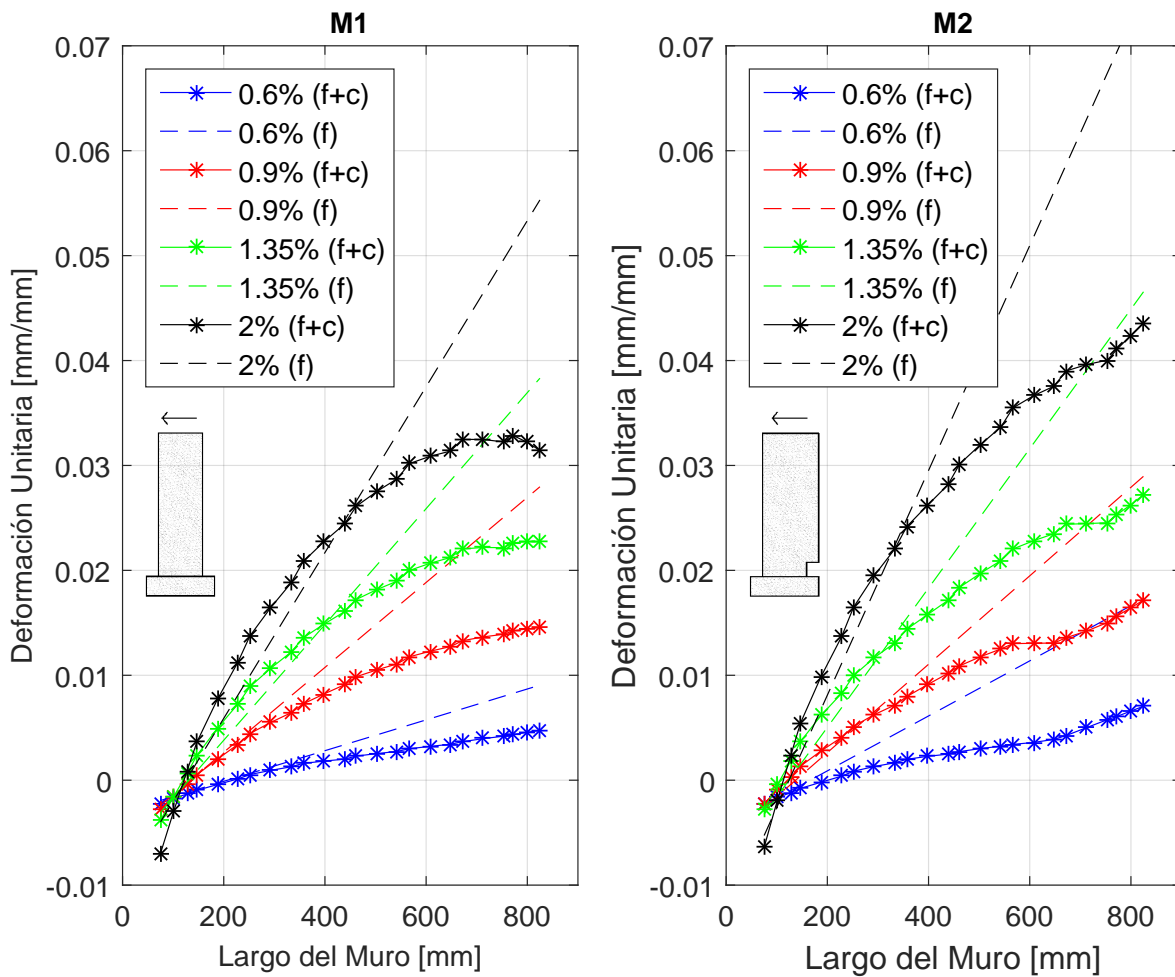
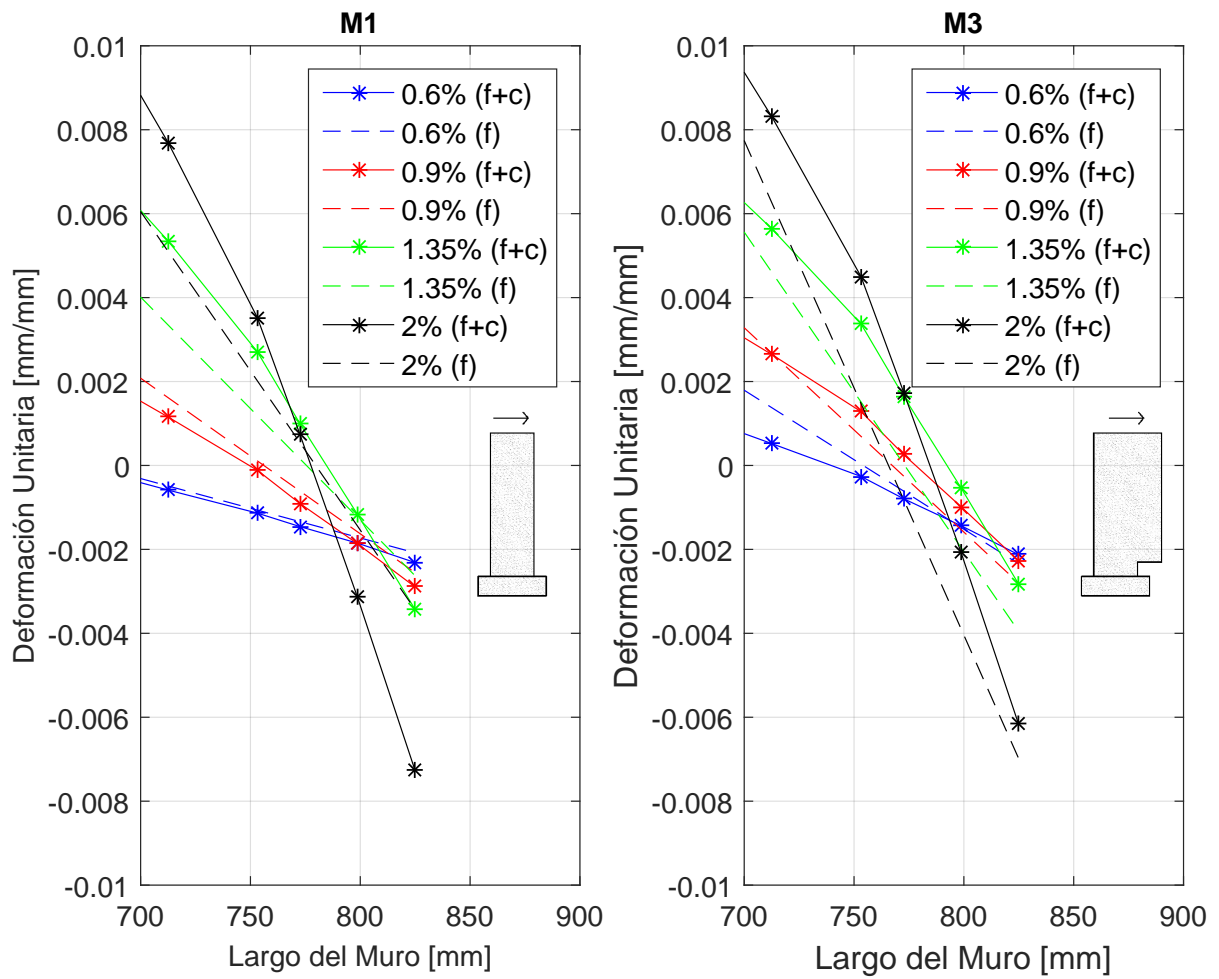


Figura D.1.1: Perfil de deformaciones, Sentido Positivo.

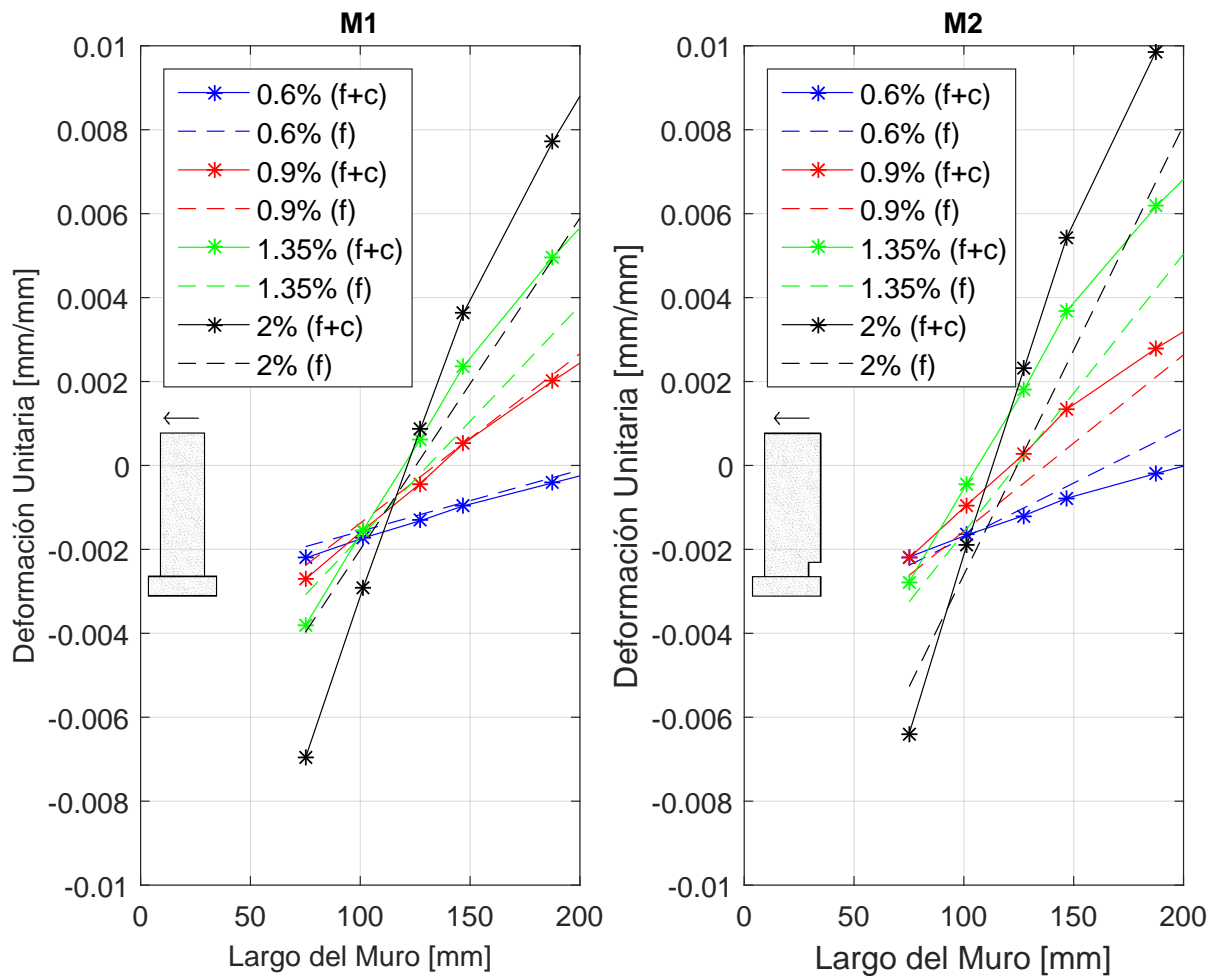


**Figura D.1.2:** Perfil de deformaciones, Sentido Negativo.

De manera adicional, en las Figuras D.1.3 y D.1.4 se presenta un acercamiento en la zona de compresión de las Figuras anteriores, con la finalidad de poder apreciar de mejor manera el efecto de la utilización del modelo completo al de flexión pura.

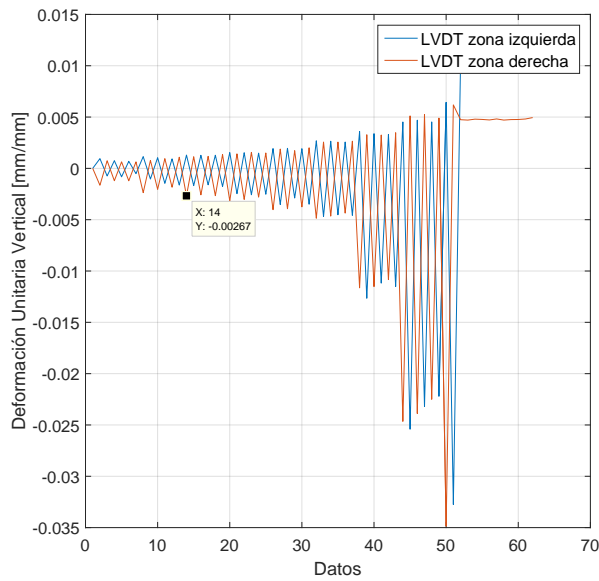


**Figura D.1.3:** Perfil de deformaciones, Sentido Positivo.

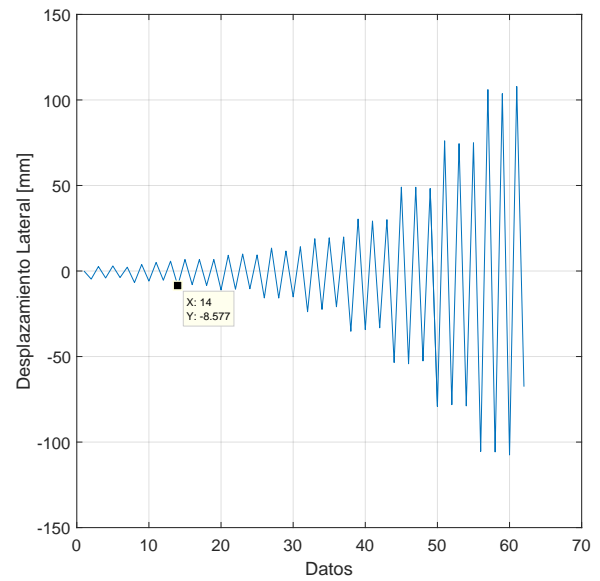


**Figura D.1.4:** Perfil de deformaciones, Sentido Negativo.

## D.2. Determinación desplazamiento de fluencia a partir de los ensayos

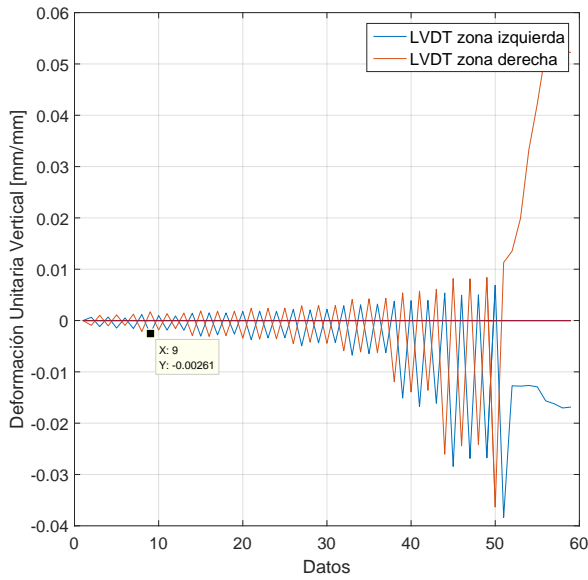


(a) Registro deformaciones verticales LVDT.

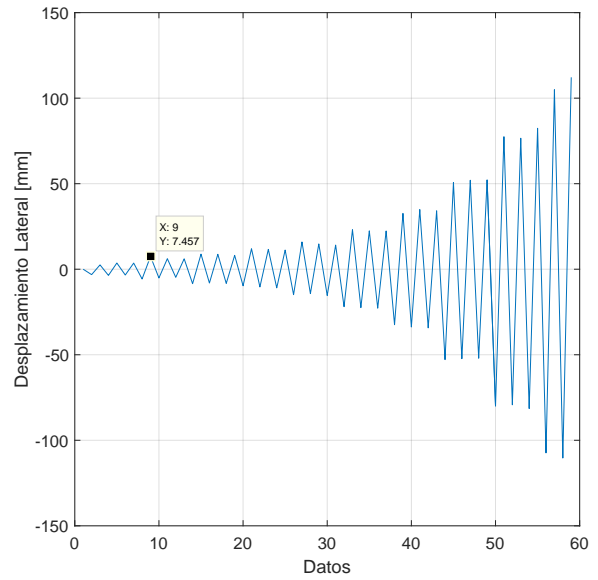


(b) Desplazamiento de techo cuando ocurre primera fluencia.

**Figura D.2.5:** Determinación desplazamiento de fluencia Muro 2.

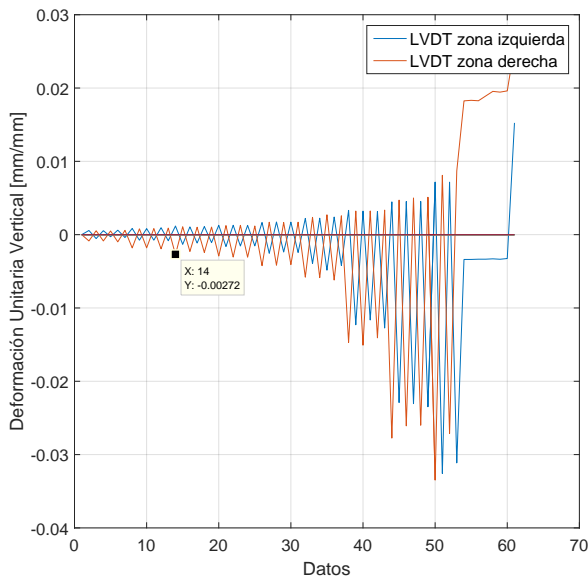


(a) Registro deformaciones verticales LVDT.

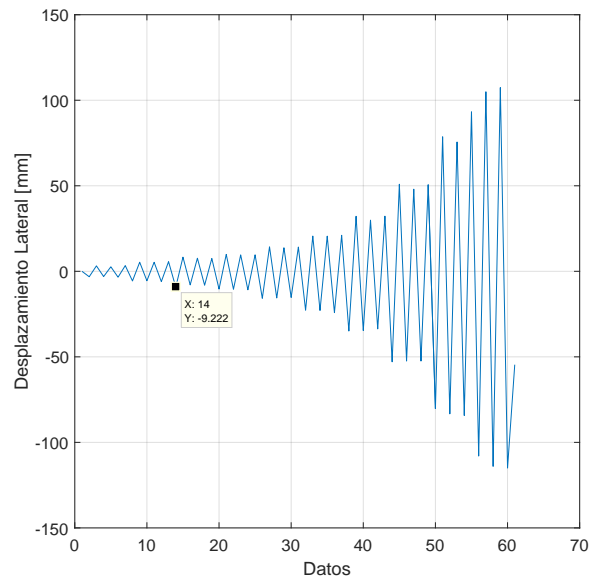


(b) Desplazamiento de techo cuando ocurre primera fluencia.

**Figura D.2.6:** Determinación desplazamiento de fluencia Muro 3.



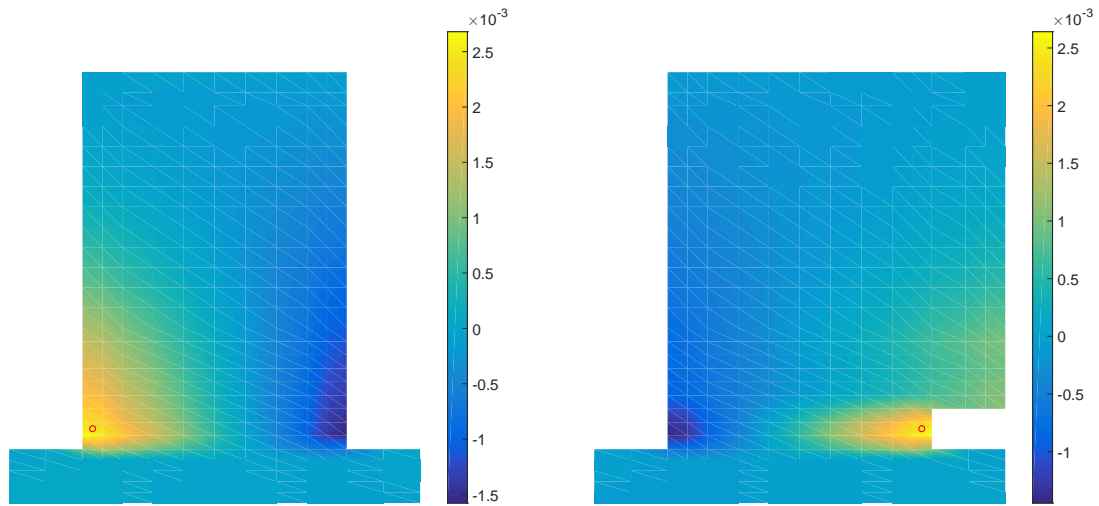
(a) Registro deformaciones verticales LVDT.



(b) Desplazamiento de techo cuando ocurre primera fluencia.

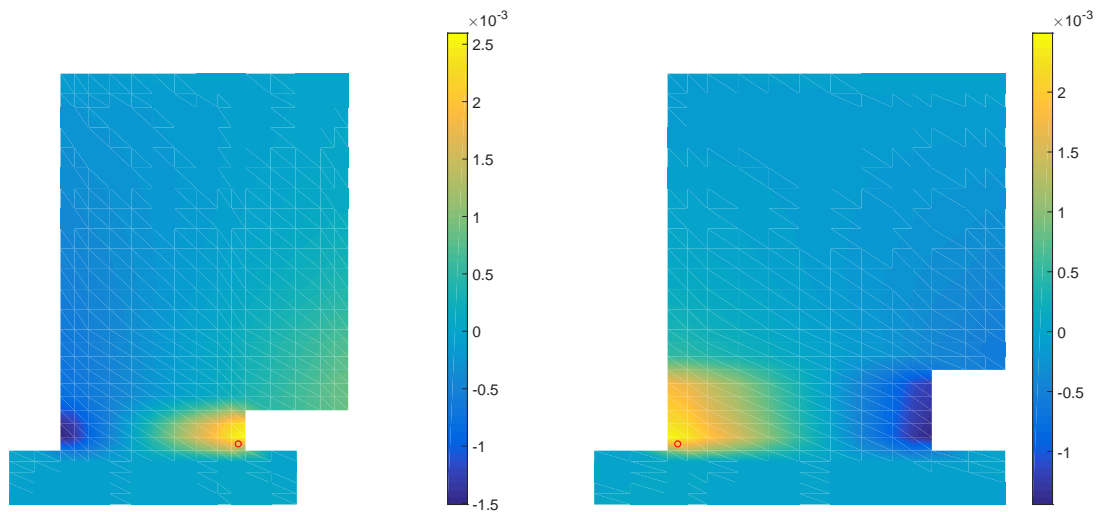
**Figura D.2.7:** Determinación desplazamiento de fluencia Muro 4.

### D.3. Determinación desplazamiento de fluencia a partir de los modelos



(a) Muro 1

(b) Muro 2

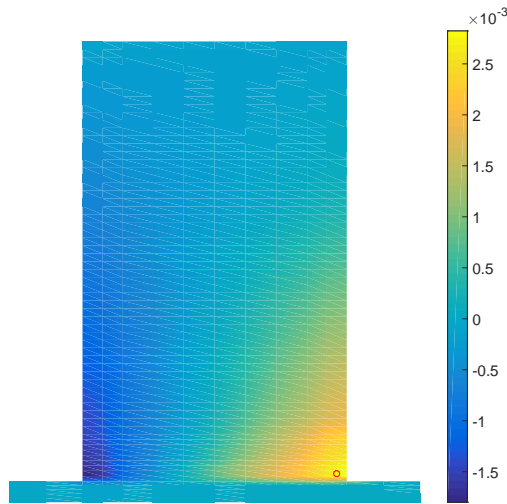


(c) Muro 3

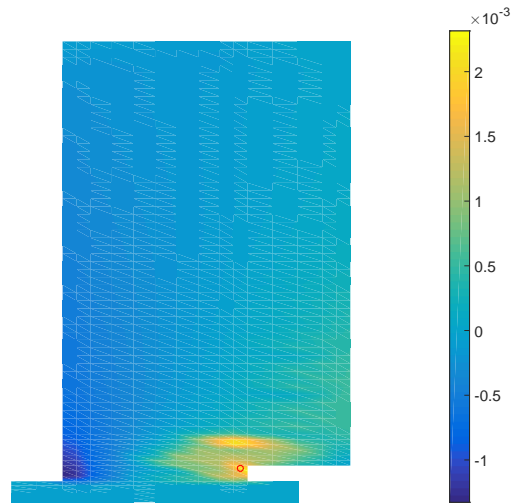
(d) Muro 4

Figura D.3.8: Elemento que fluye primero en modelo (f).

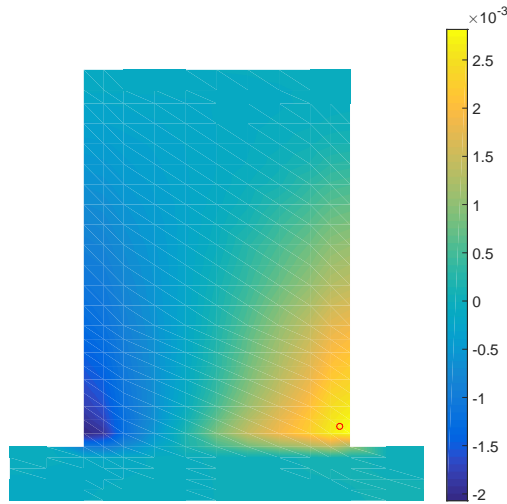




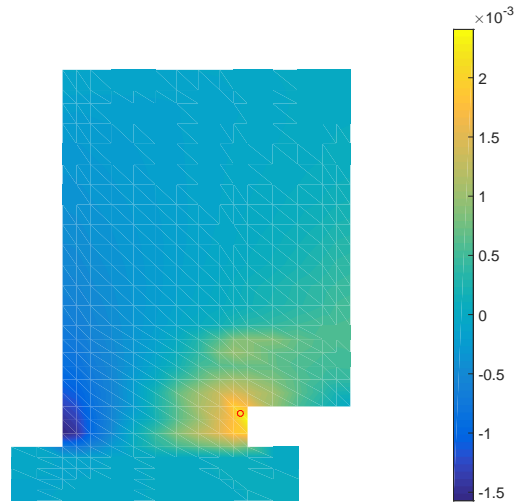
(a) Muro 1 Más Alto



(b) Muro 3 Más Alto

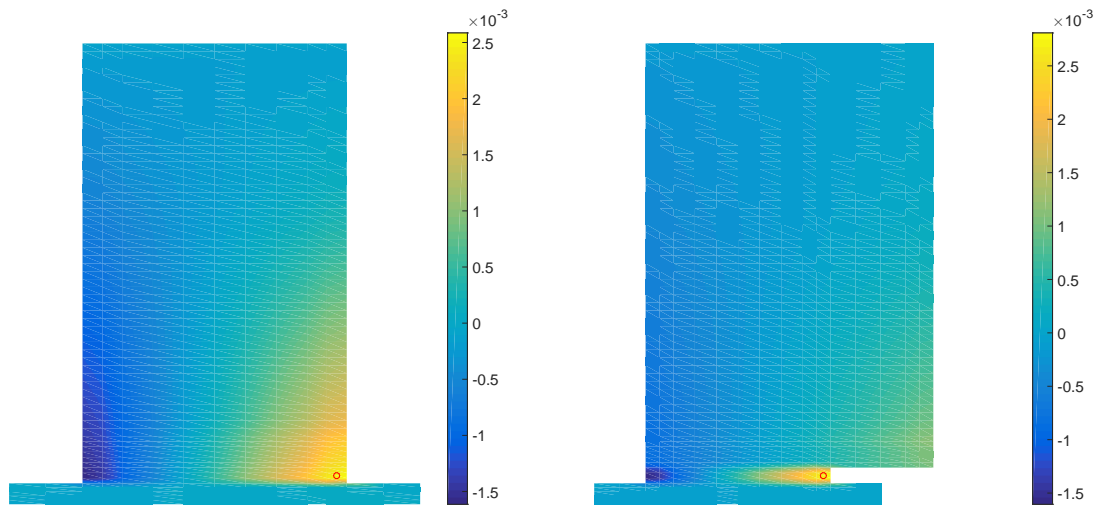


(c) Muro 1 Más Angosto



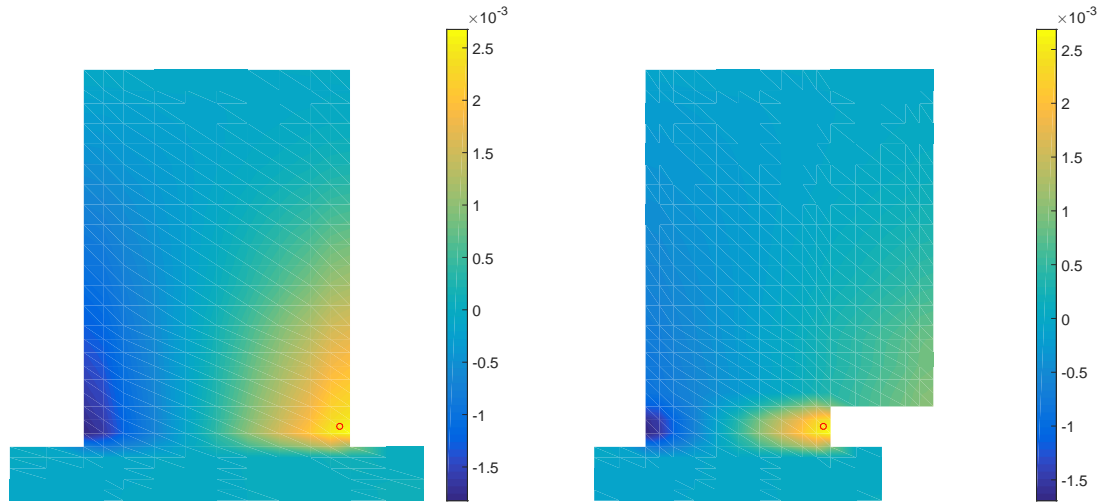
(d) Muro 3 Más Angosto

**Figura D.3.9:** Elemento que fluye primero en modelo (f+c) para casos de mayor esbeltez.



(a) Muro 1 Más Alto

(b) Muro 3 Más Alto



(c) Muro 1 Más Angosto

(d) Muro 3 Más Angosto

**Figura D.3.10:** Elemento que fluye primero en modelo (f) para casos de mayor esbeltez.