



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**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**

**MATIAS GONZALO AHUMADA CASTROMAN**

**PROFESOR GUÍA:**

LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

FABIÁN ROJAS BARRALES

RENÉ LAGOS CONTRERAS

SANTIAGO DE CHILE

AÑO 2014

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ESTRUCTURAL.  
MATIAS AHUMADA CASTROMAN

MODELACIÓN EN ELEMENTOS FINITOS DE MUROS ESBELTOS DE HORMIGÓN  
ARMADO CON DISCONTINUIDADES EN LA BASE. RECOMENDACIONES PARA EL  
DISEÑO.

Los muros esbeltos con discontinuidades en su base, tales como muros bandera o muros con abertura tipo puerta, se dan mucho en la práctica constructiva debido a necesidades arquitectónicas en fachadas, primeros pisos o en subterráneos. Sin embargo y aunque existen datos experimentales que muestran el comportamiento de estos elementos sometidos a cargas cíclicas, estos no incluyen análisis que consideren el tamaño de la abertura como parámetro, ni recomendaciones o guías de diseño en la normativa vigente que consideren los efectos de las discontinuidades en la base. Los efectos del corte en las deformaciones unitarias en la base de un muro esbelto no son considerados en los modelos de diseño actuales, es por esto que se hace necesario estimar la magnitud de estos efectos para ser incorporados a los modelos de flexión tradicionales. En este trabajo se analizan los efectos del corte en las deformaciones de compresión máximas y tracción máximas en la base de un muro rectangular, encontrándose que la relación de aspecto tiene gran importancia en ambos casos, y la deriva de techo toma importancia en la amplificación de compresión. Se calibra un modelo matemático a través de un análisis de elementos finitos no lineal, capaz de estimar la amplificación de la compresión y reducción de la tracción en la base mediante parámetros globales del muro: largo de confinamiento, relación de aspecto, deriva plástica de techo, cuantía longitudinal de borde y el largo de promedio de deformación. También se incluye un modelo simplificado que considera la deriva plástica y la relación de aspecto como variables para determinar la amplificación de compresión máxima, y la relación de aspecto para la reducción de tracción máxima. Los modelos simplificados tienen una desviación estándar de 20% y un promedio de 1.03 en la precisión (valor obtenido sobre valor esperado) en el caso de compresión, y una desviación del 9% y promedio 0.99 en el caso de la tracción.

A través de análisis de flexión no lineales, se propone un modelo que estima el desplazamiento de fluencia de muros con aberturas de borde o muros bandera, que depende de las dimensiones de la abertura y la cuantía longitudinal de borde. El modelo propuesto tiene una desviación estándar de 13% y un promedio de precisión de 1.03. Además, se proponen rangos de validez para 3 modelos que estiman la curvatura última en el rango plástico de este tipo de muros. El modelo propuesto con mayor rango de validez tiene un promedio (valor propuesto sobre valor esperado) de 1 y una desviación estándar de 29%.

Finalmente se estudian 3 casos de muros con aberturas basales en el centro, describiéndose el comportamiento global y local en secciones críticas para dar luces a futura investigación y al diseño en la práctica común.

## DEDICATORIA

A mis padres, por todo el apoyo y confianza durante los 6 años y medio de carrera.

A Bárbara, por ser la motivación necesaria para seguir adelante, y todos los momentos que hacen que todo esto valga la pena.

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que todo, agradecer a mi familia por la confianza que han depositado en mí y que hicieron mi carrera posible desde el principio. Sin ustedes nada de esto habría sido posible. A mis padres específicamente, por la formación y herramientas que me entregaron en la infancia, y que construyeron esencialmente lo que hoy en día soy.

A Bárbara, por la constante preocupación, apoyo incondicional, amor y cariño, que hicieron de mi paso por esta carrera una etapa muy feliz. Gracias por hacer que todo el estrés se transforme en una oportunidad de crecer, por todos los consejos y apoyo en momentos en que más lo necesitaba y por la paciencia necesaria para acompañarme en todo este proceso.

A mis amigos de la universidad, Rafael, Javier, Umberto, Rodrigo, Jaime, gracias por hacer de largas tardes de estudio momentos inolvidables, y de siempre estar dispuestos a ayudar, apoyar, y sobretodo, reír con las cosas simples de la vida. Gracias por compartir sus conocimientos y capacidades.

A los amigos de la carrera (pecera), gracias por la buena disposición, buena onda y amistad, por los almuerzos, analizados y discutidos, que hacen olvidar a ratos las responsabilidades y por hacer amenas las largas jornadas de trabajo.

A mi profesor guía, Leonardo Massone, por la buena disposición y siempre tener las puertas abiertas para despejar dudas y dar a esta memoria un buen camino.

Al profesor Fabián Rojas, por la buena disposición, apoyo y conocimientos.

A todos los profesores de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, especialmente a los del Departamento de Ingeniería Civil.

A todos los que influyeron de alguna manera en estos 6 años y medio de carrera,

¡Gracias!

## TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.10. OBJETIVOS.....	5
1.11. METODOLOGÍA .....	6
1.12. ALCANCES .....	7
<b>CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>9</b>
2.1. Thomsen, J. H., and Wallace, J. W. 1995.....	9
2.2. Taylor, C. P. and Wallace, J. W. 1995. ....	10
2.3. Massone, Leonardo M., Alfaro, Jorge I. (2014?).....	11
<b>CAPÍTULO 3. MODELACIÓN. ....</b>	<b>15</b>
3.1. SAFE Toolbox.....	15
3.2. Leyes de materiales.....	15
3.2.1. Hormigón.....	15
3.2.2. Acero. ....	21
<b>CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN.....</b>	<b>24</b>
4.1. Espécimen RW2, Thomsen & Wallace (1995).....	24
4.1.1. Propiedades del material.....	24
4.1.2. Geometría. ....	25
4.1.3. Cuantías de refuerzo. ....	26
4.1.4. Análisis de respuesta global: Carga lateral versus desplazamiento de techo. ....	27
4.1.5. Análisis de respuesta local: perfil basal de deformaciones. ....	29
4.2. Espécimen RW3-O, Taylor & Wallace. ....	32
4.2.1. Propiedades del material.....	33
4.2.2. Geometría y armaduras.....	37
4.2.3. Análisis de respuesta global: Carga lateral versus desplazamiento de techo. ....	38
4.2.4. Análisis de respuesta local: perfil basal de deformaciones, dirección sur. ....	39
4.2.5. Análisis de respuesta local: perfil basal de deformaciones, dirección norte. ....	43
<b>CAPÍTULO 5. EFECTO DEL CORTE EN LAS DEFORMACIONES BASALES.....</b>	<b>47</b>
5.1. Análisis preliminar.....	47
5.2. Consideraciones generales. ....	53
5.3. Resultados.....	56
5.3.1. Calibración de amplificación de deformaciones de compresión y tracción en la base.....	56

5.3.2.	Modelo calibrado versus experimentación. ....	67
5.3.3.	Aplicabilidad del modelo para muros no confinados. ....	69
<b>CAPÍTULO 6.</b>	<b>MURO BANDERA: ANÁLISIS Y APROXIMACIÓN ANALÍTICA. ....</b>	<b>75</b>
6.1.	Consideraciones generales. ....	75
6.2.	Observaciones preliminares. ....	78
6.2.1.	Fluencia temprana. ....	78
6.2.2.	Concentración de plastificación. ....	79
6.3.	Modelos de flexión pura para muros tipo bandera. ....	85
6.3.1.	Modelo para desplazamiento elástico. ....	85
6.3.2.	Modelo para curvatura última en el rango plástico. ....	91
6.4.	Efecto del corte en la amplificación de deformaciones basales en muros tipo bandera. ....	103
<b>CAPÍTULO 7.</b>	<b>MUROS CON PERFORACIÓN CENTRAL: ESTUDIO DE CASOS...109</b>	
7.1.	Análisis de respuesta global: carga versus deformación en análisis de flexión. ....	111
7.2.	Análisis de respuesta local: deformaciones unitarias en análisis de flexión. ....	113
7.2.1.	Análisis de curvaturas y puntos de fluencia. ....	113
7.2.2.	Análisis de deformaciones unitarias. ....	122
7.2.3.	Análisis de efecto de la armadura longitudinal en la abertura. ....	133
7.2.4.	Resumen de resultados. ....	138
7.2.5.	Validación mediante resultados experimentales. ....	140
7.3.	Efectos de la incorporación de las deformaciones de corte en muros con aberturas centradas. ....	143
7.3.1.	Análisis de muro con abertura central reforzada. ....	143
<b>CAPÍTULO 8.</b>	<b>CONCLUSIÓN. ....</b>	<b>151</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>.....</b>	<b>158</b>
<b>ANEXO.</b>	<b>.....</b>	<b>160</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Propiedades del acero. Valores experimentales. ....	24
Tabla 4-2: Propiedades del hormigón al día del test y deformación estimada en base a Figura 4.1. ....	25
Tabla 4-3: Descomposición estimada de deriva de techo. ....	30
Tabla 5-1: Largo de confinamiento ("CL) según carga axial y deriva de diseño bajo criterios de DS60. ....	54
Tabla 5-2: Modelos FEM para análisis de efectos del corte. ....	55
Tabla 5-3: Coeficientes calibrados con todas las variables para compresión. ....	62
Tabla 5-4: Factores de amplificación y reducción para probeta RW2. ....	69
Tabla 6-1: Modelos FEM de flexión para análisis muros bandera. ....	77
Tabla 6-2: Dispersión de modelos propuestos. ....	90
Tabla 6-3: Rangos recomendados para cada modelo. ....	90
Tabla 6-4: Rangos recomendados para cada modelo. ....	97

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Distribución de curvatura en la altura, muro rectangular, para distintas cuantías y niveles de endurecimiento. Massone & Alfaro (2014?) .....	13
Figura 2.2: Curvatura determinada a partir de la expresión 1.4 (Massone & Alfaro 2014) para un desplazamiento de fluencia determinado de forma simplificada ( $K = 1.4$ y $\alpha = 0.22$ ). Massone & Alfaro (2014?).....	14
Figura 3.1: Envolvente de compresión del hormigón, curva de Thorenfeldt (1987). .....	16
Figura3.2: Envolvente de tracción. Belarbi & Hsu (1995).....	16
Figura3.3: Material uniaxial cíclico desarrollado por Massone (Rojas, 2012).....	17
Figura 3.4: Efecto de tracción transversal. Belarbi & Hsu (1995). .....	19
Figura 3.5: Modelo uniaxial del acero. Menogotto & Pinto (1973). .....	21
Figura 4.1: Dimensiones elementos finitos del muro (primer piso visible). .....	26
Figura 4.2: Cuantías de armadura horizontales y verticales por zona.....	27
Figura 4.3: Carga-deformación del modelo versus respuesta experimental. RW2.....	28
Figura 4.4: Deformación vertical promedio sobre 12" en la base. 1% Deriva.....	31
Figura 4.5: Deformación vertical promedio sobre 12" en la base. 1.5% Deriva.....	31
Figura 4.6: Deformación vertical promedio sobre 12" en la base. 2% Deriva.....	32
Figura 4.7: Hormigón no confinado. ....	33
Figura 4.8: Hormigón confinado, elemento de borde norte. ....	34
Figura 4.9: Hormigón confinado, elemento de borde sur. ....	34
Figura 4.10: Modelo uniaxial del acero para barras #2 y #3 (malla y armadura longitudinal). .....	35
Figura 4.11: Modelo uniaxial para barras de 3/16" (estribos). .....	36
Figura 4.12: Modelo uniaxial versus modelo embebido en hormigón para barras de borde longitudinales. ....	36
Figura 4.13: Malla modelo RW3-O. Armaduras no necesariamente coinciden en colores iguales. ....	37
Figura 4.14: Carga lateral versus deriva. Cuadrante negativo: dirección sur (columna en compresión).....	39
Figura 4.15: Deformaciones en la base para deriva 0.5%. Dirección sur. ....	40
Figura 4.16: Deformaciones en la base para deriva 0.75%. Dirección sur. ....	40
Figura 4.17: Deformaciones en la base para deriva 1%. Dirección sur. ....	41
Figura 4.18: Deformaciones en la base para deriva 1.5%. Dirección sur. ....	41
Figura 4.19: Deformaciones en la base para deriva 2%. Dirección sur. ....	42
Figura 4.20: Deformaciones en la base para deriva 2.5%. Dirección sur. ....	42
Figura 4.21: Deformaciones en la base para 0.5% deriva. Dirección norte.....	43
Figura 4.22: Deformaciones en la base para 0.75% deriva. Dirección norte.....	44
Figura 4.23: Deformaciones en la base para 1% deriva. Dirección norte.....	44
Figura 4.24: Deformaciones en la base para deriva 1.5%. Dirección norte.....	45
Figura 4.25: Deformaciones en la base para deriva 2%. Dirección norte.....	45
Figura 4.26: Deformaciones en la base para deriva 2.5%. Dirección norte.....	46
Figura 5.1: Respuesta carga-desplazamiento. Modelos de flexión y flexión + corte. ....	48
Figura 5.2: Comparación de deformaciones basales para 2% deriva. ....	48
Figura 5.3: Comparación de deformaciones basales para 2.5% deriva. ....	49
Figura 5.4: Discretización modelo para análisis de efectos del corte. ....	51
Figura 5.5: Factor de amplificación de deformación de compresión máxima (MCSAF) al variar la relación de aspecto.....	52

Figura 5.6: Factor de amplificación de deformación de compresión máxima (MCSAF) al variar la carga axial. ....	52
Figura 5.7: Factor de amplificación de deformación de compresión máxima (MCSAF) al variar la cuantía longitudinal de borde.....	53
Figura 5.8: Amplificación de compresión máxima y reducción de tracción máxima para FEM #1 (ver tabla 5.2). a) Amplificación de compresión máxima versus deriva, b) Reducción de tracción máxima versus deriva, c) Deformación de compresión máxima en análisis de flexión y flexión + corte, d) Deformación de tracción máxima en análisis de flexión y flexión + corte.....	57
Figura 5.9: Amplificación de compresión máxima y reducción de tracción máxima para FEM #2 (ver tabla 5.2). a) Amplificación de compresión máxima versus deriva, b) Reducción de tracción máxima versus deriva, c) Deformación de compresión máxima en análisis de flexión y flexión + corte, d) Deformación de tracción máxima en análisis de flexión y flexión + corte.....	58
Figura 5.10: Amplificación de compresión máxima y reducción de tracción máxima para FEM #3 (ver tabla 5.2) . a) Amplificación de compresión máxima versus deriva, b) Reducción de tracción máxima versus deriva, c) Deformación de compresión máxima en análisis de flexión y flexión + corte, d) Deformación de tracción máxima en análisis de flexión y flexión + corte.....	59
Figura 5.11: Dispersión del modelo completo para compresión y tracción. ....	63
Figura 5.12: Dispersión del modelo simplificado para compresión.....	63
Figura 5.13: Dispersión de la precisión del modelo simplificado para tracción. ....	64
Figura 5.14: Comparación deformaciones basales: Análisis versus Modelos Propuestos. FEM #1. a) Compresión máxima, b) Tracción máxima. ....	65
Figura 5.15: Comparación deformaciones basales: Análisis versus Modelos Propuestos. FEM #2. a) Compresión máxima, b) Tracción máxima. ....	66
Figura 5.16: Comparación deformaciones basales: Análisis versus Modelos Propuestos. FEM #3. a) Compresión máxima, b) Tracción máxima. ....	66
Figura 5.17: a) Deformación de compresión máxima en la base, b) Deformación de tracción máxima en la base, c) Error porcentual respecto a datos experimentales. Comparación de modelo calibrado con experimentación (RW2, Thomsen& Wallace, 1995). ....	68
Figura 5.18: a) Máxima deformación de compresión, b) Máxima deformación de tracción, c) Error, d) Diferencia análisis flexión versus flexión + corte. AR = 2.5, GL = 0.02 (250/12500), ALR = 5%, LSR = 2.5%.....	71
Figura 5.19: a) Máxima deformación de compresión, b) Máxima deformación de tracción, c) Error, d) Diferencia análisis flexión versus flexión + corte. AR = 2.5, GL = 0.06 (750/12500), ALR = 5%, LSR = 2.5%.....	72
Figura 5.20:a) Máxima deformación de compresión, b) Máxima deformación de tracción, c) Error, d) Diferencia análisis flexión versus flexión + corte. AR = 7.5, GL = 0.0067 (250/37500), ALR = 5%, LSR = 2.5%.....	73
Figura 5.21: a) Máxima deformación de compresión, b) Máxima deformación de tracción, c) Error, d) Diferencia análisis flexión versus flexión + corte. AR = 7.5, GL = 0.02 (750/37500), ALR = 5%, LSR = 2.5%.....	74
Figura 6.1:a) Distribución de armaduras longitudinales, b) Discretización (mallado) genérica. Muros bandera. ....	77
Figura 6.2: Distribución de plastificación versus deriva para casos con 6 pisos y aberturas de a) 20% y b) 40% del largo del muro. ....	79

Figura 6.3: Distribución de plastificación versus deriva para casos con 10 pisos y aberturas de a) 20% y b) 40% del largo del muro. ....	80
Figura 6.4: Distribución de plastificación versus deriva para casos con 15 pisos y aberturas de a) 20% y b) 40% del largo del muro. ....	80
Figura 6.5: Curvaturas muro bandera versus muro rectangular de 6pisos, aberturas de a) 20% del largo total y b) 40% del largo total. ....	82
Figura 6.6: Curvaturas muro bandera versus muro rectangular de 10 pisos, aberturas de a) 20% del largo total y b) 40% del largo total. ....	82
Figura 6.7: Curvaturas muro bandera versus muro rectangular de 15 pisos, aberturas de a) 20% del largo total y b) 40% del largo total. ....	83
Figura 6.8: Curvaturas de fluencia basal y a nivel de la discontinuidad. $h_x/h_w = 16.67\%$ , a) $l_x/l_w = 10\%$ , b) 20% y c) 40%. ....	84
Figura 6.9: Curvaturas de fluencia basal y a nivel de la discontinuidad. $h_x/h_w = 10\%$ , a) $l_x/l_w = 10\%$ , b) 20% y c) 40%. ....	84
Figura 6.10: Curvaturas de fluencia basal y a nivel de la discontinuidad. $h_x/h_w = 6.67\%$ , a) $l_x/l_w = 10\%$ , b) 20% y c) 40%. ....	84
Figura 6.11: Comparación curvatura de fluencia. Muro rectangular versus perforado. ....	86
Figura 6.12: a) Esquema muro bandera, b) Distribución de curvatura elástica, c) Distribución de desplazamiento elástico en la altura. Modelo "INT". ....	87
Figura 6.13: Desplazamiento elástico obtenido con modelos MA, INT y PH en comparación al análisis. ....	91
Figura 6.14: Valor de Beta estimado. ....	95
Figura 6.15: a) Valores promedio (Valor modelo/Valor análisis) y b) Desviación estándar, del modelo "MA". ....	95
Figura 6.16: a) Valores promedio (Valor modelo/Valor análisis) y b) Desviación estándar, del modelo "PH". ....	96
Figura 6.17: a) Valores promedio (Valor modelo/Valor análisis) y b) Desviación estándar, del modelo "LMA-INT". ....	96
Figura 6.18: Dispersión de modelo "MA" en: a) rango recomendado, b) todos los casos de análisis. ....	98
Figura 6.19: Dispersión de modelo "MA" en: a) rango recomendado, b) todos los casos de análisis, según altura relativa. ....	99
Figura 6.20: Dispersión de modelo "MA" en: a) rango recomendado, b) todos los casos de análisis, según largo relativo. ....	99
Figura 6.21: Dispersión de modelo "PH" en: a) rango recomendado, b) todos los casos de análisis. ....	100
Figura 6.22: Dispersión de modelo "PH" en: a) rango recomendado, b) todos los casos de análisis, según altura relativa. ....	100
Figura 6.23: Dispersión de modelo "PH" en: a) rango recomendado, b) todos los casos de análisis, según largo relativo. ....	101
Figura 6.24: Dispersión de modelo "LMA-INT" en el rango recomendado (todos los casos de análisis). ....	101
Figura 6.25: Dispersión de modelo "LMA-INT" en el rango recomendado (todos los casos de análisis), según altura relativa. ....	102
Figura 6.26: Dispersión de modelo "LMA-INT" en el rango recomendado (todos los casos de análisis), según largo relativo. ....	102
Figura 6.27: Amplificación de compresión y reducción de tracciones para muros perforados versus muros rectangulares (datos del análisis). ....	104

Figura 6.28: Relación de amplificación rectangular/perforado versus deriva total. Caso 7 (ver tabla 6.1). .....	104
Figura 6.29: Relación de amplificación rectangular/perforado versus deriva total. Caso 8 (ver tabla 6.1). .....	105
Figura 6.30: Relación de amplificación rectangular/perforado versus deriva total. Caso 9 (ver tabla 6.1). .....	105
Figura 6.31: Compresión estimada versus deriva considerando efectos del corte en muro con abertura. $h_x/h_w = 6.67\%$ , $l_x/l_w = 40\%$ . $GL = 0.0067$ , $AR = 12.5 (lw^2/hw)$ . ..	106
Figura 6.32: Tracción estimada versus deriva considerando efectos del corte en muro con abertura. $h_x/h_w = 6.67\%$ , $l_x/l_w = 40\%$ . $GL = 0.0067$ , $AR = 12.5 (lw^2/hw)$ . .....	107
Figura 6.33: Compresión estimada versus deriva considerando efectos del corte en muro con abertura. $h_x/h_w = 16.67\%$ , $l_x/l_w = 40\%$ . $GL = 0.016$ , $AR = 5 (lw^2/hw)$ . .....	107
Figura 6.34: Tracción estimada versus deriva considerando efectos del corte en muro con abertura. $h_x/h_w = 16.67\%$ , $l_x/l_w = 40\%$ . $GL = 0.016$ , $AR = 5 (lw^2/hw)$ . .....	108
Figura 7.1: Dimensiones de casos de análisis: a) Caso 1: Muro rectangular, b) Caso 2: Muro con abertura central, c) Caso 3: Muro con abertura descentrada este, d) Caso 4: Muro con abertura descentrada oeste.....	110
Figura 7.2: Dimensiones de casos de análisis: a) Caso 5: Muro con abertura central con armadura de abertura hasta piso 3, b) Caso 6: Muro con abertura central, con armadura de abertura hasta piso 9.....	111
Figura 7.3: Carga versus deformación para muro rectangular (C1), con perforación central (C2), perforación descentrada este (C3), perforación descentrada oeste (C4), perforación central armada hasta piso 3 (C5) y perforación central armada hasta piso 9 (C6) . .....	112
Figura 7.4: Curvatura en la altura de muro rectangular. Caso 1.....	114
Figura 7.5: Curvaturas en la altura de muro con abertura centrada y armadura hasta piso 2. Caso 2. a) Sección oeste, b) Sección este, c) Sección superior.....	114
Figura 7.6: Curvaturas en la altura de muro con abertura descentrada, columna en compresión. Caso 3. a) Sección oeste, b) Sección este, c) Sección superior.....	115
Figura 7.7: Curvaturas en la altura de muro con abertura descentrada, columna en tracción. Caso 4. a) Sección oeste, b) Sección este, c) Sección superior.....	115
Figura 7.8: Curvaturas en la altura de muro con abertura centrada, refuerzo de abertura hasta piso 3. Caso 5. a) Sección oeste, b) Sección este, c) Sección superior.....	116
Figura 7.9: Curvaturas en la altura de muro con abertura centrada, refuerzo de abertura hasta piso 9. Caso 6. a) Sección oeste, b) Sección este, c) Sección superior.....	117
Figura 7.10: Altura de plastificación. ....	118
Figura 7.11: Curvatura basal versus deriva para los 6 casos de análisis indicando puntos de fluencia. ....	119
Figura 7.12: Curvatura cielo piso 1 (bajo losa segundo piso), para los 6 casos de análisis indicando fluencias. ....	120
Figura 7.13: Curvatura piso 2 (sobre losa segundo piso), para los 6 casos de análisis indicando fluencias.....	121
Figura 7.14: Curvatura piso 3 (sobre losa tercer piso), para los 6 casos de análisis indicando fluencias.....	122
Figura 7.15: Perfil de deformaciones unitarias en la base. Muro rectangular. Caso 1. ....	123
Figura 7.16: Perfil de deformaciones unitarias en la base. Muro con abertura central. Caso 2.....	123
Figura 7.17: Perfil de deformaciones unitarias en la base. Muro con abertura descentrada al este. Caso 3.....	124

Figura 7.18: Perfil de deformaciones unitarias en la base. Muro con abertura descentrada al oeste. Caso 4.....	124
Figura 7.19: Perfil de deformaciones unitarias en la base. Muro con abertura centrada, armadura hasta piso 3. Caso 5. ....	125
Figura 7.20: Perfil de deformaciones unitarias en la base. Muro con abertura centrada, armadura hasta piso 9. Caso 6. ....	125
Figura 7.21: Puntos de referencia para deformaciones unitarias y sentido de carga en muros con abertura central.....	126
Figura 7.22: Deformación en la base para el punto 1 (punto más traccionado). ....	127
Figura 7.23: Deformación en la base para el punto 2.....	128
Figura 7.24: Deformación en la base para el punto 3.....	129
Figura 7.25: Deformación en la base para el punto 4 (punto de máxima compresión). ....	130
Figura 7.26: Deformación basal en punto 2 y 3 en muros con abertura.....	131
Figura 7.27: Perfil de deformaciones en segundo piso. a) Caso 1: muro rectangular y b) Caso 6: muro con abertura centrada y refuerzo continuo. ....	132
Figura 7.28: Deformación en piso 2 para el punto 1 (punto de máxima tracción). ....	132
Figura 7.29: Deformación en piso 2 para el punto 4 (punto de máxima compresión). .	133
Figura 7.30: Dimensiones de caso de análisis 7: muro con abertura central sin armadura de borde en la abertura. ....	134
Figura 7.31: Carga desplazamiento Casos 1, 6 y 7.....	135
Figura 7.32: Curvatura basal versus deriva para caso 1, 6 y 7, indicando puntos de fluencia.....	136
Figura 7.33: Perfil de deformaciones unitarias en la base. Muro con abertura centrada, sin refuerzo en abertura. Caso 7. ....	137
Figura 7.34: Deformación en la base para el punto 1 (punto de máxima tracción). ....	137
Figura 7.35: Deformación en la base para el punto 4 (punto de máxima compresión). ....	138
Figura 7.36: Comparación RW3-O y RW2. Carga en dirección sur (columna en compresión). Deriva 1.5%. ....	141
Figura 7.37: Comparación RW3-O y RW2. Carga en dirección norte (columna en tracción). Deriva 1.5%. ....	142
Figura 7.38: Curvatura basal para caso 2, análisis de flexión + corte. ....	143
Figura 7.39: Altura de plastificación, muro con abertura central. Análisis de flexión + corte versus flexión. ....	144
Figura 7.40: Deformación en la base para el punto 1. Análisis de flexión + corte versus flexión.....	145
Figura 7.41: Deformación en la base para el punto 2. Análisis de flexión + corte versus flexión.....	145
Figura 7.42: Deformación en la base para el punto 3. Análisis de flexión + corte versus flexión.....	146
Figura 7.43: Deformación en la base para el punto 4. Análisis de flexión + corte versus flexión.....	146
Figura 7.44: Modelo calibrado de tracción (ecuación 5.5) aplicado a deformación de punto 3 en muro con abertura centrada. ....	147
Figura 7.45: Deformación en punto 1, a) Piso 2 y b) Piso 3. Comparación con modelo calibrado de tracción. ....	148
Figura 7.46: Deformación en punto 4, a) Piso 2 y b) Piso 3. ....	149
Figura 7.47: Perfil de deformaciones unitarias en la base. Muro con abertura centrada. Caso 2, en análisis de flexión + corte.....	150

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Durante el terremoto de febrero de 2010 en la zona central y centro-sur de Chile, una falla común observada en edificios relativamente altos (15-25 pisos) de hormigón armado, se dio en los bordes de muros esbeltos, de forma localizada y frágil, presentando descascaramiento del hormigón de recubrimiento, trituración del hormigón y pandeo de las barras longitudinales, indicando grandes niveles de deformación. Muchos de los muros dañados presentan discontinuidades en la base, ya sea en el primer piso o en el subterráneo, debido a necesidades arquitectónicas o de espacio libre. Los modelos adoptados por los reglamentos de diseño (por ejemplo ACI-318) o por los decretos desarrollados post-terremoto en Chile, que proveen de ciertos requerimientos en el diseño para evitar las fallas observadas durante el terremoto (requerimientos sobre confinamiento y restricciones de máxima carga axial), no consideran el efecto de las deformaciones de corte, ni tampoco cubren los casos en que aberturas basales modifican las deformaciones basales. Lo anterior, sumado a que hoy en día los estudios disponibles sobre discontinuidades en la base de muros esbeltos escasean, motiva a profundizar la investigación en el tema.

Diversos autores, como Taylor y Wallace(1), muestran que discontinuidades en la base de tipo compuerta cambian significativamente las deformaciones verticales a lo largo del muro (perfil de deformaciones), disminuyendo el grado de precisión en la predicción de la respuesta calculada mediante la hipótesis de Bernoulli para niveles de deriva altas, y viéndose afectada la capacidad a flexión del muro desde niveles de deriva de 0,5%. Los autores proponen métodos de diseño suficientemente efectivos para muros con aberturas tipo compuerta en la base de una geometría determinada, pero la estimación de deformaciones basales no es abordada de manera directa y particular para el tipo de muro analizado.

Post terremoto 2010, la normativa chilena para diseño de estructuras de hormigón armado incluye el DS N°60 para modificar las disposiciones del estándar ACI 318-08. Dentro de las modificaciones que implementa el decreto, está la limitación de la carga axial máxima a la que puede estar sometido un muro de hormigón armado, limitándola a 35% de la capacidad del hormigón en compresión. Además se incluye un método para limitar las deformaciones máximas de compresión en un muro sometido a flexo-compresión, el cual supone que la hipótesis de secciones planas es válida. Ésta limitación permite que el muro esté sometido como máximo a una deformación de compresión de 0,003 en el borde más comprimido sin necesidad de confinamiento. Para muros que incurran en deformaciones mayores, se propone el confinamiento como solución, en un largo total confinado que cubra la zona donde las deformaciones sobrepasan 0,003, limitando la compresión máxima a 0,008. Bajo el decreto supremo N°60, estas limitaciones de deformación en la fibra más comprimida quedan determinadas por las expresiones 1.1 y 1.2.

$$\phi_u = \frac{2d_u}{H_w l_w} = \frac{\varepsilon_c}{c} \leq \frac{0.008}{c} \quad 1.1.$$

$$\phi_u = \phi_y + \frac{d_u - d_y}{l_p \left( H_w - \frac{l_p}{2} \right)} = \frac{\varepsilon_c}{c} \leq \frac{0.008}{c} \quad 1.2.$$

Donde

- |  |                                    |
|--|------------------------------------|
| $\varepsilon_c$ : Deformación unitaria límite                | $d_y$ : Desplazamiento de fluencia |
| $c$ : Posición de la línea neutra desde fibra más comprimida | $d_u$ : Desplazamiento de diseño   |
| $H_w$ : Altura del muro                                      | $\phi_y$ : Curvatura de fluencia   |
| $l_w$ : Largo del muro                                       | $l_p$ : Largo de rótula plástica   |
| $\phi_u$ : curvatura última                                  |                                    |

Massone & Alfaro (2014?) desarrollaron las ecuaciones 1.3 y 1.4 para el largo de rótula plástica y curvatura última, que reemplaza a la ecuación 1.2, considerando el nivel de carga axial, relación  $M/V$ , cuantía de refuerzo de borde, longitud de los muros, niveles de deriva y grado de endurecimiento del acero, y recomendando una ecuación conservadora independiente del grado de endurecimiento y la cuantía de refuerzo de borde.

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

$$\phi_u = \phi_y + \frac{\delta_u - \bar{d}y}{\beta l_p \left( h_w - \frac{l_p}{2} \right)} \quad 1.4.$$

Donde:

$\beta$  : Factor que da cuenta de la no linealidad de la curvatura en la zona de rótula plástica. P : Carga axial

$\bar{d}_y$  : desplazamiento elástico, estimado como  $d_y * k$ , con  $k = 1 + 0.9 \left(\frac{l_p}{h_w}\right)^{0.23} \approx 1.4$   $f'_c$  : Resistencia cilíndrica hormigón.

$A_g$  : Área bruta de la sección.

$z$  : Relación entre el momento y corte basal.

$\Delta_p$  : Deriva de techo plástica, definida como  $\Delta_u - \Delta_y$

Las expresiones anteriores fueron determinadas mediante análisis numéricos de modelos de fibras que no incluyen las deformaciones de corte (secciones planas).

En este trabajo de título se propone un método simple, que considere ya sea la expresión 1.3, 1.2, 1.1 u otra basada en asumir válida la hipótesis de secciones planas, que es capaz de reproducir los efectos del corte en la zona de compresión y tracción máxima en la base, a través de un factor de amplificación o reducción de las deformaciones, del tipo:

$$\varepsilon_{cs} = F_c(\vec{X}) * \varepsilon_{cf} \quad 1.5.$$

$$\varepsilon_{ts} = F_t(\vec{X}) * \varepsilon_{tf} \quad 1.6.$$

Dónde  $\varepsilon_{cs}$  corresponde a la máxima deformación axial de compresión considerando los efectos del corte,  $\varepsilon_{cf}$  la deformación máxima axial de compresión en un modelo de secciones planas (como la obtenida por las expresiones 1.1, 1.2 o 1.4 con la incorporación de la línea neutra),  $F_c(\vec{X})$  corresponde al factor de amplificación de la compresión debido al efecto del corte y  $\vec{X}$  son los parámetros relevantes. El subíndice "t" aplica para la zona de máxima tracción, para la cual el factor  $F_t(\vec{X})$  corresponde a una reducción en la deformación. Con la ecuación 1.5, la limitación dada por las ecuaciones 1.1 u 1.2 podría reordenarse, a modo de ejemplificar las consecuencias de este trabajo de título, de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{cs} = F_c(\vec{X}) * \varepsilon_{cf} = F_c(\vec{X}) c \phi_u \leq 0.008 \quad 1.7.$$

Dónde  $c$  es determinado a partir de un análisis seccional y  $\phi_u$  a partir de un modelo de rótula plástica. El método propuesto asumiría que es suficiente considerar solamente la amplificación de la máxima deformación de compresión como guía, y que la línea neutra se mantiene, lo cual es una aproximación en que se deja propuesto evaluar su grado de precisión. A través del factor  $F_c$ , el largo de la zona a confinar quedaría determinado como:

$$c'' = c \left( 1 - \frac{\varepsilon_{cl}}{\varepsilon_{cs}} \right) = c \left( 1 - \frac{\varepsilon_{cl}}{F_c(\vec{X}) c \phi_u} \right) \quad 1.8.$$

Con  $\varepsilon_{cl} = 0.003$ .

Bajo las mismas hipótesis se podría determinar un factor de amplificación de compresión para muros no confinados ( $F'_c(\vec{X})$ ), con el fin de evaluar la necesidad de confinamiento, mediante la expresión 1.9.

$$c \geq \frac{\varepsilon_{cl}}{F'_c(\vec{X}) \phi_u} \quad 1.9.$$

El factor de reducción de deformaciones máximas de tracción ( $F_t(\vec{X})$ ) puede ser útil si se considera que una menor deformación de tracción significa menor desgaste en las armaduras cuando se está bajo cargas cíclicas.

Además de incluir los efectos del corte en las deformaciones basales, se proponen modelos para determinar la curvatura última en muros tipo bandera, que reemplacen a las ecuaciones 1.1 y 1.2 e incluyan el efecto del corte y se dan observaciones del comportamiento de muros con perforaciones centrales para dar luces de lo que puede ocurrir a la hora de diseñar, o para futuras investigaciones.

El presente trabajo de título se enmarca dentro del proyecto *Fondecyt Regular 2013 N°1130219 "Analytical and experimental study of RC walls with discontinuities"*.

## 1.10. OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo general.

Análisis en elementos finitos del comportamiento de muros esbeltos de hormigón armado con aberturas en la base bajo carga “pushover”.

### 1.1.2 Objetivos específicos.

- Cuantificar los efectos del corte en las deformaciones de la zona de concentración del daño para muros sin aberturas y proponer un modelo que dé cuenta de estos efectos en muros rectangulares. Extender modelo para muros bandera.
- Muros con discontinuidad: desarrollo de un modelo matemático que relacione los parámetros dimensionales de la abertura con las deformaciones basales de muros tipo bandera. Análisis descriptivo del comportamiento de muros con aberturas centrales.
- Comparar resultados con la normativa y metodologías usadas actualmente y desarrollar directrices de diseño.

## 1.11. METODOLOGÍA

Se trabaja con software de elementos finitos en Matlab, que incorpora herramientas que permiten modelar la respuesta biaxial de paneles de hormigón armado, desarrollado por Rojas (6). Se utilizan análisis tipo “pushover” para obtener la respuesta carga–deformación y deformaciones unitarias de compresión y tracción en zonas críticas. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Revisión bibliográfica con el estado del arte y análisis experimentales afines para establecer una base de comparación al procedimiento que se utiliza. Se estudian dos casos experimentales: Thomsen & Wallace (1995), Taylor & Wallace (1995) (ver capítulo 2).
2. Estudio de capacidad y características del programa SAFE Toolbox, definición de teorías y parámetros a utilizar en el estudio: leyes de materiales, tipo de elementos finitos y grados de libertad (ver capítulo 3).
3. Validación de la metodología, teorías y parámetros a través de la comparación con resultados experimentales estudiados. Se compara la respuesta carga – deformación y las deformaciones unitarias en la base del muro (ver capítulo 4).
4. Estudio de la influencia del corte en las deformaciones unitarias en la base de muros rectangulares esbeltos. Se estudia la influencia de parámetros como la carga axial, cuantía de refuerzo longitudinal de borde, largo de confinamiento, relación de aspecto y deriva de techo en los efectos causados por las deformaciones de corte en la base. Se propone un modelo calibrado para incorporar estos efectos en modelos de flexión pura (ver capítulo 5).
5. Estudio del comportamiento de muros bandera. Se analiza la influencia de aberturas de borde o reducción de sección en la base de muros esbeltos en el comportamiento del muro. Se compara el perfil de curvaturas en la altura con un muro rectangular de sección igual a la sección basal del muro bandera, estableciendo criterios para modelar las deformaciones basales y se compara la efectividad de varios modelos matemáticos, tanto para el desplazamiento elástico como para deformaciones plásticas (ver capítulo 6).
6. Estudio del comportamiento de muros esbeltos con abertura centrada en la base. Se presentan perfiles de deformación en secciones críticas y una descripción general del comportamiento para establecer bases para futura investigación y diseño (ver capítulo 7).

## **1.12. ALCANCES**

### **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

Se realiza una breve descripción y contextualización del tema. Se describen los objetivos y metodología del trabajo de título.

### **CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.**

Breve revisión de trabajos previos, experimentales y analíticos, de los que se rescata características interesantes para el trabajo de título propuesto.

### **CAPÍTULO 3: MODELACIÓN.**

Se describen las hipótesis que utiliza el software y las leyes de materiales a utilizar.

### **CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN.**

Se presentan y analizan los resultados de los modelos utilizados para validar la metodología del trabajo de título, específicamente para contrastar la capacidad del software y de las leyes constitutivas de los materiales en representar prototipos experimentales.

### **CAPÍTULO 5: EFECTO DEL CORTE EN LAS DEFORMACIONES BASALES.**

Parametrización y desarrollo de una aproximación analítica de las variables que influyen en la amplificación y reducción de deformaciones de compresión y de tracción en la base del muro al contrastar el modelo de flexión y corte con el de flexión.

## **CAPÍTULO 6: MURO BANDERA: ANÁLISIS Y APROXIMACIÓN ANALÍTICA.**

Se analiza la influencia de aberturas de borde o reducción de sección en la base de muros esbeltos en el comportamiento del muro. Se compara la efectividad de varios modelos matemáticos, tanto para el desplazamiento elástico como para deformaciones plásticas y se define un criterio para modelar.

## **CAPÍTULO 7: MUROS CON PERFORACIÓN CENTRAL: ESTUDIO DE CASOS.**

Análisis de casos con perforaciones ubicadas en el centro de la base del muro: descripción general y bases para futura investigación y diseño.

## **CAPÍTULO 8: CONCLUSIÓN.**

Se resume sobre los modelos propuestos para el diseño incorporando los efectos del corte, aberturas basales de borde (muros bandera) y aberturas centrales.

## CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Diversas investigaciones se han desarrollado en los últimos 40 años respecto al comportamiento de muros esbeltos de hormigón armado sometidos a cargas laterales monotónicas y cíclicas cuasi-estáticas, midiéndose propiedades como diagramas de momento-curvatura, perfiles de deformaciones axiales, respuesta carga lateral-desplazamiento de techo, entre otras, los cuales son interesantes para el trabajo de título propuesto como una base experimental con la cual contrastar los resultados obtenidos. A continuación se describe en forma general los objetivos, metodologías y resultados de los trabajos experimentales más interesantes que constituyen los antecedentes experimentales al trabajo de título propuesto y estudios analíticos previos.

### 2.1. Thomsen, J. H., and Wallace, J. W. 1995.

El objetivo principal de los autores en este trabajo analítico y experimental es evaluar la efectividad de un método basado en desplazamientos para el diseño de muros esbeltos de hormigón armado con secciones simétricas y asimétricas (muros “T”, “L” o “C”). Cuatro especímenes fueron diseñados para un nivel de deriva de 1,5%, y construidos a escala 1:4, representando muros de 4 pisos de altura. Ensayados con carga cíclica lateral, aplicada en el nivel de techo. El hormigón para el diseño es de 27,6 MPa (4000 psi), sin embargo el promedio de la resistencia al momento de los ensayos era de 37,7 MPa. Acero GR 60 (414 MPa) para el refuerzo. Los especímenes fueron sometidos a una carga axial aproximada de  $0,1Agf'_c$  (variando desde 0,07 a 0,1 por dificultades de implementación).

Se midieron desplazamientos laterales en cada nivel utilizando potenciómetros. Se utilizaron LVDTs para medir el perfil de deformaciones axiales en la base de cada espécimen, los cuales fueron graficados para el máximo desplazamiento del primer ciclo de cada nivel de deriva (desplazamiento de techo). También se incluyen mediciones de deformaciones en los 3 tipos de refuerzo, en la base y a nivel del primer piso, utilizando sensores de deformación (“strain gages”). Mediciones en el hormigón de los elementos de borde fueron tomadas utilizando sensores (“strain gages”) embebidos.

El trabajo concluye que los 4 especímenes ensayados mostraron un comportamiento de dominancia flexural, como se espera para muros esbeltos. La influencia del corte en los 4 muros fue de poca relevancia. Se concluye que el método de diseño por desplazamientos resulta ser flexible, razonable, y más económico que la aplicación de los códigos UBC-91 y ACI 318-89, constituyendo una buena alternativa para estimar las deformaciones de compresión máximas en muros simétricos y asimétricos, y obtener una estimación de la acción del corte de forma acertada. El

especimen RW2 es utilizado como referencia para la etapa de validación de este trabajo de título. En el anexo se adjuntan figuras que ilustran las dimensiones y armadura de la probeta RW2. Además se incluyen los gráficos de carga versus desplazamiento y perfil de deformaciones basales medidos con LVDTs. Los datos son extraídos del reporte listado en la bibliografía.

## **2.2. Taylor, C. P. and Wallace, J. W. 1995.**

El trabajo de Taylor & Wallace se enfoca en la verificación de la efectividad de métodos de diseño para muros esbeltos de H.A. con aberturas relativamente grandes en la base, del tipo compuertas, dispuestas junto a los elementos de borde. Se estudiaron dos especímenes: RW3-O y BW1-O, de sección rectangular y sección agrandada en los extremos (“barbell shape”) respectivamente, construidos en escala 1:4, donde los materiales utilizados fueron hormigón estructural  $f'_c = 27,6$  MPa (4000 psi) y acero GR 60 (414 MPa). Se ensayaron de forma cíclica con una carga única lateral a nivel de techo y una carga axial constante. La geometría de los especímenes utilizados en la experimentación fue seleccionada en base a los especímenes estudiados por Ali & Wight (2) y Thomsen & Wallace (3) (detallados más adelante) para su directa comparación (RW3-O con RW2 y BW1-O con W1 y W2).

La armadura longitudinal utilizada es la misma usada por Thomsen & Wallace (1995). La armadura transversal (confinamiento) de los elementos de borde fue diseñada utilizando un método basado en desplazamientos, determinando una demanda de curvatura en la base dado una deriva de diseño de 1,5% (y asumiendo un largo de rótula plástica de  $\frac{l_w}{2}$ ). La demanda de curvatura es utilizada para iterar el valor de armadura transversal hasta obtenerse un daño no significativo en los elementos de borde, luego se chequea el espaciamiento necesario para evitar el pandeo de las barras longitudinales. El diagrama momento curvatura fue construido asumiendo una distribución lineal de deformaciones a lo largo del muro, sin embargo la sección analizada considera la abertura del muro y modelos no lineales de materiales. La armadura de corte es diseñada independientemente de la armadura transversal de los elementos de borde, utilizando un modelo puntal-tensor (“strut and tie”) para proveer un adecuado traspaso de cargas de corte, dada la existencia de la discontinuidad. Para asegurar una falla de flexión, se utilizó el corte resultante de la resistencia a flexión en la base (dividiendo por la altura del muro).

Se midieron deformaciones longitudinales en la base del muro y a 889 mm (35 in) y 711,2 mm (28 in) para RW3-O y BW1-O respectivamente. Para esto se utilizaron sensores (“straingages”) en las barras verticales a lo largo del muro en ambos niveles, sensores (“straingages”) embebidos en el hormigón en diversos puntos a lo largo de la base del muro y LVDTs dispuestos en la base en diversos puntos, con un largo de

calibre de 228,6 mm (9 in) para RW3-O y de 203,2 mm (8 in) para BW1-O. La carga lateral fue medida utilizando una celda de carga situada entre el actuador hidráulico de 667 kN (150 kips) y el montaje de traspaso de carga sobre el muro. El desplazamiento lateral fue medido utilizando potenciómetros en cada nivel (base y 4 pisos superiores). El muro fue sometido a una carga axial efectiva aproximada de  $0.1f'_c A_g$  (373,7 kN, 84 kips).

Una conclusión interesante es que para el tamaño de abertura dada, el comportamiento global del muro no se ve muy afectado, mostrando un comportamiento histerético estable y gran ductilidad. Las mediciones del perfil de deformaciones en la base, muestran que se tiene una desviación de un comportamiento lineal mayor al observado por muros sin discontinuidad, e.g. Thomsen & Wallace(3) y Ali & Wight(2), incluso llegando a valores del doble de lo predicho por considerar secciones planas, y también que la deformación en el acero y el hormigón en ciertos puntos no siempre son iguales. Sin embargo, la respuesta en momento-curvatura (respecto a resistencia, rigidez y ductilidad) fue predicha de buena forma y se concluye que considerar secciones planas para el diseño a flexión es una herramienta razonable para al menos el tamaño de abertura considerado.

En el anexo se presentan las dimensiones y armaduras de la probeta RW3-O, además de los gráficos originales de carga-desplazamiento y perfiles de deformación basal obtenidos de los LVDTs. Los gráficos y figuras pertenecen al reporte listado en la bibliografía.

### **2.3. Massone, Leonardo M., Alfaro, Jorge I. (2014?).**

El trabajo de los autores consiste en, mediante un análisis numérico utilizando un modelo de fibras no lineal, determinar una expresión para la longitud de rótula plástica, capacidad de desplazamiento elástico y curvaturas de fluencia y última, que reemplacen a la expresión 1.1 y 1.2 del DS N°60. La capacidad de desplazamiento elástico se estudia para muros "T", muros rectangulares y muros acoplados por losas. Se encontró que la componente elástica es altamente dependiente de la cuantía de refuerzo de borde y que el grado de acoplamiento de muros disminuye la capacidad elástica de estos considerablemente. La expresión para longitud de rótula plástica es calibrada mediante análisis numérico considerando la relación M/V, largo del muro, carga axial y componente plástica del desplazamiento (deriva) para ser utilizada con la nueva expresión de curvatura última, la cual depende de la curvatura de fluencia, desplazamiento de fluencia, desplazamiento de diseño, largo de rótula plástica y altura del muro. También se desarrolla una expresión para el largo de rótula plástica dependiente del desplazamiento total del muro (componente elástica + componente plástica) para su uso con la ecuación 1.1. del DS N° 60.

La propuesta para el desplazamiento elástico de muros rectangulares se detalla a continuación:

$$d_y = \alpha \phi_y h_w^2 \quad 2.1.$$

$$\phi_y = K \frac{\varepsilon_y}{l_w} \quad 2.2.$$

$$\alpha = 0.33 \rho_b^{0.14} \quad 2.3.$$

$$K = 1.25 + 1.69 \frac{P}{A_g f'_c} + 0.65 \rho_b \quad 2.4.$$

Donde:

$\rho_b$  : Cuantía de refuerzo longitudinal  $\varepsilon_y$  : Deformación de fluencia del acero de borde.

El valor de  $K$  se puede tomar de forma conservadora, como 1.4 para cuantías sobre 5% y carga axial sobre  $0.1 f'_c A_g$ . El valor de  $\alpha$  se puede tomar como 0.22, siendo conservador para cuantías de borde sobre 5%. La propuesta para curvatura última post fluencia es la siguiente:

$$\phi_u = \phi_y + \frac{d_u - \widetilde{d}_y}{\beta l_p \left( h_w - \frac{l_p}{2} \right)} \quad 2.5.$$

La expresión 2.5 incluye una modificación del desplazamiento de fluencia  $\widetilde{d}_y$ , que básicamente cubre el desplazamiento elástico luego de la primera fluencia (el desplazamiento elástico del muro aumenta con el nivel de deriva) de la forma siguiente:

$$\widetilde{d}_y = d_y \left[ 1 + 0.9 \left( \frac{l_p}{h_w} \right)^{0.23} \right] \approx 1.4 d_y \quad 2.6.$$

El término que multiplica al  $d_y$  se puede aproximar como 1.4 de forma conservadora para los casos en que se puede tomar  $K = 1.4$  y  $\alpha = 0.22$ . El término  $\beta$  se incluye en la expresión 2.5 para contar por la no linealidad de la curvatura en la zona de plasticidad, ya que se observó que la curvatura tiende a concentrarse hacia la base del muro como muestra la Figura 2.1, dependiendo de la cuantía de borde y el endurecimiento del acero.

$$\beta = 10(b\rho_b)^{0.42} \left(1 - (\varepsilon_{sh} - \varepsilon_y)\right)^{0.22} \quad 2.7.$$

Donde:

$\varepsilon_{sh}$  : Deformación unitaria para la cual el acero endurece.

El largo de rótula plástica se estimó dependiente de la deriva plástica, carga axial, distribución de carga lateral y largo del muro según la expresión 2.8.

$$l_p = (0.2l_w + 0.05z) \left(1 - \frac{1.5P}{A_g f'_c}\right) (6.7\Delta_p^{0.3}) \quad 2.8.$$

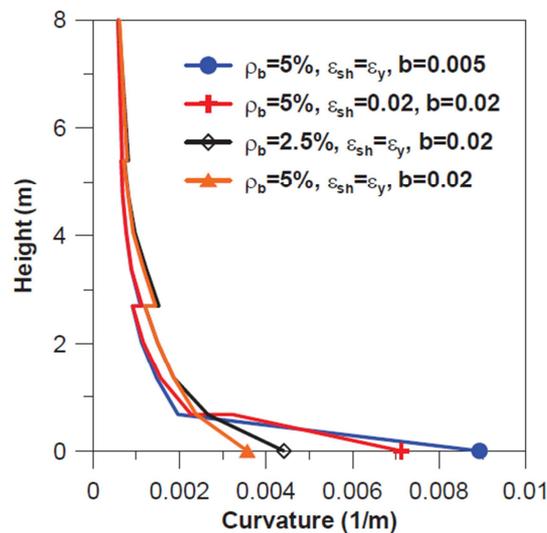


Figura 2.1: Distribución de curvatura en la altura, muro rectangular, para distintas cuantías y niveles de endurecimiento. Massone & Alfaro (2014?)

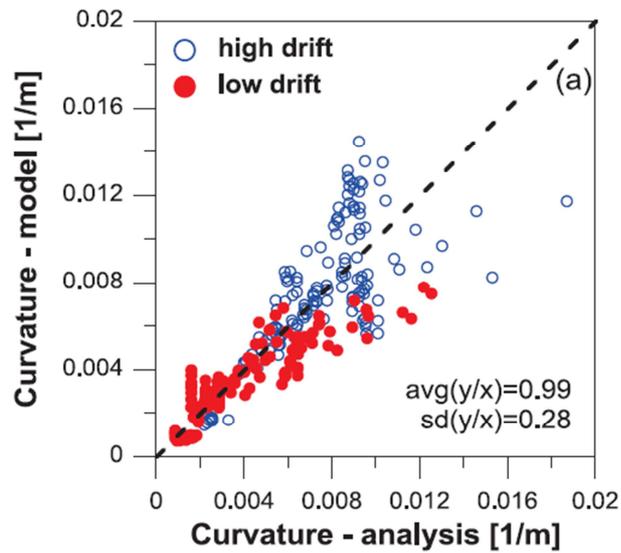


Figura 2.2: Curvatura determinada a partir de la expresión 1.4 (Massone & Alfaro 2014) para un desplazamiento de fluencia determinado de forma simplificada ( $K = 1.4$  y  $\alpha = 0.22$ ). Massone & Alfaro (2014?).

La Figura 2.2 muestra los resultados del modelo propuesto contrastados con el análisis para casos de derivas bajas y altas (bajas menores a 1.5%  $N/20$  con  $N$  igual al número de pisos). Se observa una buena correlación en la mayoría de los casos, con un promedio de 0.99 y dispersión de 0.28. Para los casos con derivas bajas, el largo de rótula plástica se puede aproximar por  $l_p = 0.17l_w + 0.027h_w$ , dando una correlación levemente mejor para ese grupo de casos de análisis.

## **CAPÍTULO 3. MODELACIÓN.**

### **3.1. SAFE Toolbox.**

El conjunto de herramientas SAFE toolbox para Matlab fue desarrollado por Rojas (6). Las herramientas actualmente disponibles permiten modelar elementos tipo cascarón o "Shell" planos, delgados, de cuatro nodos y en capas, y elementos tipo membrana de cuatro nodos en capas, para modelar el comportamiento no lineal de muros de hormigón armado, bajo diversas leyes constitutivas de acero y hormigón. En el presente trabajo de título se utilizan los elementos tipo membrana, por lo que se cubre sólo lo relacionado con la respuesta en el plano de los elementos. Los elementos de cuatro nodos presentan un total de 12 grados de libertad, 3 por nodo: desplazamientos horizontales, verticales y giros en el plano, y una interpolación de campo combinado para las deformaciones en el elemento. Para este trabajo de título se trabaja con una interpolación con 9 puntos de cuadratura por elemento. Los elementos consideran adherencia completa entre capas de hormigón ortotrópico y acero, modelados con leyes constitutivas biaxiales.

El toolbox dispone de algoritmos de solución para problemas no lineales con control de desplazamientos y control de fuerzas. Para el presente trabajo de título se utilizan cargas bajo control de desplazamientos, con carga puntual en el techo.

### **3.2. Leyes de materiales.**

A continuación se describe en detalle los parámetros utilizados en los modelos de materiales usados para el análisis en cada caso.

#### **3.2.1. Hormigón.**

El hormigón es modelado como material plano ortotrópico con agrietamiento en base a las deformaciones promedio, con las equivalentes leyes constitutivas uniaxiales de deformaciones promedio en las direcciones principales. Se asume que las direcciones principales de deformación coinciden con las direcciones principales de tensión. La ley constitutiva uniaxial cíclica escogida para el desarrollo de este trabajo es la desarrollada por Massone (2006). En las figuras 3.1 y 3.2 se muestran las principales características y parámetros de este material y a continuación se enumeran y describen los parámetros utilizados. La envolvente de compresión corresponde a la calibrada por

Carreira & Kuan-Han (1985) basada en la curva de Thorenfeldt (1987), y la envolvente de tracción corresponde a la desarrollada por Belarbi & Hsu (1995).

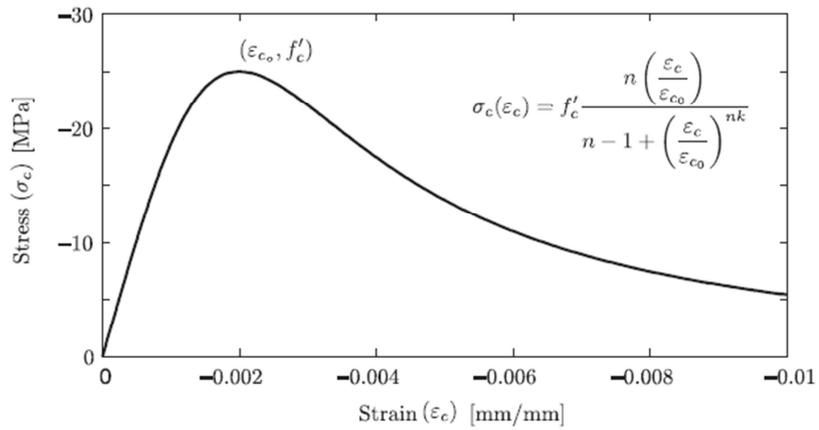


Figura 3.1: Envolvente de compresión del hormigón, curva de Thorenfeldt (1987).

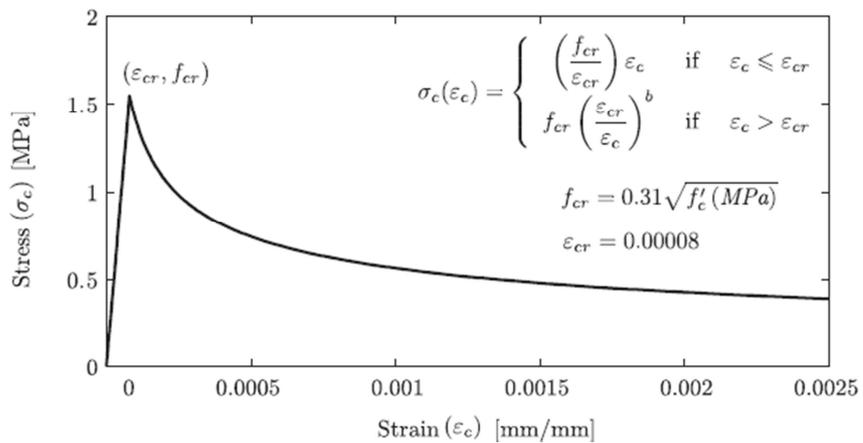


Figura3.2: Envolvente de tracción. Belarbi & Hsu (1995).

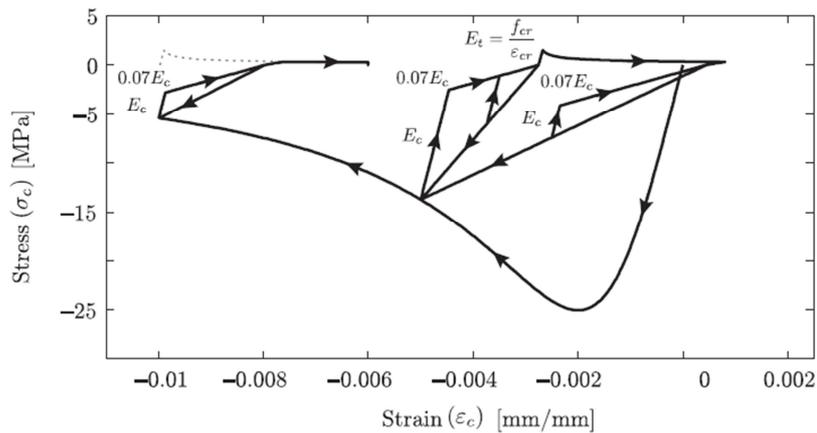


Figura3.3: Material uniaxial cíclico desarrollado por Massone (Rojas, 2012).

Los parámetros escogidos para definir cada una de las curvas mostradas en las figuras anteriores se describen a continuación.

El parámetro “n” de la curva de compresión permite modificar la pendiente de la zona descendente de la curva. Los valores para la validación utilizando el espécimen ensayado por de Thomsen & Wallace (3) (RW2) son tomados en base al trabajo de Rojas, mientras que para la validación con el modelo de Taylor (1995) (RW3-O) y los casos de análisis, el valor para hormigón confinado se calibra para coincidir con la curva del modelo de Saatcioglu & Razvi (1992). El valor para hormigón no confinado, para todos los modelos FEM<sup>1</sup> desarrollados, se toma como:  $n = 3.1$

El parámetro “k” de la curva de compresión influye en la zona descendente de la curva. En base al trabajo de Rojas (6), por simplicidad para todos los modelos, este valor es tomado como  $k = 1$ .

La curva de tracción del hormigón se modela en base a los valores propuestos por Belarbi & Hsu (1995):

$$f_{cr} = 0.31 * \sqrt{f'c} \tag{3.1}$$

<sup>1</sup> FEM: “Finite Element Model”, Modelo de elementos finitos.

$$\varepsilon_{cr} = 0.00008$$

3.2.

El valor del exponente para la zona descendente de la curva de tracción permite variar la inclinación, y son tomados como:

$b = 0.6$  Para hormigón no confinado.

$b = 0.4$  Para hormigón confinado.

Las deformaciones plásticas remanentes en compresión del material son tomadas en cuenta con la expresión siguiente:

$$\varepsilon_p^c = \varepsilon_m^c \left( 1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon_m^c}{\varepsilon_{c0}}\right)\alpha_c} \right) \quad 3.3.$$

Dónde el parámetro  $\alpha_c$  se toma como:

$$\alpha_c = 0.32$$

De manera similar, se requiere de un parámetro para definir las deformaciones plásticas en tensión, dado por:

$$\alpha_t = 0.08$$

Que se incluye en una ecuación idéntica a la ecuación 3.3. Los valores son tomados en base al trabajo de Rojas (2012).

Además de las leyes constitutivas uniaxiales para deformaciones promedio en las direcciones principales, se consideran algunos efectos adicionales listados a continuación:

- **Tracción transversal:** Se incluye el ablandamiento del hormigón debido a tracción en la dirección transversal a la compresión. Esto se toma en cuenta de la expresión desarrollada por Belarbi & Hsu (1995):

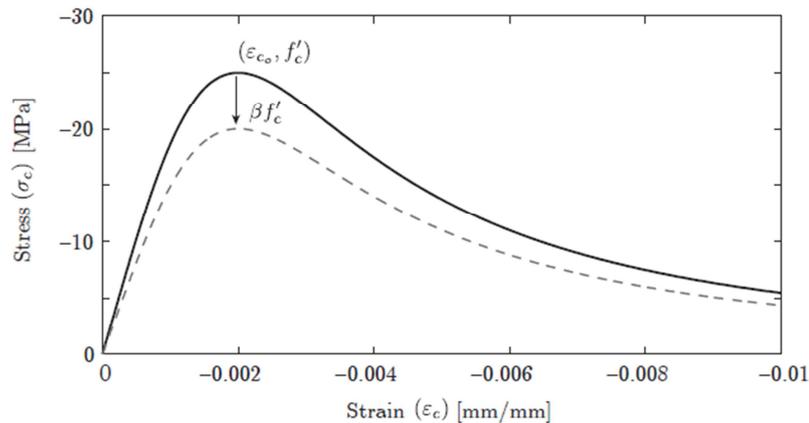


Figura 3.4: Efecto de tracción transversal. Belarbi & Hsu (1995).

$$\beta_s = \frac{k}{\sqrt{1 + k_\theta \epsilon_{tension}}} \quad 3.4.$$

Los parámetros de la ecuación 3.4 se toman como sigue, acorde a Belarbi & Hsu (1995) y Rojas (2012):

$$k = 1$$

$k_\theta = 400$  y  $250$  para carga proporcional y secuencial respectivamente.

- **Confinamiento:** El confinamiento por estribos aumenta la capacidad de deformación y la resistencia a compresión del hormigón. Expresiones simples pueden ser utilizadas para asimilar este efecto. El aumento en resistencia y

en ductilidad es aproximado por las expresiones de Saatcioglu & Razvi (1992):

$$f'_{cc} = f'_c + k_1 f_{le} \quad 3.5.$$

$$k_1 = 6.7(f_{le})^{-0.17} \quad 3.6.$$

$$f_{le} = k_2 f_l \quad 3.7.$$

$$f_l = \frac{\sum A_s f_{yt} \sin \alpha}{b_c s} \quad 3.8.$$

$$k_2 = 0.26 \sqrt{\frac{b_c b_c}{s s_l} \frac{1}{f_l}} \leq 1 \quad 3.9.$$

Donde  $b_c$  corresponde al ancho del elemento confinado,  $s_l$  es el espaciamiento lateral de barras longitudinales apoyadas,  $A_s$  es el área de 1 estribo y  $s$  corresponde al espaciamiento de estribos.

La capacidad de deformación del hormigón se ve aumentada acorde a la ecuación 3.11:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{01}(1 + 5K) \quad 3.10.$$

$$K = \frac{k_1 f_{le}}{f'_c} \quad 3.11.$$

### 3.2.2. Acero.

La ley constitutiva uniaxial del acero escogida para la modelación corresponde a la curva de Menegotto & Pinto (1973), modificada posteriormente por Filippou et al (1983). La Figura 3.5 describe las principales características:

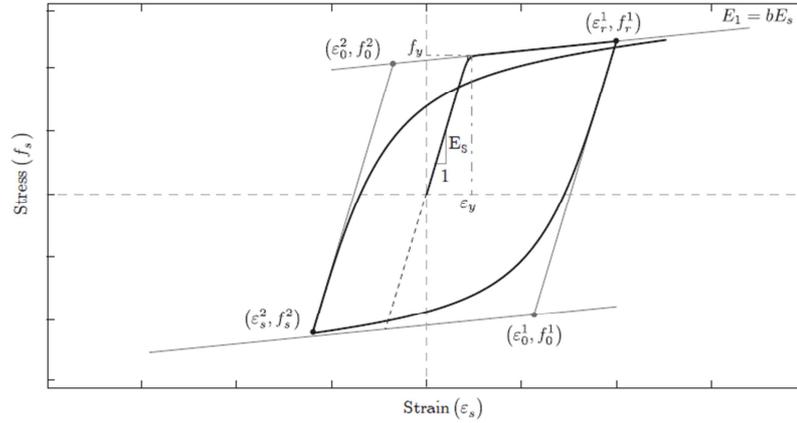


Figura 3.5: Modelo uniaxial del acero. Menogotto & Pinto (1973).

El parámetro “b” corresponde a la razón de endurecimiento de deformación y define la pendiente luego de la transición de fluencia. La curva de transición sigue la siguiente regla:

$$f_s^*(\varepsilon_s^*) = b\varepsilon_s^* + \frac{(1-b)\varepsilon_s^*}{(1 + (\varepsilon_s^*)^R)^{\frac{1}{R}}} \quad 3.12.$$

$$\varepsilon_s^* = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r} \quad 3.13.$$

$$f_s^* = \frac{f_s - f_r}{f_0 - f_r} \quad 3.14.$$

El parámetro R se determina de la siguiente expresión:

$$R = R_0 - \frac{a_1 \xi}{a_2 + \xi} \quad 3.15.$$

Los parámetros utilizados para este trabajo son los siguientes, en base a Rojas (2012):

$$R_0 = 18$$

$$a_1 = 16.2$$

$$a_2 = 0.15$$

El valor de  $\xi$  se calcula con:

$$\xi = \left| \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_0}{\varepsilon_y} \right| \quad 3.16.$$

Dónde  $\varepsilon_m$  es la mínima o máxima deformación del último cambio de dirección de carga (dependiendo si se está decreciendo o creciendo en la deformación actual), y  $\varepsilon_y$  es la deformación de fluencia de la barra libre.

Para utilizar esta ley constitutiva uniaxial en términos de deformaciones promedio para acero embebido en hormigón, se considera el término de fluencia aparente determinado por Belarbi & Hsu (1994) y un valor promedio del parámetro "b" determinados por:

$$f_y^{average} = (0.91 - 2B)f_y \quad 3.17.$$

$$b_{avg} = b_{bare}(0.8 + 10B) \quad 3.18.$$

El valor de "B" corresponde a:

$$B = \frac{1}{\rho} \left( \frac{f_{cr}}{f_y} \right)^{1.5} \quad 3.19.$$

Y  $b_{bare}$  corresponde a la razón de la rigidez post fluencia de la barra libre en tracción. Los efectos de fluencia aparente y cambio en la pendiente post fluencia son, por simplicidad del modelo, utilizados tanto para compresión como para tracción.

La ecuación 3.17 causa, para cuantías altas o tensiones de fluencia altas, que la pendiente post fluencia de la barra disminuya en comparación a la barra original libre, efecto que no se quiere incorporar, por lo que para los casos en que esto suceda se considera la rigidez post fluencia original. La fluencia aparente se considera en todos los casos.

## CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN.

Para validar las capacidades del software de modelación se recurre a modelar especímenes de muros esbeltos de hormigón armado que han sido experimentalmente estudiados en el pasado. Los trabajos de Thomsen & Wallace (3) y de Taylor y Wallace (1) son los seleccionados para contrastar sus resultados con los de la modelación. Refiérase al CAPÍTULO 2 para una descripción breve de los especímenes ensayados.

### 4.1. Espécimen RW2, Thomsen & Wallace (1995).

Este espécimen es uno de los modelos desarrollados por Rojas (6), y para este trabajo se toma como referencia parcialmente este modelo, con algunas modificaciones, específicamente en las propiedades de los materiales, que como se ve más adelante, tiene una influencia sobre los resultados que vale la pena destacar.

#### 4.1.1. Propiedades del material.

El muro ensayado se modela tomando en consideración los valores de resistencia del hormigón y deformación  $\varepsilon_0$  acorde a los datos experimentales de probetas ensayadas. Los valores de deformación a resistencia máxima y resistencia del hormigón y fluencia y deformación de fluencia del acero se listan a continuación.

Tabla 4-1: Propiedades del acero. Valores experimentales.

Propiedad	Barras #3	Barras #2	Barras 3/16"
$f_y$ [MPa]	434	448	434
$E_s$ [MPa]	200000	200000	200000
$\varepsilon_y$	0.0022	0.003	0.003

Tabla 4-2: Propiedades del hormigón al día del test y deformación estimada en base a Figura 4.1.

Propiedad	Piso 1	Piso 2	Piso 3	Piso 4	Pedestal
$f'_{c.test}$ [MPa]	43.7	45.7	40.8	41.3	34.5
$\varepsilon_0$	0.0025*	0.0025*	0.0025*	0.0025*	0.0025*

La razón de rigidez post fluencia del acero libre para todos los diámetros es tomada, por simplicidad, como:

$$b_{bare} = 0,025$$

Acorde a lo recomendado por Belarbi & Hsu (1995). El parámetro “n” de la curva del hormigón confinado, que afecta principalmente a la zona descendente en compresión del material, por simplicidad y acorde al trabajo de Rojas (2012), se toma como:

$$n = 2.1$$

#### 4.1.2. Geometría.

La geometría horizontal de los elementos finitos es seleccionada de manera tal de cubrir los elementos de borde con solo un elemento por simplicidad, y en la vertical se selecciona una altura tal que se logren elementos con una relación ancho-alto cercana a uno.

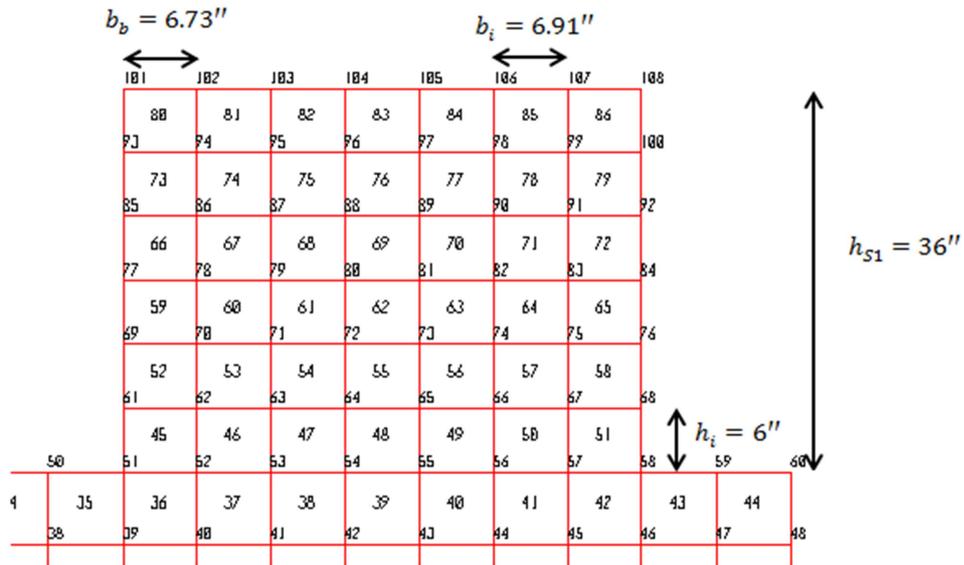


Figura 4.1: Dimensiones elementos finitos del muro (primer piso visible).

La altura de todos los pisos es idéntica. Los elementos de borde difieren en ancho de los elementos centrales tal como muestra la figura 4.3. Lo anterior debido a que es necesario cubrir en lo posible el 100% del elemento de borde con su ancho respectivo.

#### 4.1.3. Cuantías de refuerzo.

El refuerzo es introducido al modelo calculando las cuantías correspondientes a cada zona, rescatadas del espécimen experimental. La armadura horizontal en los elementos de borde incluye el tramo de los estribos en la dirección del plano del muro y la malla horizontal. La armadura vertical incluye los refuerzos longitudinales en los elementos de borde. Para el centro del muro, se considera la malla horizontal y vertical. La figura 4.4 muestra un esquema de las zonas definidas acorde a la cuantía de armadura en cada una de ellas, por cada capa de acero (2 capas en total).

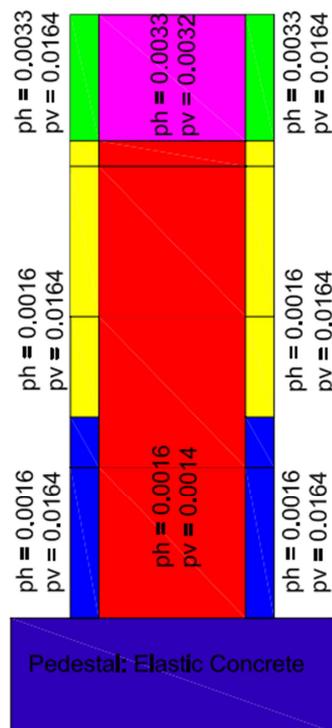


Figura 4.2: Cuantías de armadura horizontales y verticales por zona.

En el pedestal no se considera armadura y se modela como hormigón elástico por simplicidad. Acorde a las observaciones del comportamiento durante la experimentación, esto no debiera afectar significativamente los resultados, excepto por el efecto que tienen la penetración de las deformaciones en el pedestal (“strain penetration”).

#### 4.1.4. Análisis de respuesta global: Carga lateral versus desplazamiento de techo.

La respuesta del modelo bajo la solicitación de desplazamiento de techo con carga puntual se muestra en la Figura 4.3. Las unidades corresponden a las utilizadas por los autores en el reporte (Thomsen & Wallace 1995), debido a que los datos del ensayo son escaneados directamente de la figura del reporte, sin ser posible la conversión precisa de unidades. Se observa que la rigidez inicial del modelo es significativamente mayor que la de los datos experimentales. Posterior a la fluencia, las curvas se aproximan gradualmente hasta terminar con resistencias muy similares. En general se ve que la resistencia del muro en el segundo ciclo de cada nivel de desplazamiento de techo es sobreestimada por el modelo. Esto se atribuye principalmente a que no se considera el efecto del daño o degradación por carga cíclica en la resistencia del hormigón para este caso, lo cual no permite una degradación

notoria entre ciclos de igual desplazamiento. Se observa que la carga a la que fluye el modelo es muy similar a la del ensayo, pero es claro que la rigidez inicial del modelo es bastante mayor. Esto podría deberse a diversas razones: lo primero es considerar en el modelo que el hormigón comienza a decaer en resistencia al nivel de  $\varepsilon_0$  determinado de las probetas ensayadas, ya que, en realidad, a nivel local, el hormigón se comienza a degradar a una deformación mayor (en el centro de la probeta estándar, la deformación comienza a provocar la degradación, pero se mide la deformación promedio en la altura de la probeta, la cual es menor), por lo que se haría necesario aumentar en cierto nivel la deformación  $\varepsilon_0$  para la cual el hormigón pierde su resistencia en el modelo, lo que disminuiría la rigidez (este efecto fue también observado por Rojas, 2012). Más importante aún, la rigidez presentada por el modelo es influenciada por el hecho de no considerar hormigón de recubrimiento en los elementos de borde, si no que considera que el hormigón está confinado en todo el ancho del muro (por simplicidad de la modelación), y hasta el borde exterior. Y por último, la componente de desplazamiento lateral provocada por la penetración de deformaciones (“strain penetration”) que ocurre en la probeta es leída por el sensor de desplazamiento lateral, por lo que el desplazamiento del muro en realidad es menor, consecuentemente esto disminuiría la rigidez observada en la probeta. Se hace una estimación simplificada del desplazamiento lateral provocado por la penetración de deformaciones, el cual se detalla en la tabla 4.3. Se concluye que a nivel global la representación del modelo para este caso es suficientemente acertada.

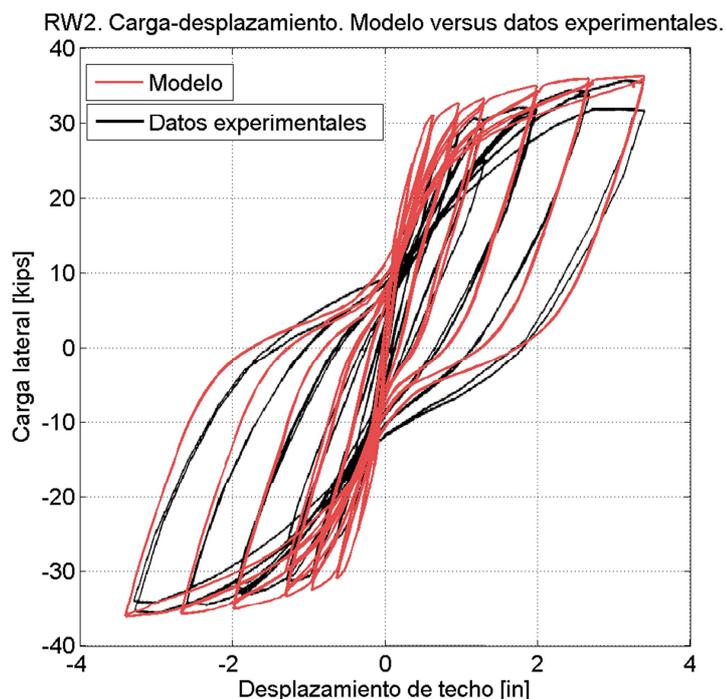


Figura 4.3: Carga-deformación del modelo versus respuesta experimental. RW2.

#### **4.1.5. Análisis de respuesta local: perfil basal de deformaciones.**

Adicionalmente se extraen los datos de deformaciones unitarias en la base del muro del modelo, y se comparan con los resultados de la experimentación. Se muestra en las Figura 4.4 a Figura 4.6 una comparación de las deformaciones para niveles de desplazamiento de techo altos. Se mantienen las unidades utilizadas por los autores para mantener consistencia. En general el modelo logra representar las características observadas en la experimentación, con algunas diferencias que si bien en algunos casos no son menores, se considera que son en parte dependientes de las diferencias inherentes entre la modelación y la realidad (deformaciones promedio), y no constituirán mayor fuente de error al comparar los casos de estudio con el caso base (todos modelados bajo las mismas hipótesis). Otra constituyente de las diferencias observadas, es que la altura de medición (largo de calibre de LVDTs) es de 9", mientras que las deformaciones mostradas corresponden a promediar 1 nivel de elementos finitos, es decir, 6" equivalentes, es por esto que la zona de tracción debiera acercarse aún más a los datos medidos experimentalmente. Además es importante mencionar que en la zona de tracción, los sensores pueden haber incurrido en errores de medición ya que se observa una discontinuidad notoria en la curva. Los resultados para este modelo se consideran satisfactorios, a pesar de utilizar las simplificaciones ya mencionadas. Para la validación con el espécimen RW3-O de Taylor & Wallace, algunas de estas simplificaciones son afinadas para una mejor representación.

Notar que los niveles de deriva mostradas en la leyenda corresponden a derivas nominales, ya que en realidad se ha corregido mediante un método aproximado el efecto de la penetración de deformaciones. El giro del pedestal del modelo fue observado y es despreciable. Para descontar el desplazamiento de techo causado por la penetración de deformaciones, se toman los valores estimados por Thomsen & Wallace (1995) al 0.4% y 3.5% de deriva total, que corresponden a 4.4% y 8.5% del desplazamiento de techo. Para los valores intermedios se interpola linealmente. La tabla 4.3 muestra la descomposición de la deriva nominal en las contribuciones del pedestal, penetración de deformación y deriva efectiva del muro.

**Tabla 4-3: Descomposición estimada de deriva de techo.**

Deriva nominal [%]	Deriva por giro de pedestal [%]	Contribución estimada por $\delta_{sp}^2$ [%]	Deriva efectiva [%]
0.25%	0.00%	0.010%	0.24%
0.50%	0.06%	0.020%	0.42%
0.75%	0.08%	0.033%	0.64%
1.00%	0.10%	0.047%	0.86%
1.50%	0.12%	0.081%	1.30%
2.00%	0.14%	0.121%	1.74%

Utilizando los valores de la tabla 4.3 y de forma aproximada, se estima el efecto que tiene la penetración de deformaciones sobre la lectura del sensor de deformaciones unitarias de tracción, considerando secciones planas. El giro en la base debido a la penetración de deformaciones se puede estimar como:

$$\theta_{sp} = \frac{\delta_{sp}}{h_w}$$

Para luego estimar la curvatura como  $\gamma_{sp} = \frac{\theta_{sp}}{GL}$ , donde GL corresponde al largo de calibre del sensor (“gauge length”). Con esto se puede calibrar la lectura de forma aproximada para obtener la deformación del muro en la base:  $\varepsilon_w = \varepsilon_{GL} - \varepsilon_{sp}$ , donde  $\varepsilon_{sp}$  se calcula como  $\gamma_{sp} * l_i$ , donde  $l_i$  es la distancia desde el eje neutro hasta el punto de medición. Esta estimación de la lectura del sensor es corregida en las figuras a continuación.

---

<sup>2</sup> La contribución de strain penetration se aplica al deriva efectivo luego de descontar la contribución del giro del pedestal.

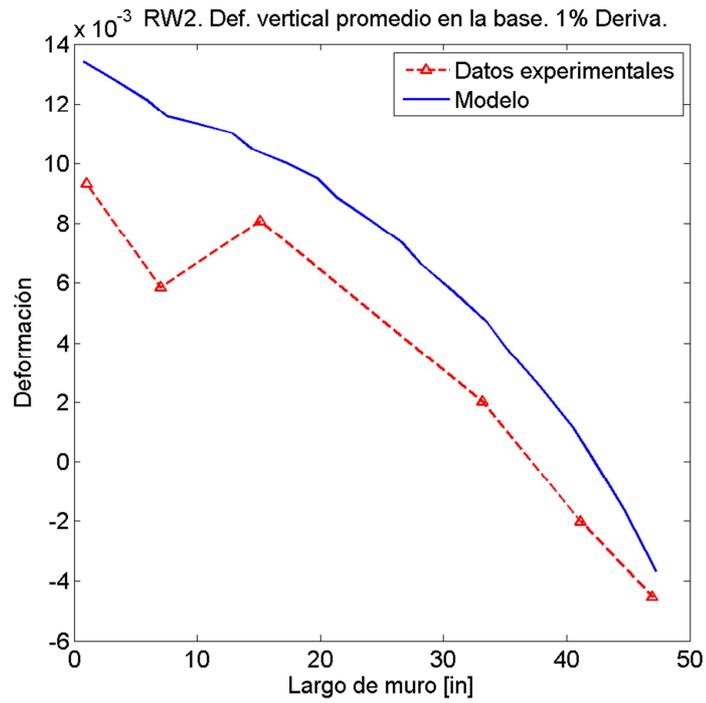


Figura 4.4: Deformación vertical promedio sobre 12" en la base. 1% Deriva.

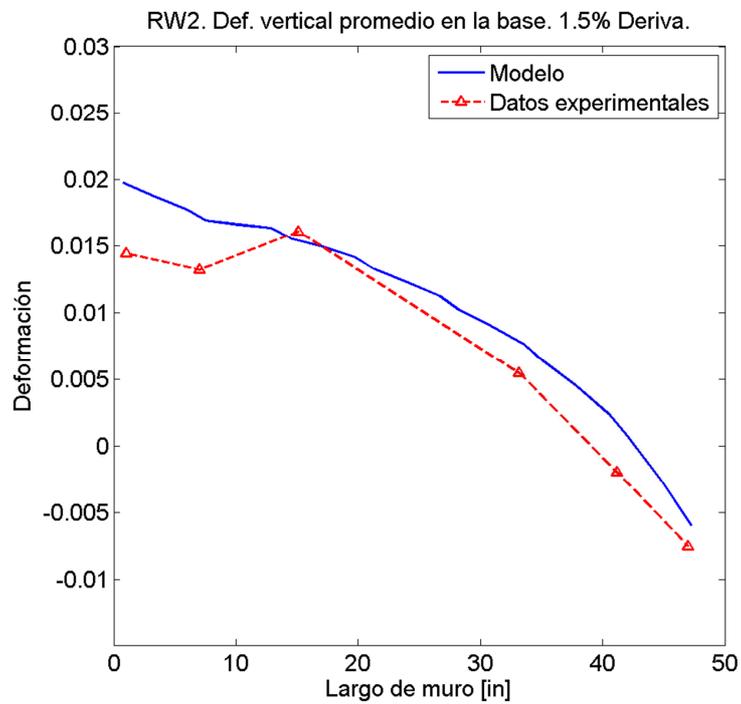


Figura 4.5: Deformación vertical promedio sobre 12" en la base. 1.5% Deriva.

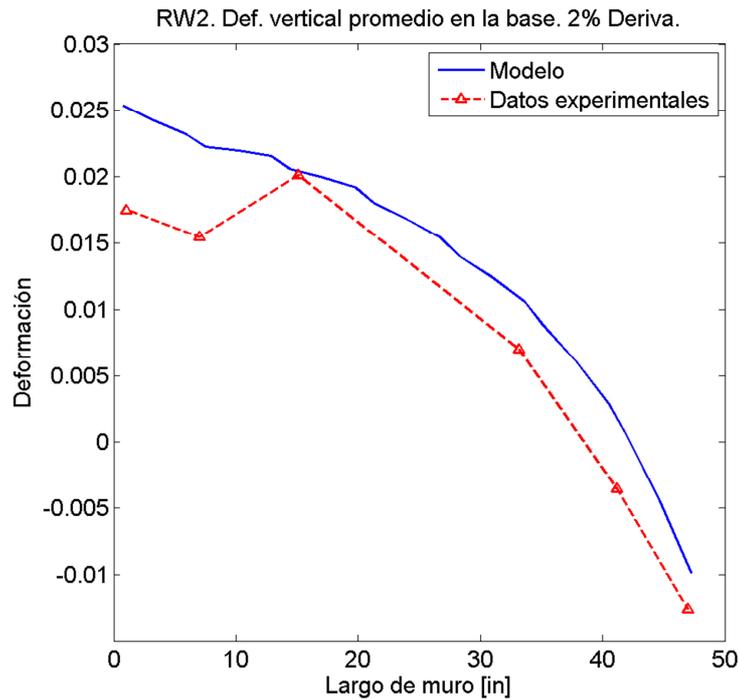


Figura 4.6: Deformación vertical promedio sobre 12" en la base. 2% Deriva.

Se observa en la zona comprimida que las diferencias entre el modelo y los datos experimentales se acentúan a medida que aumenta el nivel de deriva. La diferencia máxima observada en la zona más comprimida es de 50% para el caso con 2% de deriva. Para los puntos de menor deriva, las diferencias se limitan a 20% (caso 1.5% deriva). Estos valores podrían verse reducidos por el efecto de la penetración de las deformaciones en la zona de compresión, sin embargo el aporte se estima como poco significativo. Los resultados obtenidos se consideran satisfactorios, ya que las diferencias para niveles de deriva de 1 y 1,5% son aceptables dadas las simplificaciones realizadas, y para el caso con 2% de deriva, las deformaciones del hormigón sobrepasan el 1% en compresión en el experimento, lo que puede afectar la precisión de las mediciones si se toma en cuenta que el hormigón está en fase de daño significativo en la zona de recubrimiento. Al menos el modelo y las mediciones indican que a este nivel de deriva el hormigón en compresión máxima ya se encuentra en etapa de daño por aplastamiento.

#### 4.2. Espécimen RW3-O, Taylor & Wallace.

Para este modelo, se realizan algunas modificaciones que apuntan a aumentar la precisión de la modelación.

#### 4.2.1. Propiedades del material.

Para el hormigón no confinado, se utilizan los mismos parámetros para definir la curva de compresión y tracción que en el caso anterior, modificando los valores de  $f'_c$  y  $\epsilon_0$  acorde a los datos de este espécimen. Para el hormigón confinado, se calibran los valores de "n" y "k" para obtener una curva similar a la obtenida por el modelo de Saatcioglu & Razvi (1992), mediante ajuste de mínimos cuadrados en la zona descendente. Las figuras a continuación muestran las curvas de los modelos utilizados para el hormigón no confinado, y el hormigón de cada elemento de borde del espécimen.

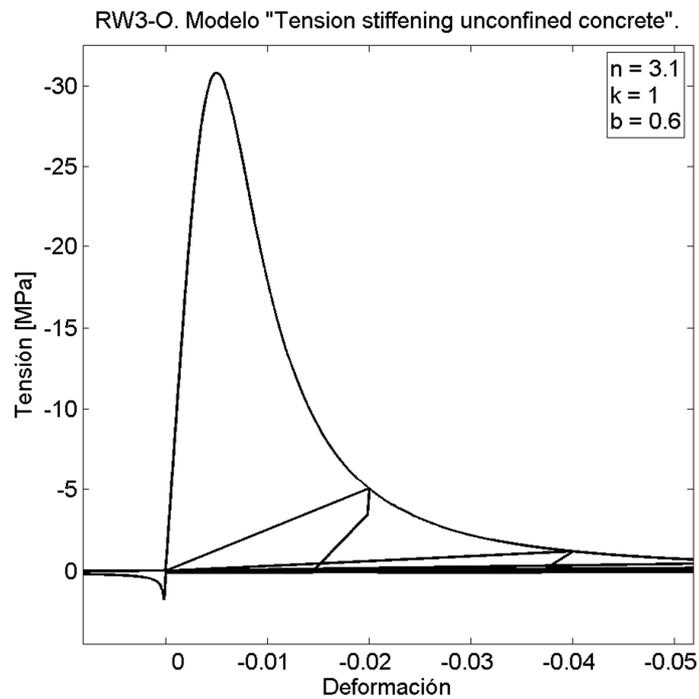


Figura 4.7: Hormigón no confinado.

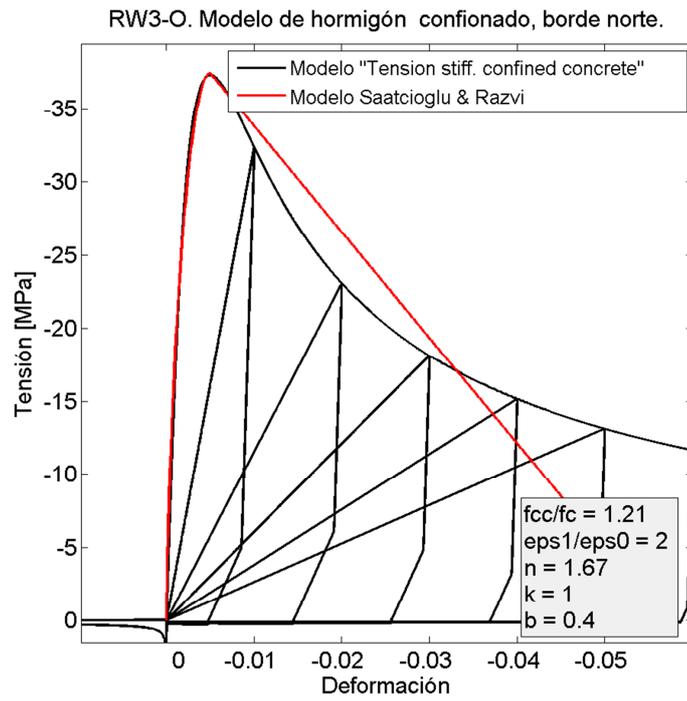


Figura 4.8: Hormigón confinado, elemento de borde norte.

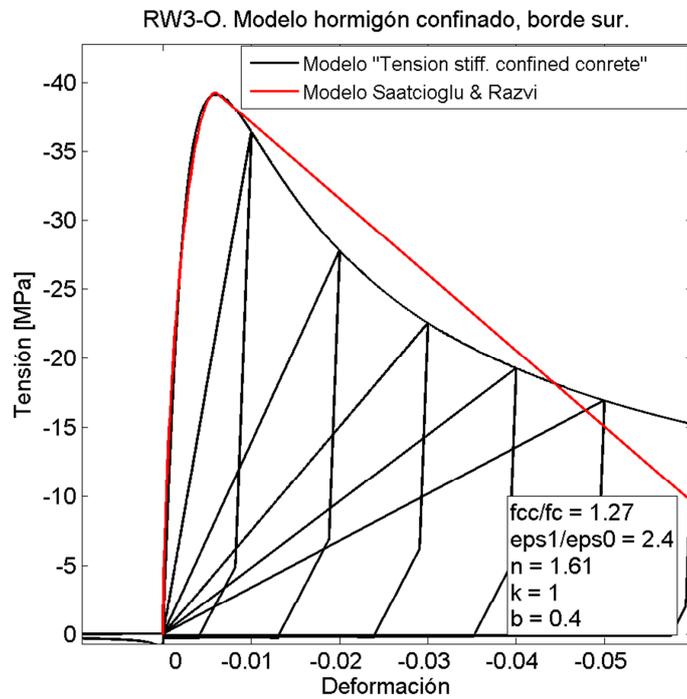


Figura 4.9: Hormigón confinado, elemento de borde sur.

Para el acero, se utilizan las curvas de ensayos de las barras libres en tracción para calibrar las pendientes post fluencia del modelo del material, la cual es modificada posteriormente acorde a la ecuación 3.17 para considerarse el eventual efecto de rigidización. A continuación se muestran las curvas respectivas de calibración (modelo uniaxial versus ensayo), y la curva de las barras de los elementos de borde versus el modelo uniaxial. En la leyenda se indica el valor de la pendiente post-fluencia utilizada para cada tipo de refuerzo ("b"). Las unidades corresponden a las utilizadas por los autores en el reporte (Taylor & Wallace 1995) debido a que los datos experimentales son escaneados directamente de las figuras del reporte, sin ser posible la conversión de unidades de manera precisa.

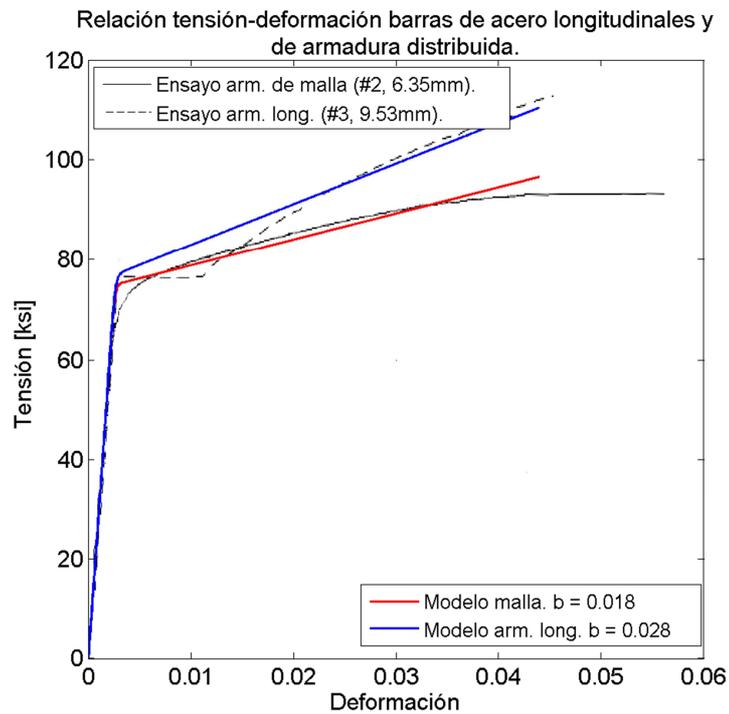


Figura 4.10: Modelo uniaxial del acero para barras #2 y #3 (malla y armadura longitudinal).

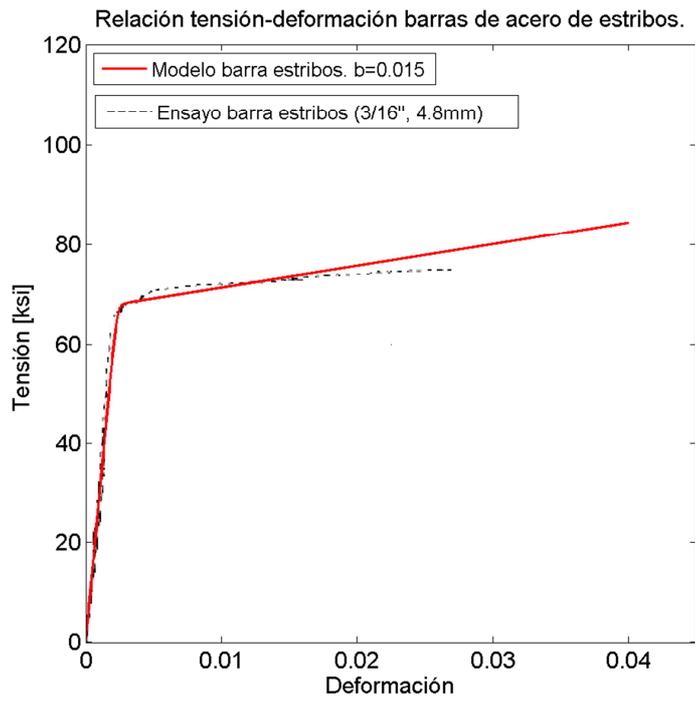


Figura 4.11: Modelo uniaxial para barras de 3/16" (estribos).

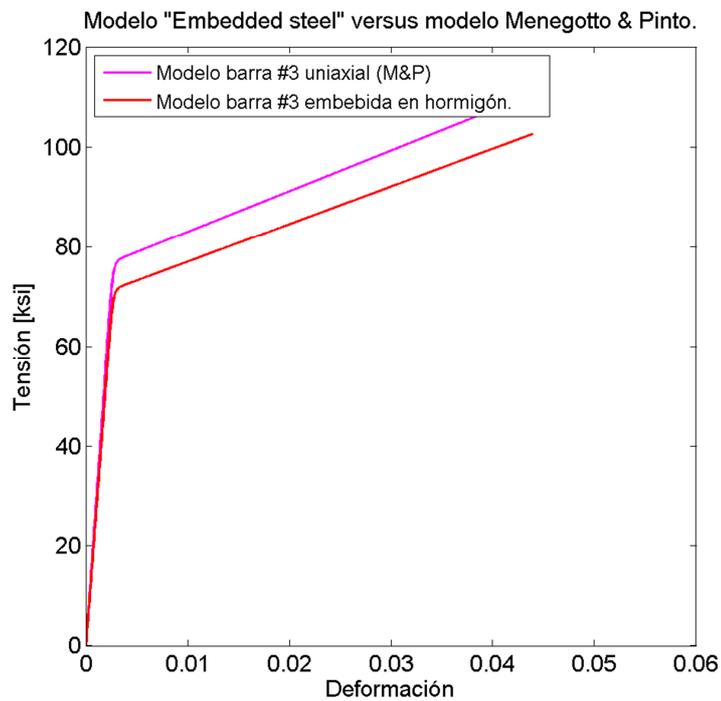


Figura 4.12: Modelo uniaxial versus modelo embebido en hormigón para barras de borde longitudinales.

Como se menciona en la sección 3.2.2, se considera para todas las barras el efecto de fluencia aparente y la eventual rigidización post fluencia.

#### 4.2.2. Geometría y armaduras.

El modelo sigue las mismas reglas geométricas que en el caso anterior, pero esta vez la altura de los elementos se elige de tal manera de coincidir con la altura de los sensores (9"). La Figura 4.13 muestra esquemáticamente la malla y las zonas con distintas armaduras modeladas (colores son sólo para diferenciar entre una zona y otra, ver detalle en Figura A - 8: Detalle refuerzo RW3-O. (Taylor & Wallace 1995)). El cálculo de armaduras se hace en base a la disposición real del espécimen ensayado. El pedestal se modela como hormigón elástico. El largo del muro corresponde al largo del espécimen ensayado sin contar con el recubrimiento de bordes. El resto de las dimensiones son idénticas al espécimen experimental. La reducción en el largo total del muro es de un 6%.

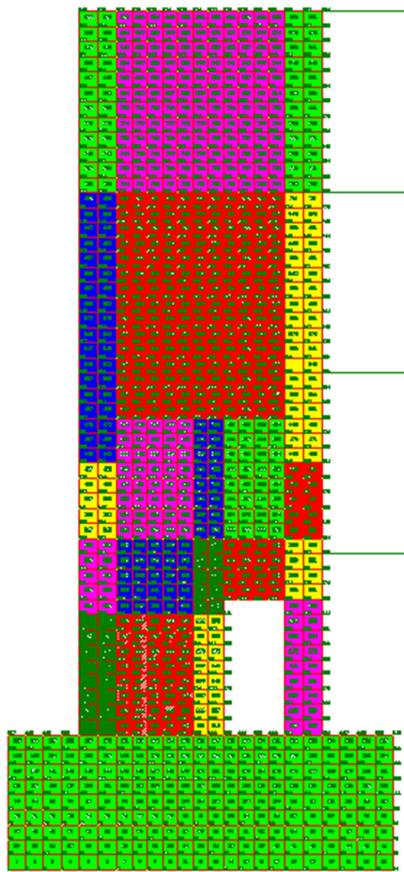


Figura 4.13: Malla modelo RW3-O. Armaduras no necesariamente coinciden en colores iguales.

### 4.2.3. Análisis de respuesta global: Carga lateral versus desplazamiento de techo.

La respuesta global se asemeja bastante a la del espécimen original (Figura 4.14: Carga lateral versus deriva.). Se observa que el modelo mejora las diferencias en rigidez respecto al caso anterior, pero se tiene una menor resistencia en la dirección norte, lo cual se atribuye, en parte, a la diferencia en el largo del muro (no se modeló el recubrimiento). Lo anterior cubriría aproximadamente un 50% de la diferencia observada (considerando que el brazo de palanca del momento basal disminuye en la misma proporción en que lo hace el largo del muro al descontar el recubrimiento del borde comprimido), sin embargo la diferencia total en resistencia es pequeña (6%).

Se observa que el modelo se comporta de forma casi simétrica, con una leve mayor resistencia en la dirección sur (3,7%), mientras que los datos experimentales muestran que cuando la columna está en compresión, la resistencia es menor. Lo anterior se podría explicar en parte por el hecho que el confinamiento modelado en la columna es levemente mayor al confinamiento del borde norte (hormigón 5% más resistente y 20% más dúctil para la máxima resistencia), lo cual en realidad no ocurre debido a que el borde norte tiene un confinamiento extra por estar adherido al resto del muro, de hecho los autores reportan daño en el hormigón de la columna al 075% de deriva nominal (desplazamiento de 0.72 in), para lo cual el hormigón modelado se encuentra en 0.004 de deformación unitaria, lejos del daño (ver Figura 4.16: Deformaciones en la base para deriva 0.75%. Dirección sur.). Los resultados globales no logran representar fielmente lo que se observa experimentalmente en la dirección sur, sin embargo, las diferencias son pequeñas: la diferencia máxima de resistencia es de un 14%.

En comparación al modelo del espécimen RW2, el modelo del espécimen RW3-O alcanza resistencias muy similares, con un 4% menor resistencia en la dirección norte y un 2% mayor resistencia en la dirección sur, mientras que los datos experimentales presentan una diferencia de 2% de aumento en dirección norte y una disminución de 15% en la dirección sur. En resumen, la diferencia notoria es en la dirección sur (columna en compresión), la que se explica principalmente por haber sobreestimado la capacidad resistente del hormigón y su ductilidad en la columna.

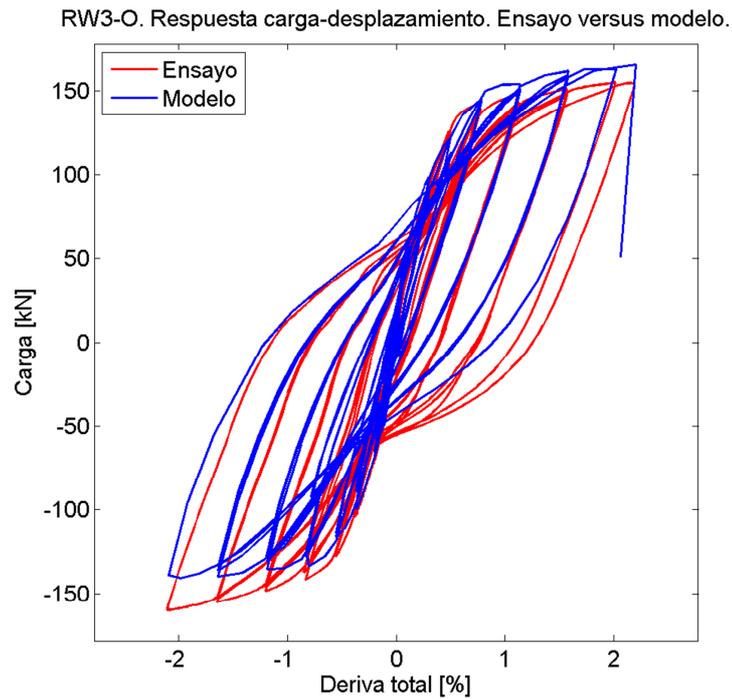


Figura 4.14: Carga lateral versus deriva. Cuadrante negativo: dirección sur (columna en compresión).

#### 4.2.4. Análisis de respuesta local: perfil basal de deformaciones, dirección sur.

El perfil de deformaciones para la dirección de carga sur (columna en compresión) se muestra en las figuras a continuación. Se comparan los resultados del modelo FEM con los resultados experimentales. Los datos experimentales son escaneados de las figuras del reporte que se lista en la bibliografía (Taylor & Wallace 1995).

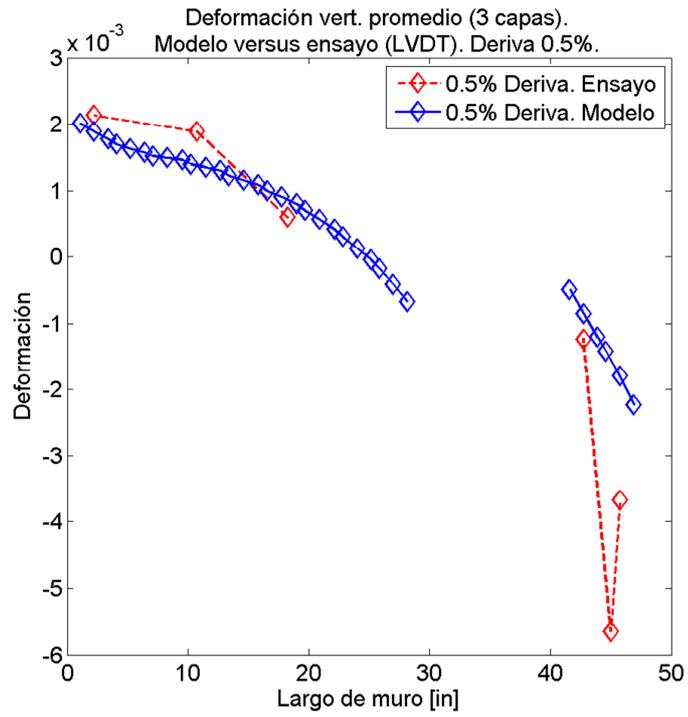


Figura 4.15: Deformaciones en la base para deriva 0.5%. Dirección sur.

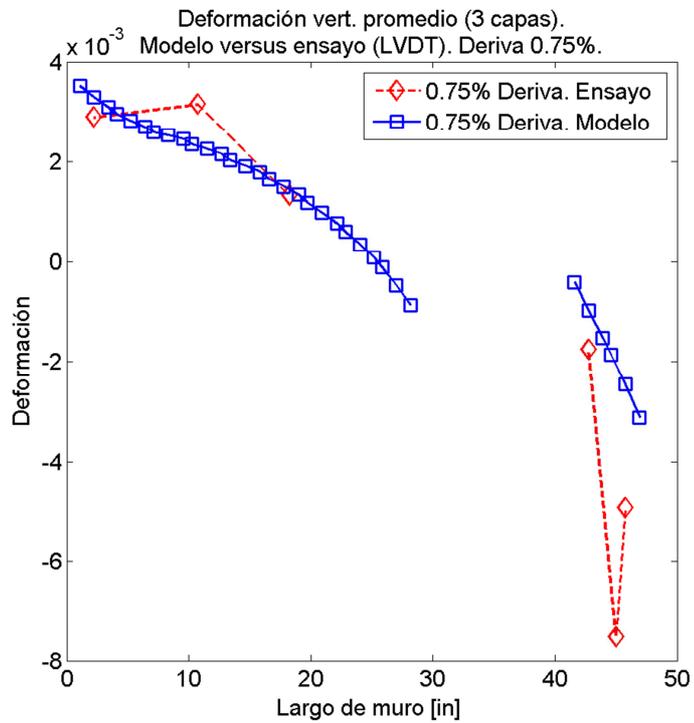


Figura 4.16: Deformaciones en la base para deriva 0.75%. Dirección sur.

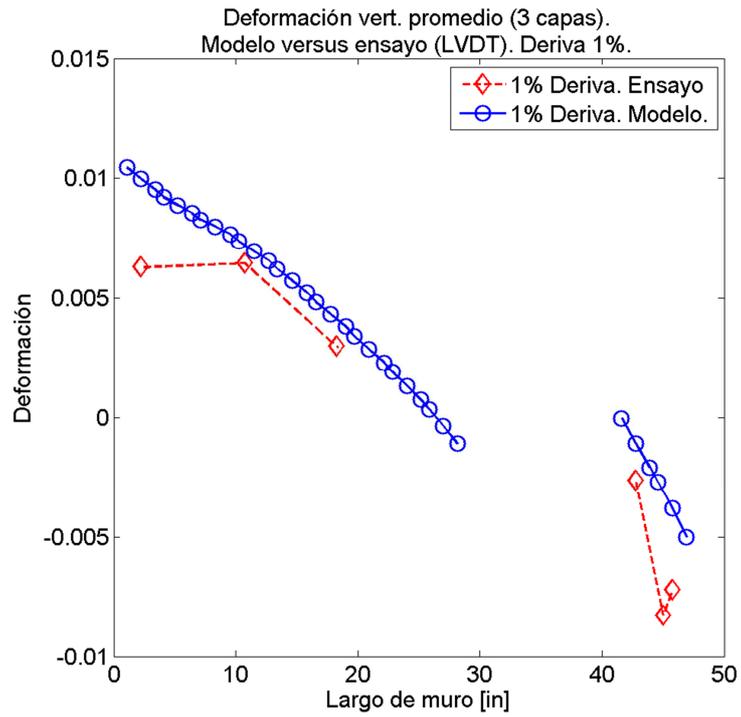


Figura 4.17: Deformaciones en la base para deriva 1%. Dirección sur.

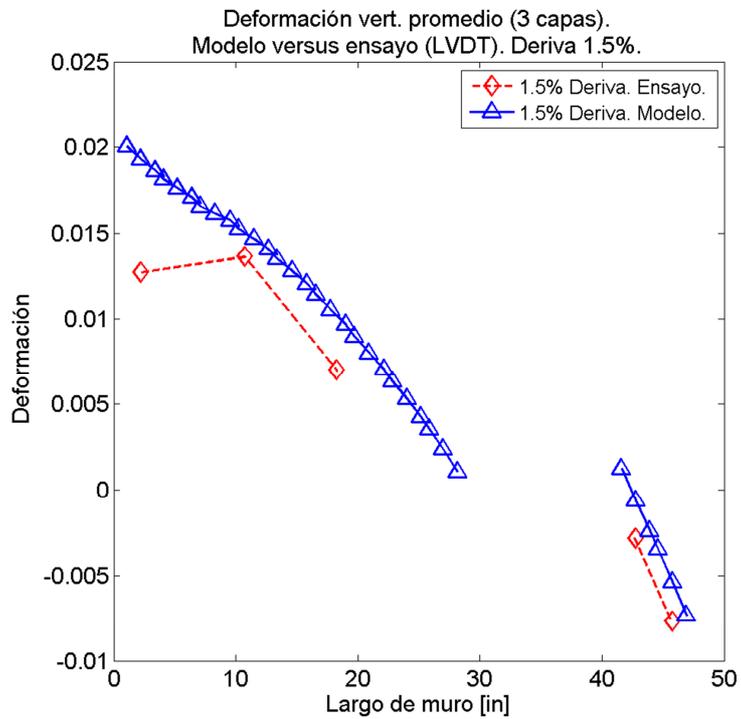


Figura 4.18: Deformaciones en la base para deriva 1.5%. Dirección sur.

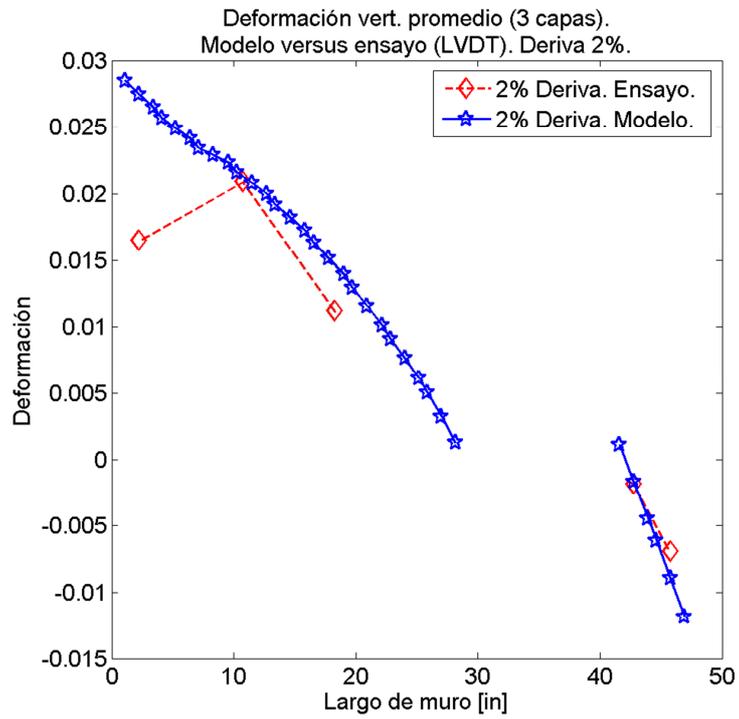


Figura 4.19: Deformaciones en la base para deriva 2%. Dirección sur.

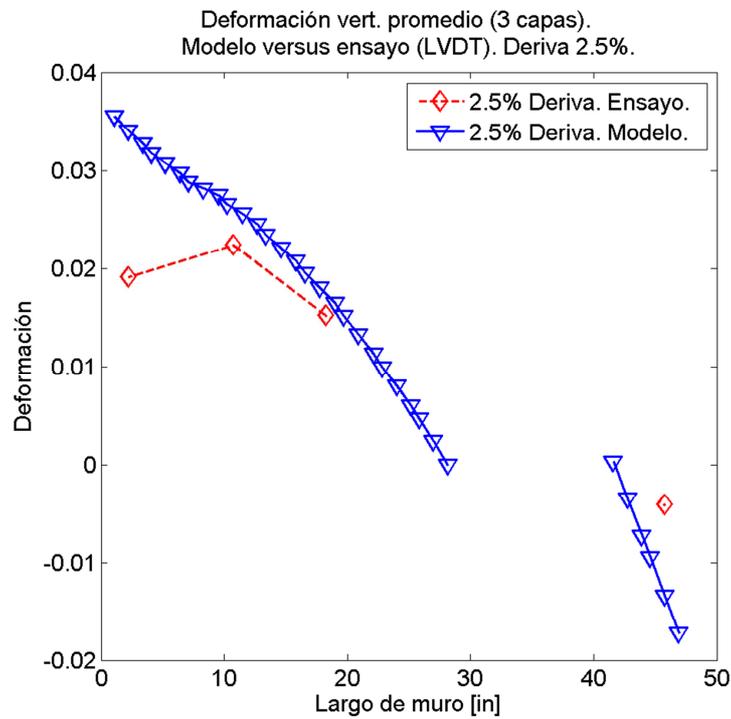


Figura 4.20: Deformaciones en la base para deriva 2.5%. Dirección sur.

Se observa que, en la zona de tracción, el modelo es capaz de representar satisfactoriamente la pendiente del perfil de deformación, coincidiendo para todos los niveles de deriva en al menos 2 puntos, con un error máximo de 50% para el punto de menor exactitud. Para la zona de compresión, bajo niveles de deriva de 1.5%, los valores no son similares, excepto por el punto más cercano a la abertura, el cual mantiene su cercanía con el modelo para todos los niveles de deriva, esto es consistente con el hecho de tener un hormigón modelado más resistente y dúctil en la columna. Se deduce que el punto central de la medición es erróneo, ya que se aleja excesivamente respecto del modelo (en sentido sur y norte) y de la tendencia del resto, mientras que los otros puntos conforman una pendiente similar a la del modelo. Para niveles de deriva de 1.5% y 2%, los resultados son satisfactorios y el error máximo es de 30% en deformación respecto de la medición, sin embargo, de acuerdo a los autores, para niveles de deriva sobre 2% la compresión en la columna provocó descascaramiento considerable, por lo que las mediciones pueden no ser confiables. Las pendientes son bastante similares, lo que indica que el modelo asimila el comportamiento observado de manera correcta al menos para derivas altas. Mencionar que se observa que las deformaciones de compresión experimentales tienden a estancarse e incluso retroceder para deriva de 2.5%, lo que sugiere que el hormigón puede encontrarse en etapa de daño significativo y la medición no es acertada.

#### 4.2.5. Análisis de respuesta local: perfil basal de deformaciones, dirección norte.

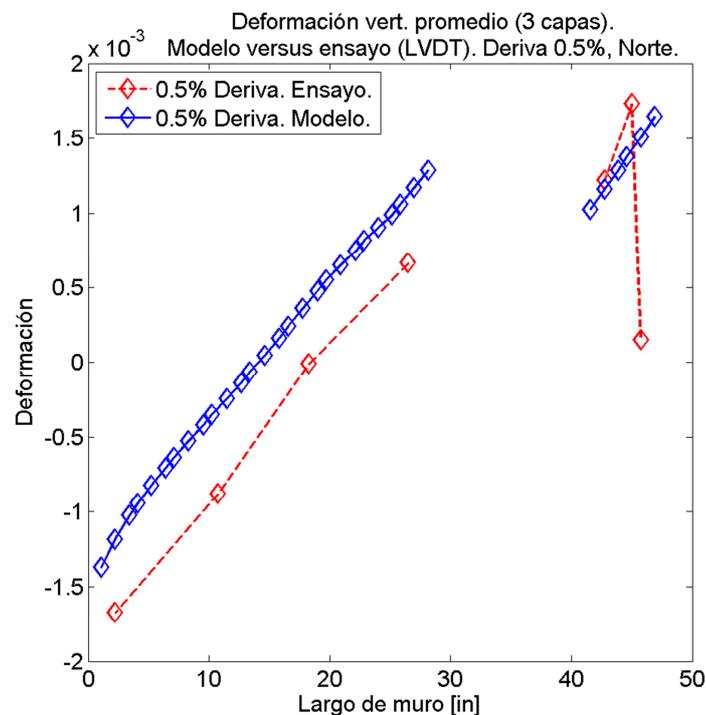


Figura 4.21: Deformaciones en la base para 0.5% deriva. Dirección norte.

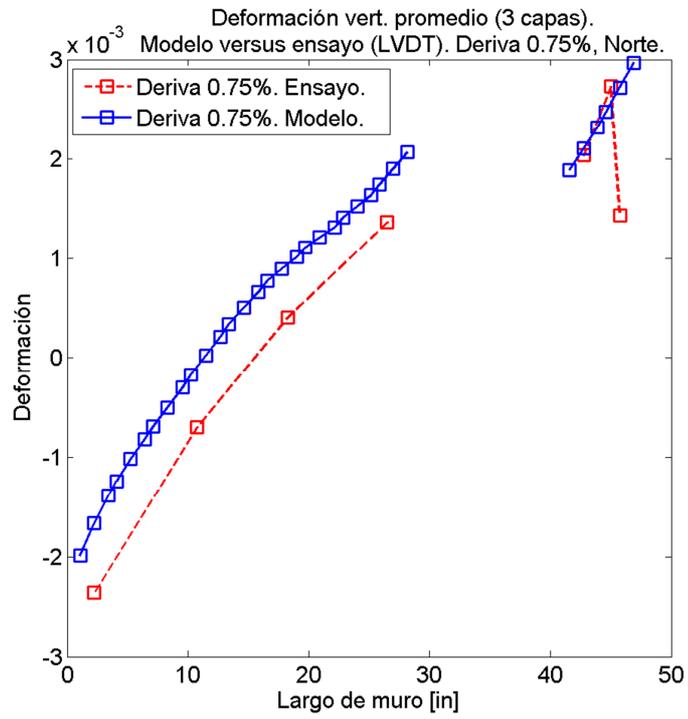


Figura 4.22: Deformaciones en la base para 0.75% deriva. Dirección norte.

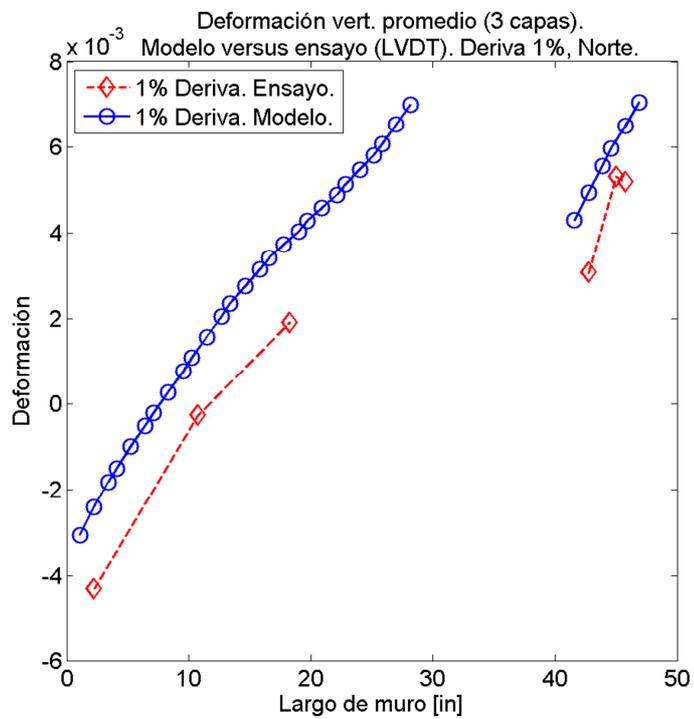


Figura 4.23: Deformaciones en la base para 1% deriva. Dirección norte.

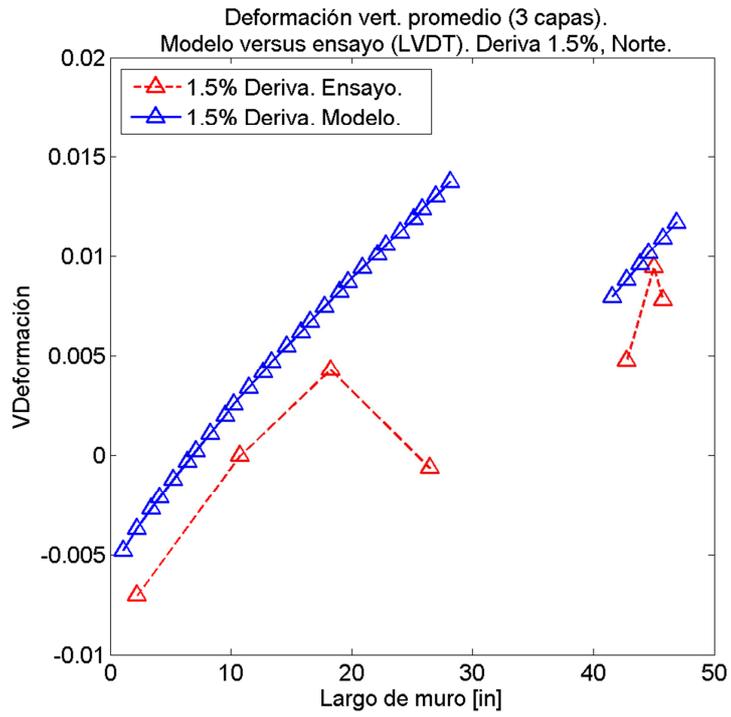


Figura 4.24: Deformaciones en la base para deriva 1.5%. Dirección norte.

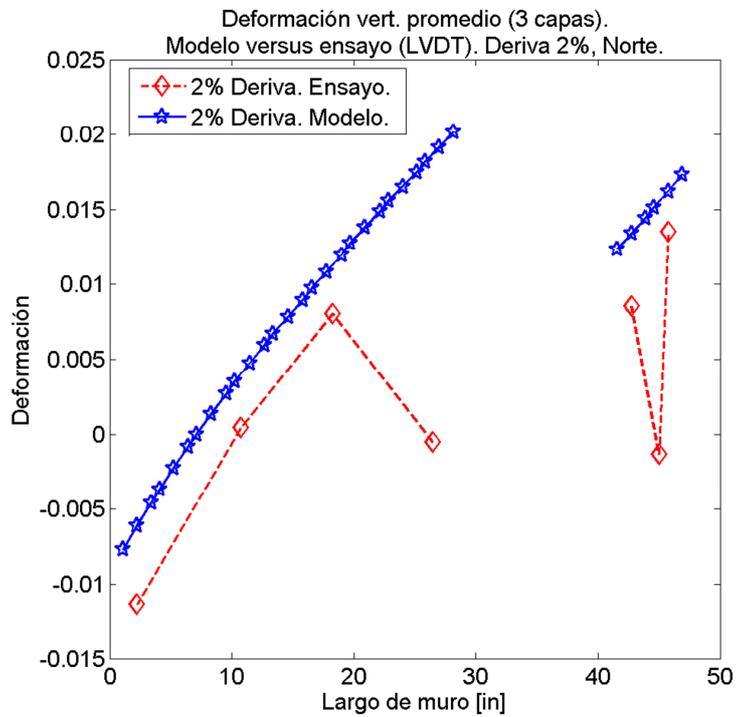


Figura 4.25: Deformaciones en la base para deriva 2%. Dirección norte.

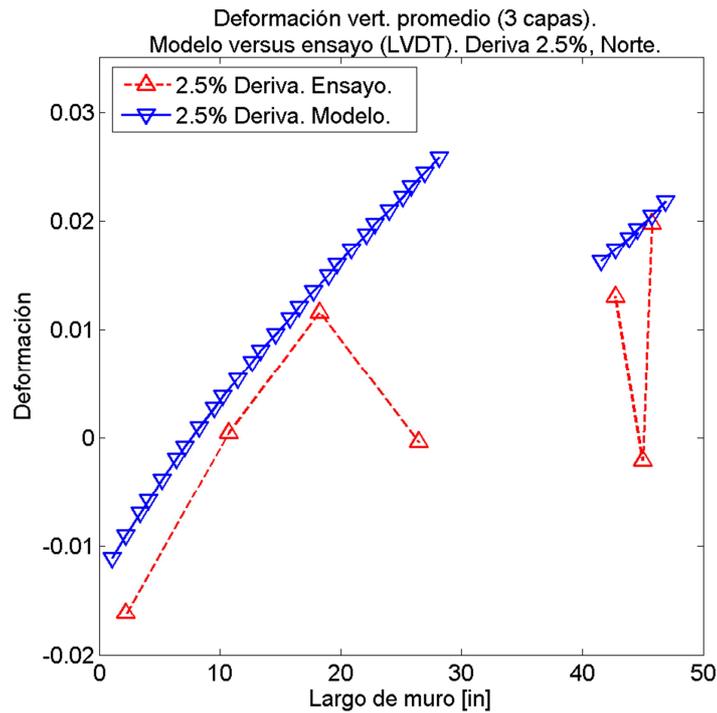


Figura 4.26: Deformaciones en la base para deriva 2.5%. Dirección norte.

Se observa que para el caso de carga en la dirección norte, el error en la zona de máxima compresión oscila de forma ascendente desde un 15% a un 40% al aumentar la deriva, sin embargo siempre se mantiene la pendiente de forma muy similar a la definida por la mayoría de los puntos de medición. En la zona de la columna las mediciones coinciden con el modelo en al menos un punto con un error máximo de 13%, y al menos 2 puntos de medición definen una pendiente similar a la definida por el modelo. Se deduce que de 0.5% a 0.75% de deriva, el sensor ubicado en la máxima tracción es inconsistente con lo esperado, ya que presenta deformaciones muy pequeñas respecto a los otros en la zona de la columna y respecto al modelo. El sensor ubicado en la penúltima posición comienza a dar resultados inconsistentes a partir de 2% de deriva. Esto nos deja con sólo el sensor ubicado en la primera posición en la columna como referencia válida, y los resultados son satisfactorios al menos en derivas grandes (en 2.5% se tiene una diferencia de 14% en deformación).

El modelo es capaz de reproducir en ambas zonas (muro y columna) el “salto” de deformaciones que hace que la sección completa no se pueda unir mediante un perfil de deformaciones lineal único, si no que al menos se debe tener una hipótesis para cada sección si se quiere representar la globalidad del perfil.

## CAPÍTULO 5. EFECTO DEL CORTE EN LAS DEFORMACIONES BASALES.

### 5.1. Análisis preliminar.

Es interesante cuantificar de manera preliminar las diferencias de un modelo base que incluya los efectos del corte y flexión versus un modelo que cumpla la hipótesis de secciones planas (sólo flexión). Éste último se puede lograr utilizando vigas rígidas que unan los elementos planos del muro en la horizontal en cada capa. Esto se hace con el objetivo de tener una primera estimación de los efectos del corte.

Con el objetivo de observar qué efecto tiene considerar las deformaciones de corte, se imponen vigas rígidas en el modelo RW2 de largo igual al largo del muro entre cada capa de elementos, conectando todos los nodos y se somete a una carga monotónicamente creciente (bajo control de desplazamientos). Las vigas son modeladas con hormigón elástico, con las siguientes propiedades:

$$E_b = 63245 \text{ [MPa]}$$

$$h_b = 300 \text{ [mm]}$$

$$b_b = 102 \text{ [mm]} = \textit{wall thickness}$$

La figura 5.1 muestra la respuesta monotónica carga versus desplazamiento del análisis con flexión forzada en contraste con el análisis de flexión más corte. Se observa que responden de forma muy similar, con una diferencia máxima en resistencia de 9% aproximadamente. El gráfico indica que el modelo del análisis de flexión es ligeramente más rígido después de la fluencia, lo que es consecuente si observamos los perfiles de deformación en la base más adelante en las figuras 5.2 y 5.3. Las figuras 5.2 a 5.3 muestran las diferencias principales en las deformaciones basales entre ambos modelos. Se observa que considerar la hipótesis de secciones planas subestima excesivamente las deformaciones de compresión máxima en la base del muro para niveles de deriva mayores a 2%, lo que es indeseable a la hora de decidir cómo proteger del daño, mientras que sobreestima las deformaciones de tracción máxima. Si bien un 2% de desplazamiento de techo es bastante en comparación a la deriva en el que incurren edificios típicos en Chile, más adelante se observa, en modelos de control, que la amplificación de compresiones y reducción de tracciones toman valores importantes a partir de la fluencia del muro.

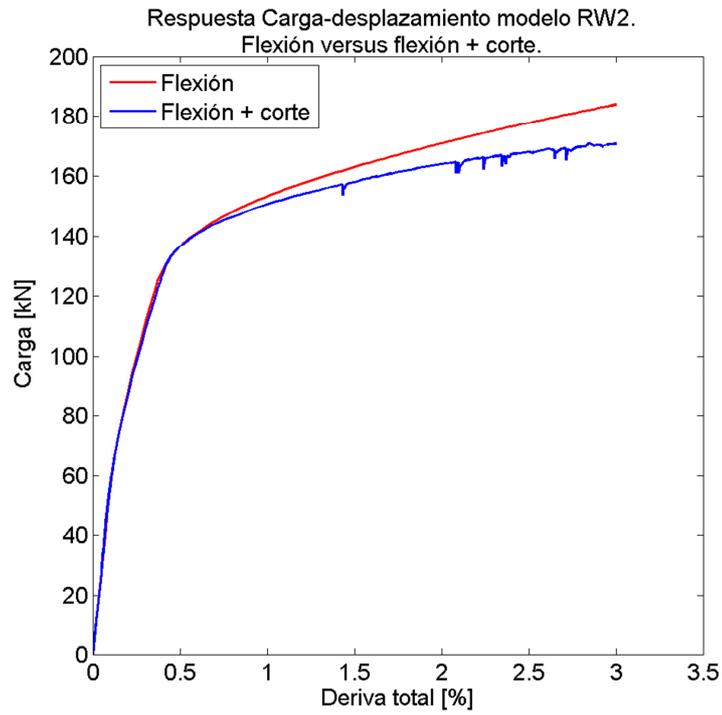


Figura 5.1: Respuesta carga-desplazamiento. Modelos de flexión y flexión + corte.

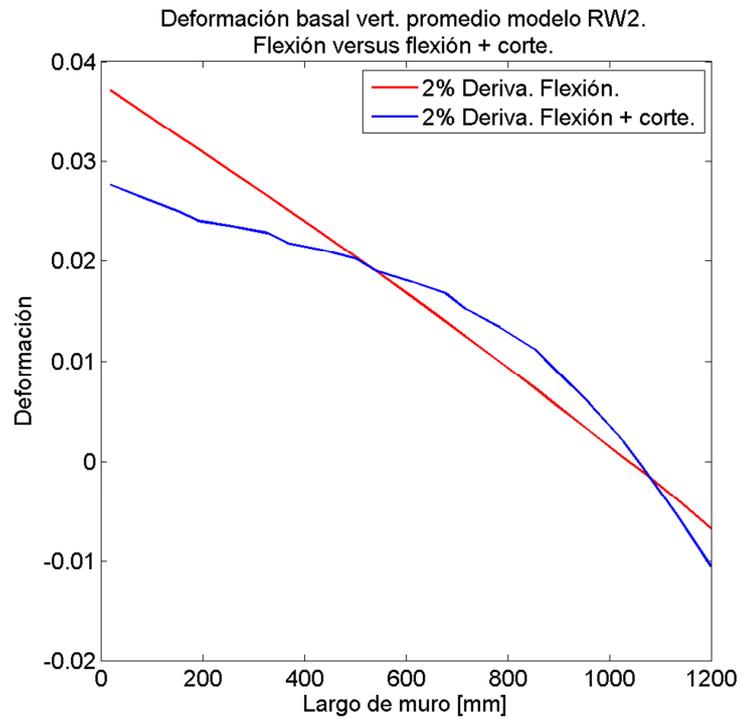
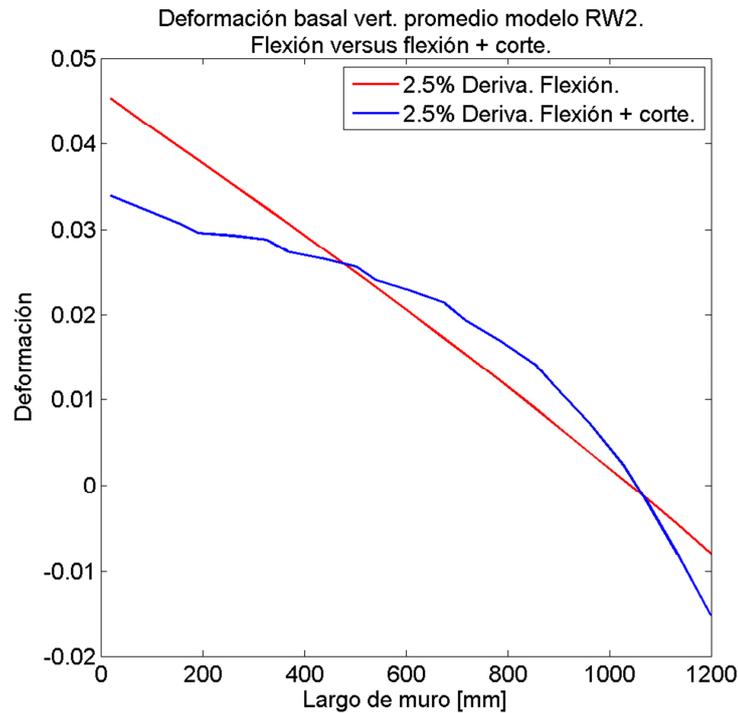


Figura 5.2: Comparación de deformaciones basales para 2% deriva.



**Figura 5.3: Comparación de deformaciones basales para 2.5% deriva.**

En el diseño de muros, por lo general, se diseña en base a las deformaciones máximas que ocurren en los bordes, por lo que siendo consecuente con este criterio, se realiza un análisis de la amplificación y reducción que sufren las compresiones y tracciones máximas al incorporar el corte en el análisis. Si bien esto puede ser conservador, ya que se observa en la Figura 5.3 que la amplificación se reduce a medida que nos acercamos a la línea neutra, también se debe tomar en cuenta que a medida que aumenta la deformación máxima, esta va degradando el material, por lo tanto reduciendo también la zona comprimida efectiva progresivamente.

Para tener una primera estimación de los parámetros importantes que influyen en los efectos del corte, se estudian los resultados de análisis FEM de flexión y flexión + corte variando algunos parámetros. El análisis de flexión se logra incorporando vigas rígidas entre cada capa de elementos. Los parámetros que se varían son:

- Armadura longitudinal de borde: 2.5% y 7.5%.
- Relación de aspecto: se varía en los valores 2.5, 3, 4 y 7.5. (5, 6, 8 y 15 pisos de 2.5 m de altura).

- Carga axial: 5% y 15%.

Otros parámetros del modelo:

- Largo del muro: 5 m.
- Cuantía horizontal distribuida: 0.25%
- Cuantía vertical distribuida: 0.25%
- Cuantía horizontal de borde: 0.69%. Esta se determina en base a considerar espaciamientos mínimos para estribos de 10 mm de espesor, barras longitudinales de 18 mm de espesor, recubrimiento de 30 mm y respetando cuantías volumétricas mínimas según ACI 318-08.
- Espesor del muro: 300 mm.
- Largo de confinamiento: 10% del largo del muro (500 mm).
- $f'_c$ : 30 MPa.
- $\varepsilon_0$ : 0.0025.
- $\varepsilon_y$ : 0.0021.
- $F_y$ : 420 MPa.
- Rigidez post fluencia del acero: 2.5%.
- Resistencia en hormigón confinado: 1.32  $f'_c$ . (Saatcioglu & Razvi, 1992).
- Deformación del hormigón confinado en máxima resistencia ( $\varepsilon_1$ ): 2.62  $\varepsilon_0$  (Saatcioglu & Razvi, 1992).
- Discretización: la Figura 5.4 esquematiza la discretización utilizada para este análisis. Se utilizan 6 elementos en la vertical en el primer piso, y se reducen para los pisos superiores en fracciones de  $\frac{1}{4}$  del número de elementos en el primer piso hasta tenerse 2 elementos como mínimo por piso, por lo tanto a la secuencia de cantidad de elementos es como sigue: 6 en primer piso, 5 en segundo piso, 3 en tercer piso, 2 en cuarto piso hasta piso n-ésimo. Esto con el objetivo de reducir el tiempo del análisis, ya que interesa el comportamiento en la base del muro, y se espera que los pisos superiores no se deformen considerablemente y por lo tanto la cantidad de elementos no es relevante. Se incluye un pedestal de hormigón elástico para evitar problemas de estabilidad en los elementos basales. Además se modelan las 3 primeras capas de elementos con una altura de 250 mm para lograr un largo de calibre de 250 mm, 500 mm, y 750 mm en los cuales promediar las deformaciones

basales. Este rango de alturas de calibre se utiliza en base al supuesto de que la zona de concentración de daño se encontraría entre este rango de distancias (aproximadamente 2 veces el espaciamiento de estribos o 2.5 veces el espesor del muro).



Figura 5.4: Discretización modelo para análisis de efectos del corte.

En la Figura 5.5 a la Figura 5.7 se muestra la amplificación de la deformación de compresión en el borde más comprimido ("MCSAF") para los modelos analizados. La Figura 5.5 muestra los resultados del modelo con carga axial 5%, cuantía de borde 2,5% y variando la relación de aspecto, se observa que esta última es de gran relevancia en el valor de la amplificación. En la Figura 5.6 se comparan los casos con relación de aspecto 2,5 y 7,5, cuantía de borde de 2.5% y variando la carga axial, y en la Figura 5.7 se comparan los mismos casos de relación de aspecto, con carga axial de 5% y variando la cuantía de borde, se observa que estos últimos dos parámetros tienen una relevancia mucho menor, tanto para el muro esbelto como para el muro de baja relación de aspecto. La razón por la que algunos casos no presentan datos a partir de derivas de techo más bajas, es porque en algunos casos se encontraron problemas de inestabilidad en la convergencia, que no permiten obtener datos confiables a partir de ciertos niveles de deriva.

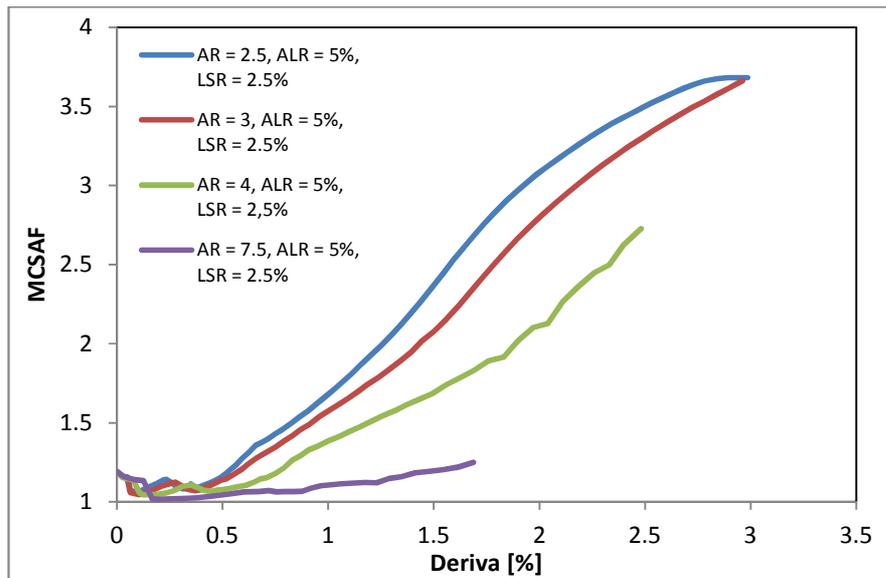


Figura 5.5: Factor de amplificación de deformación de compresión máxima (MCSAF) al variar la relación de aspecto.

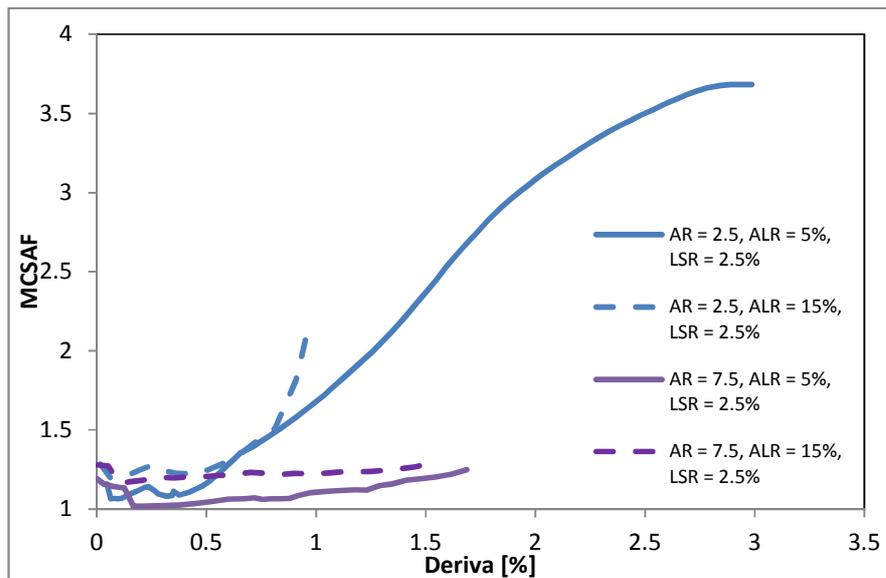
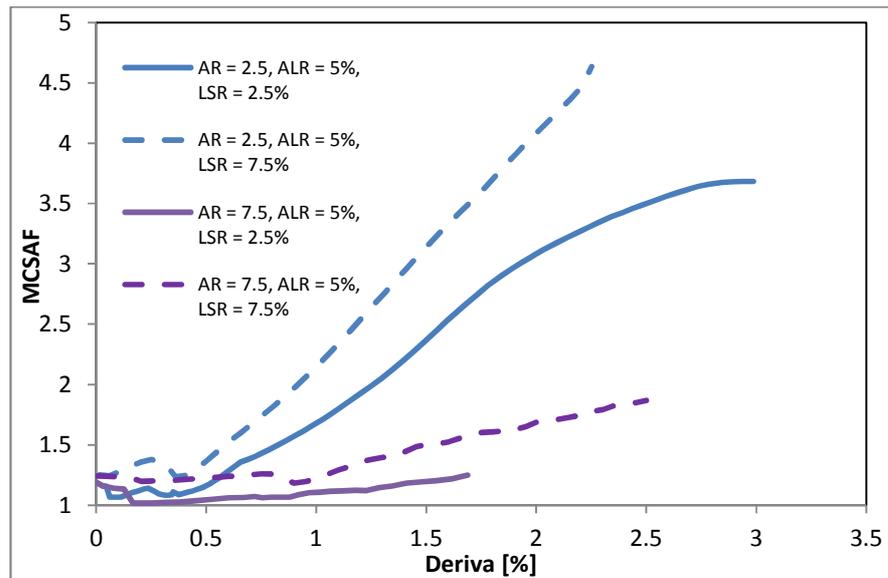


Figura 5.6: Factor de amplificación de deformación de compresión máxima (MCSAF) al variar la carga axial.



**Figura 5.7: Factor de amplificación de deformación de compresión máxima (MCSAF) al variar la cuantía longitudinal de borde.**

A continuación se presenta un análisis detallado con éstas y otras variables para calibrar una expresión que permita obtener la amplificación de compresión y la reducción de tracción máximas en la base del muro.

## 5.2. Consideraciones generales.

Para abordar este problema con mayor profundidad, se procede a parametrizar las diferentes variables que se considera podrían influir mayormente en la amplificación de las deformaciones de compresión o reducción de las deformaciones de tracción por los efectos del corte y rigidez longitudinal variable. Las variables a considerar son las siguientes:

- Carga axial (ALR): 10%, 15% y 20% de la capacidad de la sección ( $f'c Ag$ ).
- Relación de aspecto (AR): se varía entre 2,5 y 7,5 (equivalentes a muros de 5 y 15 pisos con largo de muro de 5 m).
- Cuantía longitudinal (LSR): 2,5% y 7,5% (respecto al área del elemento de borde).
- Largo de confinamiento (CL): 200 mm, 500 mm y 850 mm. Se considera dependiente de la carga axial, diseñándose para una deriva de 1.5%. Esto porque en un diseño real, la variabilidad del largo de confinamiento está amarrado principalmente al nivel de carga axial. Se diseña el largo de confinamiento con el método de ACI318-08 y DS60, utilizando un modelo

simplificado, que considera armaduras de borde, armadura distribuida en fluencia en un 1/6 del largo del muro cerca de cada borde (que correspondería aproximadamente a la armadura que puede contribuir de forma efectiva al equilibrio de fuerzas axiales), hormigón en degradación al 85% de  $f'_c$  para una deformación de compresión máxima 0.003, se asume que la línea neutra se mantiene antes y después de confinar y se asume que las secciones se mantienen planas (modelo de flexión). Este criterio se aplica para 8 de los modelos utilizados, el resto considera una carga axial baja (entre 5% y 8.33%) y largo de confinamiento de 500mm. Estos últimos se incluyen en la calibración para obtener más datos en el rango de grandes deformaciones unitarias.

Tabla 5-1: Largo de confinamiento (“CL) según carga axial y deriva de diseño bajo criterios de DS60.

CL <sup>3</sup> [mm]	deriva [%]				
ALR <sup>4</sup>	1	1.5	2	2.5	3
0.05	0	0	100	150	200
<b>0.1</b>	0	<b>200</b>	350	400	500
<b>0.15</b>	250	<b>500</b>	650	750	800
<b>0.2</b>	600	<b>850</b>	1000	1100	1150
0.25	900	1200	1350	1400	1500

- Deriva de techo: se aumenta desde 0 hasta un valor suficientemente grande para cubrir una deformación de compresión máxima de al menos 1,5% en el modelo de flexión más corte (en general 1% a 2,5% deriva de techo).
- Largo de calibre de deformaciones basales (GL): Se promedian las deformaciones basales de cada modelo en tres largos distintos: 250 mm, equivalentes a aproximadamente 2 veces el espaciamiento de los estribos (espaciamiento varía poco alrededor de 100mm entre cada modelo), 750mm, equivalentes a 2.5 veces el espesor del muro y 500mm como altura intermedia para la calibración.

Para ambos casos se deja fijo cualquier otro parámetro. Los rangos de cada variable son elegidos en base a la práctica común en edificios chilenos (Estay, 2008). Los valores de otros parámetros se listan a continuación:

- Cuantía vertical distribuida a lo largo del muro: 0.25% del área bruta.
- Cuantía horizontal distribuida en la altura: 0.25% del área bruta.

<sup>3</sup> CL: “Confinement length”, Largo de confinamiento.

<sup>4</sup> ALR: “Axial load Ratio”, Razón de carga axial.

- Largo del muro: 5 m.
- Altura de piso: 2.5 m.
- Largo de elementos de borde: 500mm ( $\gamma = 0.9$ ).
- Espesor del muro: 300 mm.
- $f'c$ : 30 MPa.
- $\varepsilon_0$ : 0.0025.
- $\varepsilon_y$ : 0.0021.
- $F_y$ : 420 MPa.
- Rigidez post fluencia del acero: 2.5%.
- Resistencia en hormigón confinado: 1.32  $f'c$ . (Saatcioglu & Razvi, 1992).
- Deformación del hormigón confinado en máxima resistencia ( $\varepsilon_1$ ): 2.62  $\varepsilon_0$  (Saatcioglu & Razvi, 1992).

Además se considera en la modelación la incorporación de vigas rígidas para simular el efecto de las losas en cada nivel de piso. A continuación la tabla 5.2 muestra las características de cada análisis FEM. La discretización del modelo (malla) sigue la misma regla definida en la Figura 5.4.

**Tabla 5-2: Modelos FEM para análisis de efectos del corte.**

CASO [#]	ALR [%]	LSR <sup>5</sup> [%]	AR <sup>6</sup> [m/m]	CL <sup>7</sup> [mm/mm]
1	10	2,5	2,5	200/5000
2	10	2,5	4	200/5000
3	10	2,5	7,5	200/5000
4	15	2,5	2,5	500/5000
5	15	2,5	7,5	500/5000
6	20	2,5	2,5	850/5000
7	20	2,5	7,5	850/5000
8	10	7,5	2,5	200/5000
9	10	7,5	7,5	200/5000
10	15	7,5	2,5	500/5000
11	15	7,5	7,5	500/5000
12	5	2.5	3	500/5000
13	8.33	2.5	5	500/5000
14	10	2.5	2.5	500/5000
15	5.56	2.5	3.33	500/5000
16	6.25	2.5	3.75	500/5000

<sup>5</sup>LSR: "Longitudinal Steel Ratio", Cuantía de refuerzo longitudinal de borde.

<sup>6</sup> AR: "Aspect Ratio", Relación de aspecto.

<sup>7</sup>CL: "Confinement Length", Largo de confinamiento.

### 5.3. Resultados.

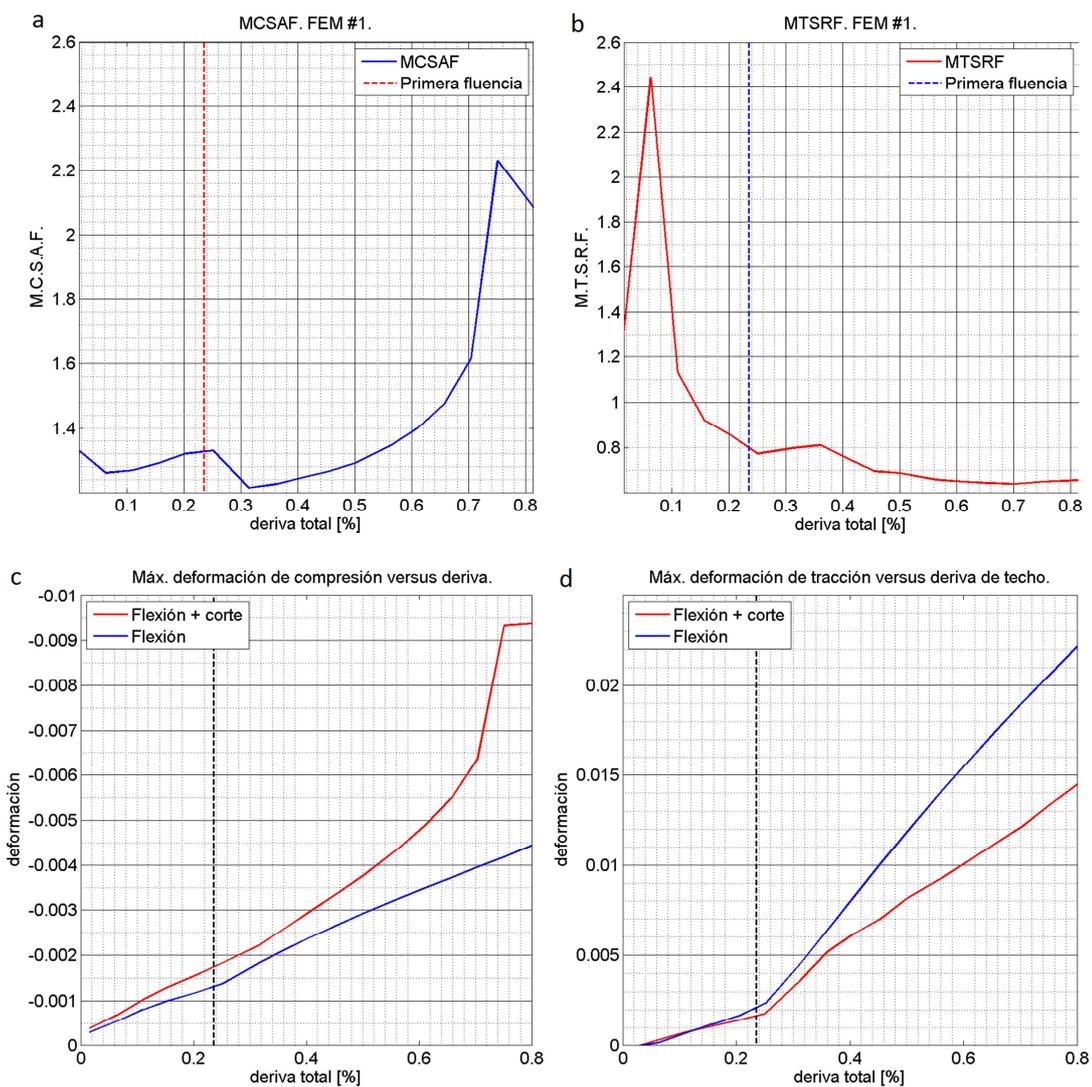
#### 5.3.1. Calibración de amplificación de deformaciones de compresión y tracción en la base.

De cada modelo se calcula la amplificación (o reducción) de las compresiones y tracciones basales tomando los puntos de cuadratura de los elementos ubicados en el borde del muro. Se observa que la amplificación de deformaciones de compresión es significativa a partir de valores de deriva por sobre la fluencia del muro (ver figuras 5.7 a 5.9), lo cual se repite en todos los casos, así como también se considera que la reducción de las deformaciones de tracción tienen sentido a partir de valores de deriva elevadas (en general por sobre la plastificación). Por lo anterior es que se decide calibrar el modelo en base a la deriva plástica,  $\Delta_p$ , y dejar en 1 la amplificación para el rango elástico. La deriva plástica se define como:

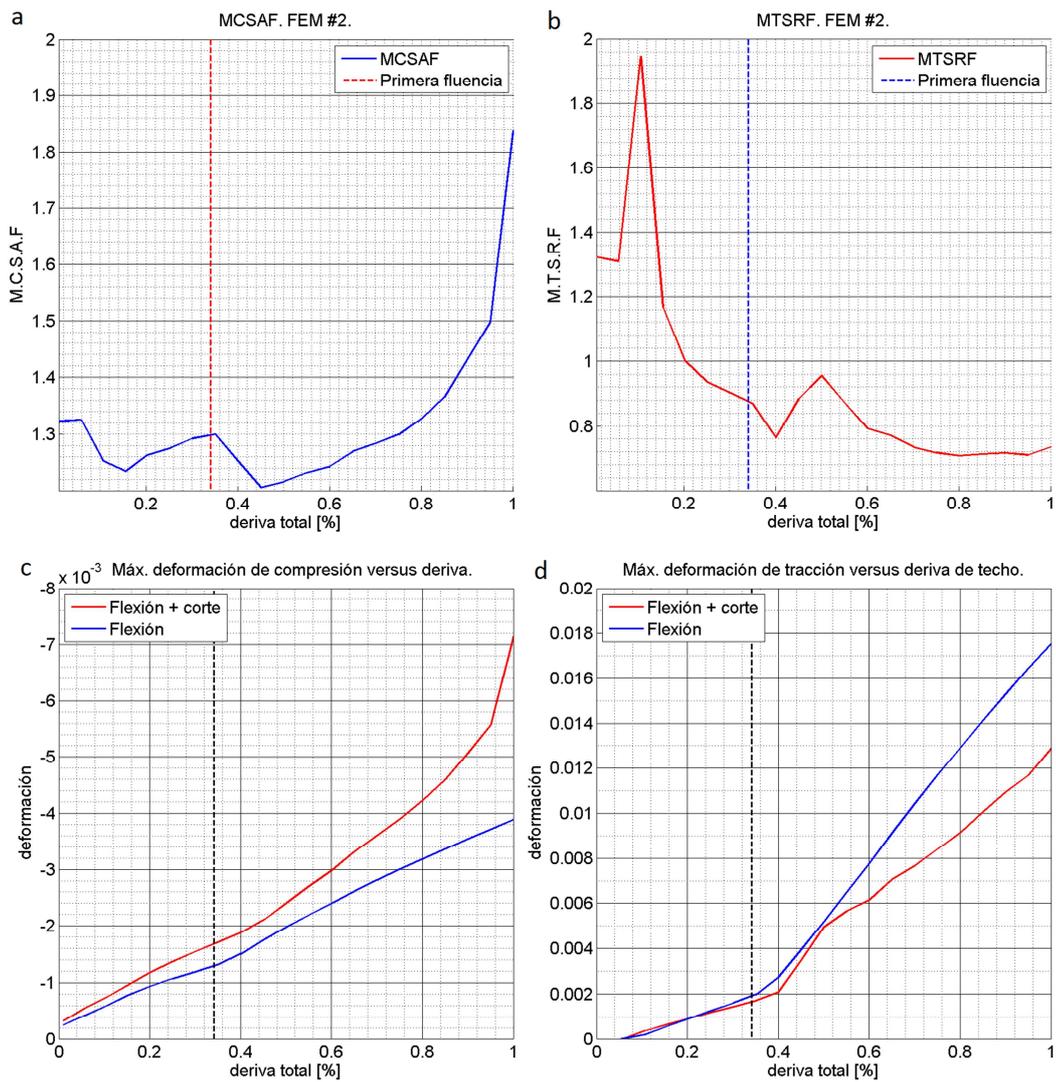
$$\Delta_p = \Delta_u - \Delta_y \quad 5.1.$$

Donde  $\Delta_y$  es la deriva para el desplazamiento de fluencia del modelo de flexión y  $\Delta_u$  deriva de diseño.

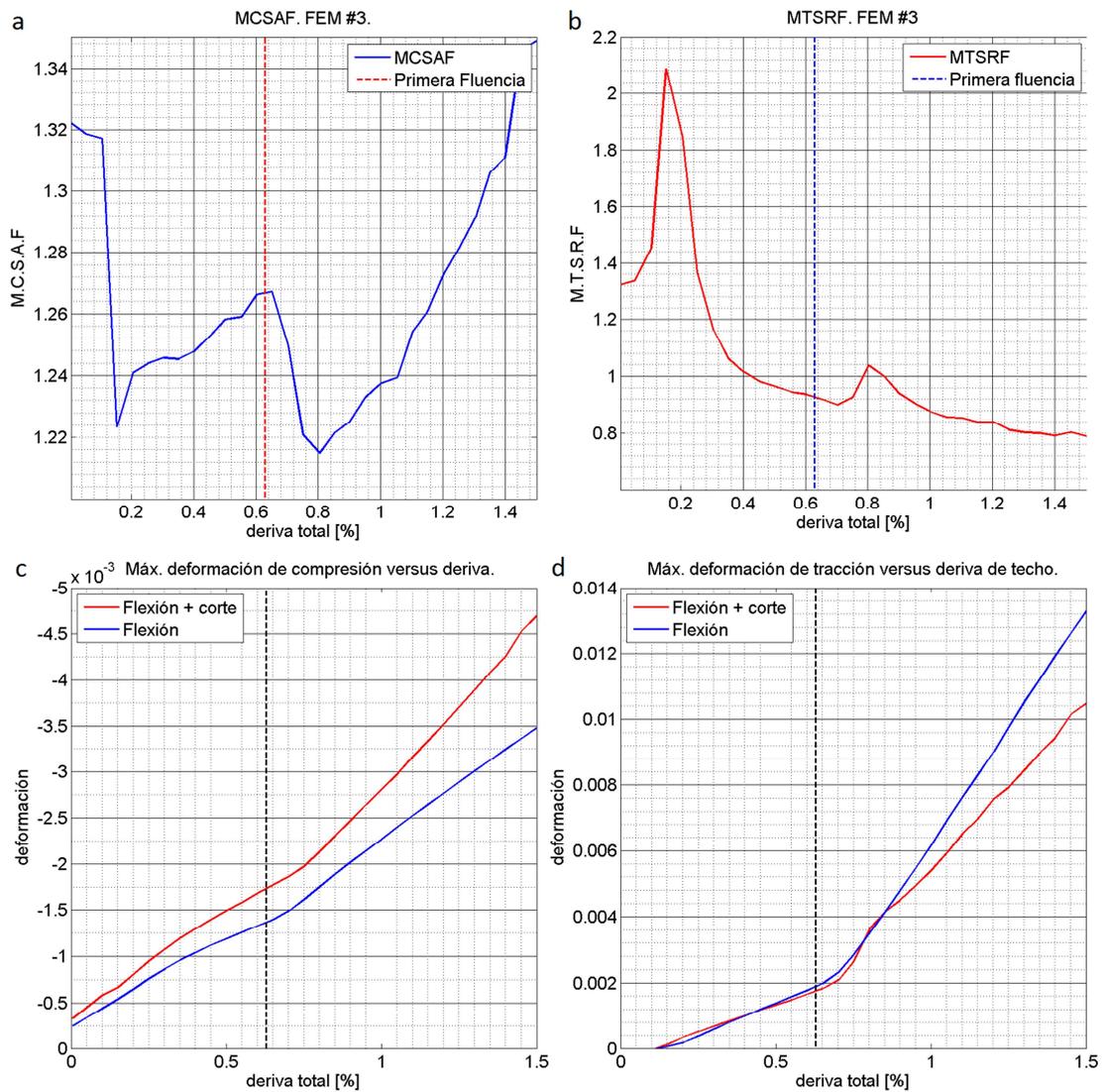
En la Figura 5.8 a la Figura 5.10 se muestran 3 de los casos de análisis (casos 1 a 3), que se diferencian entre sí por la relación de aspecto (2.5, 4 y 7.5 respectivamente) en donde se grafica el factor de amplificación de deformación de compresión máxima ("MCSAF", a), el factor de reducción de deformación de tracción máxima ("MTSRF", b), la máxima deformación de compresión de los modelos de flexión y flexión más corte (c) y la máxima deformación de tracción de los modelos de flexión y flexión más corte (d) para 250mm de altura de calibre ("GL") en la base, y el punto de primera fluencia del muro marcado con línea punteada. El "peak" inicial de MTSRF observado se entiende que es consecuencia de los bajos niveles de deformación que se tienen en un comienzo, y por lo tanto la amplificación puede tomar valores grandes que son irrelevantes para esos niveles de deformación. Lo mismo ocurre al comienzo en el caso de los MCSAF, donde en general se tienen valores por sobre 1, pero que son irrelevantes por la misma razón. Se observa que luego de la fluencia las deformaciones entre el modelo de flexión y el de flexión más corte comienzan a separarse de forma más notoria en todos los casos, con un efecto más significativo en el caso con baja relación de aspecto en las deformaciones de compresión.



**Figura 5.8: Amplificación de compresión máxima y reducción de tracción máxima para FEM #1 (ver tabla 5.2). a) Amplificación de compresión máxima versus deriva, b) Reducción de tracción máxima versus deriva, c) Deformación de compresión máxima en análisis de flexión y flexión + corte, d) Deformación de tracción máxima en análisis de flexión y flexión + corte.**



**Figura 5.9: Amplificación de compresión máxima y reducción de tracción máxima para FEM #2 (ver tabla 5.2).  
a) Amplificación de compresión máxima versus deriva, b) Reducción de tracción máxima versus deriva, c) Deformación de compresión máxima en análisis de flexión y flexión + corte, d) Deformación de tracción máxima en análisis de flexión y flexión + corte.**



**Figura 5.10: Amplificación de compresión máxima y reducción de tracción máxima para FEM #3 (ver tabla 5.2)**  
**a) Amplificación de compresión máxima versus deriva, b) Reducción de tracción máxima versus deriva, c) Deformación de compresión máxima en análisis de flexión y flexión + corte, d) Deformación de tracción máxima en análisis de flexión y flexión + corte.**

Tomando los datos de puntos separados entre sí por 0.05% en deriva de techo y mayores que la deriva de primera fluencia, se calibran dos modelos matemáticos mediante mínimos cuadrados, que relacionan el factor de amplificación de deformación máxima de compresión y el factor de reducción de deformaciones de tracción máxima con las variables analizadas normalizadas. La deriva de primera fluencia es tomada como la deriva de techo para la cual el punto de cuadratura más traccionado del elemento basal de borde alcanza la tensión de fluencia aparente del acero (ecuación 3.18). El modelo por calibrar es de la forma:

$$F_{c,t} = b_0 \prod_{i=1}^m x_i^{b_i} \quad 5.2.$$

Donde:

$x$  : Vector de variables

$F_{c,t}$ : Factor de amplificación de compresión, o factor de reducción de tracción.

$\beta_i$  : Parámetros por calibrar

El modelo se puede linealizar mediante la función  $\log()$ , por lo que la calibración se hace mediante el método de mínimos cuadrados lineal multivariable, con el que se minimiza el error dado por:

$$r_j = (b_1, \dots, b_m) = y_j - \sum_{i=1}^m b_i \log(x_j) \quad 5.3.$$

Donde:

$y_j$  : Datos de valores de amplificación o reducción de deformación.

Debido a que algunos de los análisis no logran llegar a niveles de deformación grandes, debido a que los modelos muy esbeltos tienden a alcanzar deformaciones menores además de que algunos análisis presentan problemas de estabilidad en la convergencia para niveles de deriva bajos (alrededor de 1%), se considera una matriz de pesos en función de la deformación de compresión máxima amplificada por 1000, elevada al cuadrado. Por simplicidad se aplica el mismo criterio para la calibración del modelo de tracción. Con esto, se tiene que la solución del problema de mínimos cuadrados, para cada uno de los modelos, queda como:

$$\vec{b} = (F^T W F)^{-1} F^T W Y \quad 5.4.$$

Donde:

$Y = \log(\vec{Y} * 100)$ , con  $\vec{Y}$  el vector de datos de amplificación de compresión o el vector de datos de reducción de tracción.

$W$  : Matriz diagonal de pesos.  $w_i = (1000\varepsilon_{c,t})^2$

Para ver la influencia de todas las variables involucradas, se hace la calibración incluyendo todas las variables. La normalización de las variables es según lo siguiente:

- Deriva plástica (PD): Ecuación 5.1
- Relación de aspecto (AR):  $h_w/l_w$
- Cuantía longitudinal (LSR):  $\frac{A_s}{A_{cc}}$ , con  $A_{cc}$  área del elemento de borde y  $A_s$  área de acero longitudinal en la sección transversal.
- Carga axial (ALR): razón de  $f'_c A_g$
- Largo de calibre (GL): normalizado respecto a la altura del muro.
- Largo de confinamiento (CL): normalizado respecto al largo del muro.

El modelo es del tipo mostrado en la ecuación 5.5, y los resultados indican que la carga axial no tiene una influencia significativa. La tabla 5.3 muestra los coeficientes de cada variable para este análisis. Vale la pena destacar que, si la carga axial no tiene influencia en este análisis, es porque se encuentra acoplada al largo de confinamiento (todos los modelos tienen un confinamiento diseñado para alcanzar al menos una deriva de 1.5% sin entrar en deformaciones de compresión por sobre 0.008), según DS 60, es por esto que es de importancia tener como base para la validez del modelo propuesto que el confinamiento sea el adecuado según la normativa vigente en Chile. Cabe destacar que para muros diseñados para niveles de deriva menores al 1.5%, el modelo propuesto podría no ser conservador, pero ya que la carga axial tiene tan baja influencia en el rango analizado, se espera incluso que para esos casos el efecto no sea importante.

**Tabla 5-3: Coeficientes calibrados con todas las variables para compresión.**

Parámetro	Valor
$b_0$	3.82
$b_{PD}^8$	0.26
$b_{AR}$	-0.41
$b_{ALR}$	-0.01
$b_{LSR}$	0.09
$b_{GL}^9$	-0.22
$b_{CL}$	-0.15

Dado lo anterior, se proponen dos modelos para cuantificar las amplificaciones: un modelo completo que considera la deriva plástica (PD), relación de aspecto (AR), cuantía longitudinal (LSR), largo de calibre de deformaciones (GL) y largo de confinamiento (CL), y un modelo simplificado, que considera la deriva plástica y la relación de aspecto para el caso de la amplificación de la compresión, y otro que considera sólo la relación de aspecto para el caso de las tracciones, ya que en el caso de tracción, como se observa en la Figura 5.11, casi todos los parámetros tienen baja significancia exceptuando la relación de aspecto. Para la calibración sin el largo de calibre, se toman los datos de los puntos medidos en un largo de calibre de 250 mm (esto cubre un rango desde 0.67% a 3% de la altura de muro). Se encontró que para largos de calibre de 1%, la diferencia en la compresión no excede el 15% respecto a lo obtenido con 0.5%, por lo que la discretización es razonablemente pequeña. Resaltar que la carga axial no se incluye en el modelo completo por estar relacionada con el largo de confinamiento, con esto se logra cubrir los casos en que el confinamiento cumple con la normativa actual. El largo de confinamiento se escoge, en lugar de la carga axial, porque el coeficiente asociado tanto a la carga axial como al largo de confinamiento es negativo, lo que quiere decir que a mayor carga axial, menor es la amplificación, pero esto sucede debido a que el largo de confinamiento está acoplado al nivel de carga axial, lo cual podría desentenderse, por lo que es más intuitivo tener un coeficiente negativo asociado al largo de confinamiento. La Figura 5.11 muestra la dispersión del modelo completo para compresión y tracción, la Figura 5.12 muestra la dispersión del modelo simplificado para compresión y la Figura 5.13 muestra la dispersión del modelo simplificado para tracción. La ecuación 5.5. representa el modelo completo para compresión y tracción, la ecuación 5.6 muestra el modelo simplificado propuesto para compresión y la ecuación 5.7 muestra el modelo simplificado propuesto para tracción.

<sup>8</sup>PD: "Plastic Drift", deriva de techo plástica.

<sup>9</sup>GL: "Gauge Length", Altura de calibre: altura en la que se toma el promedio de las deformaciones.

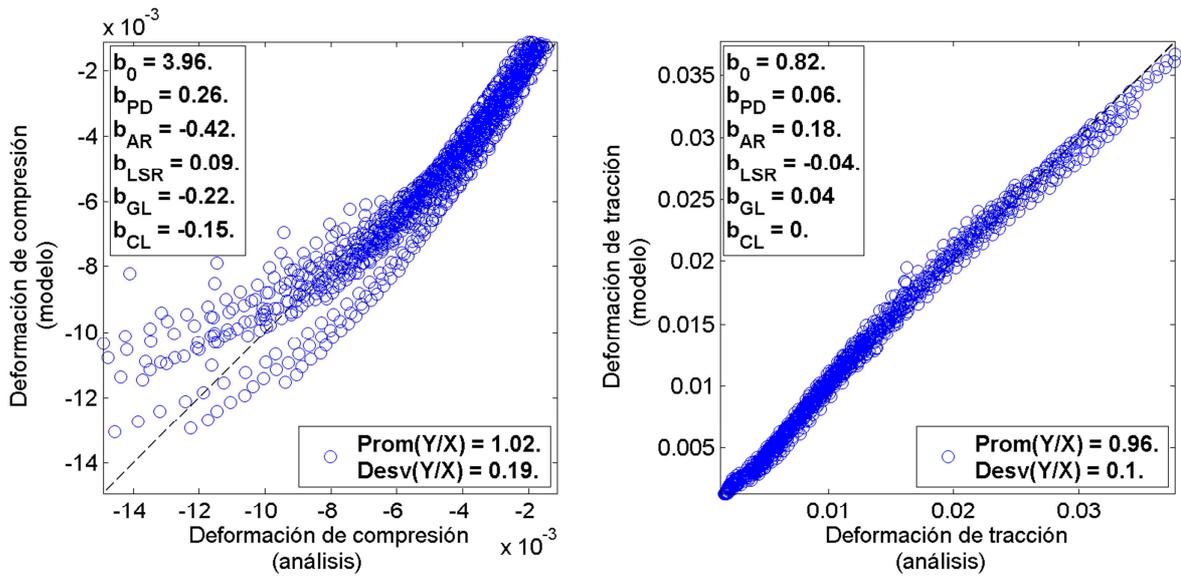


Figura 5.11: Dispersión del modelo completo para compresión y tracción.

$$F_{c,t} = b_0(PD)^{b_{PD}} * (AR)^{b_{AR}} * (LSR)^{b_{LSR}} * (GL)^{b_{GL}} * (CL)^{b_{CL}} \quad 5.5.$$

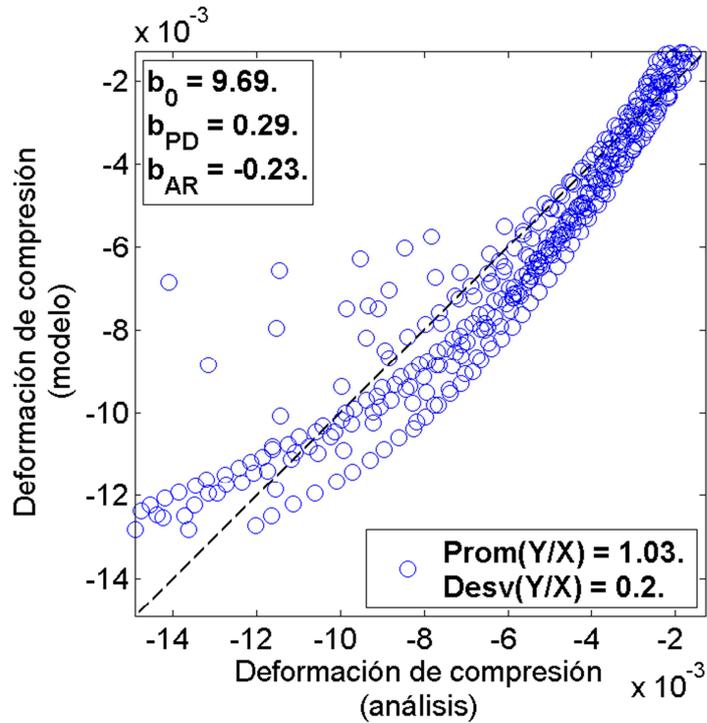


Figura 5.12: Dispersión del modelo simplificado para compresión.

$$F_c = b_0(PD)^{b_{PD}} * (AR)^{b_{AR}} \quad 5.6.$$

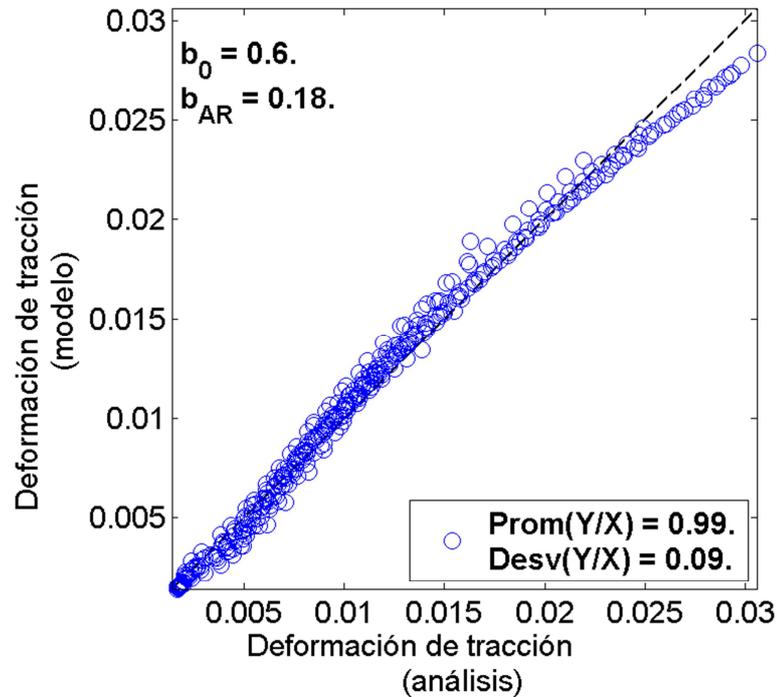


Figura 5.13: Dispersión de la precisión del modelo simplificado para tracción.

$$F_t = b_0 * (AR)^{b_{AR}} \quad 5.7.$$

La desviación estándar del modelo simplificado no varía significativamente respecto del modelo completo (1% en caso de la compresión), ni tampoco el promedio de los valores se aleja de 1 en más de un 3%. Se observa, en el caso de la deformación de compresión, que el modelo tiene mayor dispersión para deformaciones grandes. En el caso de las deformaciones de tracción la tendencia general guarda buena correlación con los datos del análisis FEM para todo el rango de valores analizados. La razón por la que se decide no incluir el largo de calibre (GL) en el modelo simplificado, es que se considera más práctico no tener que tomar una decisión respecto a la zona de concentración del daño a la hora de diseñar, sin embargo, implícitamente ya se ha mencionado que un largo de calibre de  $\frac{250}{h_w} \left[ \frac{mm}{mm} \right]$  es una buena referencia que logra no subestimar demasiado las compresiones para valores inferiores de GL. El modelo completo, por otro lado, logra cubrir el efecto del largo de calibre de los sensores utilizados para la medición de la deformación en probetas experimentales.

A continuación se muestran 3 de los casos de análisis (modelos FEM 1, 2 y 3), que difieren en relación de aspecto (2,5 4 y 7,5) comparando las deformaciones obtenidas mediante el modelo calibrado completo y simplificado (ecuación 5.5, y 5.6 con 5.7) aplicado al análisis de flexión versus el análisis de flexión + corte. En los tres casos mostrados (Figura 5.14 a Figura 5.16) se observa que la compresión se sobreestima levemente para un rango amplio de deriva plástica, y se subestima para derivas en que las deformaciones del análisis de flexión más corte son grandes, por sobre 0.008. Las diferencias que se observan en la Figura 5.12 a partir de deformaciones relativamente grandes se atribuyen a dos factores: primero, existe una mayor cantidad de puntos en la zona de bajas deformaciones, lo que se intenta contrarrestar con la matriz de pesos utilizada en la calibración, y segundo, a la variabilidad de los casos de análisis: si bien se usan largos de confinamiento coherentes con el nivel de carga axial en la mayoría de los casos, es esperable que se produzcan deformaciones excesivas en algunos casos ya que la coherencia entre la carga axial y el largo de confinamiento está determinada por reglas de diseño basadas en modelos de flexión (secciones planas), por lo que naturalmente la correlación entre carga axial y largo de confinamiento no es 100%. Esto se podría abordar en futura investigación realizando un análisis con una matriz de casos mayor, o en donde el largo de confinamiento sea independiente de la carga axial. Sin embargo, el modelo predice de buena forma la amplificación en un rango amplio de deriva plástica, al menos hasta deformaciones menores al 1%.

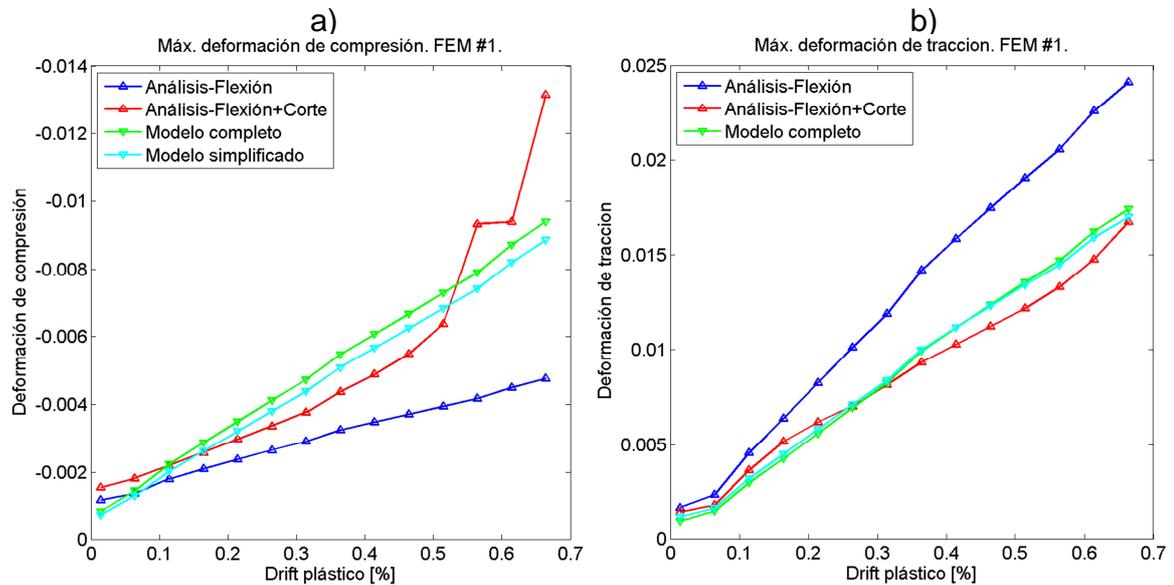


Figura 5.14: Comparación deformaciones basales: Análisis versus Modelos Propuestos. FEM #1. a) Compresión máxima, b) Tracción máxima.

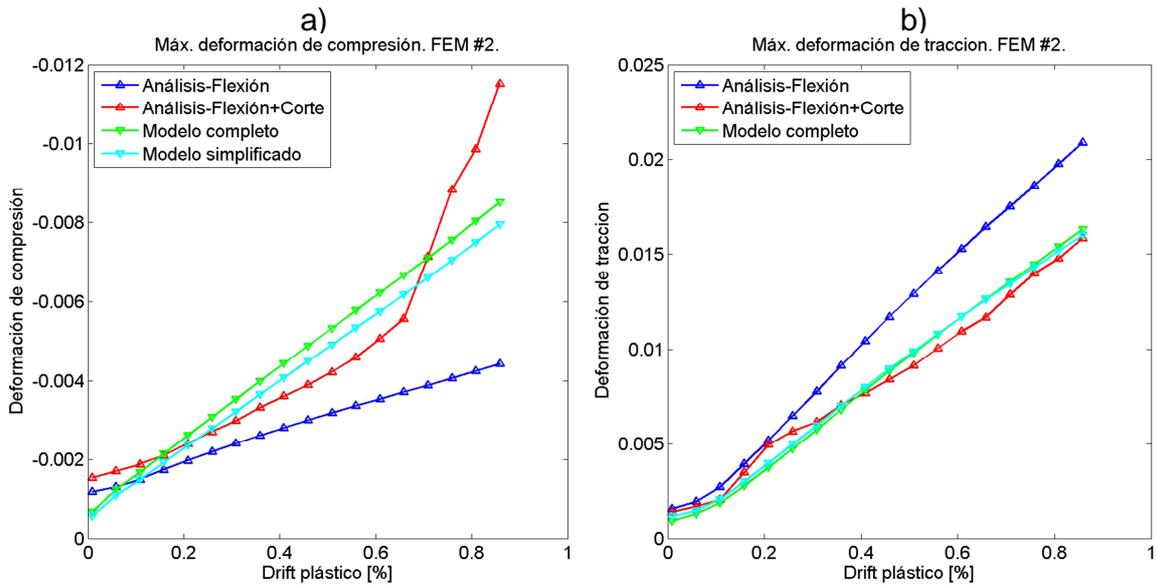


Figura 5.15: Comparación deformaciones basales: Análisis versus Modelos Propuestos. FEM #2. a) Compresión máxima, b) Tracción máxima.

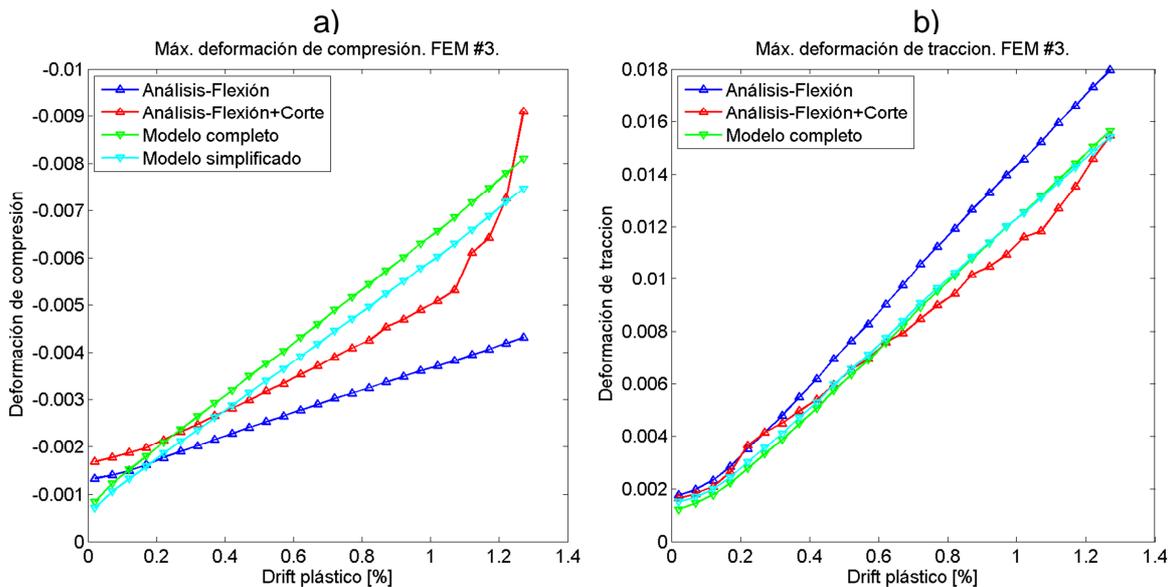


Figura 5.16: Comparación deformaciones basales: Análisis versus Modelos Propuestos. FEM #3. a) Compresión máxima, b) Tracción máxima.

Finalmente, se observa en la Figura 5.14 a la Figura 5.16 que para derivas plásticas bajas, el modelo predice amplificaciones de compresión menores a 1, lo que no es consecuente con la realidad de acuerdo a lo observado. Esto se corrige imponiendo una cota inferior a los modelos de compresión igual a 1, lo que prácticamente no modifica la precisión de los modelos propuestos. En el caso de la

tracción, una cota superior igual a 1 tiene sentido de acuerdo al comportamiento observado en el rango plástico.

### **5.3.2. Modelo calibrado versus experimentación.**

A modo de verificación, se presenta a continuación la comparación de los resultados que se obtienen al utilizar el modelo calibrado completo (ecuación 5.5) con un modelo FEM de flexión de la probeta RW2, ensayada por Thomsen & Wallace (1995). En la Figura 5.17-a se muestra la deformación de compresión máxima obtenida del análisis y de los modelos calibrados. Se observa que el modelo calibrado completo (Ecuación 5.5) aplicado al modelo FEM guarda buena correlación con los resultados experimentales. En el último punto experimental en compresión, Figura 5.17-a, se observa un aumento por sobre la tendencia general, lo que es explicado por los autores como consecuencia del aplastamiento del hormigón de recubrimiento, el cual ya se ve degradado considerablemente, afectando la lectura del sensor (anclado al recubrimiento). Se vuelve a destacar que el modelo predictivo simplificado para compresión no es el apto para contrastar con resultados experimentales, ya que no incluye el largo de calibre ("GL") como variable, lo que no permite adaptar el modelo al largo de calibre de los sensores utilizados, por el contrario el modelo completo es capaz de reproducir este efecto.

Los valores de deriva mostrados en la figura corresponden a los estimados en la forma descrita en 4.1.5, corregidos por el efecto de la penetración de deformaciones en el pedestal y giro del pedestal. Las diferencias porcentuales (absolutas) respecto a la probeta experimental se muestran en Figura 5.17-c. Se observa que para los primeros 3 puntos, el error en el caso de la tracción es bastante alto, sin embargo esto no tiene una consecuencia relevante ya que los valores absolutos de deformación son pequeños como se indica en la Figura 5.17-b (menores a 0.004), el resto de los puntos se mantiene bajo un 20% tanto para compresión como para tracción, exceptuando el último punto de compresión que, como se mencionó, incluye errores adicionales en la medición experimental.

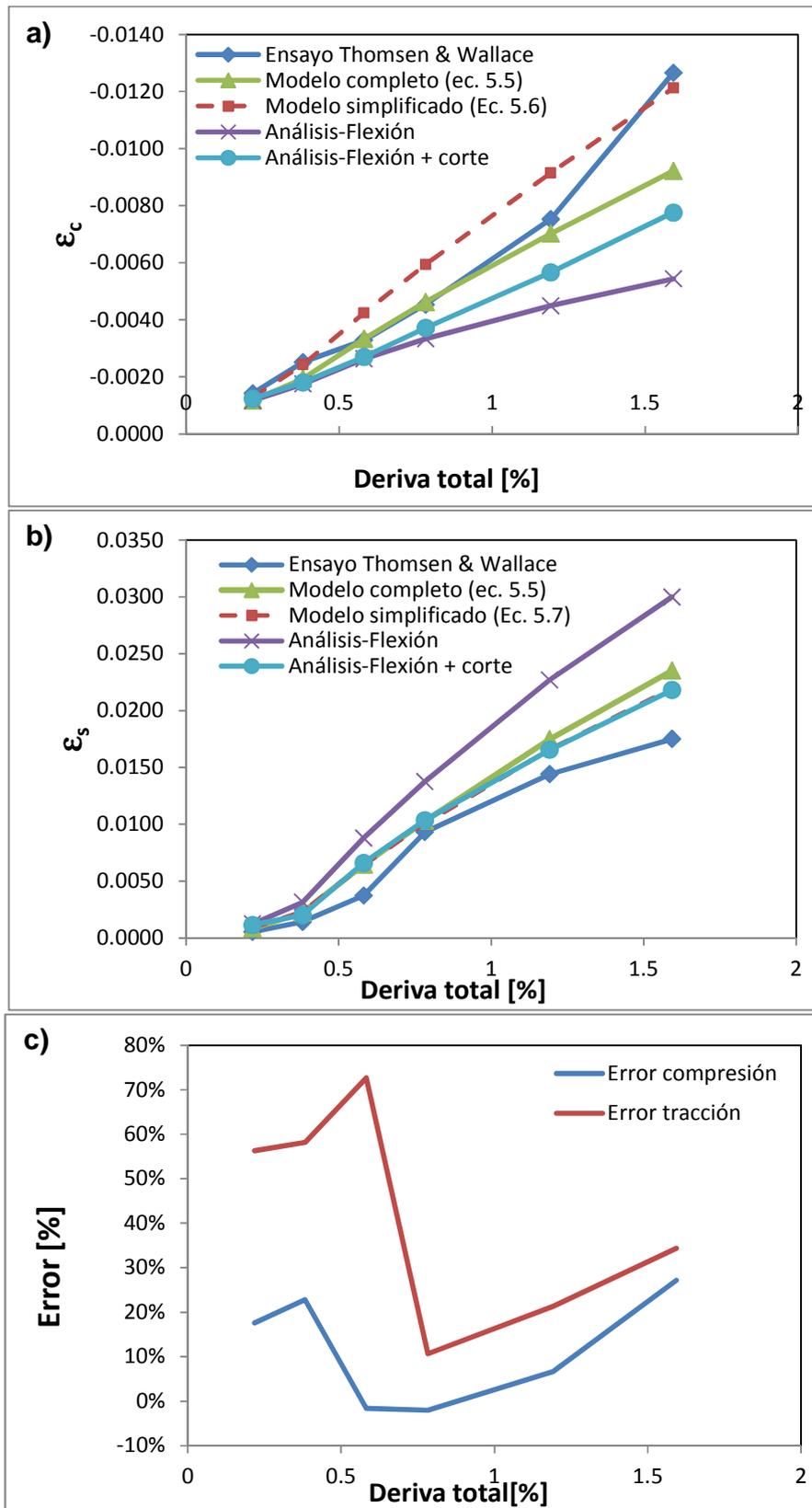


Figura 5.17: a) Deformación de compresión máxima en la base, b) Deformación de tracción máxima en la base, c) Error porcentual respecto a datos experimentales. Comparación de modelo calibrado con experimentación (RW2, Thomsen & Wallace, 1995).

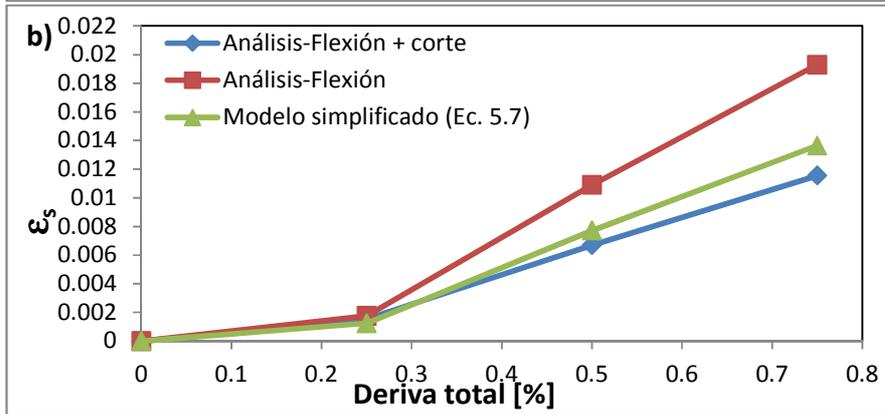
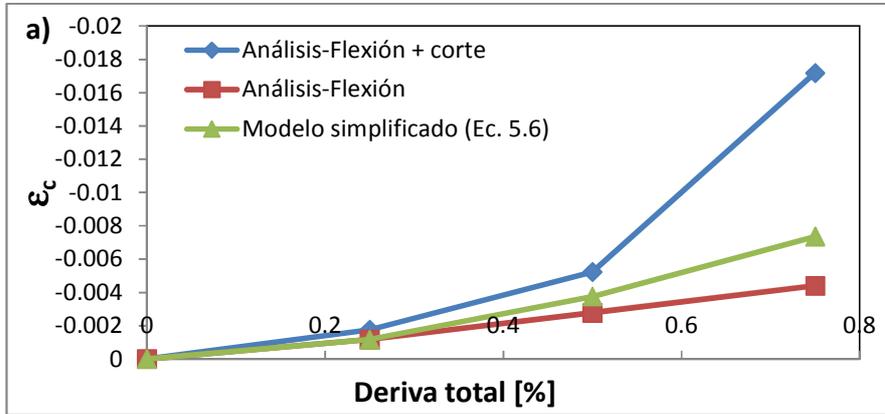
**Tabla 5-4: Factores de amplificación y reducción para probeta RW2.**

Deriva [%]	Modelo completo (Ec. 5.5)		Modelo simplificado (Ec. 5.6 y 5.7)	
	MCSAF	MTSRF	MCSAF	MTSRF
0.22	1.00	0.68	1.09	0.73
0.38	1.11	0.71	1.39	0.73
0.58	1.27	0.73	1.61	0.73
0.78	1.39	0.75	1.78	0.73
1.19	1.56	0.77	2.04	0.73
1.59	1.69	0.78	2.23	0.73

### 5.3.3. Aplicabilidad del modelo para muros no confinados.

Es de interés tener en cuenta que una amplificación de deformaciones de compresión podría tener consecuencias a la hora de tener que decidir si se confina o no el borde de un muro. Es por esto que se analizan dos casos de análisis FEM no confinados, uno con relación de aspecto baja y otro con relación de aspecto alta (2.5 y 7.5), y se comparan los resultados obtenidos con el modelo calibrado simplificado aplicado al modelo FEM de flexión y los modelos FEM de corte y flexión. Las figuras a continuación muestran la comparación para ambos muros con largos de calibre de 250 mm y 750mm, tanto para compresión como para tracción. Los resultados observados son satisfactorios para el caso de la tracción para relaciones de aspecto bajas. En la Figura 5.18-b a la Figura 5.21: a) Máxima deformación de compresión, b) Máxima deformación de tracción, c) Error, d) Diferencia análisis flexión versus flexión + corte. AR = 7.5, GL = 0.02 (750/37500), ALR = 5%, LSR = 2.5%.-b se muestran las deformaciones de tracción obtenidas según los modelos FEM de flexión + corte, FEM de flexión y el modelo calibrado simplificado aplicado al FEM de flexión. En la Figura 5.18Figura 5.18: a) Máxima deformación de compresión, b) Máxima deformación de tracción, c) Error, d) Diferencia análisis flexión versus flexión + corte. AR = 2.5, GL = 0.02 (250/12500), ALR = 5%, LSR = 2.5%.-c hasta la Figura 5.21-c se muestra el error del modelo propuesto respecto del análisis FEM de flexión + corte y en las Figura 5.18-d hasta Figura 5.21-d se muestra la diferencia porcentual de las deformaciones obtenidas del análisis FEM de flexión y flexión + corte, respecto del análisis de flexión + corte. Se observa que para la relación de aspecto de 2.5, las diferencias entre las deformaciones de tracción del análisis FEM de flexión y el de flexión más corte son del orden del 40% en promedio, mientras que el error del modelo propuesto es menor al 10% en promedio, lo que implica que el error cometido está dentro de un rango aceptable. Para relación de aspecto de 7.5, las diferencias entre el modelo de flexión y flexión más corte, rondan el 20% en promedio, mientras que el error del modelo propuesto es del mismo orden, por lo que el modelo tiene menor sentido práctico. Sin embargo, para la relación de aspecto alta, el modelo propuesto logra capturar el comportamiento del análisis FEM. En el caso de la compresión, se observa que para

todos los casos el error promedio del modelo propuesto es del mismo orden que la diferencia entre el análisis de flexión y el de flexión + corte, por lo que se considera poco práctico considerar una amplificación para los niveles de deformación bajo 0.003. Cabe destacar que tomar un largo de calibre de los análisis FEM distinto no hace una diferencia relevante dado lo anteriormente mencionado.



c)

d)

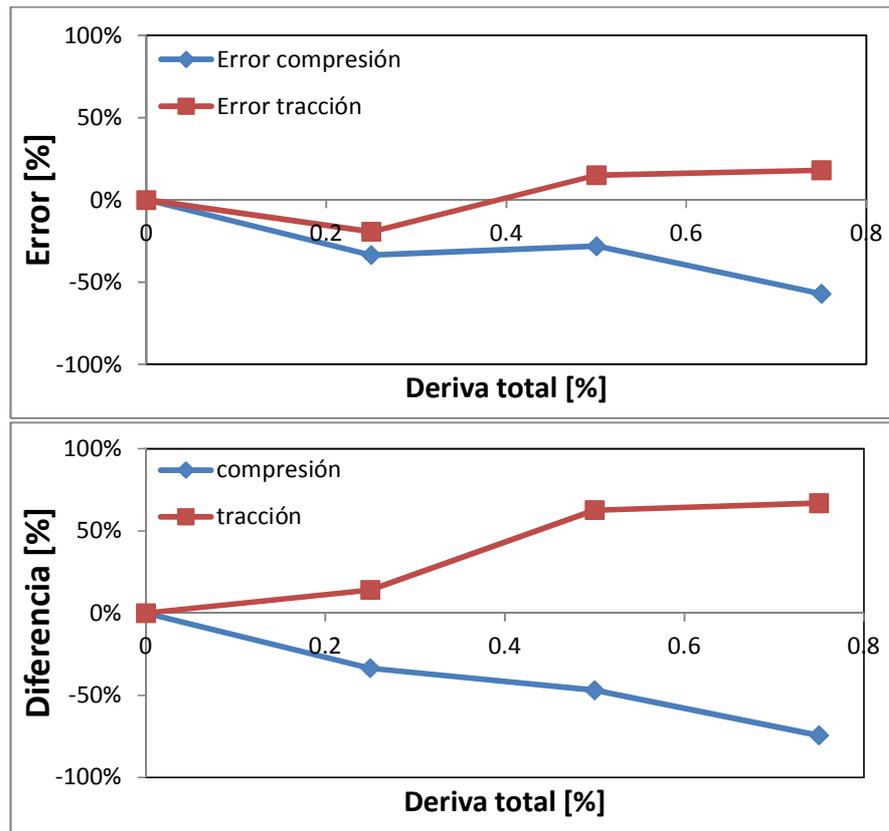


Figura 5.18: a) Máxima deformación de compresión, b) Máxima deformación de tracción, c) Error, d) Diferencia análisis flexión versus flexión + corte. AR = 2.5, GL = 0.02 (250/12500), ALR = 5%, LSR = 2.5%.

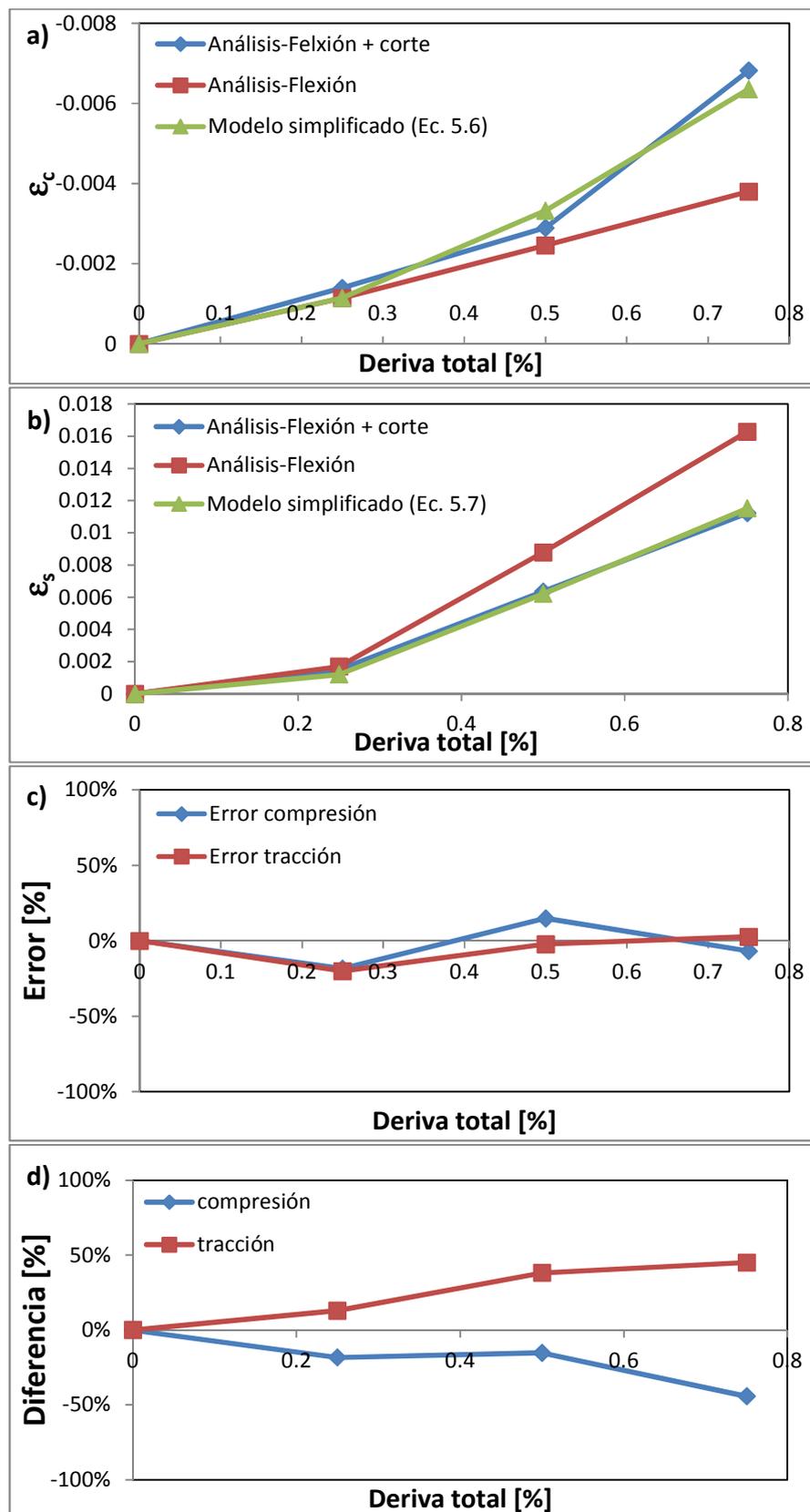


Figura 5.19: a) Máxima deformación de compresión, b) Máxima deformación de tracción, c) Error, d) Diferencia análisis flexión versus flexión + corte. AR = 2.5, GL = 0.06 (750/12500), ALR = 5%, LSR = 2.5%.

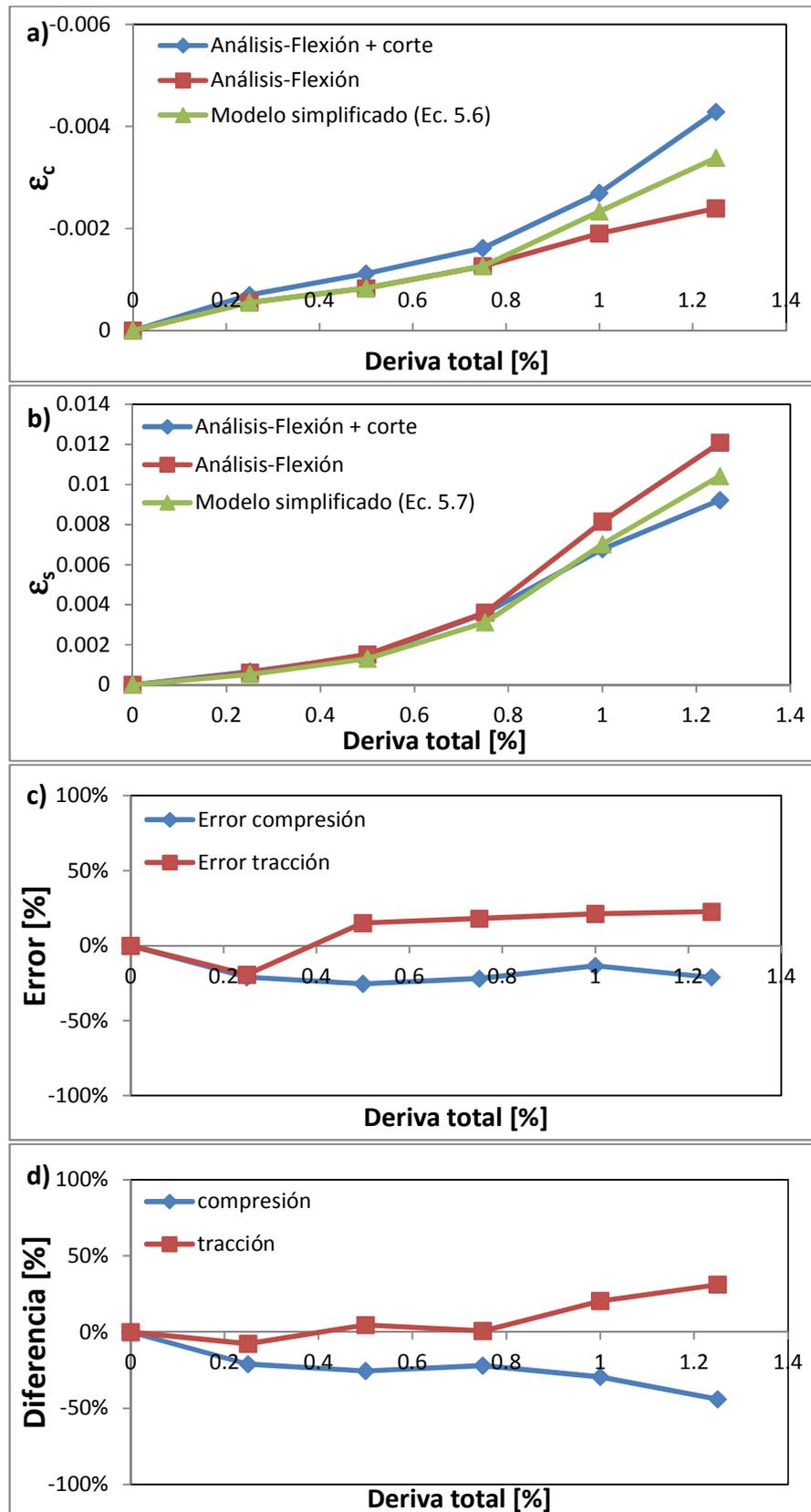


Figura 5.20:a) Máxima deformación de compresión, b) Máxima deformación de tracción, c) Error, d) Diferencia análisis flexión versus flexión + corte. AR = 7.5, GL = 0.0067 (250/37500), ALR = 5%, LSR = 2.5%.

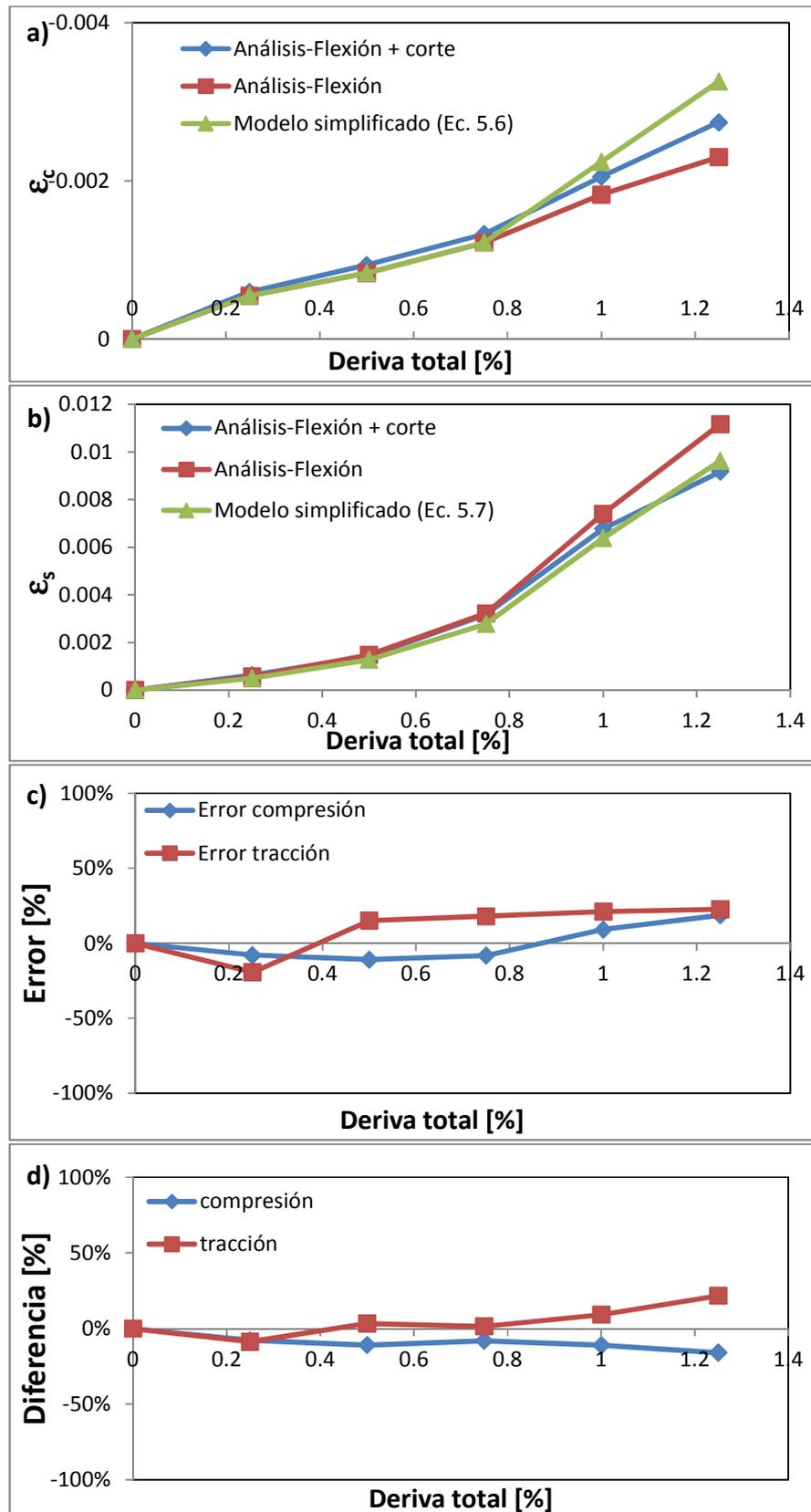


Figura 5.21: a) Máxima deformación de compresión, b) Máxima deformación de tracción, c) Error, d) Diferencia análisis flexión versus flexión + corte. AR = 7.5, GL = 0.02 (750/37500), ALR = 5%, LSR = 2.5%.

## **CAPÍTULO 6. MURO BANDERA: ANÁLISIS Y APROXIMACIÓN ANALÍTICA.**

Uno de los casos a analizar corresponde al de un muro bandera, que se caracteriza principalmente por el cambio de sección (aumento de largo de muro) a partir de cierta altura. Este análisis se centra en casos con perforaciones en la base del muro, es decir, con cambio de sección a partir del segundo o tercer piso hacia arriba. El principal objetivo en esta sección es encontrar un modelo o metodología relativamente simple para calcular la curvatura última y por ende las deformaciones de compresión y tracción en la base del muro, incluyendo los efectos del corte. Además se propone un modelo para determinar el desplazamiento de fluencia.

### **6.1. Consideraciones generales.**

Para los modelos FEM a utilizar se decide seguir los siguientes criterios:

- Largo de confinamiento: 10% del largo total del muro.
- Elementos de borde: 10% del largo total del muro ( $\gamma = 0.9$ ).
- Cuantía armadura longitudinal: 2.5% del elemento de borde.
- Cuantía armadura vertical y horizontal distribuida: 0.25%.
- Altura de piso: 2.5 m.
- Disposición de armadura longitudinal: Se dispone de armadura longitudinal continua hasta el segundo piso en el borde con el cambio de sección. En el segundo piso se incluye también armadura longitudinal de borde en el extremo extendido, la cual continúa en toda la altura del muro. En el borde continuo, la armadura es continua en toda la altura (ver figura 6.1). La armadura se considera adherida 100% en todos los casos.
- Pedestal: se considera un pedestal de hormigón elástico con el objetivo de evitar problemas numéricos por la condición de borde. Se considera una rigidez de 31528 MPa ( $4700\sqrt{45}$  MPa).
- $f'_c$ : 30 MPa.

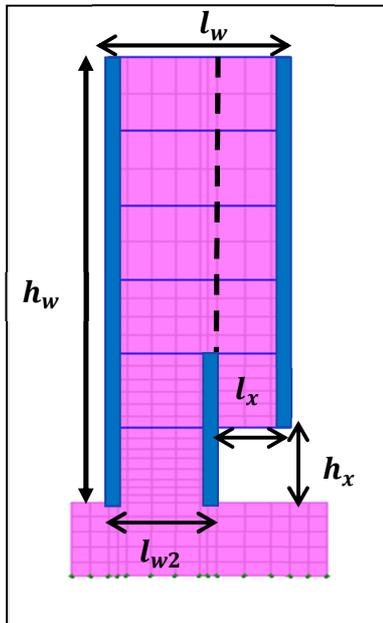
- $\varepsilon_0$ : 0.0025
- $F_y$ : 420 MPa.
- $\varepsilon_y$ : 0.0021.
- Pendiente post fluencia: 2.5%.
- Carga lateral puntual.
- Carga axial: 5% del largo de la sección completa. Esto implica tener cargas axiales en la base dependientes del tamaño de la abertura. La tabla 6.1 indica la carga axial en la base para cada caso de análisis. Mencionar que la carga axial provoca un desplazamiento lateral de techo, el cual es despreciable en comparación a los niveles de deriva plástica en los que se realiza el análisis, sin embargo, es incorporado en los análisis como parte de la deriva total.
- Discretización: Se utiliza la misma regla para la reducción de elementos en la vertical en cada piso con el objetivo de disminuir el tiempo de análisis, pero en esta sección se utilizan más elementos en los primeros pisos debido a la necesidad de observar el comportamiento no sólo en la base si no que alrededor de la abertura. Por esta razón, para mantener bajo el tiempo de análisis, se opta por reducir a 1 elemento en la vertical por piso para los pisos superiores en los modelos de 9, 10 y 15 pisos (últimos 3 pisos para modelo de 9 pisos, últimos 2 pisos para modelos de 10 pisos, y últimos 7 pisos para modelo de 15 pisos). En la horizontal en general se usan 11 elementos, excepto para los modelos con largo de abertura de 2 m, en los que se utilizan 10. La Figura 6.1-b esquematiza la malla o discretización utilizada para este análisis.

La Tabla 6-1 resume las principales características de todos los casos de análisis considerados.

Tabla 6-1: Modelos FEM de flexión para análisis muros bandera.

CASO	hw	lw	lx/lw <sup>10</sup>	hx/hw <sup>11</sup>	ALR <sup>12</sup>	LSR
--	[m]	[m]	%	%	%	%
1	15	5	10	16,67	5,56	2,5
2	25	5	10	10,00	5,56	2,5
3	37,5	5	10	6,67	5,56	2,5
4	15	5	20	16,67	6,25	2,5
5	25	5	20	10,00	6,25	2,5
6	37,5	5	20	6,67	6,25	2,5
7	15	5	40	16,67	8,33	2,5
8	25	5	40	10,00	8,33	2,5
9	37,5	5	40	6,67	8,33	2,5
10	22,5	7,5	20	11,11	6,25	2,5
11	25	5	20	10,00	6,25	1,25
12	25	5	40	20,00	8,33	2,5
13	37,5	5	40	13,33	8,33	2,5

a)



b)

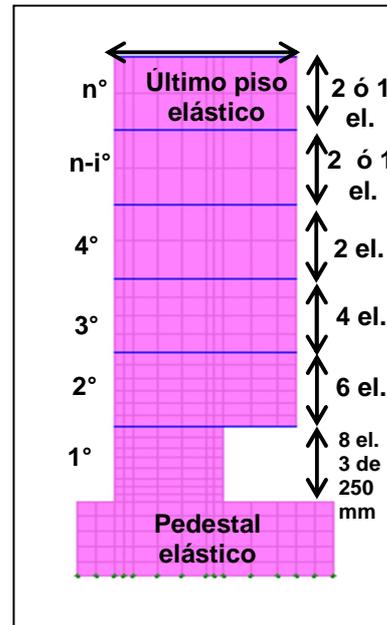


Figura 6.1: a) Distribución de armaduras longitudinales, b) Discretización (mallado) genérica. Muros bandera.

<sup>10</sup> Largo relativo de la abertura.

<sup>11</sup> Altura relativa de la abertura

<sup>12</sup> ALR: "Axial load Ratio", Razón de carga axial respecto a  $f'_c A_{g2}$ , con  $A_{g2}$  la sección en la base del muro.

Además se consideran vigas rígidas a nivel de cada piso para simular el efecto de la losa. En la Figura 6.1-a la línea punteada marca el ancho del muro rectangular análogo con el que se hace la comparación, de largo  $l_{w2}$ , y las franjas azules representan la disposición de armadura longitudinal de borde. También se indica las dimensiones de la abertura como  $l_x$  y  $h_x$  para el largo y altura respectivamente.

## 6.2. Observaciones preliminares.

Se analiza el perfil de curvaturas en la altura del muro y distribución de plastificación (altura en la cual ha fluido la fibra más traccionada) en modelos FEM de flexión y se compara con un muro rectangular de largo igual al largo basal del muro con discontinuidad. Se varían los siguientes parámetros:

- Largo de la discontinuidad ("lx"): Se observan casos con 10%, 20% y 40% respecto al largo de la sección total  $l_w$  (0.5 m, 1 m y 2 m).
- Relación de aspecto ("AR1"): 3, 5 y 15 (respecto al largo total del muro  $l_w$ ).
- Largo del muro ("lw"): 5 m y 7.5 m. Al variar el largo del muro se mantienen las relaciones de aspecto respecto al largo basal del muro, y la relación entre el largo total y el largo basal.

Al comparar el comportamiento de los muros rectangulares con los muros con abertura de borde en la base, (o más bien, con cambio de sección), se observan dos fenómenos interesantes:

### 6.2.1. Fluencia temprana.

Si se observa el punto de primera fluencia como el punto en el cual la fibra más traccionada del muro fluye en la base (alcanzando el nivel de fluencia aparente), se observa que para los muros con abertura ésta ocurre tempranamente en comparación al muro rectangular. Éste efecto se ve aumentado si el largo de la abertura es mayor en relación al largo del muro, y también se ve aumentado con la relación de aspecto del muro. En la figura 6.2 se muestra este efecto, donde se observa que el muro con abertura comienza a fluir antes que el muro rectangular. Es por esto que es de interés determinar una metodología para el desplazamiento elástico, que será distinto al de un muro rectangular.

## 6.2.2. Concentración de plastificación.

Las figuras a continuación muestran la altura en la que se está alcanzando la fluencia en la fibra más traccionada, es decir, representan una distribución de la plastificación en la altura en función del nivel de deriva, comparando el muro rectangular con el muro con abertura. Se observa que para los muros con abertura, la plastificación tiende a estancarse una vez que alcanza la altura de la abertura basal, lo que sugiere que toda la sección superior del muro (sección con mayor largo) tiende a comportarse de forma más rígida en comparación a lo que sucede en la base del muro. Éste fenómeno sucede para todos los tamaños de abertura analizados y es más notorio en muros con mayor relación de aspecto, lo cual se explica con el hecho de que la zona de plastificación de un muro rectangular se parece más a la de un muro con perforación si es que su desarrollo no sobrepasa significativamente la altura de la abertura (es decir, si la abertura es relativamente alta respecto de la altura del muro). En la Figura 6.2 a la Figura 6.4 se muestran la distribución de plastificación para muros con 6, 10 y 15 pisos de altura, de largo total 5 m, para largos de abertura de 20% y 40% del largo total (izquierda y derecha respectivamente), comparando con el respectivo caso rectangular.

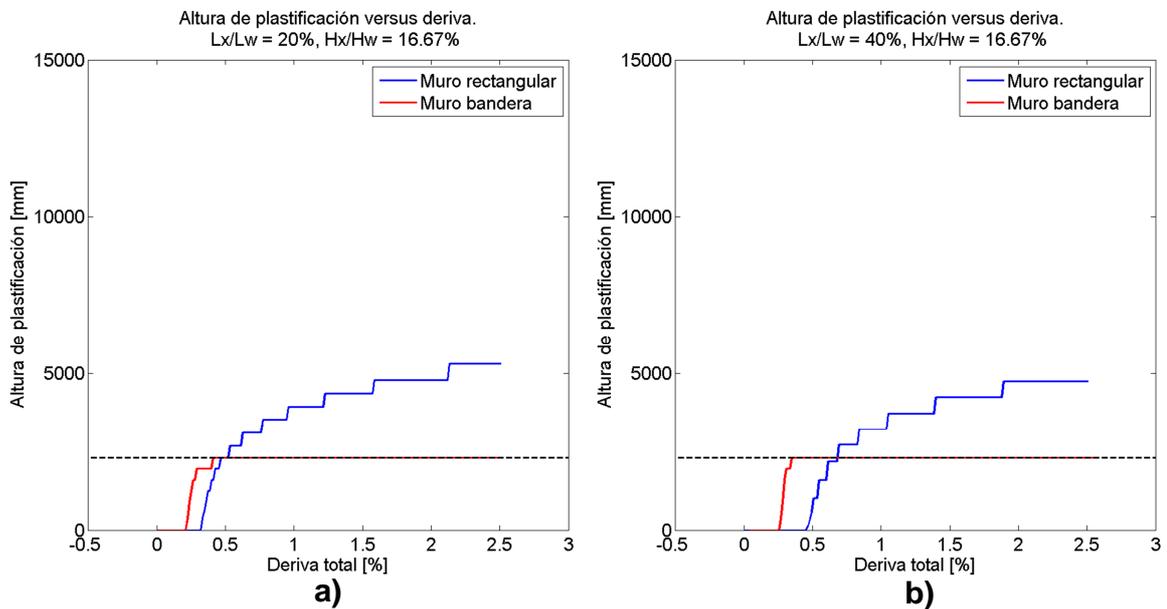


Figura 6.2: Distribución de plastificación versus deriva para casos con 6 pisos y aberturas de a) 20% y b) 40% del largo del muro.

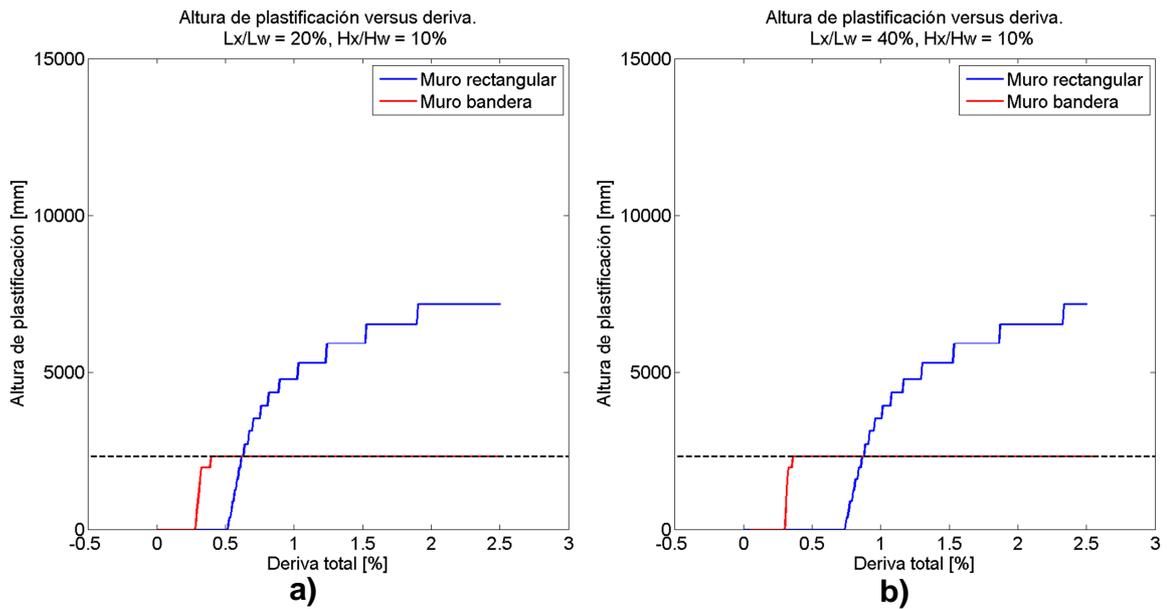


Figura 6.3: Distribución de plastificación versus deriva para casos con 10 pisos y aberturas de a) 20% y b) 40% del largo del muro.

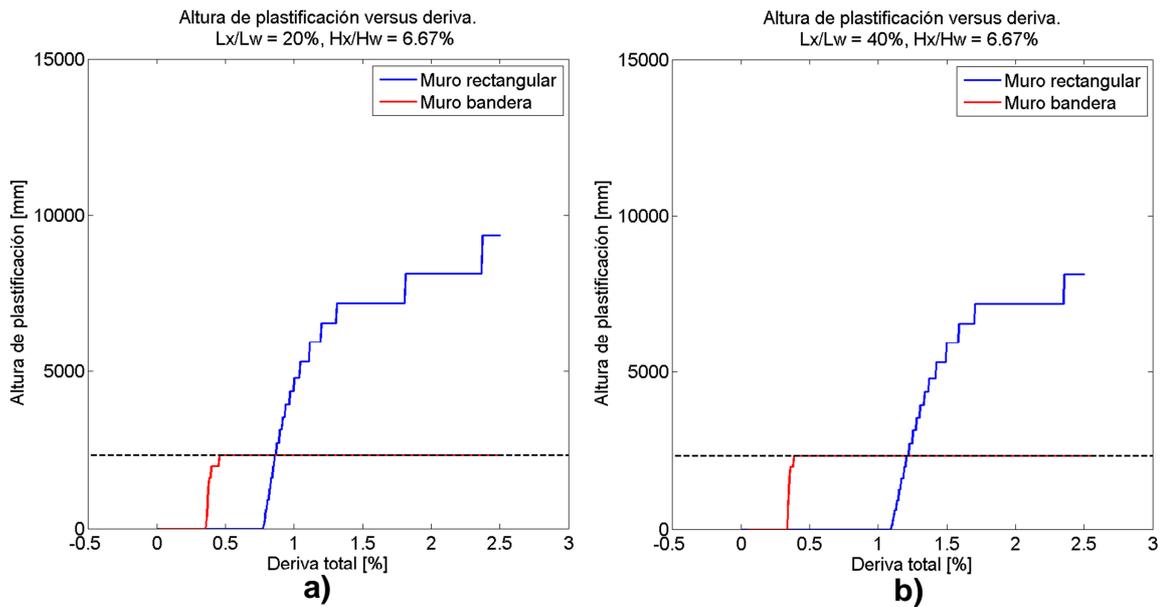


Figura 6.4: Distribución de plastificación versus deriva para casos con 15 pisos y aberturas de a) 20% y b) 40% del largo del muro.

Para tener una noción genérica de lo que sucede con las deformaciones tanto en la zona de abertura como en la zona de sección completa, las figuras a continuación muestran las curvaturas calculadas en cada capa de elementos que constituyen al modelo FEM de flexión, comparando un muro con abertura versus un muro rectangular análogo (ver Figura 6.1). En la figuras, en el cuadrante negativo se muestran las curvaturas obtenidas del modelo rectangular análogo (ver Figura 6.1), mientras que en

el cuadrante positivo se muestran las curvaturas del modelo con abertura en la base. A la izquierda se muestran los modelos con aberturas de un 20% del largo total, y a la derecha modelos con aberturas de un 40%. Hacia abajo varía la relación de aspecto de cada modelo: 6, 10 y 15 pisos respectivamente, la altura de la abertura se deja fija en un piso, por lo que la altura relativa ( $h_x/h_w$ ) de la abertura disminuye con el aumento de pisos. La curvatura se calcula como sigue:

$$\phi = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_c}{l_w^*} \quad 6.1.$$

Donde  $\varepsilon_c$  y  $\varepsilon_s$  corresponden a las deformaciones de compresión y tracción máximas en cada capa y  $l_w^*$  es el largo del muro en cada capa. Por sobre la abertura, la sección aumenta, por lo que disminuyen bastante las curvaturas calculadas con la ecuación 6.1. Es por esto que en las Figura 6.5 a Figura 6.7 se muestran las curvaturas amplificadas por un factor igual a la relación entre el largo mayor y el largo menor del muro cuando se está por sobre la abertura, para hacer comparables directamente los valores en toda la altura del muro.

Se observa que las curvaturas tienden a concentrarse en la zona de la abertura, corroborando lo que se menciona anteriormente: las deformaciones por sobre la abertura no son significativas en comparación a las deformaciones bajo la misma. Se destaca que el largo de la abertura no es muy relevante para este efecto, ya que para ambos casos de largo ( $l_x/l_w = 20\%$  y  $40\%$ ) las curvaturas se concentran en la base. Por otro lado, la relación de alturas de la abertura y el muro ( $h_x/h_w$ ) sí tiene un efecto significativo en la concentración de curvatura en la base. Lo anterior sugiere que un modelo de rótula plástica concentrada rectangular en la base es lo indicado para cuantificar la curvatura basal en casos con baja altura relativa de abertura y largo relativo elevado.

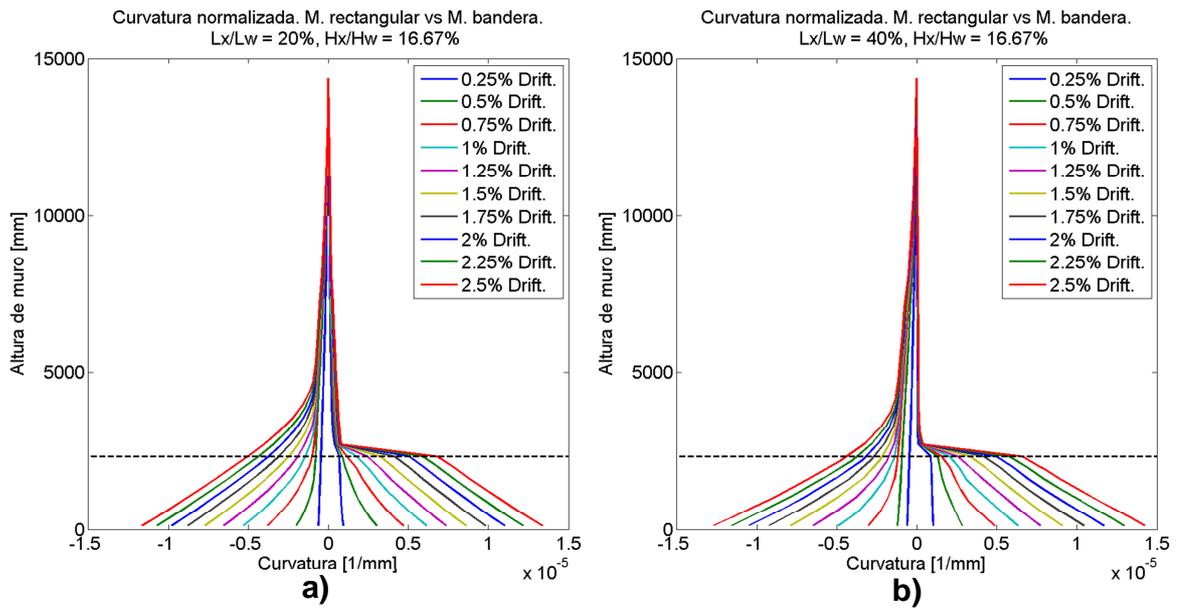


Figura 6.5: Curvaturas muro bandera versus muro rectangular de 6pisos, aberturas de a) 20% del largo total y b) 40% del largo total.

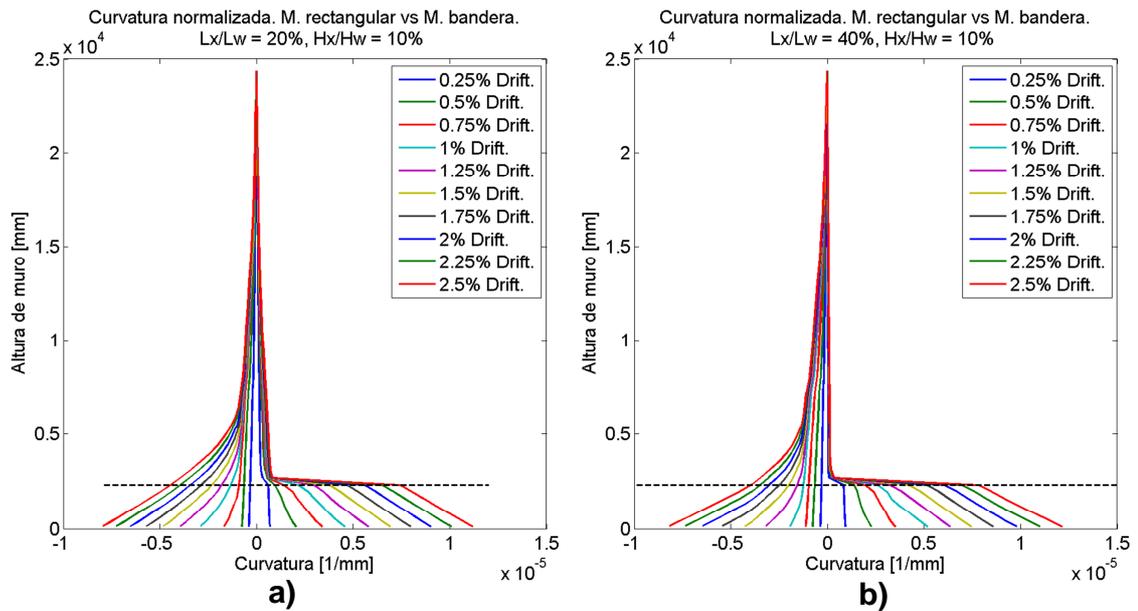


Figura 6.6: Curvaturas muro bandera versus muro rectangular de 10 pisos, aberturas de a) 20% del largo total y b) 40% del largo total.

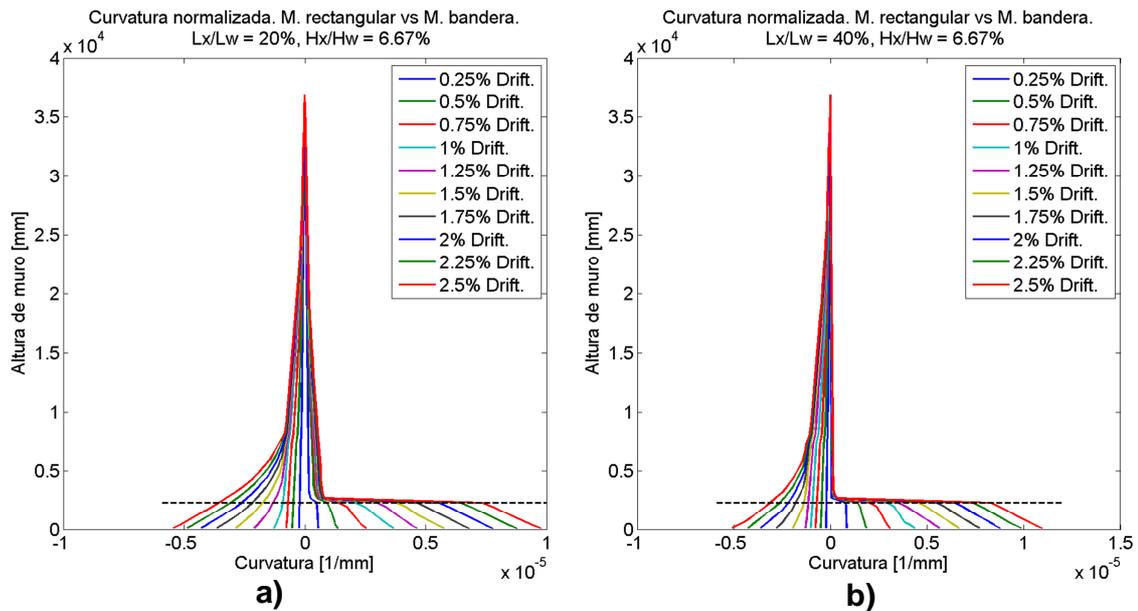


Figura 6.7: Curvaturas muro bandera versus muro rectangular de 15 pisos, aberturas de a) 20% del largo total y b) 40% del largo total.

De las figuras 6.2 a 6.4 surge el interés por determinar un modelo para el rango elástico, que relacione el desplazamiento de fluencia del muro con la curvatura de fluencia y eventualmente las dimensiones de la abertura. Las Figura 6.8 a Figura 6.10 se muestran, para casos con  $h_x/h_w = 16.67\%$ ,  $10\%$  y  $6.67\%$ , las curvaturas de primera fluencia y fluencia al nivel de la discontinuidad al variar el largo de la abertura para casos de análisis FEM de flexión pura. Se observa que un modelo de curvatura concentrada en la base podría ser útil para describir el desplazamiento de fluencia en los casos con aberturas de largo relativo importante, mientras que para los otros casos se debe buscar otra alternativa. Se observa que al aumentar la altura relativa de la abertura ( $h_x/h_w$ ), la concentración de curvatura basal de fluencia no tiende a atenuarse, si no que se mantiene.

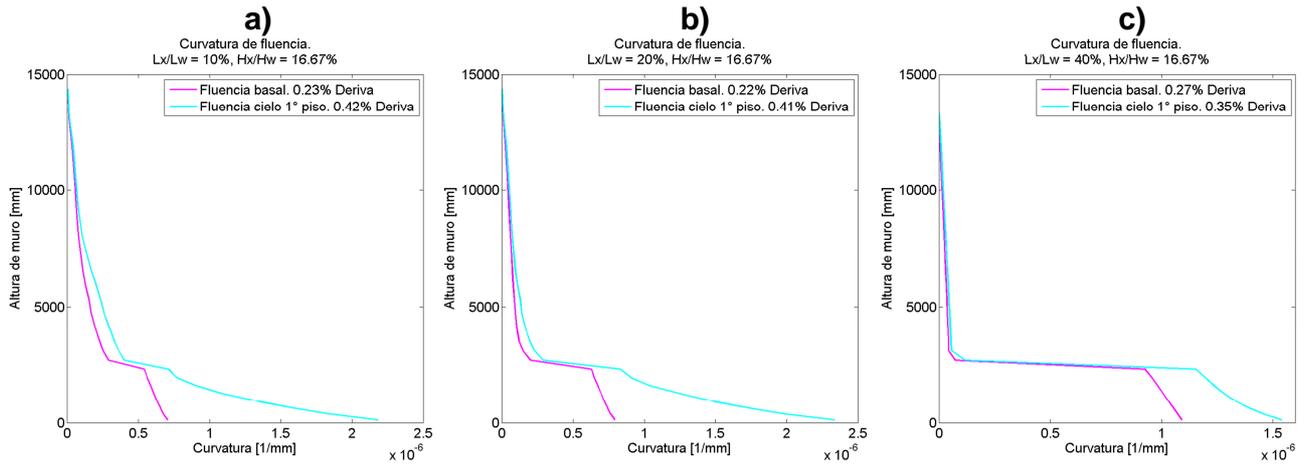


Figura 6.8: Curvaturas de fluencia basal y a nivel de la discontinuidad.  $h_x/h_w = 16.67\%$ , a)  $l_x/l_w = 10\%$ , b)  $20\%$  y c)  $40\%$ .

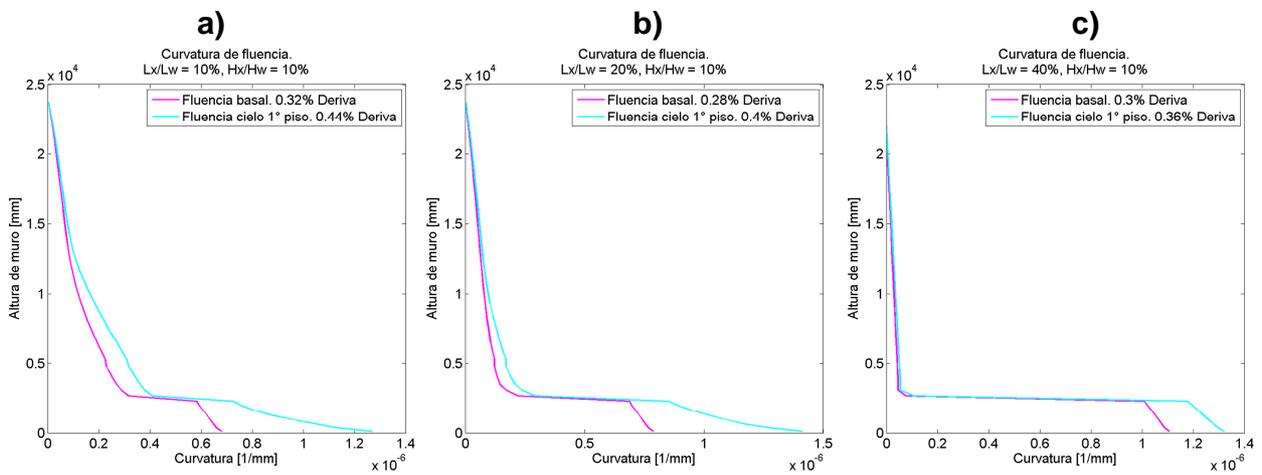


Figura 6.9: Curvaturas de fluencia basal y a nivel de la discontinuidad.  $h_x/h_w = 10\%$ , a)  $l_x/l_w = 10\%$ , b)  $20\%$  y c)  $40\%$ .

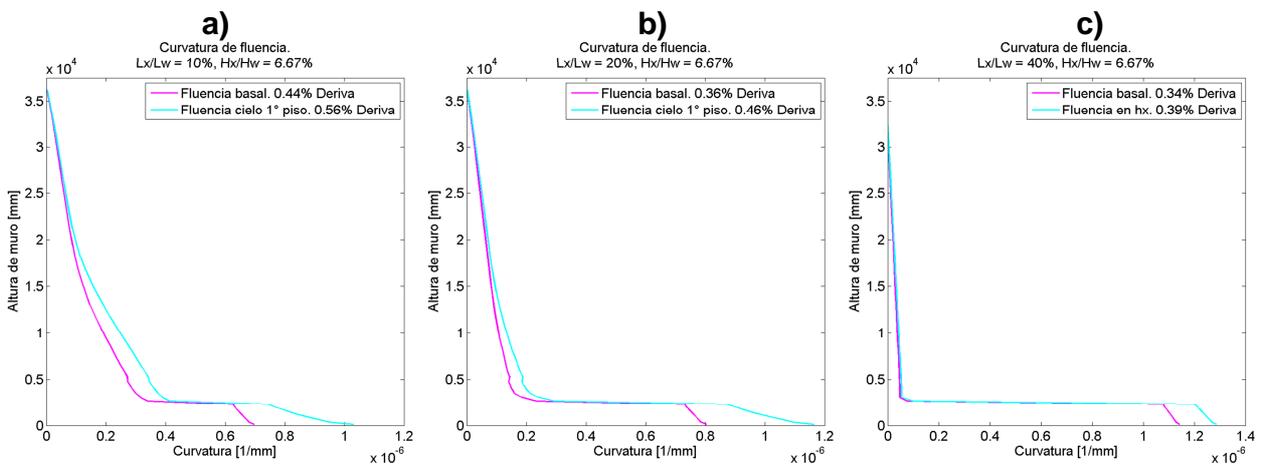


Figura 6.10: Curvaturas de fluencia basal y a nivel de la discontinuidad.  $h_x/h_w = 6.67\%$ , a)  $l_x/l_w = 10\%$ , b)  $20\%$  y c)  $40\%$ .

### **6.3. Modelos de flexión pura para muros tipo bandera.**

Como se menciona en la sección anterior, es de interés plantear un modelo que relacione el desplazamiento de techo con las deformaciones basales del muro, las cuales parecen ser significativas sólo bajo el nivel del cambio de sección, además de las dimensiones de la abertura con el desplazamiento elástico. Utilizando modelos FEM de flexión pura, se procede a analizar la efectividad de distintos modelos propuestos que se cree pueden constituir una solución efectiva dados los resultados previos observados. Las características generales de los modelos FEM utilizados para el análisis se listan en la tabla 6.1, cuyos resultados son usados para los modelos propuestos en el rango elástico y el rango plástico.

Los modelos propuestos incluyen una estimación del desplazamiento elástico del muro y curvatura última para deformaciones plásticas importantes. Cada una de las propuestas se detalla a continuación para cada nivel de deformación.

#### **6.3.1. Modelo para desplazamiento elástico.**

En primera instancia se evalúa la curvatura de fluencia ( $\phi_y$ ) de los muros bandera en comparación a muros rectangulares. Los resultados indican que no hay diferencias significativas en los 13 casos de análisis FEM de flexión, como se muestra en la figura 6.11.

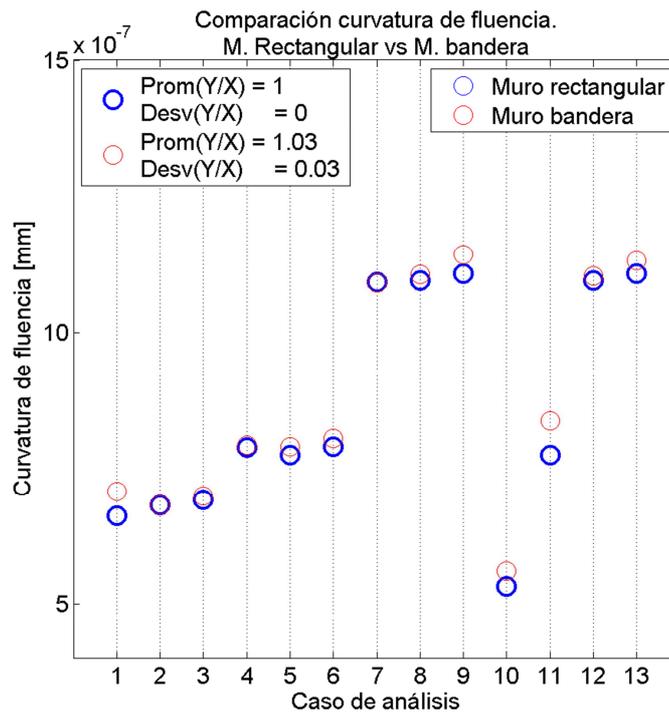


Figura 6.11: Comparación curvatura de fluencia. Muro rectangular versus perforado.

Por lo anterior, se mantiene la expresión de Massone & Alfaro (2014?) como propuesta para estimar la curvatura de fluencia (ver ecuación 2.2).

Como se observa en los resultados previos, los muros tipo bandera tienden a adelantar la fluencia respecto a un muro rectangular de sección basal equivalente (largo de muro igual al largo basal de muro bandera). Para abordar este problema se estudian y comparan 3 posibles soluciones.

- a. **Modelo “MA”:** Modelo calibrado de Massone & Alfaro (2014), para muros rectangulares y carga lateral triangular, incluye el efecto del agrietamiento en la altura del muro y del endurecimiento del acero (ver ecuación 2.5). Se espera que este modelo sea adecuado para aberturas de largo relativo pequeño y altura relativa alta.
- b. **Modelo “INT”:** Modelo determinado a partir de la doble integración en la altura de la curvatura, modificada posteriormente para contar con el efecto del agrietamiento en la altura. En primera instancia se determina un modelo básico, que asume una rigidez no agrietada en toda la altura, y considera el cambio de sección que ocurre debido a la abertura basal y una carga lateral

puntual. El modelo básico, luego de la doble integración y eliminando los términos de orden 3, queda como sigue:

$$\delta_y = \phi_y h_w^2 \left[ \left( \frac{1}{3} - \left( \frac{LX}{LW} \right)^2 - \left( \frac{LX}{LW} \right) + \frac{1}{3} \right) \left( 1 - \frac{3}{2} \left( \frac{HX}{HW} \right)^2 \right) + 3 \left( \left( \frac{LX}{LW} \right) - \left( \frac{LX}{LW} \right)^2 \right) \left( \left( \frac{HX}{HW} \right) - \frac{3}{2} \left( \frac{HX}{HW} \right)^2 \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{HX}{HW} \right)^2 \right] \quad 6.2.$$

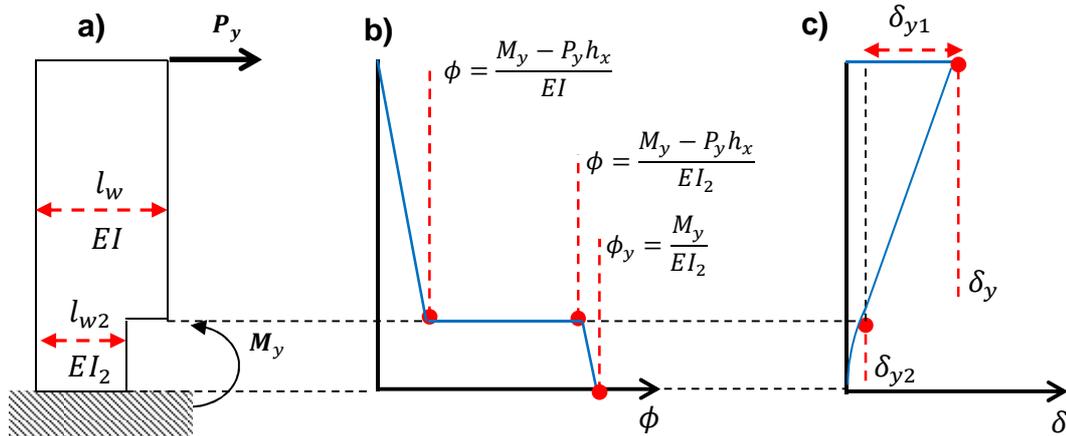


Figura 6.12: a) Esquema muro bandera, b) Distribución de curvatura elástica, c) Distribución de desplazamiento elástico en la altura. Modelo "INT".

La Figura 6.12-b muestra la distribución de curvatura según el modelo "INT". La Figura 6.12-c muestra un esquema del desplazamiento elástico que se obtiene al integrar dos veces la curvatura en la altura, donde:

$$\delta_{y2} = \int_0^{h_x} \int \phi(y) \quad \delta_{y1} = \int_{h_x}^{h_w} \int \phi(y) \quad \delta_y = \delta_{y2} + \delta_{y1}$$

Para la simplicidad del modelo y debido a que el parámetro \$hx/hw\$ es pequeño (máximo 20% en este análisis), se considera eliminar sus términos de segundo orden, mientras que se decide mantener los términos de segundo orden del parámetro \$lx/lw\$, el cual puede llegar a valores mayores (40% máximo en este análisis). Se observó que esta medida cambia insignificamente los resultados, por lo que el modelo básico reducido finalmente queda como:

$$d_y = \phi_y h_w^2 \left[ \frac{1}{3} - \lambda(1 - \lambda)(1 - 3\eta) \right] \quad 6.3.$$

Dónde:

$$\lambda = \frac{l_x}{l_w}$$

$$\eta = \frac{h_x}{h_w}$$

$l_x =$  largo de la abertura

$h_x =$  altura de la abertura

$l_w =$  largo del muro (sección mayor)

$h_w =$  altura de muro.

La expresión 2.5 es válida para un muro no agrietado en la altura y con carga lateral puntual. Para incorporar el efecto del agrietamiento en la altura de manera simple, se puede considerar incorporar el factor calibrado por Massone & Alfaro (2014), modificado para contar por la carga puntual. El factor de los autores fue calibrado para carga lateral distribuida triangular. Considerando la expresión de Paulay (2002) para muros completamente agrietados en la altura con carga triangular (ecuación 2.6)

$$d_y = \frac{11}{40} \phi_y h_w^2 \quad 6.4.$$

Y tomando en cuenta la expresión 6.3 para un muro rectangular ( $\lambda = 0$ ), se observa que el desplazamiento de fluencia se vería aumentado en al menos 1.21 veces al pasar de carga triangular a carga puntual (un poco más si el muro con carga puntual se considera completamente agrietado). Tomando como referencia el factor 1.21, podemos ajustar la expresión 6.3 incluyendo la calibración de Massone & Alfaro (2014?), amplificada en 1.21, quedando finalmente como sigue:

$$d_y = \phi_y h_w^2 \rho_b^{0.14} [0.4 - \lambda(1 - \lambda)(1 - 3\eta)] \quad 6.5.$$

El factor  $\rho_b^{0.14}$  proviene de la ecuación 2.3 de Massone & Alfaro (2014?). El procedimiento anterior supone que el efecto del agrietamiento en la altura no influye significativamente en el término dependiente de las dimensiones de la abertura, lo cual queda propuesto evaluar. El supuesto anterior se sustenta en considerar que el factor de la abertura ya tiene una manipulación previa (omisión de términos superiores), y en los resultados obtenidos.

Bajo los mismos supuestos, de forma paralela se podría proponer una expresión para el desplazamiento de fluencia del muro con carga triangular, la cual quedaría como sigue:

$$d_y = \phi_y h_w^2 \rho_b^{0.14} [0.33 - \lambda(1 - \lambda)(1 - 3\eta)] \quad 6.6.$$

Quedaría pendiente la evaluación de la expresión 6.6.

- c. Modelo “PH”:** como se menciona en la sección de resultados previos, una posible solución simple puede ser considerar un modelo de curvatura concentrada en la base (análogo a un modelo de rótula plástica concentrada) para el desplazamiento de fluencia. Se espera que este modelo sea efectivo para largos de abertura grandes.

$$d_y = \phi_y h_x \left( h_w - \frac{h_x}{2} \right) \quad 6.7.$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los modelos propuestos, y se da una recomendación indicando el modelo adecuado de acuerdo a las dimensiones de la abertura. La tabla 6.2 indica para cada tamaño de abertura analizado, la precisión de cada modelo, señalando el modelo que mejor se ajusta al análisis (la precisión es calculada como  $\frac{d_{y\text{mod}}}{d_{y\text{FEM}}}$ ). La tabla 6.1 muestra los rangos aceptables de cada modelo considerando un máximo de aproximadamente 20% de

diferencia respecto al análisis. La Figura 6.13 muestra gráficamente la información de la tabla 6.2.

**Tabla 6-2: Promedio de modelos propuestos desplazamiento elástico muros bandera.**

Promedios modelos de desplazamiento elástico		LX/LW											
		10%				20%				40%			
		Mejor	MA	INT	PH	Mejor	MA	INT	PH	Mejor	MA	INT	PH
<b>HX/HW</b>	20%	--	--	--	--	--	--	--	--	<b>PH</b>	1.32	0.89	0.99
	16.67%	<b>MA</b>	1.1	0.88	0.7	<b>INT</b>	1.26	0.92	0.81	<b>PH</b>	1.45	0.92	0.93
	13.33%	--	--	--	--	--	--	--	--	<b>INT</b>	1.79	1	0.94
	11.11%	--	--	--	--	<b>INT</b>	1.53	0.96	0.67	--	--	--	--
	10%	<b>INT</b>	1.29	1.01	0.51	<b>INT</b>	1.67	1.07	0.7	<b>INT</b>	2.17	1.12	0.86
	6.67%	<b>INT</b>	1.41	1.06	0.38	<b>INT</b>	2	1.22	0.54	<b>PH</b>	2.98	1.34	0.81

**Tabla 6-3: Rangos recomendados para cada modelo de desplazamiento elástico en muros bandera**

Modelo	Rango de validez	
	LX/LW	HX/HW
<b>MA</b>	<b>&lt;= 20%</b>	<b>&gt; 15%</b>
<b>INT</b>	<b>10% - 40%</b>	<b>10% - 20%</b>
	<b>10% - 20%</b>	<b>5% - 10%</b>
<b>PH</b>	<b>&gt;= 40%</b>	<b>10% - 20%</b>

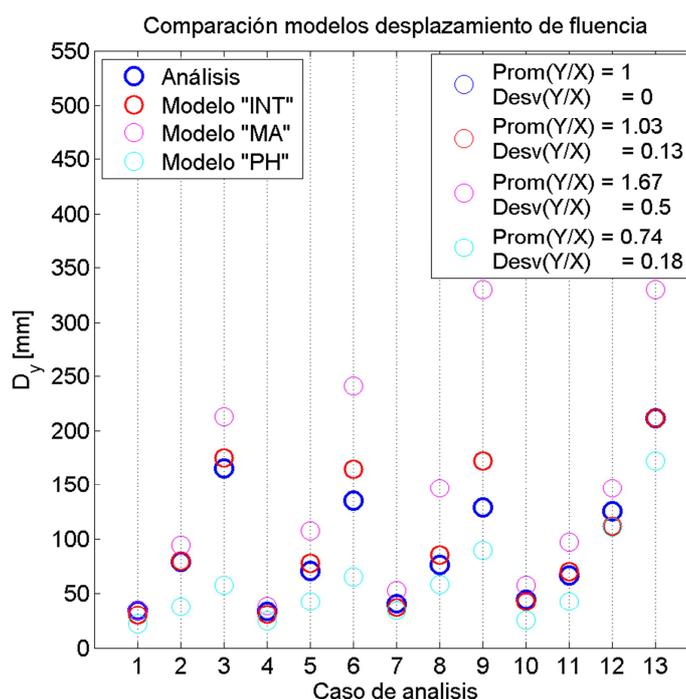


Figura 6.13: Desplazamiento elástico obtenido con modelos MA, INT y PH en comparación al análisis.

Como regla general, el modelo "INT" (ecuación 6.5) tiene la mejor aceptación general en los rangos analizados.

### 6.3.2. Modelo para curvatura última en el rango plástico.

Acorde a los resultados previos, se comparan y analizan 3 alternativas como solución para la curvatura última, descritos a continuación.

- a. **Modelo "MA"**: modelo que mantiene la expresión calibrada de Massone & Alfaro (ecuaciones 2.1 a 2.8). Se espera que este modelo constituya una buena aproximación para aberturas altas y de largo pequeño (muros casi rectangulares).
- b. **Modelo "PH"**: modelo de rótula plástica concentrada, con largo de rótula igual a aproximadamente la altura de la abertura. Este modelo constituye una solución simple y no modifica de forma drástica lo que actualmente se

recomienda en los códigos de diseño. Se espera que sea práctico para largos de abertura grandes y alturas de abertura pequeñas.

$$\phi_u = \frac{d_u}{h_x \left( h_w - \frac{h_x}{2} \right)} \quad 6.8.$$

Dónde:

$d_u$  : desplazamiento de diseño

$\phi_u$  : Curvatura última.

$h_w$  : altura del muro

$h_x$  : Altura de la abertura.

- c. Modelo “LMA-INT”:** modelo basado en limitar el desarrollo del largo de rótula plástica hasta la altura de la abertura. Se basa en lo observado en la figuras 6.2 a 6.4, dónde se aprecia que la plastificación tiende a estancarse en la altura del cambio de sección mientras que el perfil de curvaturas se aproxima cada vez más a un rectángulo basal a medida que aumenta la deriva, a menos que el desarrollo de la plastificación no alcance a sobrepasar significativamente el cambio de sección. Se considera que se debe limitar la rótula plástica directamente, y no el largo de plastificación, ya que el efecto de concentración de curvaturas en la base causado por el cambio de sección tiende a igualar estos dos valores, que para un muro rectangular se relacionan aproximadamente por:

$$l_p = \frac{l_p^*}{2}$$

Un análisis más estricto debiera considerar una calibración del largo de rótula plástica directamente con muros con aberturas, pero al menos el enfoque tomado cumple con entregar resultados satisfactorios en un rango considerable y de forma simple.

Este modelo pretende ser una solución más genérica que los modelos anteriores, tratando de cubrir un mayor rango de tamaños de abertura con una precisión aceptable, ya que da cuenta de la variabilidad de alturas relativas de aberturas. El modelo toma como base las expresiones de Massone & Alfaro (2014), pero incluyendo el desplazamiento de fluencia propuesto para muros con aberturas (sección 6.1.3.1) y las modificaciones ya descritas.

$$\phi_u = \phi_y + \frac{d_u - \bar{d}_y}{\beta l_p \left( h_w - \frac{l_p}{2} \right)} \quad 6.9.$$

$$\phi_y = K \frac{\varepsilon_y}{l_w} \quad 6.10.$$

$$K = 1.25 + 1.69 \frac{P}{f'_c A_g} + 0.65 \rho_b \quad 6.11.$$

$$d_y = \phi_y h_w^2 \rho_b^{0.14} [0.4 - \lambda(1 - \lambda)(1 - 3\eta)] \quad 6.12.$$

$$l_p = (0.2l_w + 0.05z) \left( 1 - \frac{1.5P}{A_g f'_c} \right) (6.7\Delta_p^{0.3}) \leq h_x \quad 6.13.$$

$$\bar{d}_y = d_y \left[ 1 + 0.9 \left( \frac{l_p}{h_w} \right)^{0.23} \right] \quad 6.14.$$

Donde:

$\varepsilon_{sh}$  : Deformación unitaria para la cual el acero endurece.

$\Delta_p$  : Deriva de techo plástica, definida como  $\Delta_u - \Delta_y$

$\beta$  : Factor que da cuenta de la no linealidad de la curvatura en la zona de rótula plástica.

P : Carga axial

$\bar{d}_y$  : desplazamiento elástico, estimado como  $d_y * k$ , con  $k = 1 + 0.9 \left( \frac{l_p}{h_w} \right)^{0.23} \approx 1.4$

$f'_c$  : Resistencia cilíndrica hormigón.

$A_g$  : Área bruta de la sección.

z : Relación entre el momento y corte basal.

$\rho_b$  : Cuantía de refuerzo longitudinal de borde.

$\varepsilon_y$  : Deformación de fluencia del acero.

$\lambda$  :  $l_x/l_w$ , largo relativo de abertura

$\eta$  :  $h_x/h_w$ , altura relativa de la abertura.

Para los modelos “MA” y “LMA-INT” se estimó un valor de  $\beta = 0.63$  en base a los resultados obtenidos de un muro rectangular con las características del acero y cuantías idénticas a las utilizadas en 12 de los modelos FEM de flexión. Este valor se calcula utilizando los datos del análisis FEM (curvatura última, desplazamiento elástico, largo de plastificación y curvatura de fluencia) y despejando  $\beta$  de la ecuación 6.9. Lo anterior se debe a que se encontró que el patrón de carga lateral (puntual en este caso) tiene un impacto importante en el valor del factor  $\beta$ , cuya expresión conocida fue calibrada para carga triangular. Al utilizar este valor estimado se logra una mejora del 30% aproximadamente en el resultado final. El valor de  $\beta$  estimado versus la deriva se grafica en la Figura 6.14 para el rango plástico, en el que tiende a ser constante acorde al método utilizado.

Los resultados de cada modelo se presentan en la Figura 6.15 a la Figura 6.17 a continuación y finalmente se da una recomendación de rangos para el uso de cada modelo. La Figura 6.15-a a la Figura 6.17-a muestran en colores la precisión promedio del modelo (valor modelo/valor análisis), y la Figura 6.15-b a la Figura 6.17-b la desviación estándar, graficando los datos sobre el plano de dimensiones de abertura analizados; color cercano a rojo implica una mejor cercanía a 1 en el promedio y una mejor cercanía a 0 en la desviación estándar, mientras que color amarillo implica una precisión baja respecto del análisis (lejos de 1 en el caso del promedio y lejos de 0 en el caso de la desviación). Notar que los colores están escalados en el rango de resultados mostrados en cada figura, por lo que no necesariamente colores rojo o amarillo significa buena o mala precisión, sino que son útiles para observar como varía la precisión en el plano de dimensiones, es por esto que se muestra junto al punto el valor obtenido para dejar clara la precisión obtenida. La precisión se calcula como el promedio de los valores obtenidos del modelo divididos por los valores obtenidos del análisis tomando en cuenta puntos de deriva desde 0 hasta 2.5%, separados por 0.05%, filtrando los datos que se encuentren por debajo de la primera fluencia, esto con el objetivo de analizar la efectividad del modelo sólo en el rango plástico. Por lo anterior no todos los casos de análisis tienen la misma cantidad de puntos, pero la variación no es significativa.

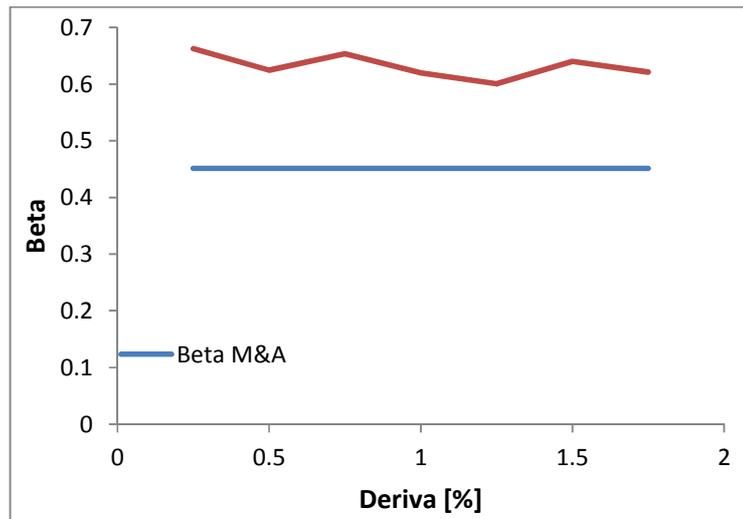


Figura 6.14: Valor de Beta estimado.

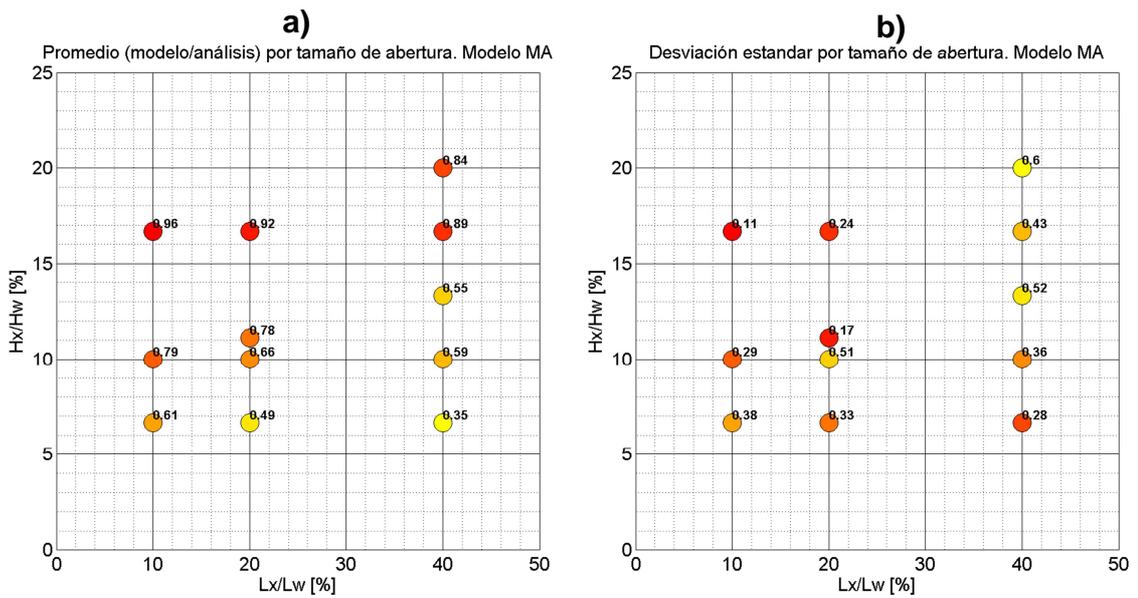


Figura 6.15: a) Valores promedio (Valor modelo/Valor análisis) y b) Desviación estándar, del modelo "MA".

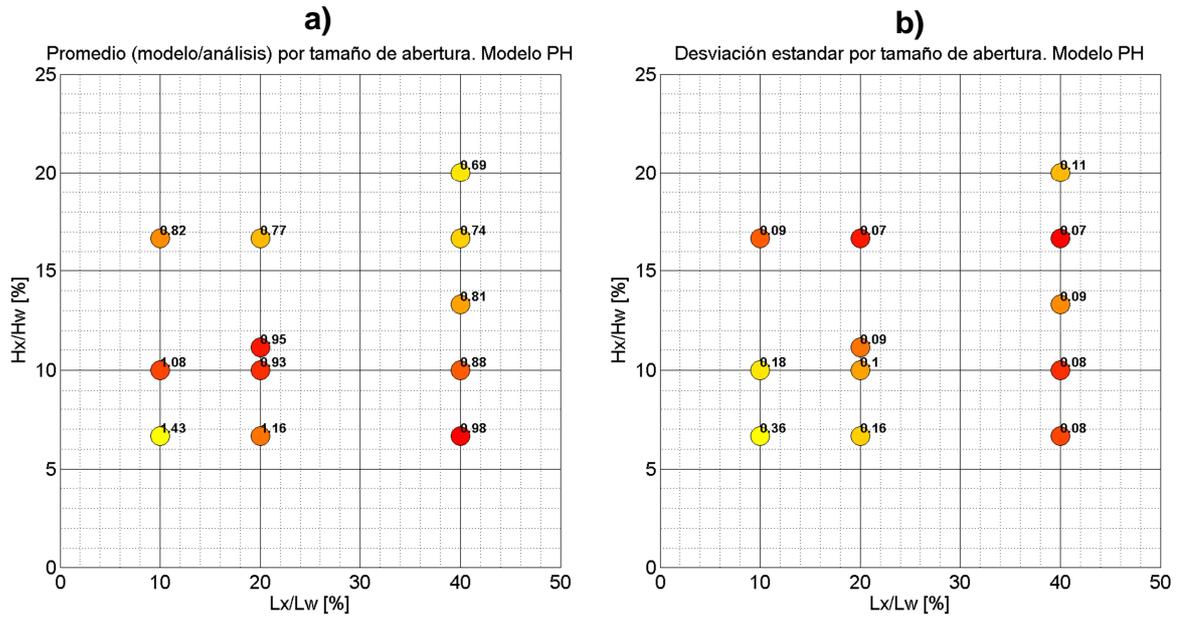


Figura 6.16: a) Valores promedio (Valor modelo/Valor análisis) y b) Desviación estándar, del modelo "PH".

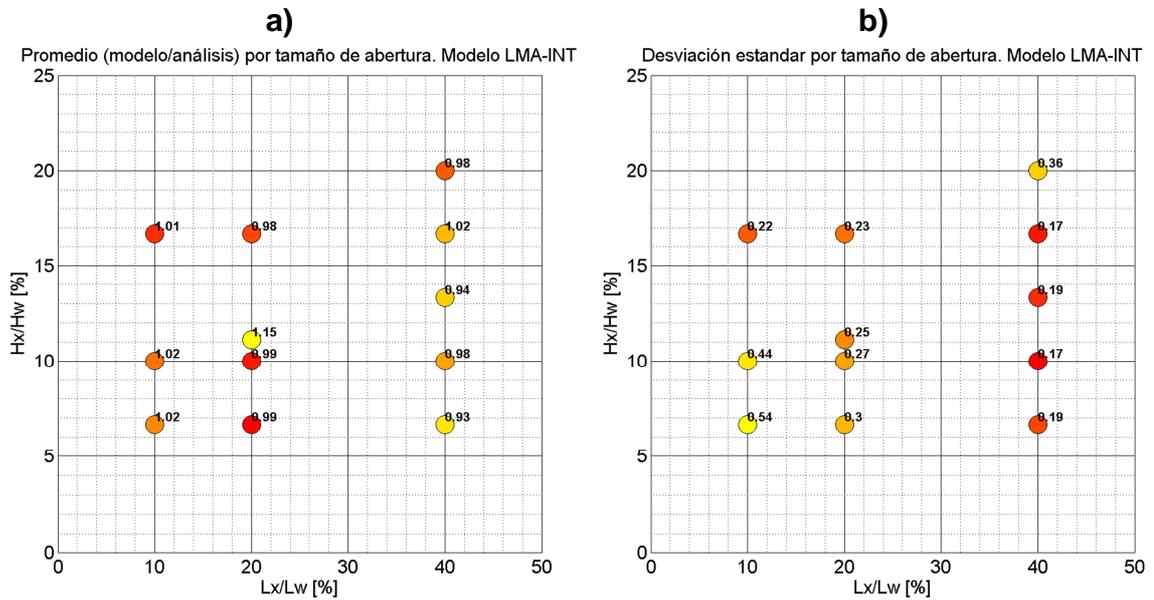


Figura 6.17: a) Valores promedio (Valor modelo/Valor análisis) y b) Desviación estándar, del modelo "LMA-INT".

De la Figura 6.15-a se observa que el modelo "MA" tiende a subestimar considerablemente la curvatura última para los rangos de altura relativa menor al 10%, mientras que funciona bastante bien para alturas relativas por sobre el 15%. Se observa que tiende a funcionar mejor para aberturas de largos pequeños. El modelo "PH" o de rótula plástica concentrada rectangular tiende a ser bastante bueno para aberturas de altura relativa menor o igual al 10% y largos mayores o iguales al 10% del largo del muro (ver Figura 6.16-a). Sin embargo, para alturas relativas pequeñas y largos relativos pequeños, el error del modelo tiende a ser mayor, pero conservador. Este error para este rango de tamaño de aberturas se explica porque el modelo de rótula concentrada rectangular ("PH") tiende a ser más conservador para muros más esbeltos debido a que el desplazamiento elástico de techo es mayor (hay una altura de muro en comportamiento elástico mayor) que en muros más bajos. El modelo LMA-INT tiene un rango de aceptación mayor, y funciona bastante bien para todo el rango analizado, sin embargo presenta dispersiones mayores a la del modelo "PH". Se encontró que limitar el largo de rótula plástica hasta un 20% por sobre la altura de la abertura permite obtener mejores resultados en cuanto a dispersión para el rango de aberturas de 10% de largo relativo y entre 5% y 10% de altura relativa, sin embargo el promedio tiende a disminuir bastante, por lo que se descarta esta alternativa (dispersión general baja a 0.26, mientras que promedio baja a 0.92). A continuación, en la tabla 6.4, se proponen rangos de resultados aceptables para cada modelo (con variación en promedio menor al 20% aproximadamente) con los respectivos promedios y desviaciones estándar que se obtienen al considerar sólo los casos dentro del rango recomendado y los promedios y desviaciones que se obtienen considerando todos los casos de análisis. Notar que el modelo PH es el de mejor dispersión general y dentro de su rango, pero se debe aclarar que se observa que son los puntos de bajas deformaciones los que disminuyen la precisión del modelo "LMA-INT", mientras que para deformaciones altas se comporta bastante bien (levemente conservador en la mayoría de los casos), como se muestra en la Figura 6.25, mientras que el modelo PH tiende a subestimar la curvatura en varios casos.

Tabla 6-4: Rangos recomendados para cada modelo.

Modelo	Rango de validez		Promedio en rango recomendado	Desviación en rango recomendado	Promedio general	Desviación general
	LX/LW	HX/HW				
MA	0 - 40%	> 15%	0.83	0.41	0.7	0.42
	<= 10%	10% - 15%				
PH	20% - 40%	< 15%	0.97	0.15	0.94	0.23
	10% - 20%	10% - 15%				
LMA-INT	10 - 40%	5% - 20%	1	0.29	1	0.29

Las figuras a continuación muestran la dispersión y precisión de los modelos recomendados en cada rango recomendado y en todos los casos de análisis. Se observa en la Figura 6.18-b que en ciertos casos de análisis la curvatura última calculada con el modelo MA (Massone & Alfaro, 2014?) es subestimada bastante, y en la Figura 6.19 y Figura 6.20 se puede corroborar que son los casos con aberturas de baja altura y largo mayor las que se deben excluir para este modelo. En la Figura 6.22-b se observa que, para el modelo "PH", son los casos con altas alturas relativas de abertura los que se deben excluir del análisis. En la Figura 6.25, se observa que el modelo "LMA-INT" tiende a sobreestimar la curvatura a partir de ciertos valores, sobre todo para los casos con baja altura relativa, esto sucede porque al limitar la rótula plástica, y por ende el desarrollo del desplazamiento elástico (cuantificado por el parámetro  $\tilde{a}_y$  de la ecuación 6.14), la curvatura última comienza a aumentar al mismo ritmo que lo hace el desplazamiento de techo, esto nos permite tener resultados conservadores para deformaciones grandes, lo cual es una ventaja del modelo propuesto en comparación al modelo "PH".

Como recomendación, se propone utilizar el modelo de rótula concentrada simple (modelo "PH") para el rango recomendado (ver tabla 6.4) debido a que es bastante simple y acertado, con baja dispersión, y para cubrir el resto de los casos en donde se tenga aberturas dentro del rango analizado, utilizar el modelo "LMA-INT", que si bien tiene una dispersión un poco más alta, mejora lo que existe previamente (modelo "MA") y en promedio se tienen valores razonables, además, los resultados tienden a ser más conservadores que el modelo PH en deformaciones grandes. Notar que el modelo PH tiende a ser excesivamente conservador para muros muy altos o de altura relativa de abertura baja, como se observa en la Figura 6.16-a, mientras que el modelo "LMA-INT" no presenta este problema al ser más adaptable.

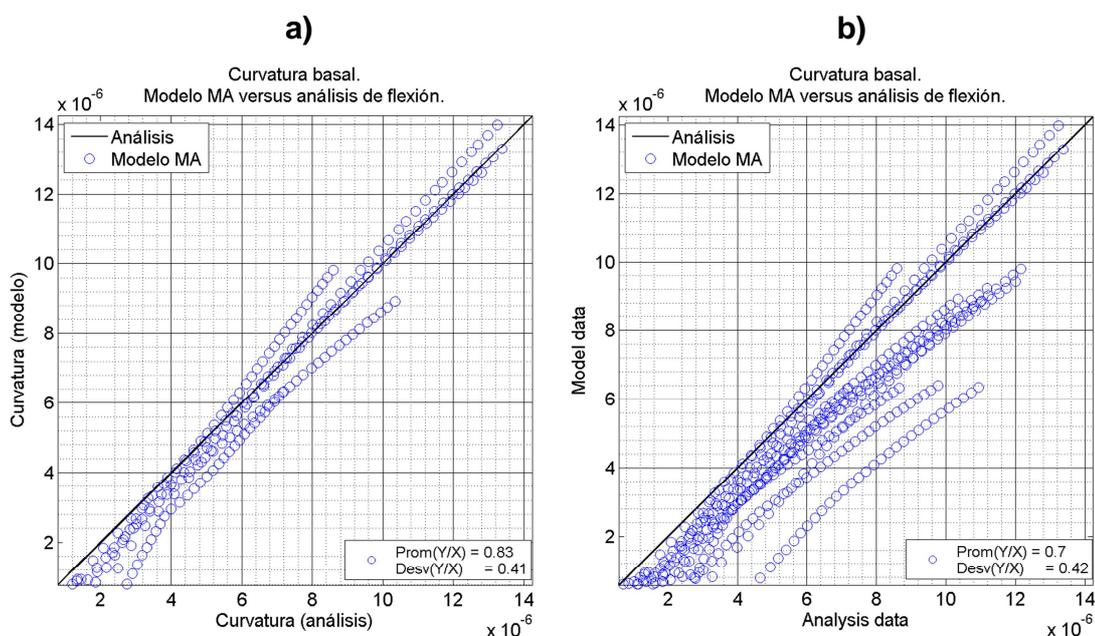


Figura 6.18: Dispersión de modelo "MA" en: a) rango recomendado, b) todos los casos de análisis.

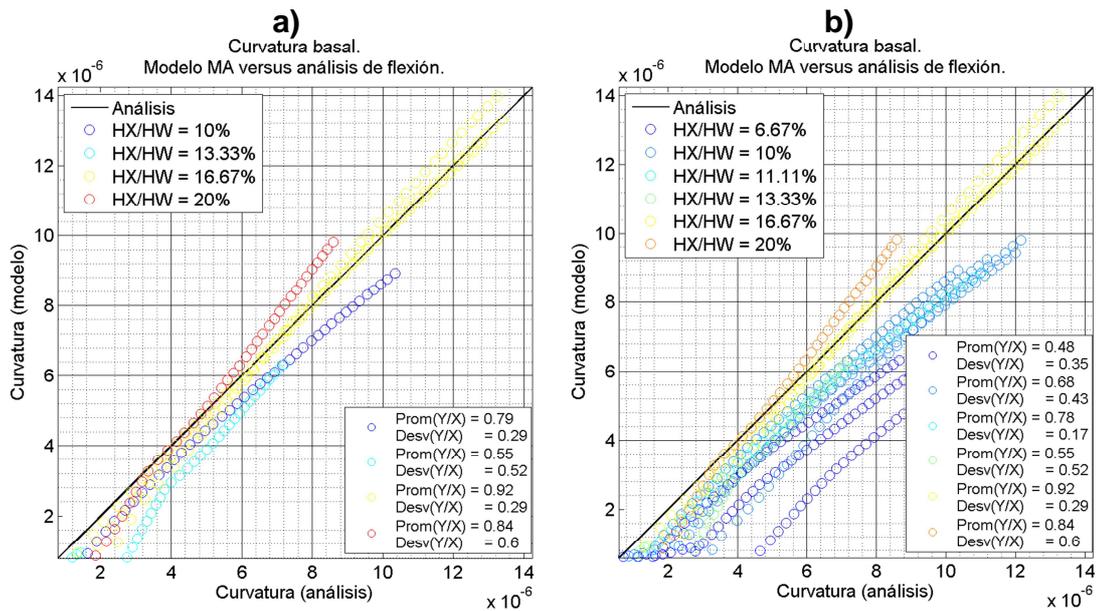


Figura 6.19: Dispersión de modelo "MA" en: a) rango recomendado, b) todos los casos de análisis, según altura relativa.

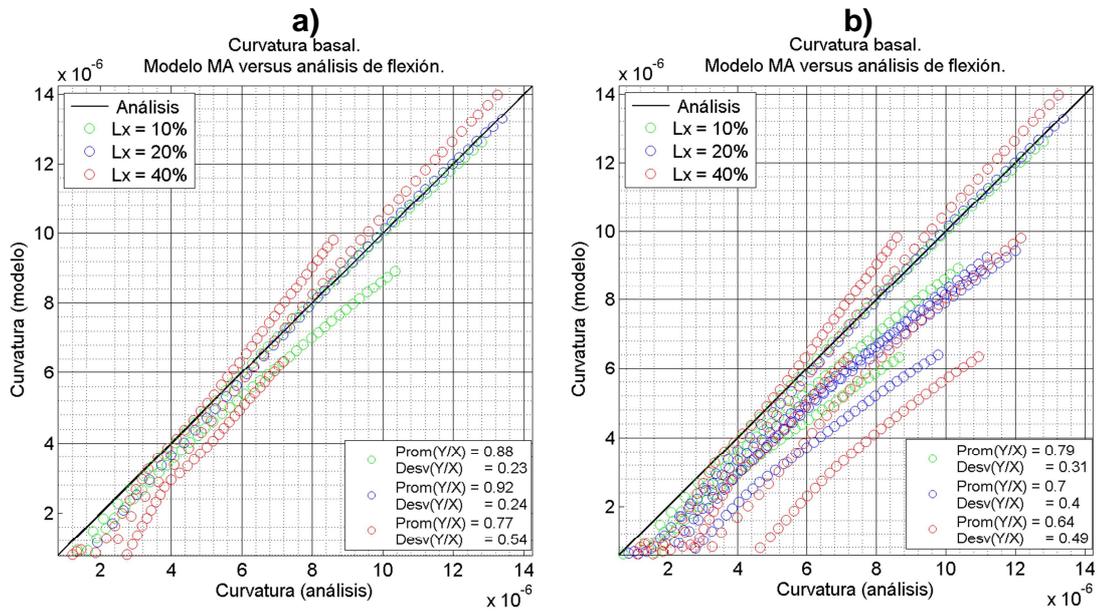


Figura 6.20: Dispersión de modelo "MA" en: a) rango recomendado, b) todos los casos de análisis, según largo relativo.

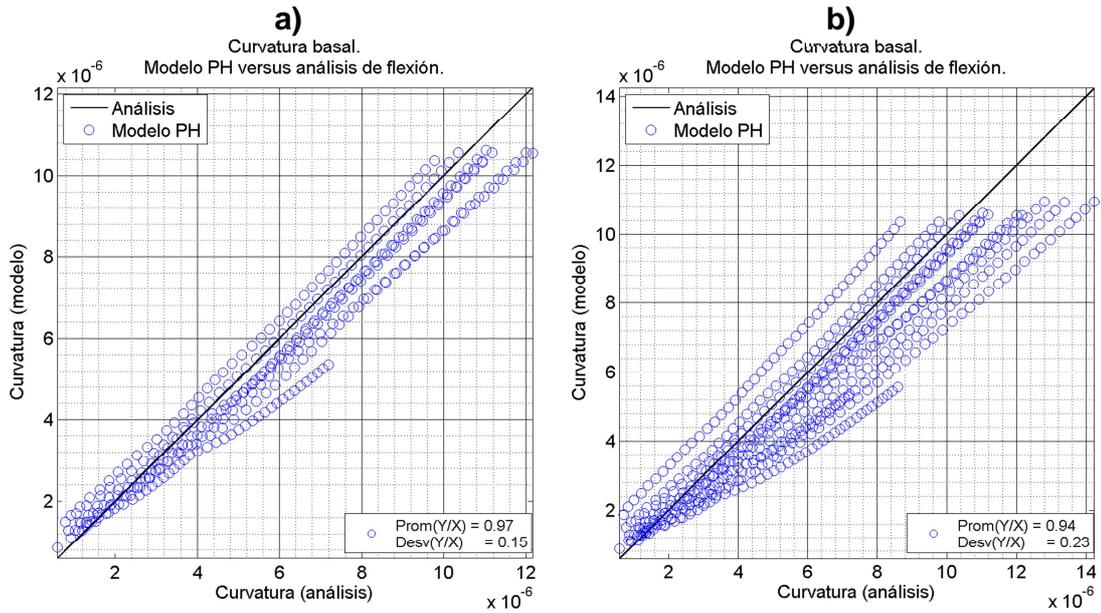


Figura 6.21: Dispersión de modelo "PH" en: a) rango recomendado, b) todos los casos de análisis.

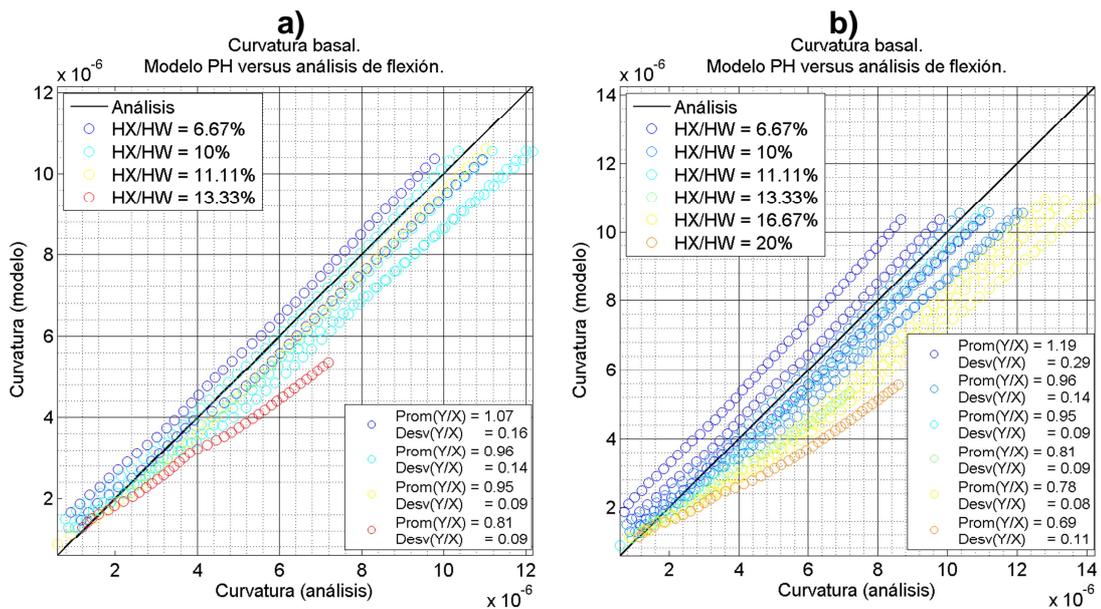


Figura 6.22: Dispersión de modelo "PH" en: a) rango recomendado, b) todos los casos de análisis, según altura relativa.

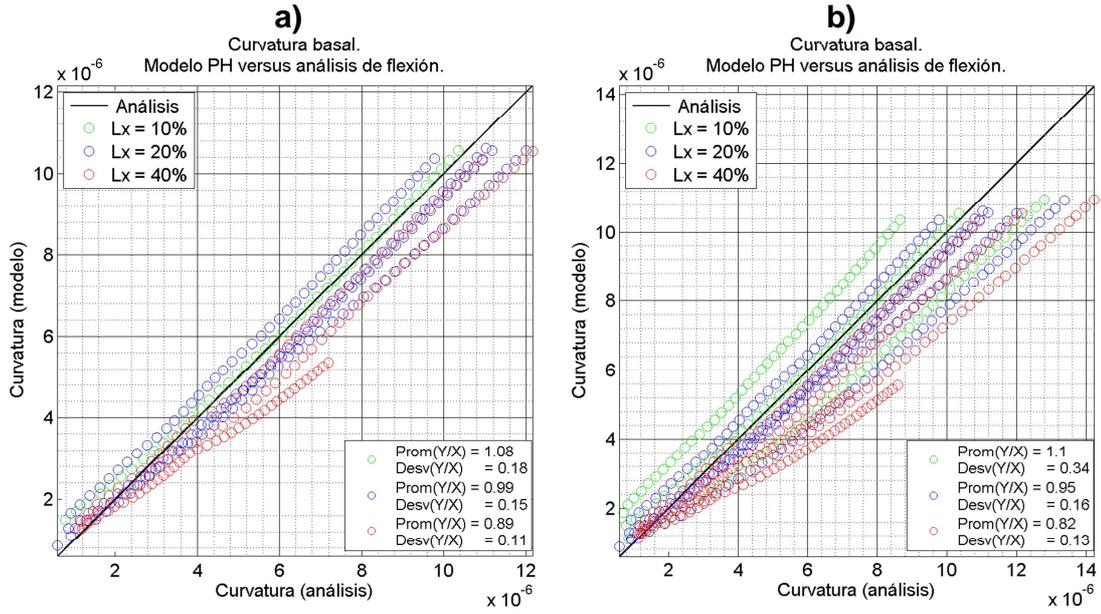


Figura 6.23: Dispersión de modelo "PH" en: a) rango recomendado, b) todos los casos de análisis, según largo relativo.

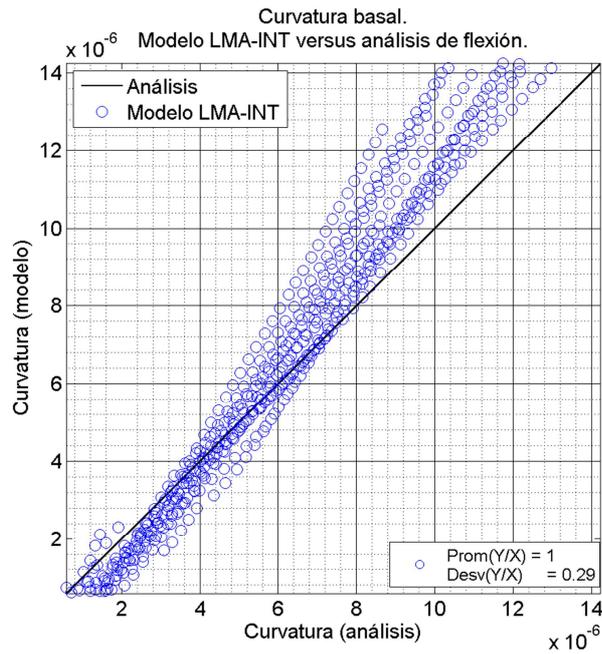


Figura 6.24: Dispersión de modelo "LMA-INT" en el rango recomendado (todos los casos de análisis).

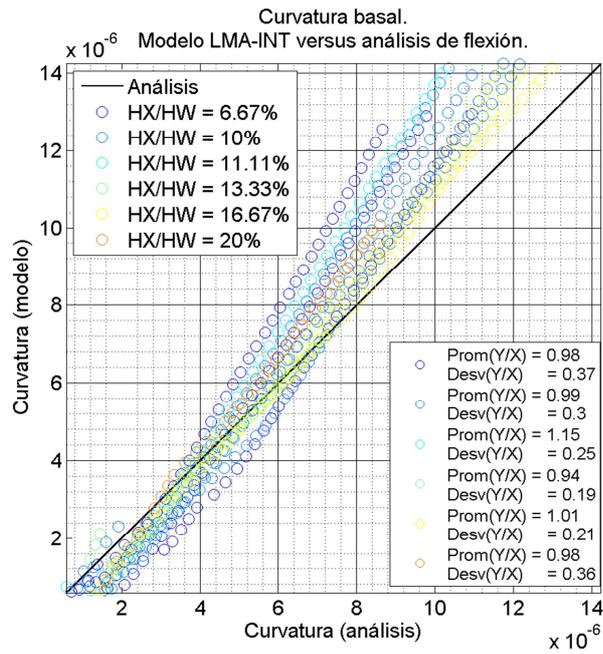


Figura 6.25: Dispersión de modelo "LMA-INT" en el rango recomendado (todos los casos de análisis), según altura relativa.

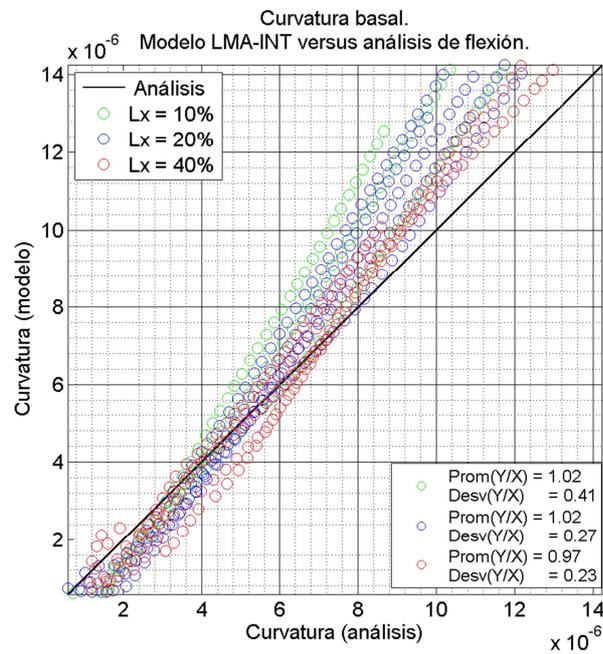


Figura 6.26: Dispersión de modelo "LMA-INT" en el rango recomendado (todos los casos de análisis), según largo relativo.

#### **6.4. Efecto del corte en la amplificación de deformaciones basales en muros tipo bandera.**

Dado que se tiene un modelo calibrado simple para amplificaciones de deformaciones basales en muros rectangulares, se evalúa la efectividad de éste en los modelos con aberturas de borde en la base. A continuación se grafican las amplificaciones basales de compresión y tracción para 8 casos de análisis en comparación con las amplificaciones de compresión y tracción de muros rectangulares con largo igual al largo basal del muro perforado. Los modelos analizados corresponden a los números 2 al 9 de la tabla 6.1 con sus respectivos análisis incluyendo flexión más corte, junto a muros rectangulares equivalentes (largo igual a largo basal de muro perforado). La Figura 6.27 muestra la tendencia obtenida en muros perforados contrastada con la de muros rectangulares para un mismo nivel de deriva total, y la respectiva desviación estándar y promedio, tomando puntos de deriva separados por 0.05%, desde la fluencia en adelante (tomando sólo la respuesta estable de los casos de análisis, limitando deformaciones de compresión por 0.015). Se debe tener en cuenta que la Figura 6.27 compara valores de amplificación o reducción para un mismo nivel de deriva total, por lo que la comparación no es directa, ya que los muros con abertura tienden a tener fluencias tempranas, lo que aumentaría el valor de amplificación si se contrasta con el muro rectangular coincidiendo en un mismo nivel de deriva plástica. Se espera que los modelos de compresión (ecuación 5.5 y 5.6), calibrados para muros rectangulares, se comporten de buena forma en muros con abertura de este tipo, mientras que los modelos calibrados de tracción para muros rectangulares (ecuaciones 5.5 y 5.7), tiendan a sobreestimar el factor de reducción de tracción (menor reducción). Lo anterior esta por el lado conservador, y considerando que en general las reducciones de tracción no son significativas ni para muros rectangulares ni muros con abertura, se considera que utilizar las ecuaciones 5.5 a 5.7 en muros bandera es lo suficientemente acertado.

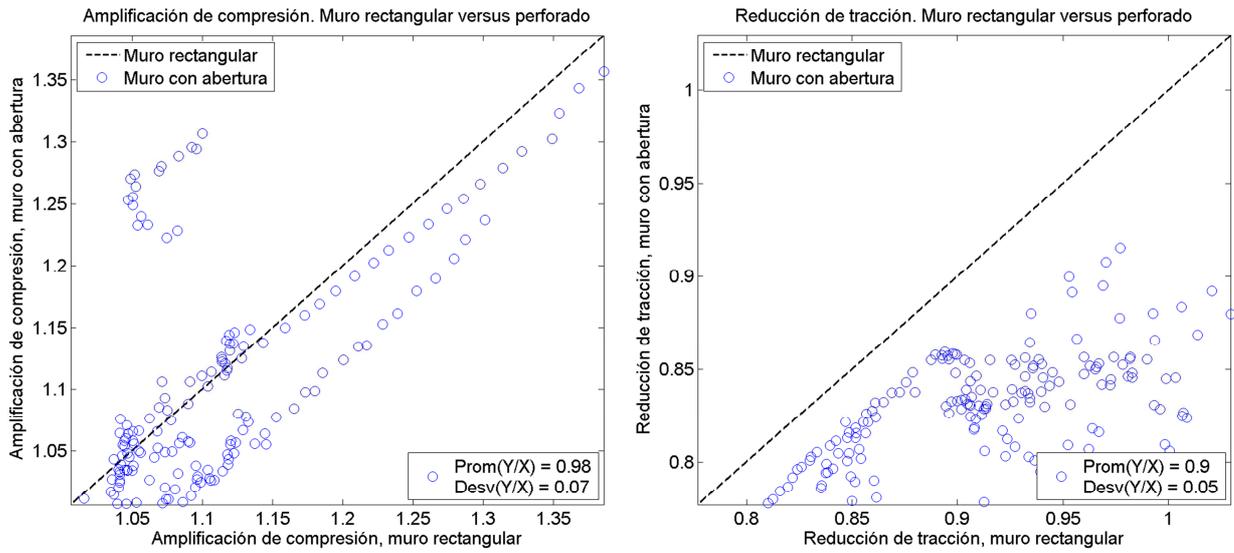


Figura 6.27: Amplificación de compresión y reducción de tracciones para muros perforados versus muros rectangulares (datos del análisis).

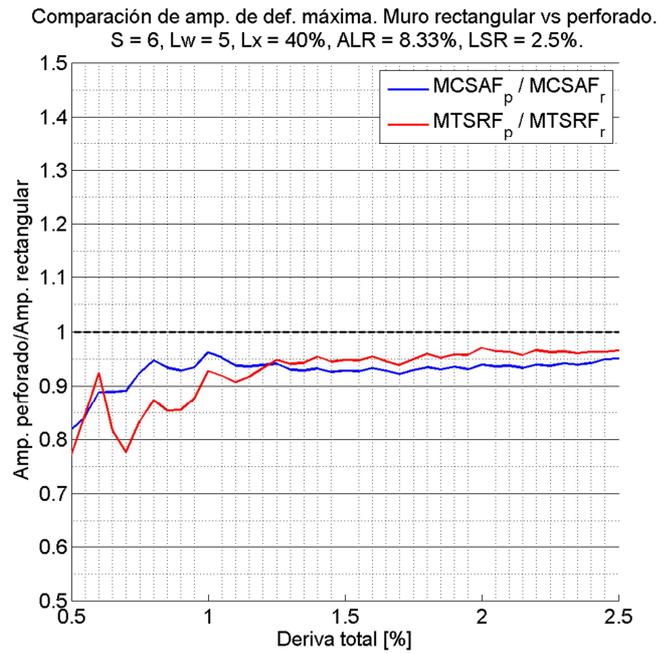


Figura 6.28: Relación de amplificación rectangular/perforado versus deriva total. Caso 7 (ver tabla 6.1).

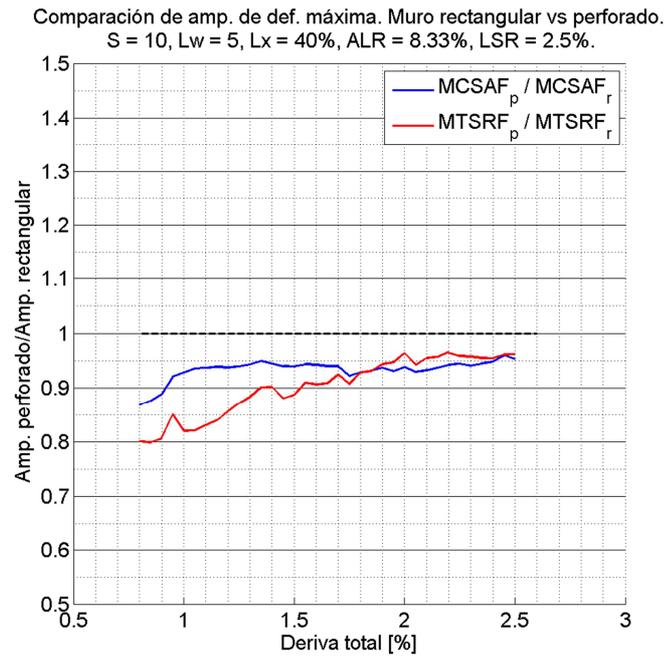


Figura 6.29: Relación de amplificación rectangular/perforado versus deriva total. Caso 8 (ver tabla 6.1).

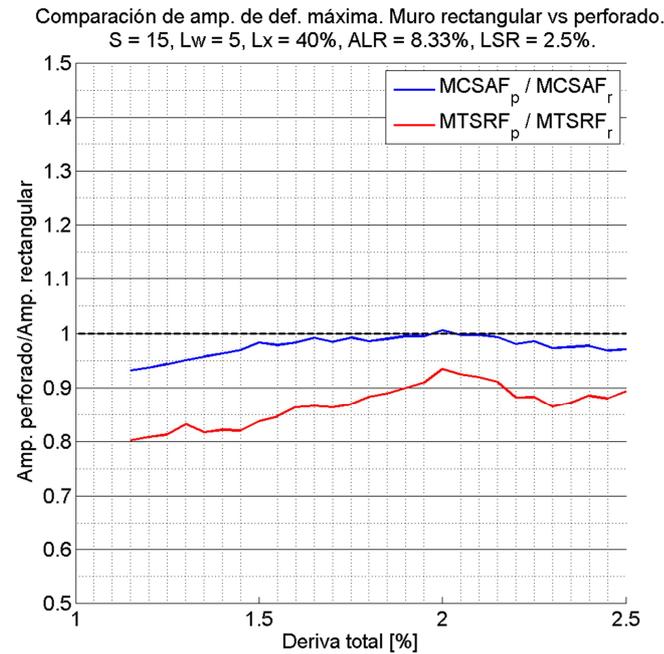


Figura 6.30: Relación de amplificación rectangular/perforado versus deriva total. Caso 9 (ver tabla 6.1).

Las Figura 6.28 a Figura 6.30 muestran, para los casos con  $lx/lw = 40\%$  la relación entre los factores de amplificación perforado y rectangular en función de la deriva total desde el punto de fluencia del muro rectangular, para un caso con 6 pisos

(relación de aspecto 5, considerando largo basal), un caso con 10 pisos (relación de aspecto 8.33) y un caso con 15 pisos (relación de aspecto 12.5), casos de análisis 7 al 9 de la tabla 6.1. Aquí se ejemplifica lo que ocurre en la mayoría de los casos analizados; en los casos de abertura de 40% de largo relativo, los factores de amplificación de muros perforados tienden a parecerse más a los de muros rectangulares a partir de derivas grandes, a esto se le debe agregar la diferencia en deriva elástica entre el modelo rectangular y el con abertura, lo que mejoraría la correlación en el caso de compresión. Al 1.5% de deriva, la amplificación de compresión se estabiliza por sobre el 90% del caso rectangular, mientras que las tracciones al menos han logrado el 85% respecto al muro rectangular. La Figura 6.31 a la Figura 6.34 muestran la comparación del modelo de compresión completo y del modelo de tracción simplificado versus el análisis de flexión y de flexión + corte para muros con aberturas de 40% de largo relativo y 6.67% y 16.67% de altura relativa (relaciones de aspecto de 12.5 y 5 respectivamente). Los resultados muestran una buena correlación para el caso de las compresiones, mientras que la tracción estimada pareciera ser más precisa para el muro con menor relación de aspecto.

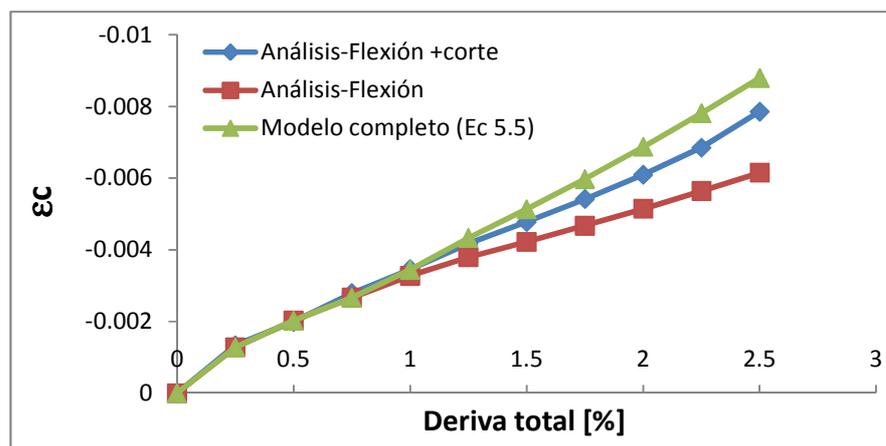


Figura 6.31: Compresión estimada versus deriva considerando efectos del corte en muro con abertura.  $h_x/h_w = 6.67\%$ ,  $l_x/l_w = 40\%$ .  $GL = 0.0067$ ,  $AR = 12.5$  ( $l_w/2/h_w$ ).

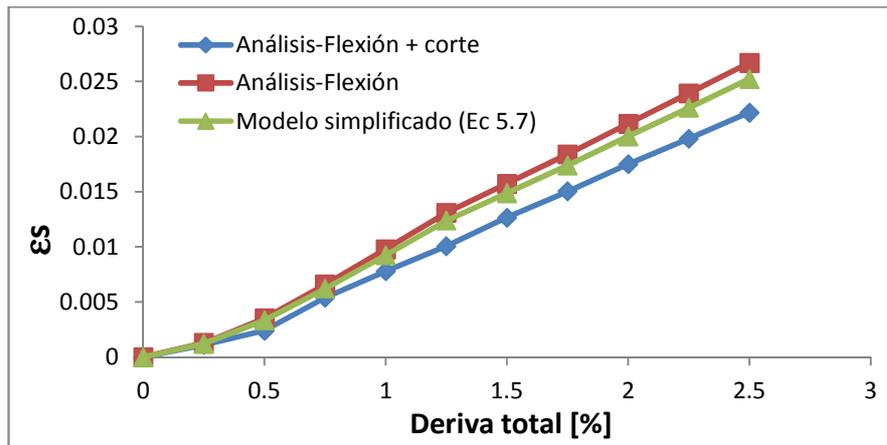


Figura 6.32: Tracción estimada versus deriva considerando efectos del corte en muro con abertura.  $h_x/h_w = 6.67\%$ ,  $l_x/l_w = 40\%$ .  $GL = 0.0067$ ,  $AR = 12.5 (l_{w2}/h_w)$ .

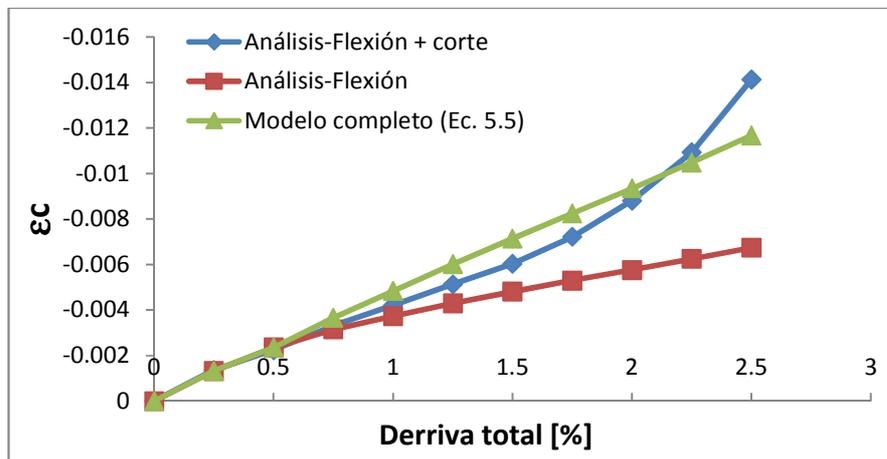


Figura 6.33: Compresión estimada versus deriva considerando efectos del corte en muro con abertura.  $h_x/h_w = 16.67\%$ ,  $l_x/l_w = 40\%$ .  $GL = 0.016$ ,  $AR = 5 (l_{w2}/h_w)$ .

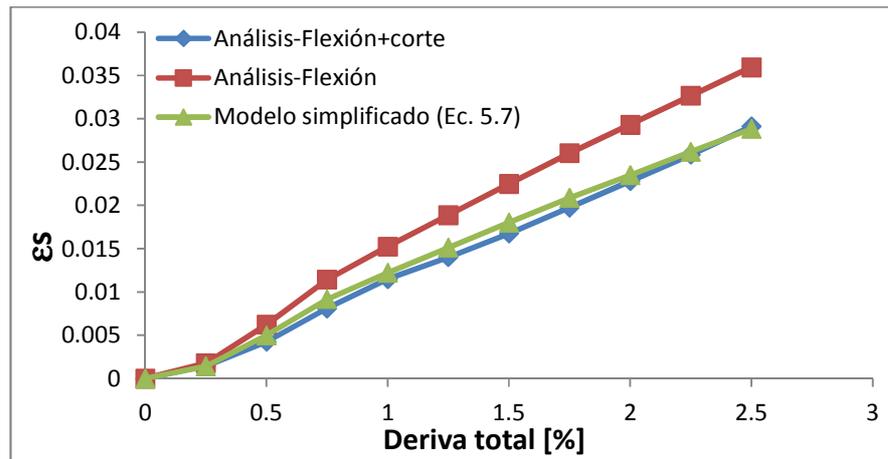


Figura 6.34: Tracción estimada versus deriva considerando efectos del corte en muro con abertura.  $h_x/h_w = 16.67\%$ ,  $l_x/l_w = 40\%$ .  $GL = 0.016$ ,  $AR = 5 (l_{w2}/h_w)$ .

En base a lo anterior se propone mantener las expresiones determinadas en el capítulo 5 para la amplificación de compresiones máximas y reducción de tracciones máximas debido al corte en muros perforados, ya que se es levemente más conservador para el rango de derivas en que la respuesta es estable.

## CAPÍTULO 7. MUROS CON PERFORACIÓN CENTRAL: ESTUDIO DE CASOS.

En este capítulo se estudia de forma cualitativa el comportamiento de muros con aberturas basales ubicadas en el centro del muro. El objetivo principal es dar luces de lo que ocurre en la zona de la discontinuidad para futura investigación y para el diseño de este tipo de muros.

En primera instancia, se analizan 4 casos: un muro rectangular, sin aberturas, como caso base, un muro con abertura de un 20% del largo del muro y altura de un piso (10% de la altura del muro), ubicada en el centro, y un muro con abertura ubicada a 1 metro de uno de los bordes, de 20% del largo del muro y de un piso de altura (10%), para el que se analizan ambas direcciones de carga lateral. Se dispone de refuerzo longitudinal a cada costado de la abertura con una cuantía de 2.5%, considerando una columna de refuerzo del 10% del largo del muro, al igual que las columnas de borde (500 mm), hasta el segundo piso. Además, se incluye el análisis de 2 muros con abertura central, cuyas armaduras de elementos de borde y alrededor de la abertura llegan hasta el piso 3 y 9 respectivamente. Todos los muros son de 10 pisos, con largo de 5 m, resultando en una relación de aspecto de 5. Se mantiene una carga axial de 5% de  $f'_c A_g$  en todos los casos, con  $A_g$  la sección completa (sección en el techo). La Figura 7.1 esquematiza los muros descritos y muestra la dirección de la carga aplicada, la cual se dirá es orientada en dirección "este". El resto de los parámetros (materiales y otros) sigue la misma regla que los casos de estudio del capítulo 6, incluyendo modelación de techo y pedestal con hormigón elástico, confinamiento del 10% del largo total del muro en cada borde, vigas rígidas entre cada fila de elementos, entre otros (ver capítulo 6), excepto la discretización en elementos. En el caso rectangular, se dispone de 8 elementos en la vertical en el primer piso, 6 en el segundo, 4 en el tercero y 2 del cuarto al último piso. En los casos con abertura se sigue la misma regla, exceptuando los últimos 4 pisos, en los que se dispone de 1 elemento por piso.

La Figura 7.1 muestra en verde las franjas correspondientes a las armaduras longitudinales de borde y alrededor de la abertura para los casos 1 a 4. El refuerzo longitudinal de borde es continuo en toda la altura, mientras que la armadura de borde en la abertura se dispone sólo hasta el segundo piso. Se dispone de confinamiento que cubre el 10% del largo del muro en cada borde.

Se implementan, en primera instancia, análisis FEM con vigas rígidas entre cada fila de elementos, que fuerzan la hipótesis de secciones planas.

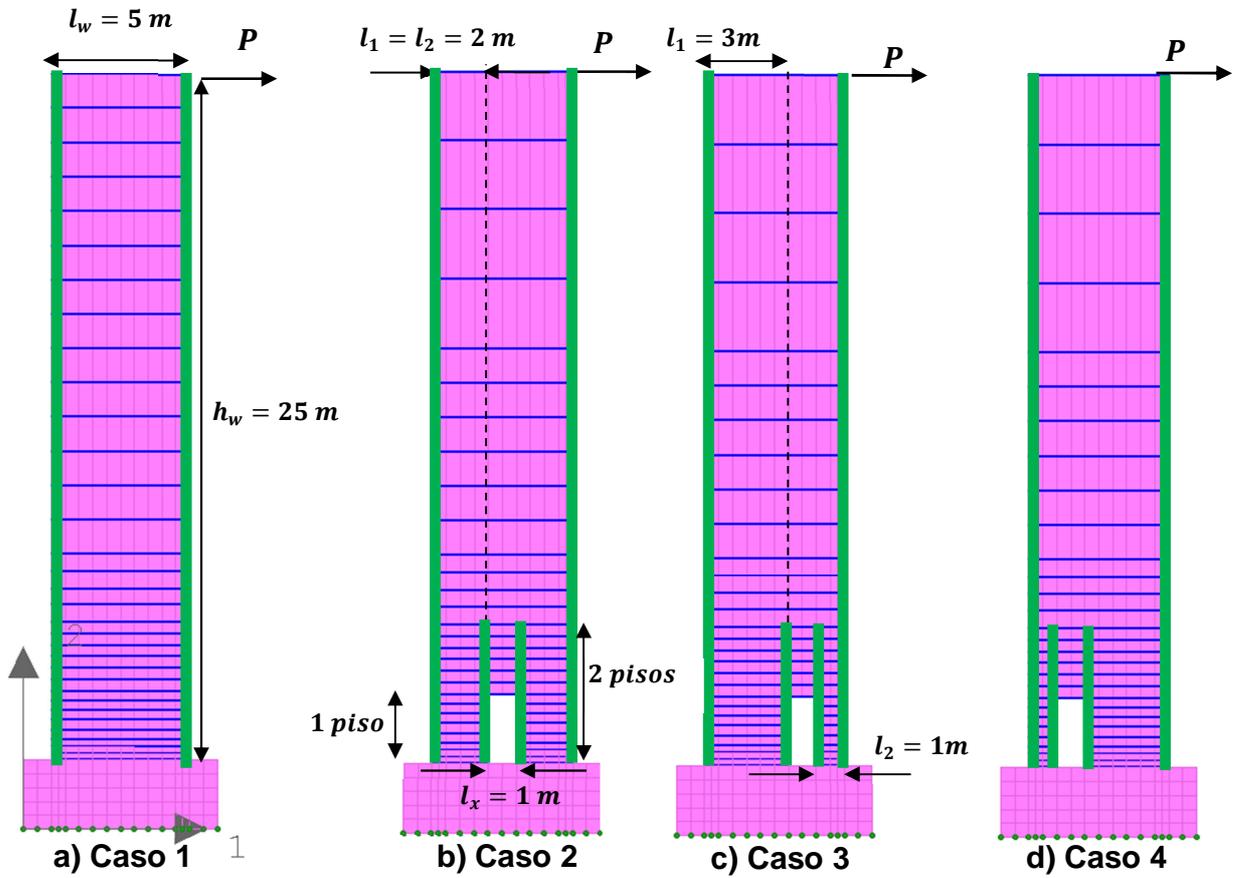


Figura 7.1: Dimensiones de casos de análisis: a) Caso 1: Muro rectangular, b) Caso 2: Muro con abertura central, c) Caso 3: Muro con abertura descentrada este, d) Caso 4: Muro con abertura descentrada oeste.

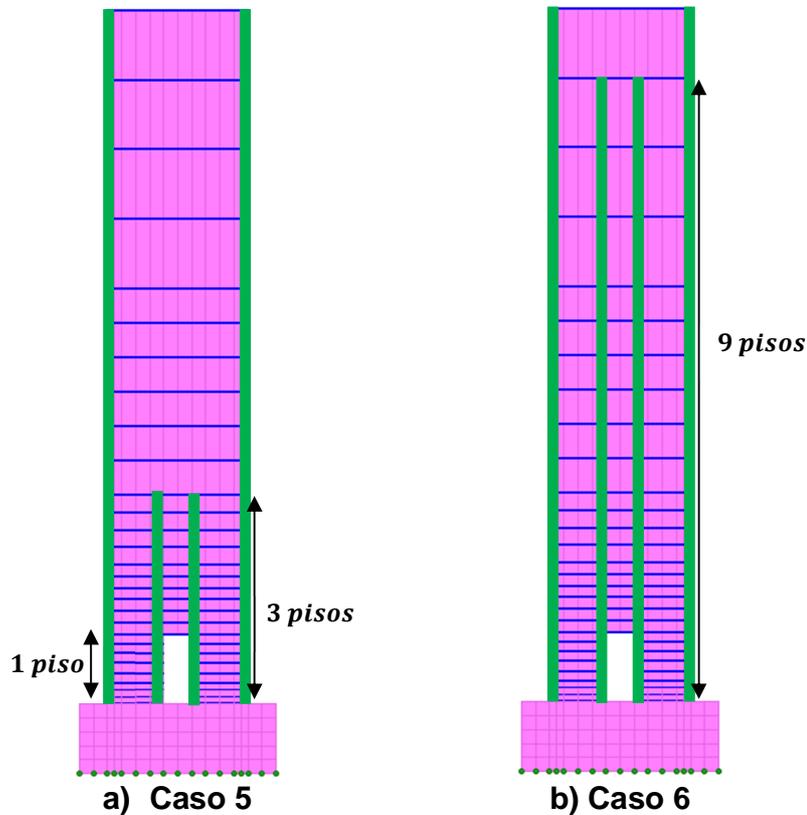


Figura 7.2: Dimensiones de casos de análisis: a) Caso 5: Muro con abertura central con armadura de abertura hasta piso 3, b) Caso 6: Muro con abertura central, con armadura de abertura hasta piso 9.

### 7.1. Análisis de respuesta global: carga versus deformación en análisis de flexión.

La Figura 7.3 muestra las relaciones carga versus desplazamiento de los casos de análisis. Se observa que el caso 1 (muro con abertura central, armado hasta el 2° piso) tiene una rigidez y resistencia mayores que el muro sin abertura, alcanzando una carga un 17,5% mayor al 2% de deriva, y el muro con abertura descentrada, con la columna en compresión, presenta una carga un 9% mayor que el caso base, mientras que en el caso 4 se observa un 27% de aumento de resistencia para 2% de deriva. Los casos 5 y 6 (abertura central con armadura hasta piso 3 y 9) presentan resistencias y rigideces muy similares al caso 4 (columna en tracción), siendo mayores que la resistencia del caso 2 (abertura central con armadura hasta piso 2). El caso más resistente es el 4, con la columna en tracción, lo cual se explica con el hecho de tener una totalidad de armadura traccionada mayor a los otros casos. Se observa que la extensión de la armadura en la altura ayuda levemente a la resistencia del muro, y su

efecto más importante es el de uniformizar la rigidez en la altura del muro, lo cual afecta la demanda de deformaciones en la altura como se observa en la sección 7.2.

Estas diferencias en resistencia se explican con que los muros con abertura tienen una cuantía total de la sección basal de aproximadamente el doble que el muro rectangular debido al refuerzo dispuesto en la abertura, sin embargo trabajan de forma distinta al tenerse secciones basales distintas, por lo tanto, distribución de deformaciones distintas. La resistencia varía entre el muro con abertura central y el muro con abertura descentrada dependiendo del trabajo de las armaduras, es decir, de la deformación que toma cada columna de borde, es por eso que, para entender mejor lo que sucede en cada caso, se comparan las deformaciones unitarias en puntos clave en la sección siguiente. Se concluye que una abertura del tipo analizado y armada apropiadamente no constituye un problema para la resistencia del muro, excepto en casos donde se observan efectos de segundo orden, como pandeos fuera del plano, los cuales no son cuantificados en este análisis, y que podría tener una incidencia importante según lo observado en la sección 7.2 respecto a las deformaciones de compresión máximas observadas en la base.

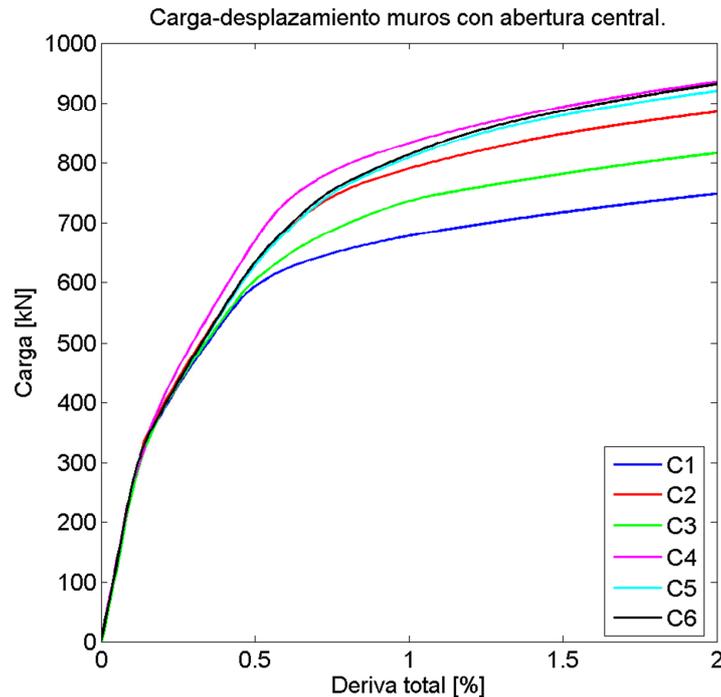


Figura 7.3: Carga versus deformación para muro rectangular (C1), con perforación central (C2), perforación descentrada este (C3), perforación descentrada oeste (C4), perforación central armada hasta piso 3 (C5) y perforación central armada hasta piso 9 (C6) .

## **7.2. Análisis de respuesta local: deformaciones unitarias en análisis de flexión.**

### **7.2.1. Análisis de curvaturas y puntos de fluencia.**

Para tener una idea de lo que ocurre a nivel seccional en toda la altura del muro, a continuación se muestran gráficos de curvatura en la altura para cada caso. La curvatura se calcula tomando, en cada sección de muro, las deformaciones en puntos extremos y dividiendo por la distancia que los separa. En los casos con abertura, las figuras se dividen en 3 secciones: a) Sección basal oeste, b) Sección basal este y c) Sección superior (por sobre la abertura).

En el caso del muro rectangular (ver Figura 7.4), se observa un comportamiento típico con concentración de curvaturas hacia la base. La curvatura basal es del orden de  $\mu 6$  [1/mm] (con  $\mu = 10^{-6}$ ) para un 2% de deriva total. En los casos 2, 3 y 4, con abertura (Figura 7.5-c a Figura 7.7-c), se observa que las deformaciones en la sección por sobre el cambio de la armadura longitudinal (donde termina el refuerzo de la abertura, a 5 m de altura) aumentan considerablemente. Lo anterior se puede describir como una “doble rótula plástica” en la altura del muro. Como primera consecuencia, se puede decir que en el diseño de este tipo de muros se debe tener especial cuidado con el cambio brusco de refuerzo en una sección como ocurre en este caso, incluso si la altura de plastificación máxima estimada para un muro rectangular es de menor longitud que la altura del cambio de armadura, como se ve más adelante. Este efecto es consecuencia de la armadura dispuesta y no de la abertura directamente. Las curvaturas en el cambio de armadura son levemente menores a la curvatura basal esperada para el muro rectangular, excepto en el caso con la abertura ubicada al este (Figura 7.6, columna en compresión), en donde se observa una curvatura de 1/2 la observada en la base del muro rectangular.

Otro efecto relevante que se observa en la Figura 7.5 a la Figura 7.9 es que la curvatura de la sección oeste (en tracción) tiende a ser lineal en la altura para todo el rango de derivas analizado, mientras que la sección este (en compresión), tiende a no ser lineal y a concentrar curvatura a medida que se acerca a la base de la sección. Esta concentración es más exagerada incluso que en el muro rectangular.

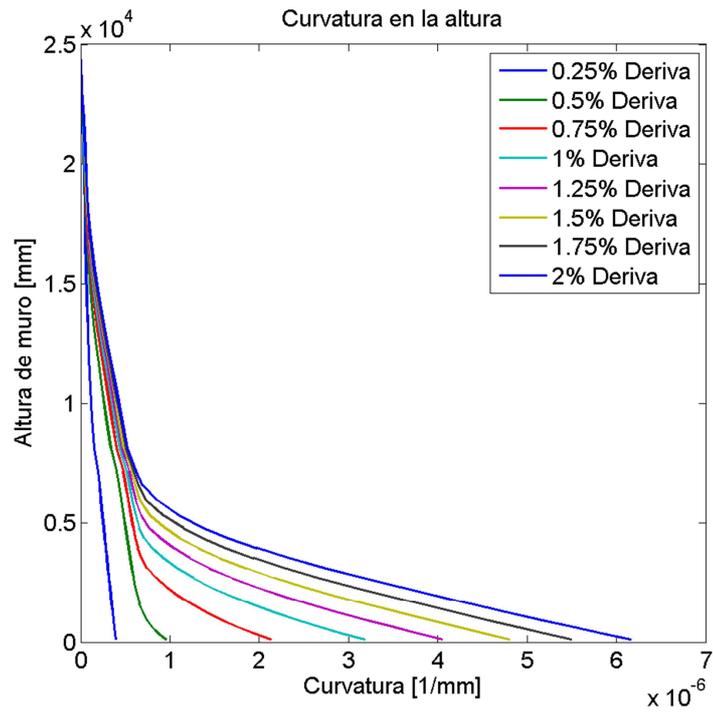


Figura 7.4: Curvatura en la altura de muro rectangular. Caso 1.

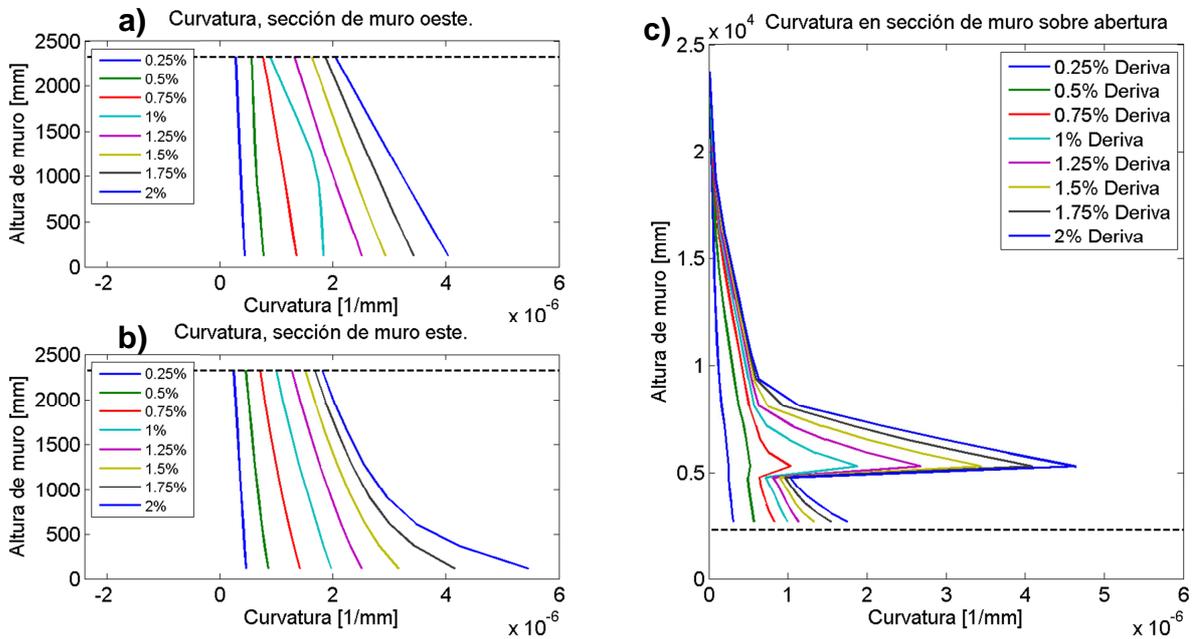


Figura 7.5: Curvaturas en la altura de muro con abertura centrada y armadura hasta piso 2. Caso 2. a) Sección oeste, b) Sección este, c) Sección superior.

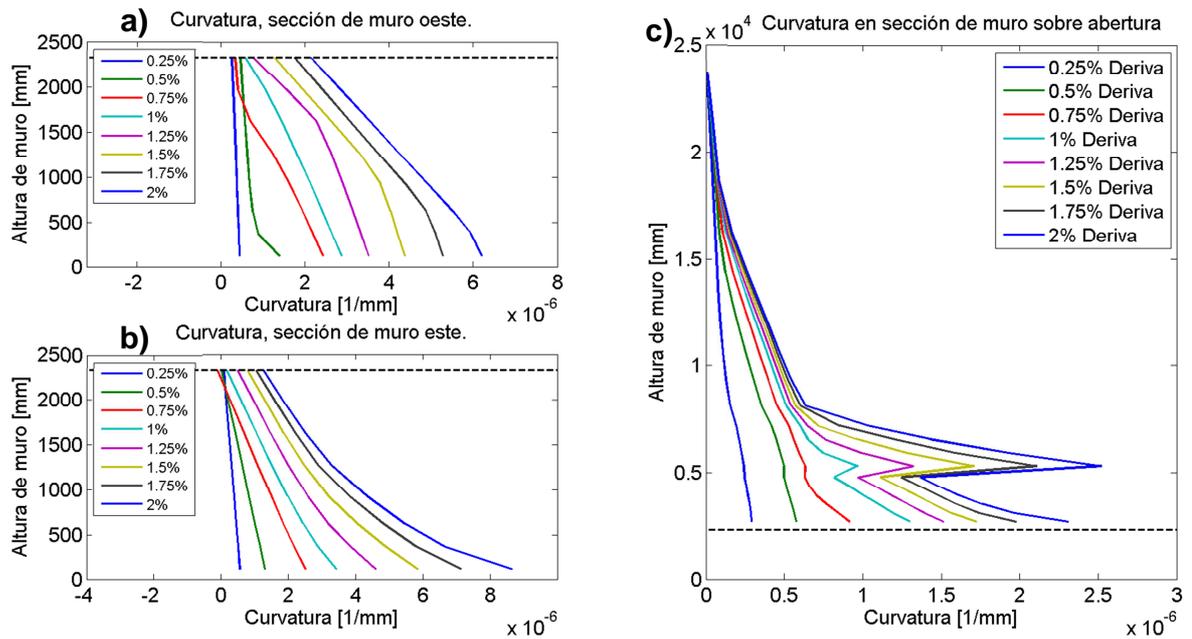


Figura 7.6: Curvaturas en la altura de muro con abertura descentrada, columna en compresión. Caso 3. a) Sección oeste, b) Sección este, c) Sección superior.

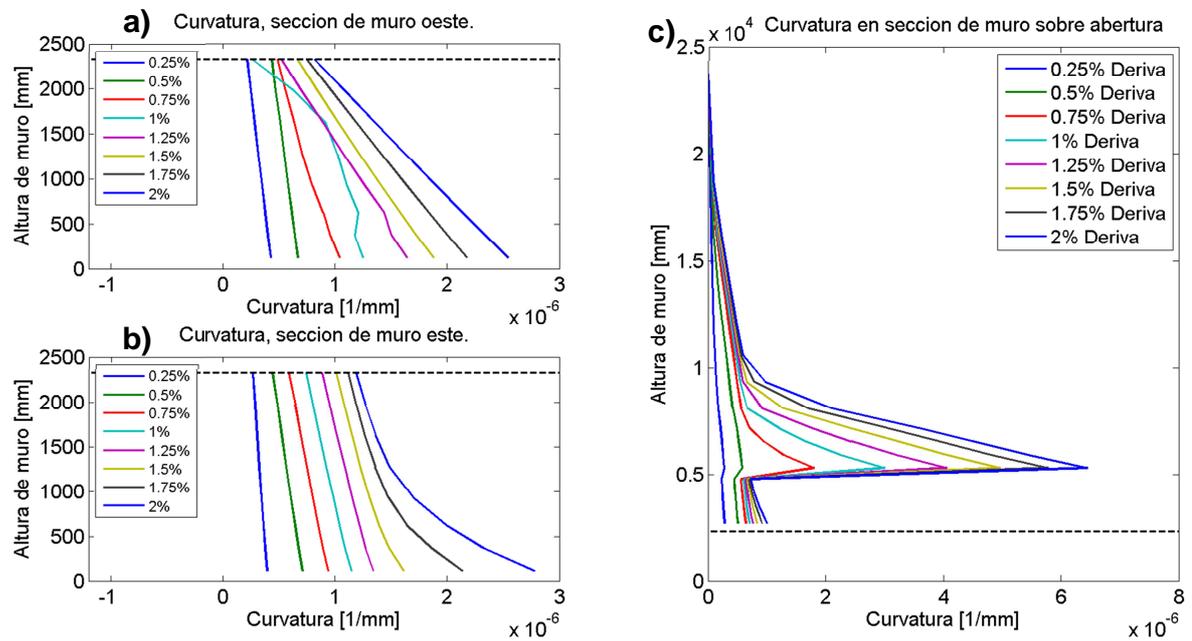
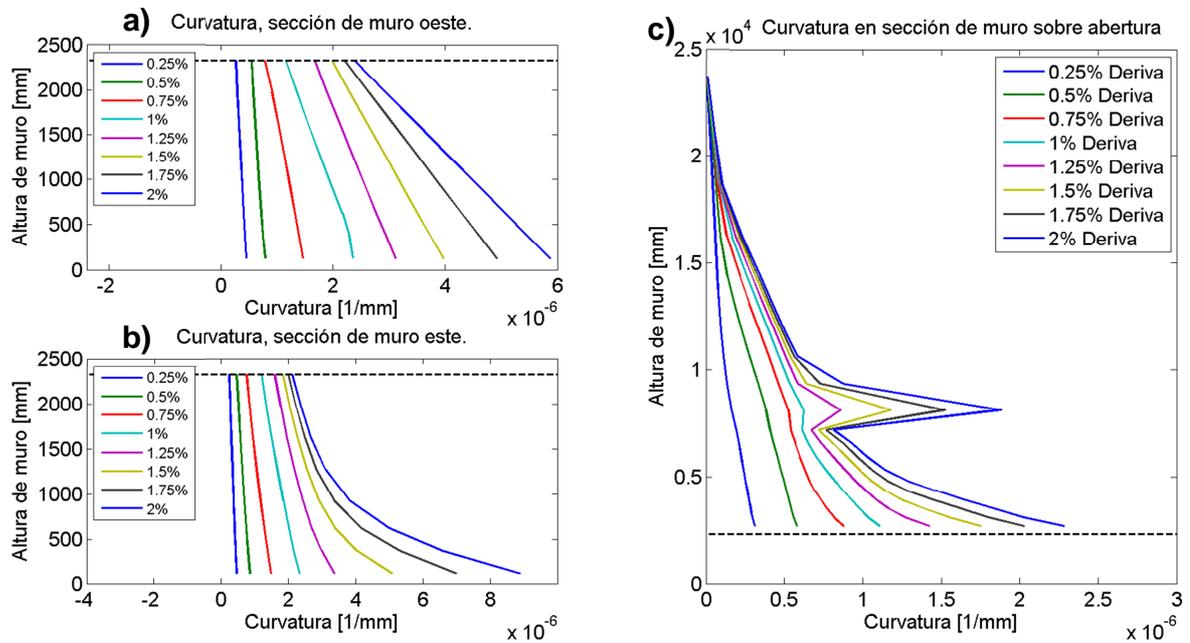


Figura 7.7: Curvaturas en la altura de muro con abertura descentrada, columna en tracción. Caso 4. a) Sección oeste, b) Sección este, c) Sección superior.

Las consecuencias de tener un cambio de armadura brusco, se pueden evitar si, por ejemplo, se continúa hasta cierta altura con la armadura extra en los bordes de la abertura. Las figuras a continuación muestran las curvaturas en la altura, y alturas de plastificación para los casos 5 y 6: con perforación central y refuerzo extra hasta el tercer y noveno piso respectivamente. Se observa en la Figura 7.8 que las curvaturas disminuyen significativamente en la zona del cambio de sección, sin embargo aún continúa existiendo una concentración en ese nivel a partir de niveles de deriva de 0.7%. De esto se concluye que aunque se disponga de armadura extendida hasta el nivel de la plastificación del muro rectangular (aproximadamente 3 pisos, ver Figura 7.4), esto no evitará que siga existiendo una concentración de deformaciones en la sección del cambio de armadura, o en otras palabras, que se tenga una sección crítica extra. En la Figura 7.9, se observa que el problema ya no existe para el caso con armadura extendida en todo el largo del muro (último piso es hormigón elástico), claramente debido a la homogeneidad en la rigidez en la altura del muro.



**Figura 7.8: Curvaturas en la altura de muro con abertura centrada, refuerzo de abertura hasta piso 3. Caso 5. a) Sección oeste, b) Sección este, c) Sección superior.**

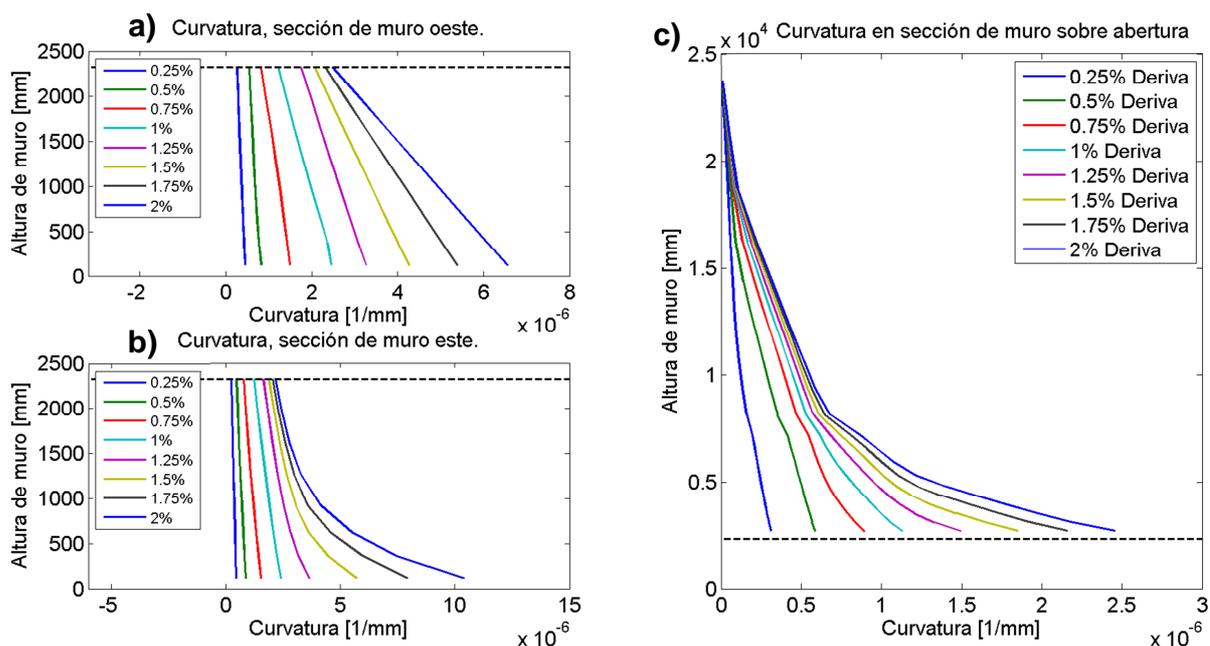


Figura 7.9: Curvaturas en la altura de muro con abertura centrada, refuerzo de abertura hasta piso 9. Caso 6. a) Sección oeste, b) Sección este, c) Sección superior.

Si bien esto constituye una solución al problema descrito, no pretende ser una recomendación sólida y las figuras a continuación son más bien un punto de referencia, ya que existen soluciones posiblemente más efectivas, como por ejemplo, utilizar armadura extra en la abertura con menor cuantía, lo que permitiría un procedimiento de diseño típico, con concentración de curvatura en la base o sección crítica basal al evitar un cambio de rigidez brusco en la sección del cambio de refuerzo. El disminuir la cuantía del refuerzo de la abertura debe tomarse con precaución ya que se observa en la sección siguiente, que las deformaciones de tracción alrededor de la abertura pueden ser significativas si no se toma la precaución necesaria para disminuirlas.

La Figura 7.10 muestra la altura donde se está alcanzando plastificación en el muro (punto más alto donde fluye armadura traccionada) para todos los casos de análisis. Se observa que, como se mencionó, la fluencia del muro se puede extender mucho más allá de lo esperado, incluso interrumpirse en cierto punto, para alcanzar a cumplir con la demanda de desplazamiento impuesta. Se observa que la plastificación ocurre de manera continua hasta 7.5 m aproximadamente en el caso rectangular, mientras que en los casos con abertura se extiende hasta 4 pisos inclusive (10 m de altura). Se observa que en el caso con columna en tracción (caso 4) la fluencia ocurre en primera instancia por sobre el cambio de refuerzos en el piso 3 (notar que esta curva pierde la información de lo que ocurre con el desarrollo de la fluencia bajo la altura del tercer piso). La fluencia adelantada de la sección de cambio de refuerzo en el caso del muro con abertura descentrada al oeste se ve favorecida claramente con el tener una columna en tracción en la base, como se verifica en la sección 7.2.2.

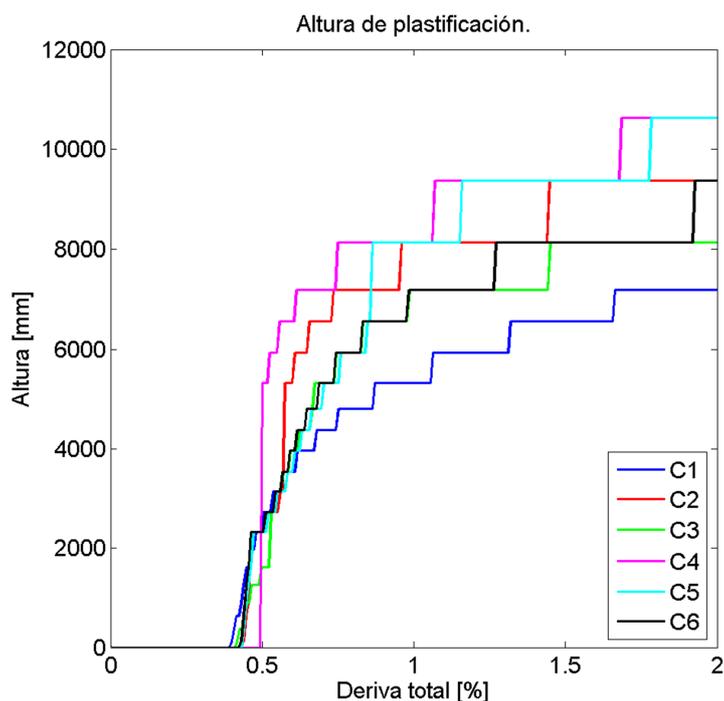


Figura 7.10: Altura de plastificación.

La Figura 7.11 muestra las curvaturas basales de cada caso de análisis, indicando con un marcador la fluencia en la base, tanto para la sección oeste como para la sección este de la base en los muros con abertura y la fluencia en la base para el muro rectangular. Se observa que la fluencia en la base de la sección oeste de los muros con abertura ocurre prácticamente al mismo nivel de desplazamiento de techo en todos los casos que al nivel en que ocurre la fluencia para el muro rectangular. La fluencia de la sección este (sección en compresión) de los muros con abertura ocurre para derivas altas, dándose para la mayoría de los casos a una deriva alrededor de 1%, mientras que para el caso 3 (columna en compresión) ocurre cerca del 1.8%. Esto es de esperar ya que la columna tiene mayoritariamente la sección comprimida debido a sus dimensiones y ubicación. Se observa una disminución de la curvatura de la sección basal oeste a medida que ésta disminuye su largo, es decir, a medida que se aproxima a las dimensiones de una columna en tracción. Por otro lado, se observa que la sección basal este de los muros con abertura tiende a disminuir cuando aumenta el largo de esta sección, y a aumentar cuando disminuye su largo, es decir, aumenta su curvatura cuando se acerca más hacia una columna en compresión. Lo anterior es lógico si se piensa que las curvaturas de alguna manera se deben compensar entre una sección basal y otra para que al integraren la altura se llegue al mismo desplazamiento de techo. Otro efecto interesante que se observa de la figura es que la disposición de armadura alrededor de la abertura influye notablemente en la curvatura que se obtiene en ambas secciones basales, ya que si comparamos el caso 2 (armadura hasta segundo piso), con el caso 5 (armadura hasta piso 3) y el caso 6 (armadura hasta piso 9), se observa que la curvatura basal aumenta notablemente. Esto se debe a que la

plasticidad se concentra más hacia la base en el muro con armadura continua, como se observa en la Figura 7.10 y Figura 7.9.

Haciendo una comparación entre los casos que no presentan una concentración de deformaciones considerable en el piso 3 (caso 1, 5 y 6), se observa que las curvaturas basales de las secciones oeste (sección en tracción) para los casos 5 y 6 son muy similares a la curvatura basal del muro rectangular para todo el rango de deriva analizado, mientras que la curvatura de la sección este (sección en compresión) es similar solo para deformaciones pequeñas. El límite se encuentra cercano a la fluencia de la sección este, a partir del cual las curvaturas se elevan considerablemente en comparación a la sección oeste y al muro rectangular. Este aumento de curvatura en la sección este, como se observa en la sección siguiente, significa un gran aumento de compresión en la fibra más comprimida, mientras que las tracciones se limitan a ser levemente menores a las del caso rectangular.

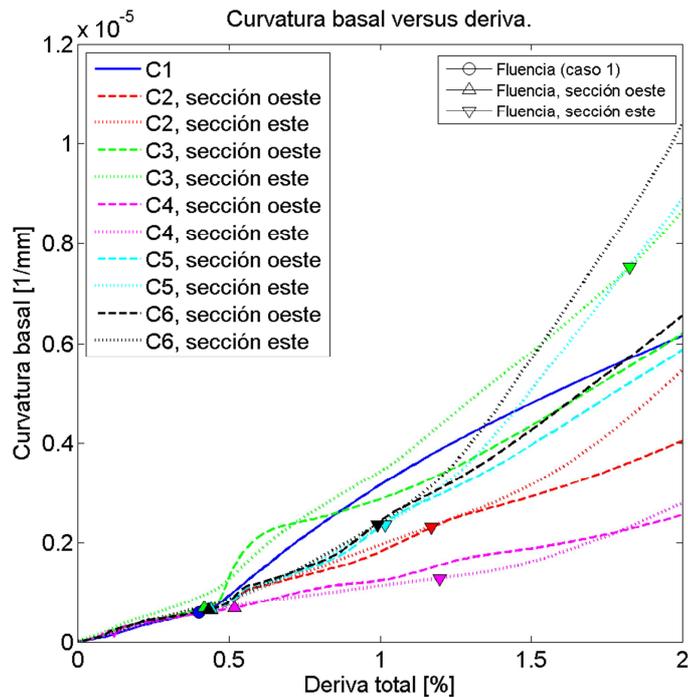


Figura 7.11: Curvatura basal versus deriva para los 6 casos de análisis indicando puntos de fluencia.

La Figura 7.12 muestra la curvatura justo por debajo de la losa del segundo piso (cielo primer piso), indicando los puntos de fluencia a esa altura. Se observa que la fluencia ocurre prácticamente para todos los casos a una deriva de 0.5%. Esto implica que la fluencia en todo el primer piso en la sección oeste ocurre prácticamente de manera instantánea. Analizando los casos 5 y 6, se observa que las curvaturas en

ambas secciones son bastante similares a la curvatura del muro rectangular para casi todo el rango de deriva observado, separándose a partir de derivas altas (alrededor de 1.5% en adelante).

La similitud entre las curvaturas de ambas secciones basales se da para todos los casos, excepto el caso 3 (columna en compresión), donde se observa que son distintas desde derivas muy tempranas, incluso teniéndose una inversión de curvatura en la sección este entre 0.5% y 1% de deriva.

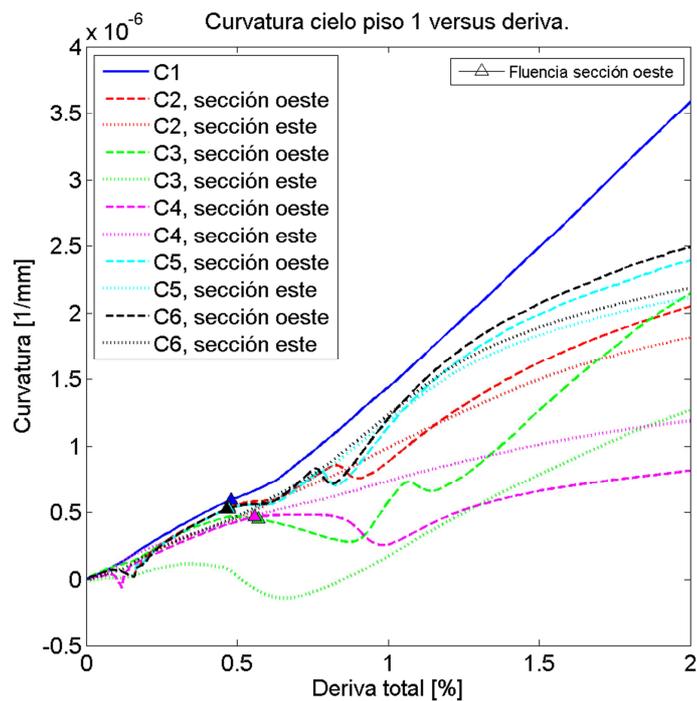


Figura 7.12: Curvatura cielo piso 1 (bajo losa segundo piso), para los 6 casos de análisis indicando fluencias.

La Figura 7.13 indica las curvaturas justo por sobre la abertura (piso 2), indicando los puntos de fluencia. Se observa que la fluencia ocurre prácticamente al mismo tiempo que en la base y a nivel del cielo primer piso. Las curvaturas del caso 5 y 6 son muy similares a las del muro rectangular. El caso 3 (columna en compresión) también muestra curvaturas bastante similares al caso 1, esto sugiere que, si se tienen armaduras bien desarrolladas en la altura de tal manera que no se tenga una concentración de deformaciones en pisos superiores al primero, la curvatura en este nivel alcance valores superiores a los que se tienen en el caso rectangular.

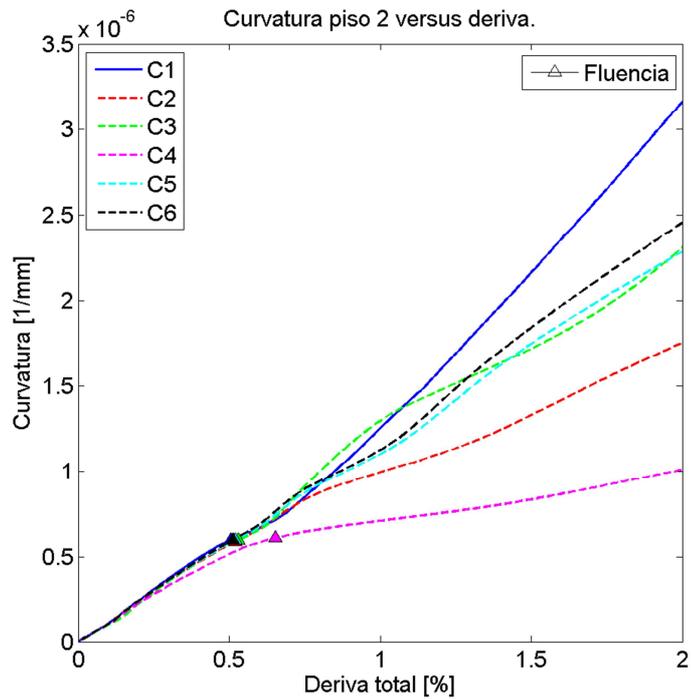


Figura 7.13: Curvatura piso 2 (sobre losa segundo piso), para los 6 casos de análisis indicando fluencias.

La Figura 7.14 muestra la curvatura al nivel del piso 3, donde para los casos 2 al 4 hay un cambio refuerzo, y como consecuencia una concentración de deformaciones. Se corrobora lo que se observa en la Figura 7.5 a la Figura 7.9 existe una concentración de curvaturas significativa a partir de la fluencia para los casos 2 al 4, llegando a valores de 6 veces lo que se observa en la misma altura en el caso rectangular o con abertura con distribución de armadura adecuada.

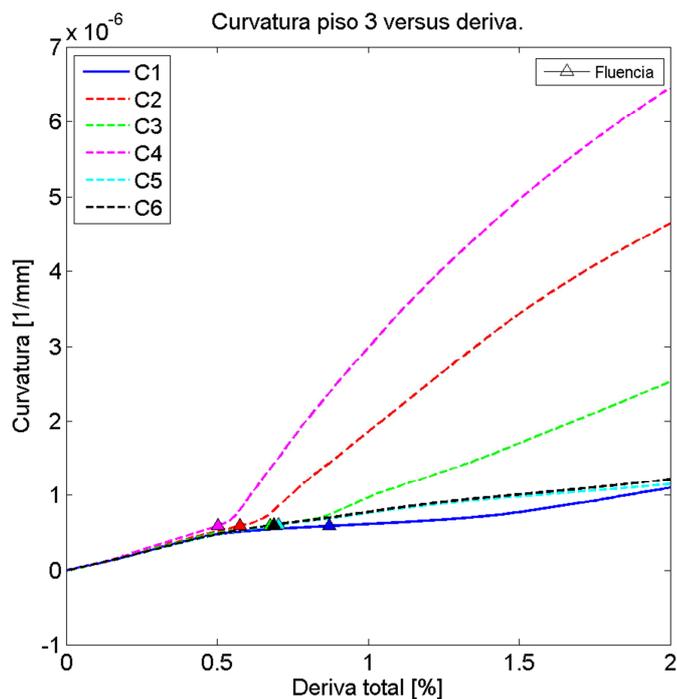


Figura 7.14: Curvatura piso 3 (sobre losa tercer piso), para los 6 casos de análisis indicando fluencias.

## 7.2.2. Análisis de deformaciones unitarias

En esta sección se estudia en detalle las deformaciones unitarias que ocurren en puntos críticos de la sección del muro, y se grafican en función de la deriva, para tener una idea de lo que sucede particularmente en zonas de discontinuidad. Se debe tener en cuenta que la distribución de momentos en la altura tendrá gran influencia en la concentración de deformación en las secciones críticas, sin embargo este estudio se limita a considerar una carga lateral puntual en el techo.

La Figura 7.15 a la Figura 7.20 muestran los perfiles de deformación vertical en la base a lo largo del muro para los casos 1 a 6. Se observa en los casos con abertura (Figura 7.16 a la Figura 7.20), que en general las deformaciones alrededor de la abertura son de un orden similar para derivas de techo bajas (hasta 1.5%), además, la deformación de tracción máxima siempre es de menor valor que la que se tiene en el caso rectangular: se da que a medida que la sección oeste es de menor largo, las deformaciones máximas de tracción tienden a disminuir respecto a las rectangulares. Estos perfiles dan una idea de lo que se podría modelar como una propuesta para el perfil de deformación, para lo cual se dan recomendaciones en la sección siguiente.

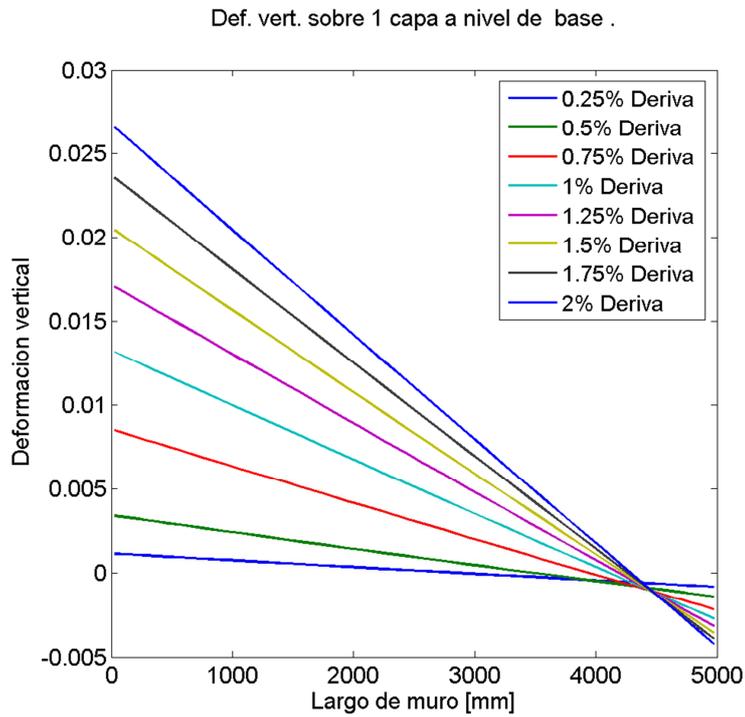


Figura 7.15: Perfil de deformaciones unitarias en la base. Muro rectangular. Caso 1.

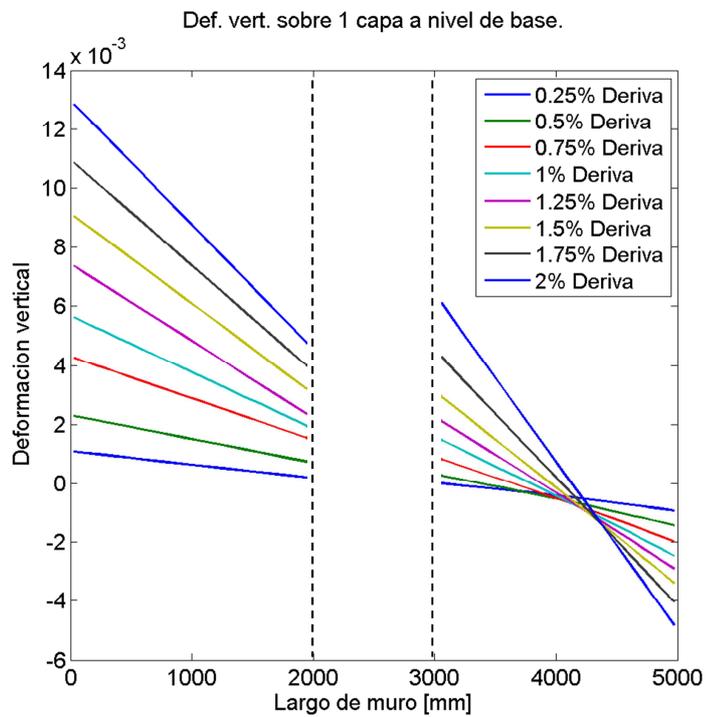
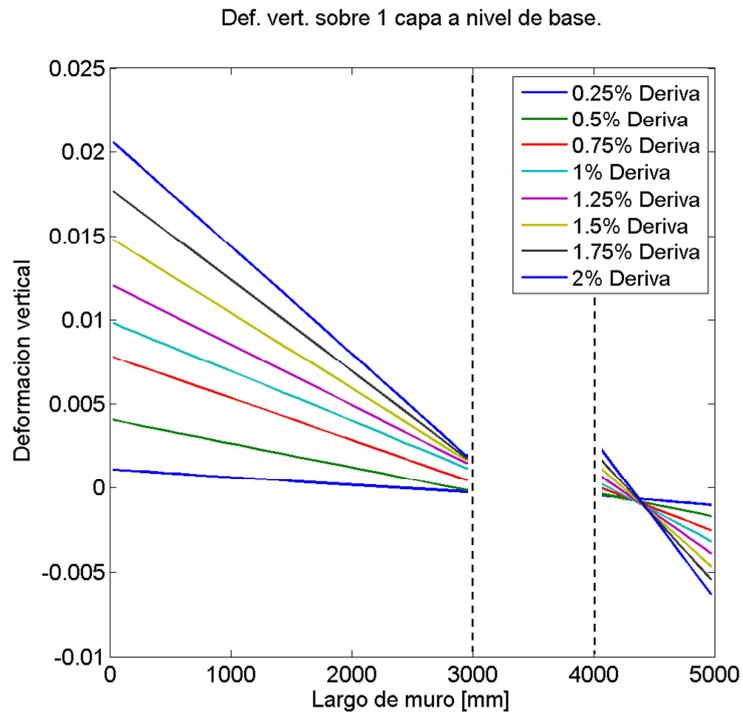
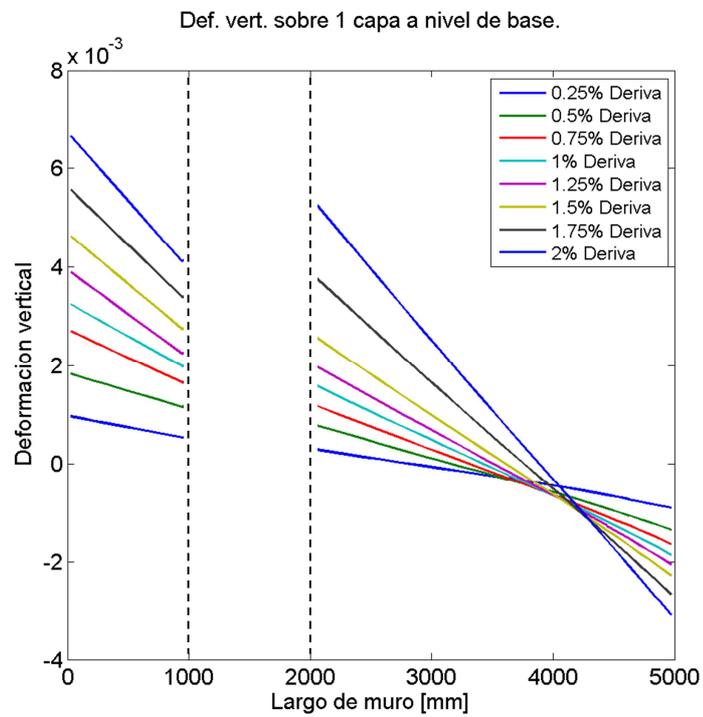


Figura 7.16: Perfil de deformaciones unitarias en la base. Muro con abertura central.<sup>13</sup> Caso 2.

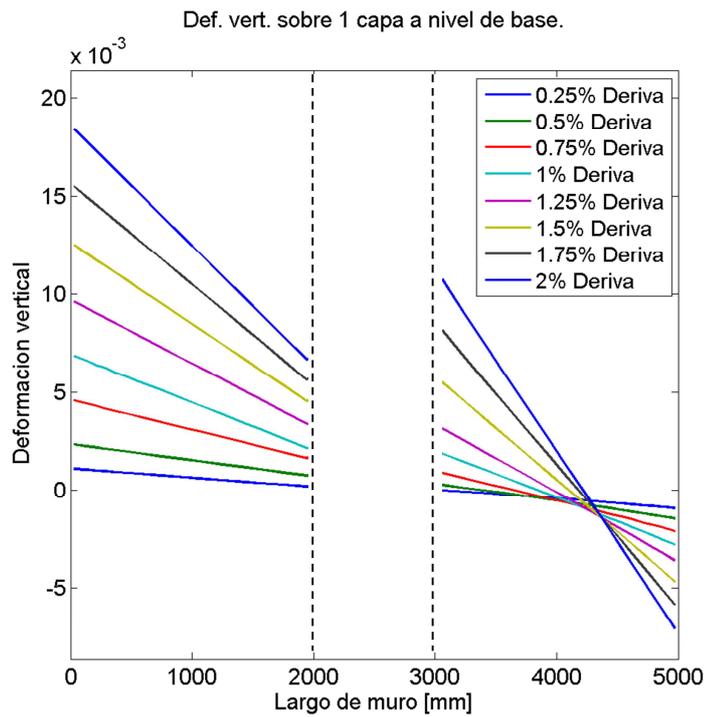
<sup>13</sup> La zona en blanco de la figura corresponde a la zona de la abertura (no hay datos en este tramo).



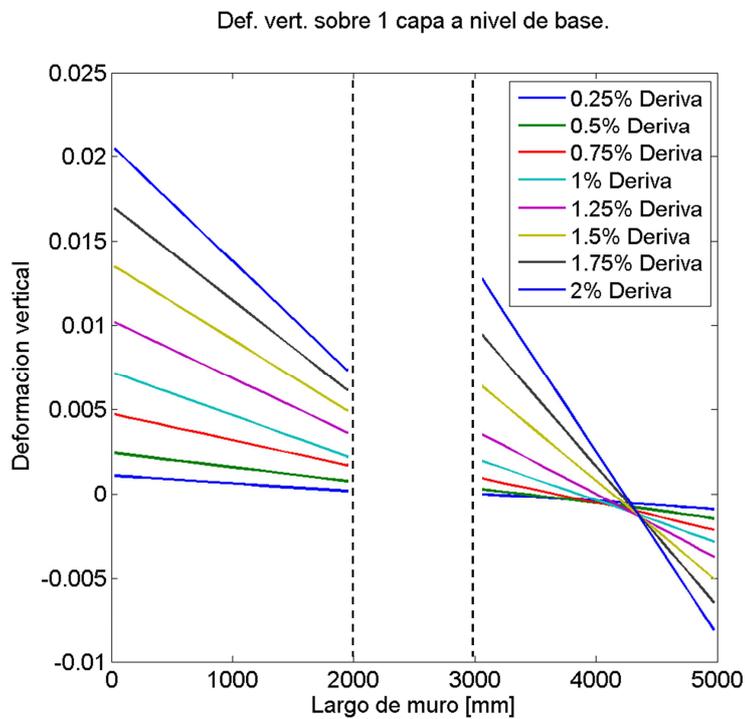
**Figura 7.17: Perfil de deformaciones unitarias en la base. Muro con abertura descentrada al este. Caso 3.**



**Figura 7.18: Perfil de deformaciones unitarias en la base. Muro con abertura descentrada al oeste. Caso 4.**



**Figura 7.19: Perfil de deformaciones unitarias en la base. Muro con abertura centrada, armadura hasta piso 3. Caso 5.**



**Figura 7.20: Perfil de deformaciones unitarias en la base. Muro con abertura centrada, armadura hasta piso 9. Caso 6.**

En general, se observa que el perfil de deformación queda definido por cuatro puntos a lo largo del muro, que constituyen las curvaturas respectivas en cada sección basal. Para comparar de mejor manera lo que ocurre con las deformaciones unitarias en los puntos de la sección que definen el perfil, a continuación se analizan versus la deriva de techo y se comparan todos los casos de análisis.

En la Figura 7.21 se muestra un esquema de la sección del muro genérica, indicando los puntos de interés para las deformaciones. El punto 1 siempre se encuentra en tracción, y el punto 4 siempre se encuentra en compresión. Los puntos 2 y 3 se encuentran en compresión o tracción dependiendo de la ubicación en cada caso de análisis y de la deriva.

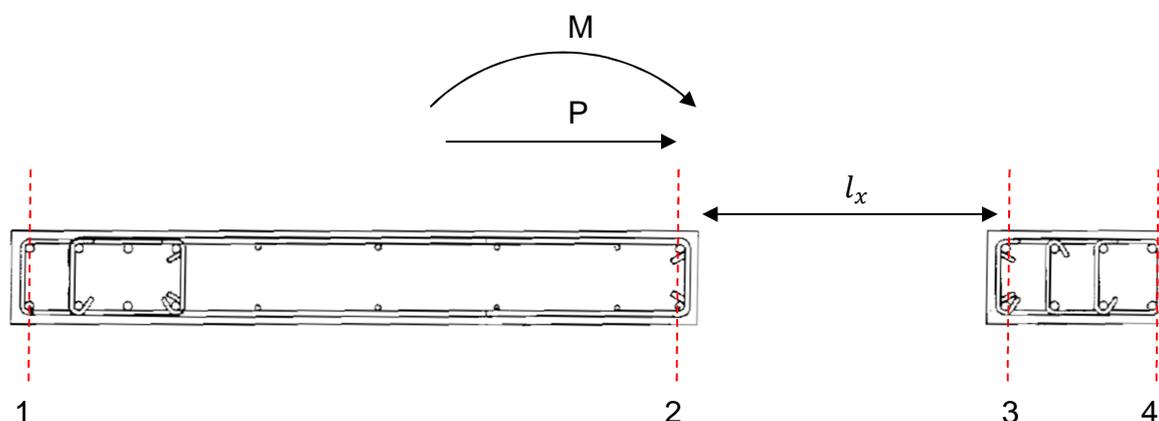


Figura 7.21: Puntos de referencia para deformaciones unitarias y sentido de carga en muros con abertura central.

La Figura 7.22 a la Figura 7.25 muestran la evolución con la deriva de techo de las deformaciones en la base en los puntos indicados en la Figura 7.21. La Figura 7.22 corresponde al punto 1, comparando todos los casos de análisis, y se observa que todos los casos con abertura tienen una deformación menor a la del caso rectangular. Los casos 5, 6 y 3 son los más similares al caso rectangular, con aproximadamente un 20% menor deformación de tracción. Esto nos indica que una abertura central de largo 20% del largo del muro, con armadura alrededor de la abertura adecuadamente desarrollada en la altura (casos 5 y 6), es capaz de reducir las deformaciones de tracción máximas en un 20% para derivas altas (2%), y que a medida que la abertura se ubica hacia el extremo en compresión, la tracción máxima se tiende a parecer a la de un muro rectangular. Notar que, el caso 3 tiene un refuerzo tal que provoca una concentración de deformación en el piso 3, lo que reduce las deformaciones basales del muro, por lo que es esperable que para un caso similar con refuerzo desarrollado adecuadamente en la altura, las deformaciones de tracción máximas sean bastante similares a las de un muro rectangular.

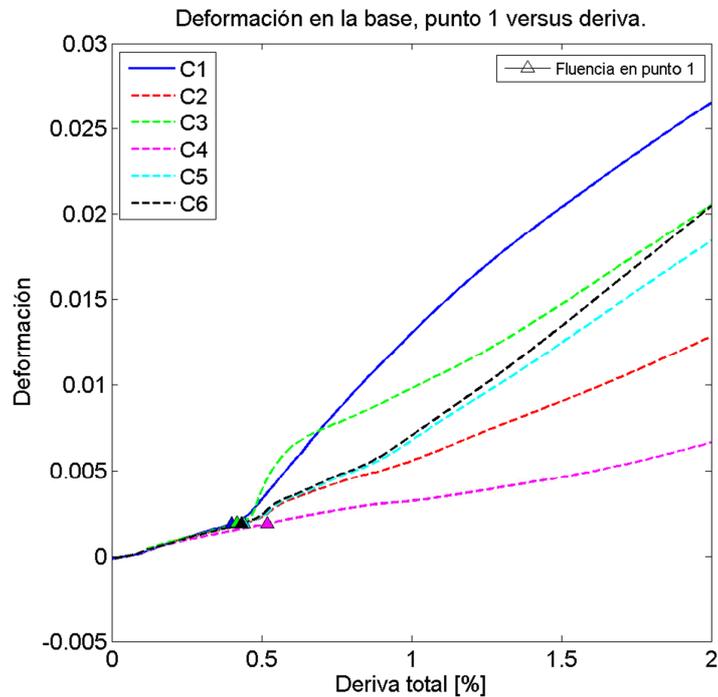


Figura 7.22: Deformación en la base para el punto 1 (punto más traccionado).

La Figura 7.23 indica la deformación en el punto 2. Notar que el punto 2 del caso 1 tiene 3 variantes, dependiendo de con qué caso con abertura se quiere hacer la comparación (indicado entre paréntesis en la leyenda). Comparando el caso 1 con los casos 2, 5 y 6 (abertura centrada), se observa que los casos con abertura también tienen una deformación de tracción menor en aproximadamente un 30% para 2% de deriva. Esto indica que las deformaciones de tracción de muros con aberturas centradas son menores que las del caso rectangular en toda la sección traccionada del muro, de manera casi uniforme en todo el largo de la sección. Comparando el caso 1 con el caso 2 (abertura al este), se observa la misma tendencia para derivas altas, pero mucho más notoria ya que en el caso con abertura las deformaciones se mantienen por debajo a la fluencia en casi todo el rango de deriva observado. Por último, el caso 4 muestra ser el con mayor diferencia respecto al caso rectangular, al igual como se observaba en el punto 1. Lo anterior implica que a medida que la abertura se acerca hacia el extremo en tracción, la deformación de tracción en toda la sección oeste tiende a ser cada vez menor a la observada en un muro rectangular.

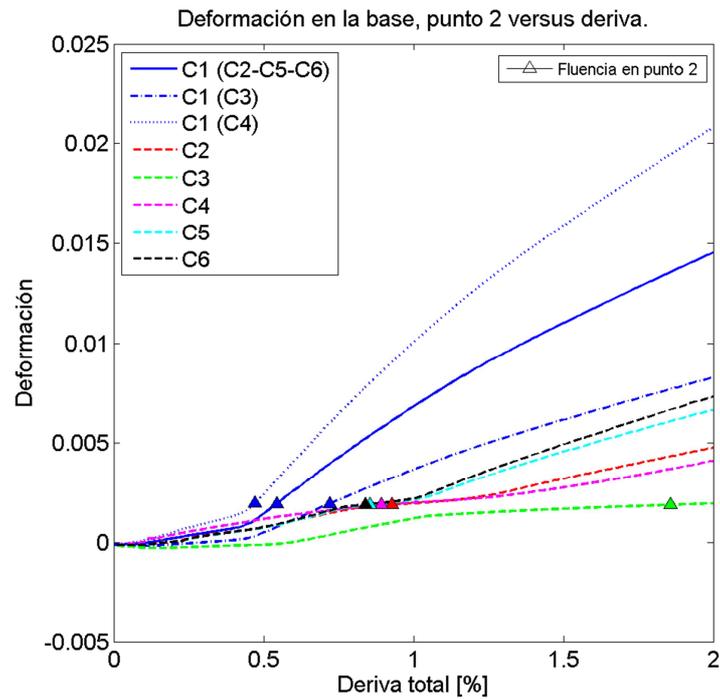


Figura 7.23: Deformación en la base para el punto 2.

La Figura 7.24 indica la deformación en el punto 3. Notar que el punto 3 del caso 1 tiene 3 variantes, dependiendo de con qué caso con abertura se quiere hacer la comparación (indicado entre paréntesis en la leyenda). Lo primero es destacar que para todos los casos se tiene que este punto se encuentra mayoritariamente en tracción (solo el caso 3 tiene compresiones bajas para niveles bajos de deriva y bajas deformaciones de tracción), esto implica que la armadura longitudinal ubicada en este punto es de relevancia para casos con aberturas centradas, incluso para casos con aberturas descentradas, que para derivas altas puede fluir (ver caso 3). Comparando con los casos 2, 5 y 6 (abertura centrada), se observa que si se tiene armadura correctamente desarrollada en la altura, las deformaciones son menores en general, pero tienden a parecerse para derivas altas. Todas las tendencias observadas en el punto 2 se mantienen para el punto 3, incluso las deformaciones del punto 3 tienden a ser muy similares a las del punto 2, excepto para derivas muy altas.

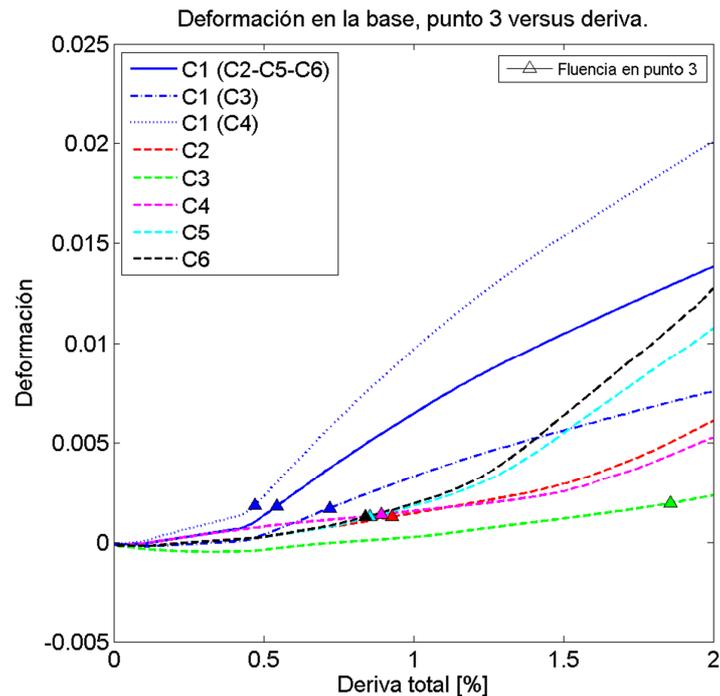


Figura 7.24: Deformación en la base para el punto 3.

La Figura 7.25 muestra las deformaciones de compresión máximas en todos los casos de análisis. Se observa que los casos 3, 5 y 6 tienen deformaciones mayores desde un 50% a un 100% del caso rectangular, esto significa que, para aberturas centradas con la armadura longitudinal en la abertura bien desarrollada en la altura (caso 5 y 6), las deformaciones de compresión pueden aumentar hasta el doble de las observadas en el caso rectangular, y que si la abertura se localiza hacia el extremo en compresión (caso 3), el aumento en compresiones puede ser bastante significativo. Notar que el caso 3 tiende a tener concentraciones de deformación en el piso 3, por lo que la demanda de deformación en la base es reducida en comparación a los casos 5 y 6, por lo que es esperable que las deformaciones de compresión máximas para muros con aberturas descentradas localizadas hacia el extremo en compresión sean incluso mayores al 100% de lo observado en un muro rectangular. Observando el caso 4, se espera también que las compresiones máximas de la sección este sean más similares a las de un muro rectangular a medida que la abertura se sitúa más cerca de la zona en tracción, pudiendo ser también significativamente mayores. Parte de esta amplificación de compresión se explica por el aumento de carga axial que existe al incorporar la abertura en la base. La carga axial promedio en la base es de  $5/4$  la carga axial promedio en el techo, es decir, 25% mayor en promedio, pero la amplificación de deformación depende de la redistribución de deformaciones a lo largo del muro y claramente no se puede esperar un aumento de deformaciones de compresión de 25%, por lo que un análisis más acabado para estimar el aumento de compresión se debe basar en evaluar la ubicación y tamaño de la abertura en conjunto.

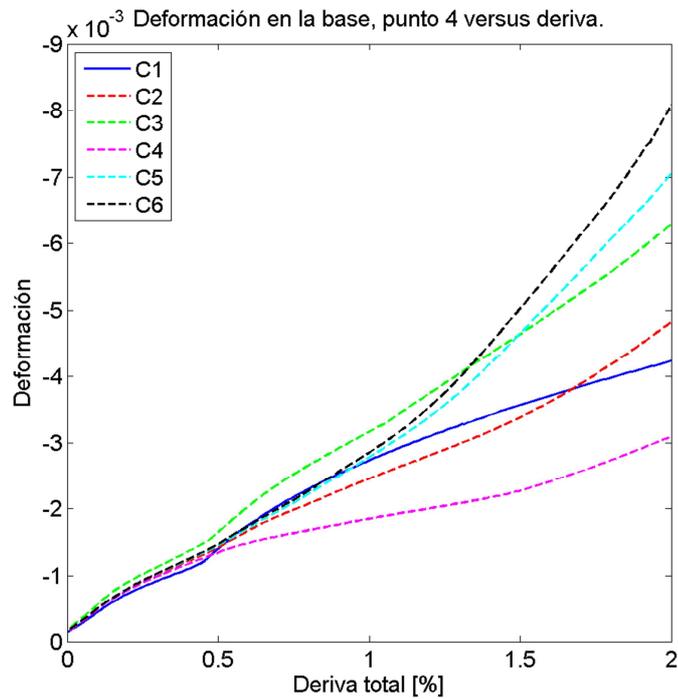


Figura 7.25: Deformación en la base para el punto 4 (punto de máxima compresión).

Las conclusiones derivadas de este análisis deben extenderse a cargas sísmicas, las cuales son cíclicas, por lo que se debe tener especial atención con las situaciones descritas para muros con aberturas descentradas. Al final de este capítulo se resume el análisis realizado considerando el comportamiento observado en muros con abertura en el alma, enfocado a cargas cíclicas.

En la Figura 7.23 y Figura 7.24 se observa que las deformaciones en el punto 2 y 3 tienden a ser similares para derivas bajas, lo que se corrobora en la Figura 7.26, que compara las deformaciones en el punto 2 y 3 para todos los modelos con abertura (casos 2 al 6). Se observa que, para los casos con armadura longitudinal en la abertura bien desarrollada en la altura (casos 5 y 6), a partir de derivas de 1.5% la deformación medida en los puntos 2 y 3 comienza a separarse. Esta similitud, sin embargo, se espera que dependa fuertemente de la cuantía que se disponga alrededor de la abertura.

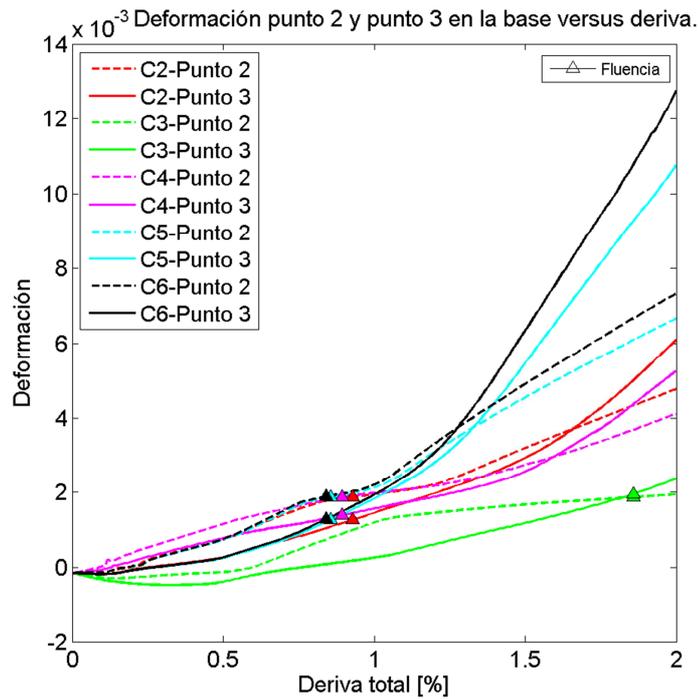


Figura 7.26: Deformación basal en punto 2 y 3 en muros con abertura.

A continuación en la Figura 7.27, se compara el perfil de deformación a nivel del segundo piso para el caso 1 (rectangular) y el caso 6 (abertura centrada con refuerzo continuo en abertura hasta piso 9). Se observa que el perfil es típico de un muro rectangular en ambos casos, indicando que a este nivel el comportamiento del muro se es comparable directamente con un caso rectangular, y que las deformaciones de tracción máxima del caso 6 son levemente menores a las del caso 1, mientras que las deformaciones de compresión son bastante similares para todo el rango de deriva mostrado. Esto se corrobora en mayor detalle en la Figura 7.28, que muestra la evolución de la máxima tracción con la deriva de techo para todos los casos de análisis en el segundo piso, y en la Figura 7.29, que muestra la deformación de máxima compresión versus la deriva de techo en el segundo piso. Se observa que la tracción máxima es similar para derivas bajas entre el caso 1, 5 y 6, y a una deriva de 2% se tiene una tracción menor en un 27% al caso rectangular. La compresión máxima es prácticamente idéntica en los 3 casos.

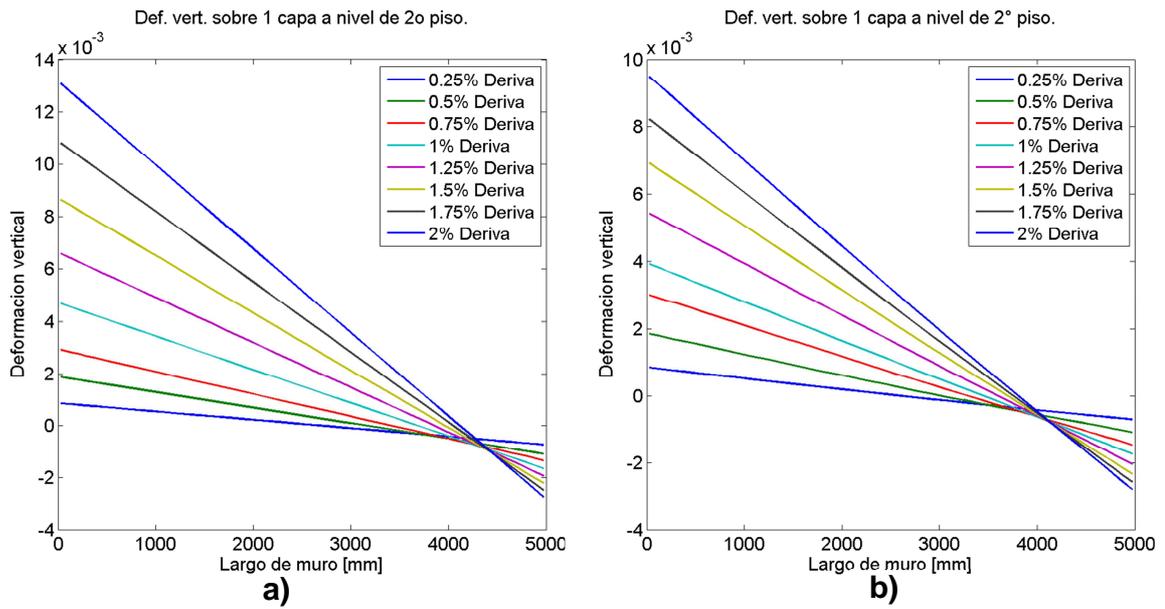


Figura 7.27: Perfil de deformaciones en segundo piso. a) Caso 1: muro rectangular y b) Caso 6: muro con abertura centrada y refuerzo continuo.

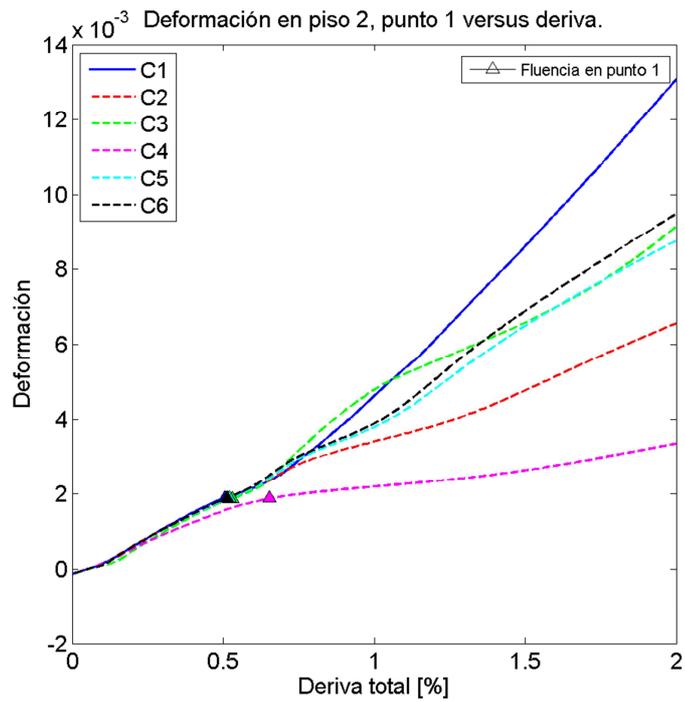


Figura 7.28: Deformación en piso 2 para el punto 1 (punto de máxima tracción).

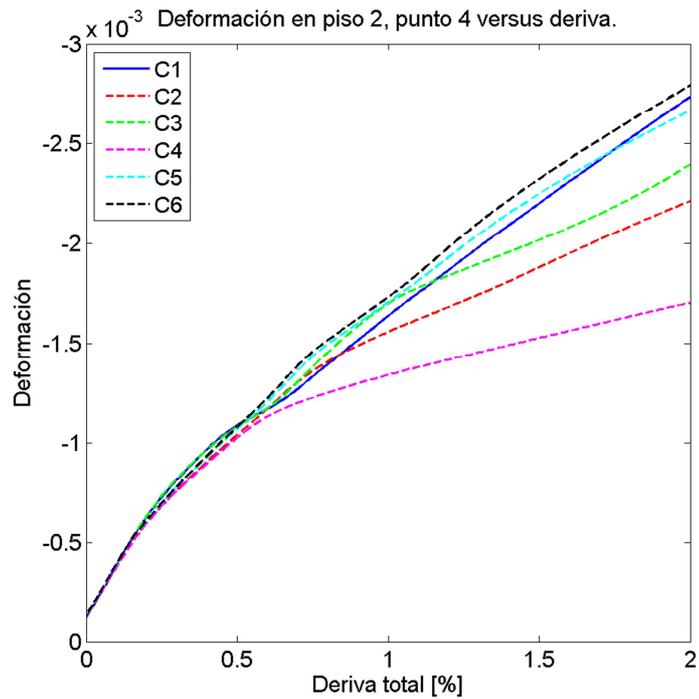
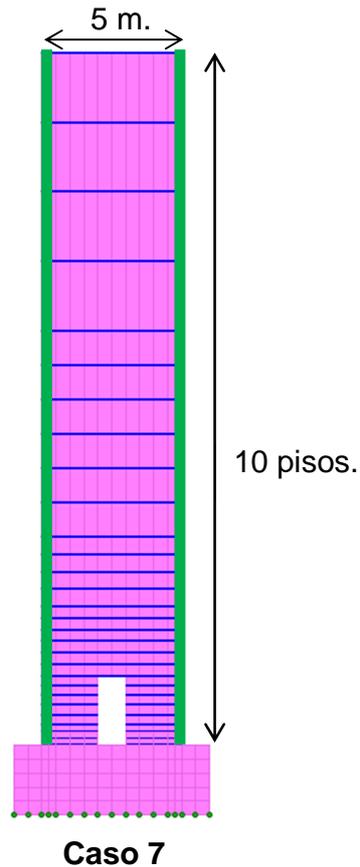


Figura 7.29: Deformación en piso 2 para el punto 4 (punto de máxima compresión).

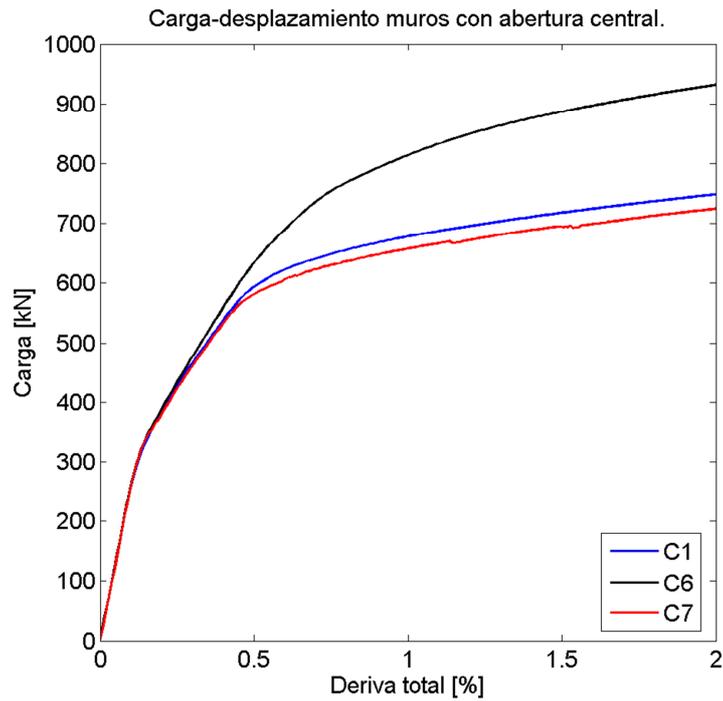
### 7.2.3. Análisis de efecto de la armadura longitudinal en la abertura.

Para ver la influencia que tiene la armadura longitudinal dispuesta alrededor de la abertura en las tracciones y compresiones máximas en la base del muro con abertura, se analiza en esta sección un caso de muro con abertura centrada sin armadura longitudinal dispuesta en los bordes de la abertura (sólo con armadura distribuida con cuantía de 0.0025) y se compara con el caso 1 y 6 de la sección anterior. La Figura 7.30 muestra las dimensiones y disposición de armaduras del caso de análisis, que se llamará "caso 7". El caso de análisis tiene los mismos parámetros definidos para los casos anteriores de este capítulo.



**Figura 7.30: Dimensiones de caso de análisis 7: muro con abertura centra sin armadura de borde en la abertura.**

La Figura 7.31 muestra la relación carga-desplazamiento que se obtiene del Caso 7 en contraste con el caso 6 (armadura longitudinal continua en la abertura con cuantía 0.025) y el caso 1 (muro rectangular). Se observa que no existe gran diferencia en resistencia ni rigidez entre el caso 7 y el caso 1. Sin embargo se espera que la resistencia tienda a ser menor en casos con abertura ubicadas en la dirección de la carga sin armadura longitudinal, como se observa en la tendencia de la Figura 7.3 (comparando el caso 3 con el 4). Esto se evita disponiendo de refuerzo longitudinal en la abertura.



**Figura 7.31: Carga desplazamiento Casos 1, 6 y 7.**

La Figura 7.32 muestra la curvatura basal que se observa en el caso 7, contrastado con el caso 1 (rectangular) y el caso 6 (con abertura central reforzada hasta piso 9). Se observa que posterior a la fluencia de la sección basal de muro en compresión, la cual ocurre de manera temprana en comparación al caso 6, las curvaturas de ambas secciones basales comienzan a aumentar significativamente, siendo la sección este la con mayor aumento, llegando a casi 2.5 veces la curvatura observada en el caso rectangular. La curvatura de la sección oeste, que para el caso 6 era similar a la del muro rectangular, también tiende a ser mayor, casi un 60% que en el caso rectangular.

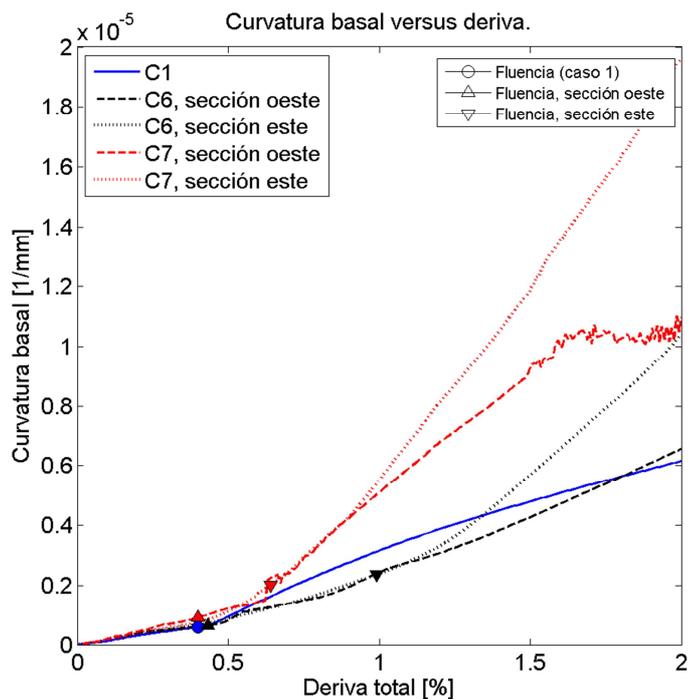
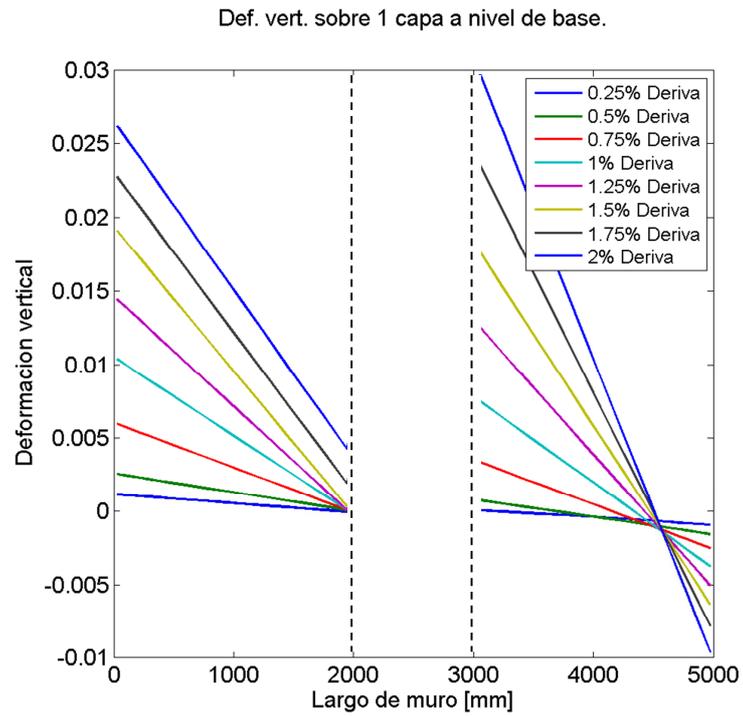
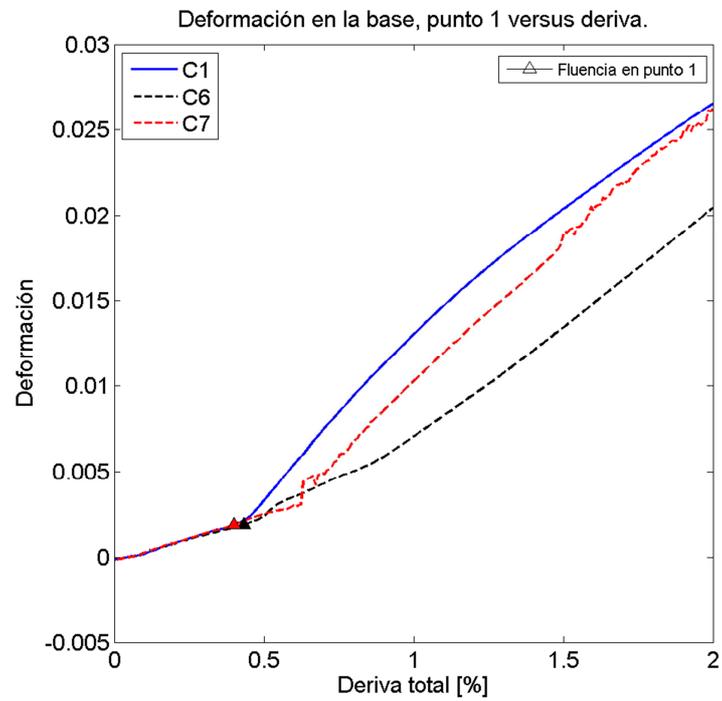


Figura 7.32: Curvatura basal versus deriva para caso 1, 6 y 7, indicando puntos de fluencia.

La Figura 7.33 muestra el perfil de deformaciones en la base. En ella, se observa lo que sucede con la curvatura en la sección este del muro: la tracción tiende a aumentar notoriamente en el punto 3 (en comparación al caso 6), mientras que la compresión máxima aumenta levemente a pesar de que el largo en compresión (o distancia entre la línea neutra y el borde más comprimido) es menor. En la sección oeste, se observa que el aumento de curvatura se debe principalmente a un aumento en las tracciones máximas. Para cuantificar estas diferencias, la Figura 7.34 muestra las deformaciones de tracción máxima en los casos 1, 6 y 7, y la Figura 7.35 muestra las deformaciones de compresión máxima. Se observa que la tracción máxima se desarrolla casi a la par respecto a la del muro rectangular (caso 1), por lo que la reducción en la máxima tracción observada en los casos anteriores con abertura central se debe principalmente a la armadura extra dispuesta en la abertura. Sin embargo, como se observó anteriormente, la abertura dispuesta cerca del borde en tracción provoca una disminución importante debido a su ubicación. Esto nos permite deducir que si la abertura se ubica en la dirección en la que se orienta la carga, la tracción máxima será similar a la del caso rectangular si no se dispone de armadura longitudinal alrededor de la abertura. En la Figura 7.35, se observa que la compresión máxima tiende a ser aún mayor que la del caso 6, sobrepasando notablemente la compresión del caso rectangular, lo que se traduce en menor ductilidad. De esto se concluye que disponer de armadura longitudinal en los bordes de la abertura trae beneficios tanto para la tracción máxima como para la compresión.



**Figura 7.33: Perfil de deformaciones unitarias en la base. Muro con abertura centrada, sin refuerzo en abertura. Caso 7.**



**Figura 7.34: Deformación en la base para el punto 1 (punto de máxima tracción).**

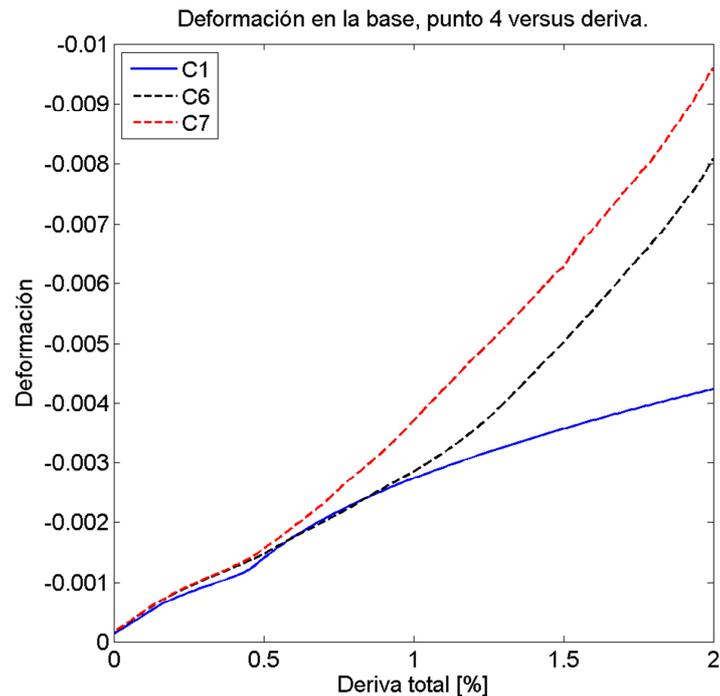


Figura 7.35: Deformación en la base para el punto 4 (punto de máxima compresión).

#### 7.2.4. Resumen de resultados.

Acorde a lo observado en este capítulo, se concluye que es muy recomendable evitar la doble rótula plástica en muros de este tipo, ya que de esta forma se evita tener que tomar medidas necesarias para disminuir las deformaciones en una sección que no es la que típicamente se espera sea la sección crítica. En el caso que se disponga de armaduras longitudinales bien desarrolladas en la altura alrededor de la abertura, respecto de las deformaciones basales de un muro con abertura en el alma con carga axial de  $0.05f'_c A_g$  ( $A_g$  sección completa), se debe tener en consideración las situaciones siguientes:

- La tracción máxima en un muro con abertura en el alma es de menor valor que un muro rectangular si se dispone de armadura longitudinal en los bordes de la abertura. En caso que no se disponga de esta armadura, es esperable que la tracción máxima sea del mismo valor que la del muro rectangular en los casos en que la carga va en la dirección de la ubicación de la abertura o en un muro con abertura centrada. A medida que la abertura se sitúa hacia la zona de tracción, el efecto de reducción de la tracción es mayor, mientras que si la abertura se sitúa hacia la zona de compresión (o equivalentemente la carga sísmica actúa en la dirección en la que se sitúa la abertura), la

deformación de tracción máxima se tiende a acercarse a la de un muro rectangular del mismo largo total.

- La deformación en la zona contigua a la abertura en el lado de la sección en tracción (definida como punto 2 en este capítulo), se mantiene, en general, en tracción, y sólo incurre en deformaciones de compresión pequeñas cuando la abertura se sitúa hacia la zona más comprimida del muro. Esta compresión no es significativa en ningún caso. Esto implica que la sección basal en tracción de un muro con abertura en el alma se encuentra traccionada en prácticamente toda la sección para un rango de deriva de 0 hasta 2%. La deformación de tracción, en los casos en donde se tenga armadura dispuesta alrededor de la abertura, tiende a ser uniformemente menor a la del muro rectangular a lo largo de la sección basal en tracción del muro con abertura, es decir, la curvatura en la sección basal en tracción es muy similar a la curvatura del muro rectangular. En caso que no se tenga abertura con refuerzo longitudinal en los bordes, la curvatura de la sección basal en tracción tiende a ser mayor que la del muro rectangular. Se debe evaluar cómo afecta el nivel de carga axial a la curvatura observada en la sección basal en tracción.
- La deformación en la zona contigua a la abertura en el lado de la sección en compresión (definida como punto 3 en este capítulo) sufre deformaciones de tracción de magnitud menor a la que se tiene en un muro rectangular en el mismo punto para derivas bajas (de hasta 1.5% en los casos analizados), y tienden a igualar las de un muro rectangular para derivas altas (cercano a 2% en los casos analizados). Se tiene que, incluso para casos con la abertura situada hacia la zona más comprimida, esta zona se mantendrá en tracción y sólo incurre en deformaciones de compresión pequeñas para derivas bajas. El nivel de carga axial debe ser evaluado para ver su efecto en las deformaciones de esta zona.
- Las deformaciones alrededor de la abertura son similares para derivas bajas si se considera refuerzo longitudinal alrededor de la abertura.
- La deformación de compresión máxima en muros con abertura en el alma es ampliamente mayor a la que se tiene en un muro rectangular. Este efecto es mayor si la abertura se sitúa más cerca de la zona en compresión (carga sísmica actuando en la dirección en la que se sitúa la abertura), y es menor si la abertura se sitúa cerca de la zona más traccionada, llegando a valores similares a las del muro rectangular. La armadura longitudinal dispuesta en los bordes de la abertura tiene un efecto directo sobre la compresión máxima, siendo ésta levemente mayor si no se considera refuerzo: a pesar de que la línea neutra tiende a posicionarse hacia el extremo más comprimido del muro, se observa que la curvatura aumenta de tal manera que la compresión

termina siendo mayor si no se dispone de este refuerzo. Es esperable que, si se dispone de armadura longitudinal de borde (concentrada) en la abertura, este efecto podría invertirse al variar la cuantía, es decir, a mayor cuantía mayor deformación de compresión, pero al menos se concluye que es beneficioso disponer de la armadura con la cuantía considerada en el análisis, principalmente por su efecto en limitar las deformaciones de tracción.

- En resumen, llevando el análisis al caso de una carga sísmica, se puede decir lo siguiente:
  - a. En un muro con abertura centrada, la compresión máxima será mayor a la de un muro rectangular del mismo largo total, mientras que la tracción máxima será menor o igual dependiendo de la cuantía que se disponga en el borde de la abertura. La curvatura de la zona traccionada se puede modelar como igual a la de un muro rectangular si se dispone de armadura alrededor de la abertura, mientras que la curvatura de la zona en compresión debe ser amplificada debidamente.
  - b. En un muro con abertura descentrada, cuando la carga sísmica va en la dirección en que se ubica la abertura, la compresión máxima es mayor que la obtenida en un muro rectangular, cuya amplificación, es dependiente de las dimensiones relativas de la sección basal de muro en compresión y de la ubicación de la abertura. La tracción máxima en esta dirección de carga es similar a la de un muro rectangular. Cuando la dirección de carga es en sentido contrario a la dirección en que se sitúa la abertura, la compresión máxima será mayor a la de un muro rectangular, pero menor a la compresión máxima obtenida en la dirección contraria. La deformación de tracción en esta dirección de carga será menor a la de un muro rectangular. Como regla general: las tracciones máximas son siempre menores o iguales a las de un muro rectangular en ambas direcciones de carga, mientras que las compresiones máximas serán siempre mayores.

#### **7.2.5. Validación mediante resultados experimentales.**

A modo de validación con resultados experimentales, podemos comparar las deformaciones basales obtenidas de las probetas RW2 (Thomsen & Wallace, 1995) y RW3-O (Taylor & Wallace, 1995) para validar el comportamiento observado en los casos de análisis, al menos en términos de deformaciones en la base, ya que se trata de dos probetas prácticamente idénticas, una rectangular (RW2), y una con abertura en el alma (RW3-O). En la Figura 7.36 se muestran las deformaciones en la base obtenidas de los LVDTs para 1.5% de deriva de techo nominal (ver capítulo 2), para la dirección de carga sur, en la que la columna del espécimen RW3-O se encuentra en compresión. Se observa un comportamiento similar a lo observado analíticamente, en

donde la compresión máxima tiende a ser mayor en el muro perforado que en el muro rectangular (si bien la medición no es fina, es posible deducir que la compresión máxima del RW3-O es mayor, porque la curvatura observada en ese tramo de muro es mayor que la de RW2). Por otro lado, la tracción tiende a ser levemente menor. En la Figura 7.37, se muestra la deformación basal en la dirección norte para el mismo nivel de deriva (1.5%), en donde se ha asumido que el comportamiento de la probeta RW2 es simétrico, y se observa que la compresión máxima es similar entre ambos especímenes, mientras que la tracción máxima es al menos un 30% menor al caso RW2. Esto da un indicio de lo observado analíticamente para las deformaciones máximas en la base: las tracciones se tienden a reducir al incorporar la abertura para ambas direcciones de carga, y las compresiones tienden a aumentar sobre todo para la dirección de carga orientada hacia la ubicación de la abertura.

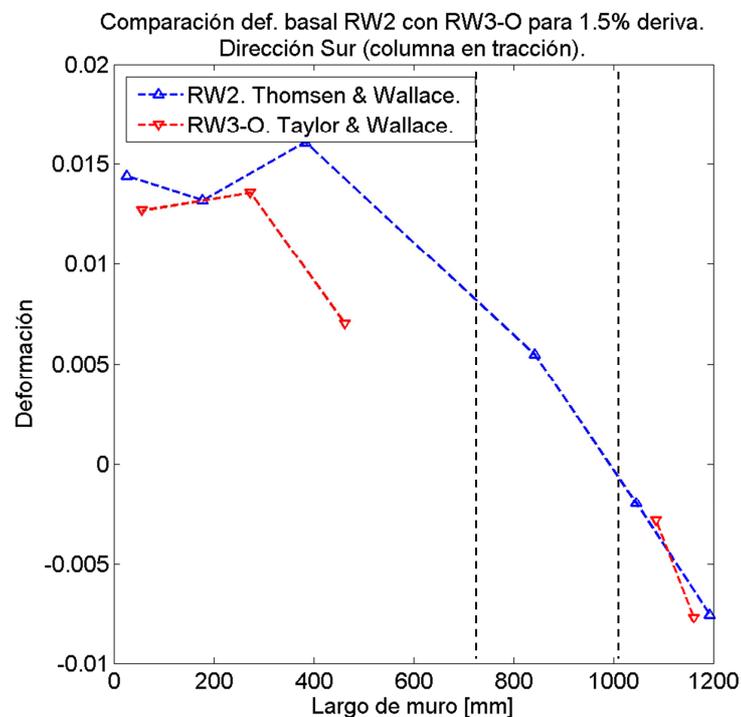


Figura 7.36: Comparación RW3-O y RW2. Carga en dirección sur (columna en compresión). Deriva 1.5%.

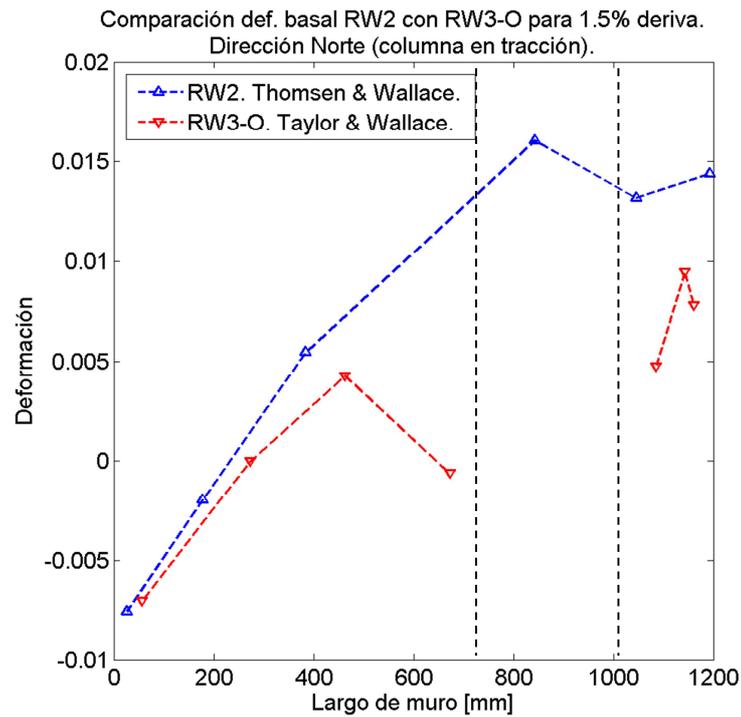


Figura 7.37: Comparación RW3-O y RW2. Carga en dirección norte (columna en tracción). Deriva 1.5%.

El comportamiento general del espécimen RW3-O parece ser bastante similar al del RW2, la fluencia en la columna ocurre prácticamente al mismo nivel de deriva en que lo hacen las barras del borde del muro RW2 (ver capítulo 2), al igual que lo observado en este capítulo. Los autores indican que en el espécimen RW3-O se pandearon fuera del plano las barras de la columna a una deriva nominal de 2.5%, mientras que en el borde norte las barras se pandearon a 3% de deriva, lo que da un indicio de la mayor compresión en la que incurre la columna en compresión en comparación al borde norte del espécimen. Además, en el reporte (Taylor & Wallace 1995), se indica que el espécimen RW2 pandea sus barras longitudinales de borde al 2.5% de deriva (tercer ciclo), lo que da indicio de que la tracción menor incurrida por las barras del borde norte del RW3-O durante las cargas cíclicas pudo haber aumentado su capacidad al pandeo respecto de la que sostuvo el espécimen RW2. En términos generales, la resistencia de las probetas es bastante similar (ver Figura 4.3 y Figura 4.14), con la probeta RW3-O alcanzando una levemente menor resistencia en la dirección de la abertura. En general, teniendo en consideración el comportamiento observado en el análisis junto con lo observado experimentalmente, se concluye que en términos de resistencia a cargas sísmicas, el hecho de tener menores deformaciones de tracción máxima es favorable al reducir las posibilidades de pandeo de barras y compensa de alguna manera las compresiones amplificadas que se producen al incluir una abertura, pero se debe tomar las precauciones necesarias para dar ductilidad a la respuesta del muro, ya que la compresión máxima es altamente aumentada al incluir una abertura tipo compuerta en la base.

### 7.3. Efectos de la incorporación de las deformaciones de corte en muros con aberturas centradas.

#### 7.3.1. Análisis de muro con abertura central reforzada.

Se implementa un modelo que incorpora el corte en las deformaciones unitarias para contrastar la respuesta y los efectos que éste produce con la respuesta del análisis de flexión. El análisis es idéntico al caso con abertura central de flexión con armadura en la abertura hasta el piso 3 (caso 2), tratado anteriormente.

Al observar la Figura 7.38 se tiene que el incorporar el corte no tiene consecuencias sobre el desplazamiento de primera fluencia, lo que sugiere que la tracción máxima no se ve afectada por incorporar el corte al menos en el rango elástico. La fluencia del tramo este se ve afectada al incorporar el corte en el análisis, lo que indica que la tracción en la zona contigua a la abertura en la sección este (sección en compresión) sí se ve disminuida al incorporar el corte, tal como ocurre en muros rectangulares. Se observa que las curvaturas en ambas secciones son muy similares para todo el rango de deriva analizado.

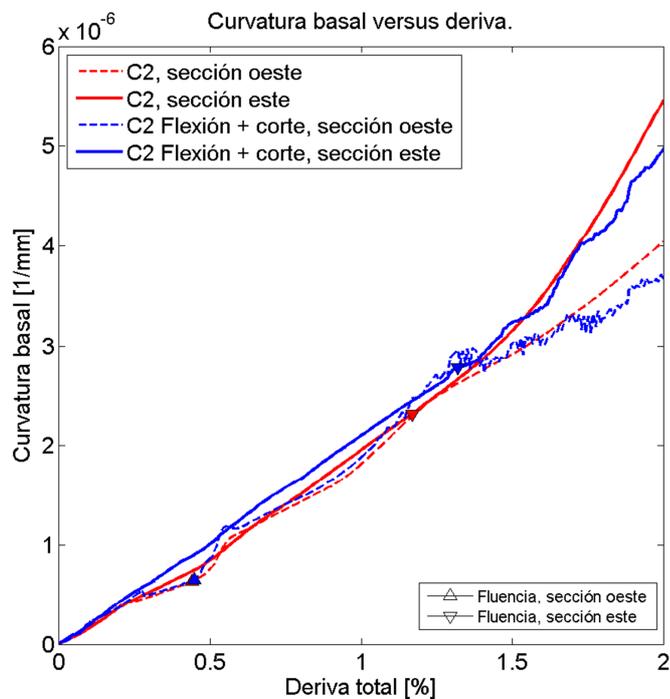


Figura 7.38: Curvatura basal para caso 2, análisis de flexión + corte.

La altura de plastificación no sufre cambios notorios debido a que es medida según la fluencia en el tramo ubicado al este del muro, el cual, como se mencionó, no tiene mucha diferencia con el caso de flexión (ver Figura 7.39).

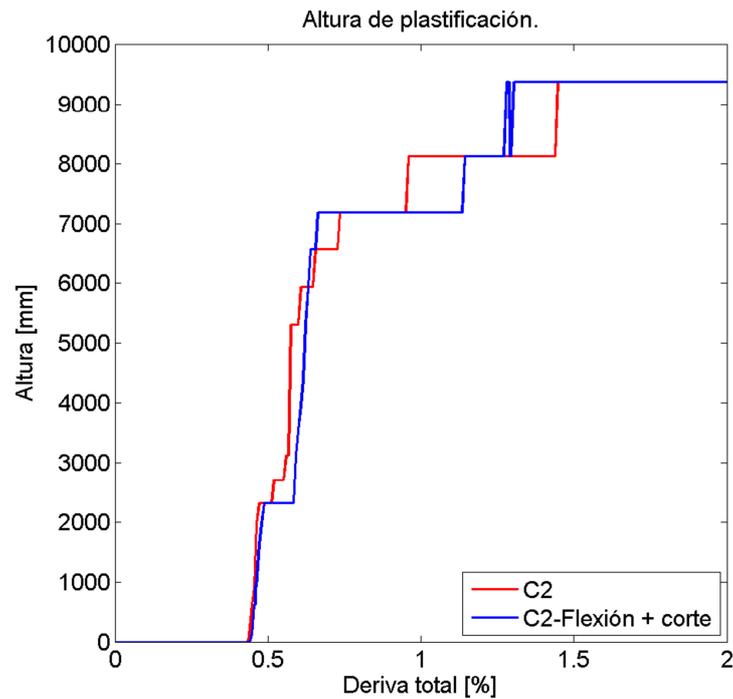


Figura 7.39: Altura de plastificación, muro con abertura central. Análisis de flexión + corte versus flexión.

Analizando lo que sucede con las deformaciones unitarias en los puntos definidos en 7.2.2, en la Figura 7.40 a la Figura 7.43 se corrobora lo que se obtiene de los gráficos de curvatura: los puntos 1 y 2 no sufren alteración debido al corte, mientras que el punto 3 y cuatro sufren una modificación similar a la que se tiene en muros rectangulares. Esto sugiere que la sección este es la única que se ve alterada por los efectos del corte.

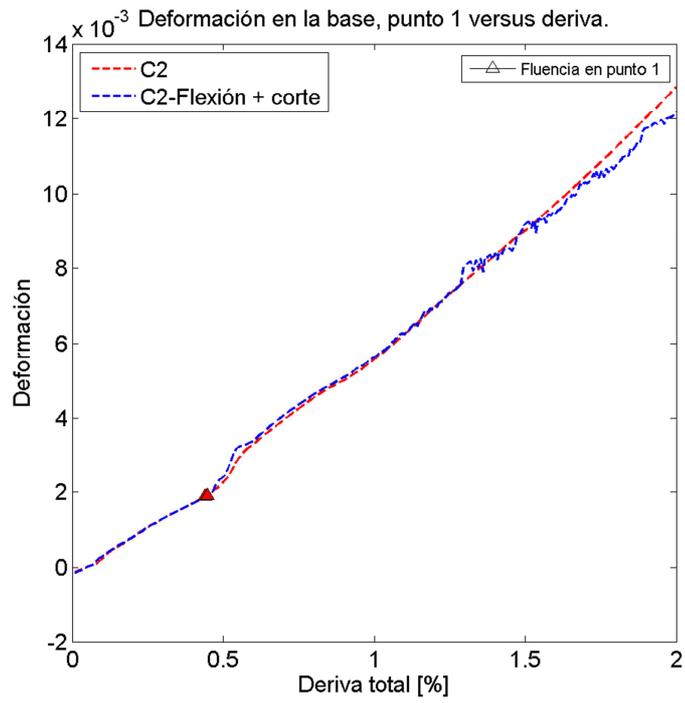


Figura 7.40: Deformación en la base para el punto 1. Análisis de flexión + corte versus flexión.

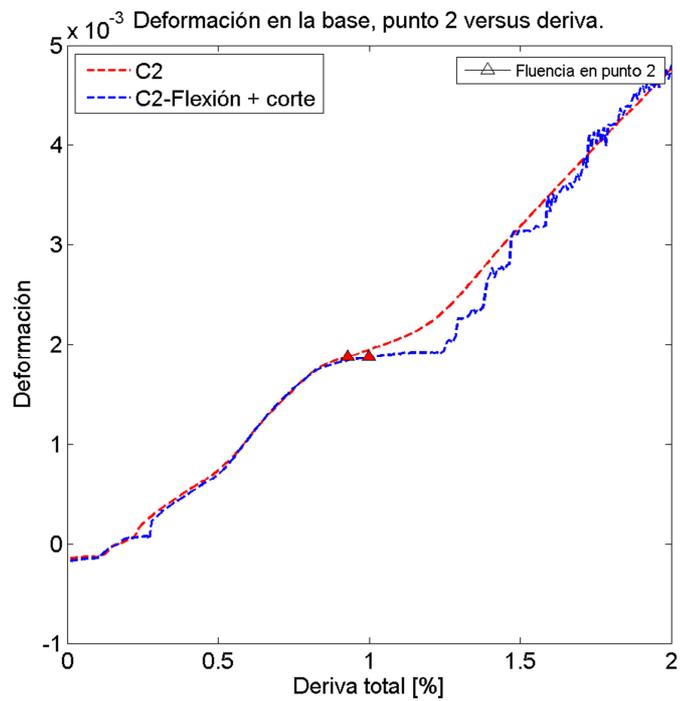


Figura 7.41: Deformación en la base para el punto 2. Análisis de flexión + corte versus flexión.

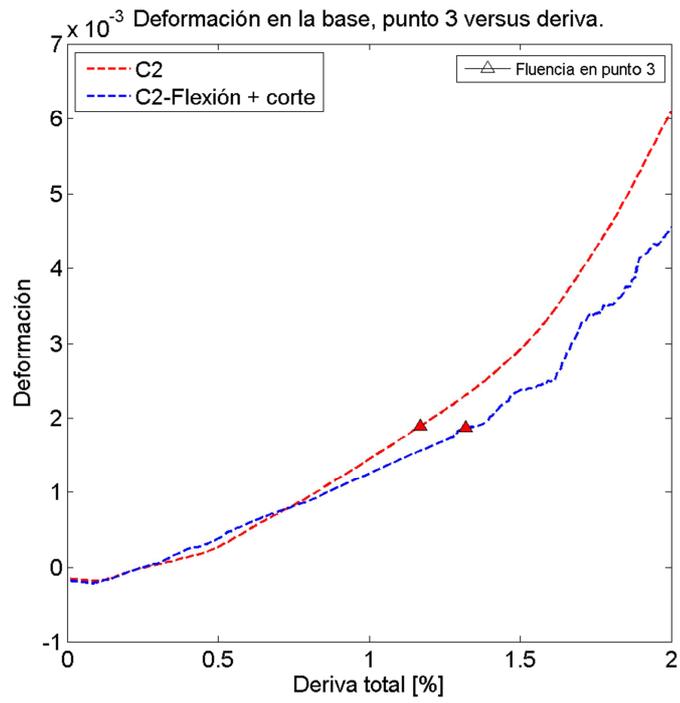


Figura 7.42: Deformación en la base para el punto 3. Análisis de flexión + corte versus flexión.

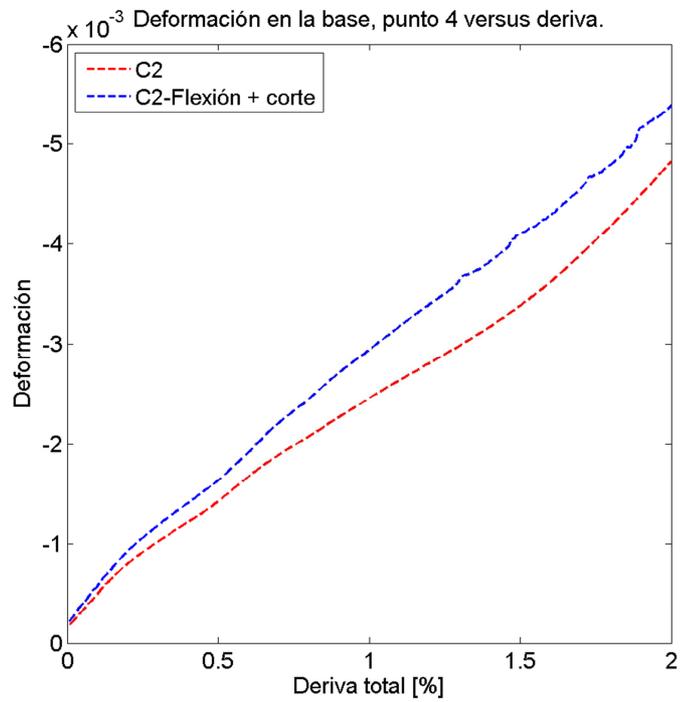


Figura 7.43: Deformación en la base para el punto 4. Análisis de flexión + corte versus flexión.

Se verifica que el modelo calibrado de tracción (ecuación 5.5 para tracción) representa de buena forma lo que sucede con el punto 3 si se considera el largo total del muro como referencia para la relación de aspecto y para el largo de confinamiento relativo, y la primera fluencia (fluencia de la sección oeste) como la fluencia a considerar para calcular la deriva plástica. La Figura 7.44 muestra lo que se obtiene con el modelo calibrado comparado con el análisis de flexión y flexión + corte. No se encontró una buena correlación para el modelo calibrado de compresión para representar la amplificación de compresión en el punto 4.

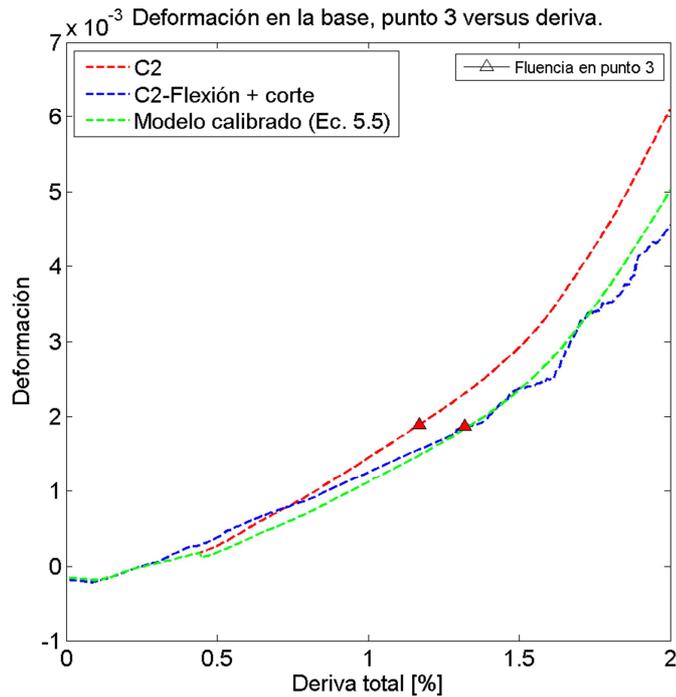


Figura 7.44: Modelo calibrado de tracción (ecuación 5.5) aplicado a deformación de punto 3 en muro con abertura centrada.

A continuación se analizan las deformaciones en el segundo y tercer piso en el punto 1 y 4 (máxima tracción y máxima compresión), con el objetivo de determinar si el corte tiene efectos similares a los que tendría en muros rectangulares en estas secciones. Se encontró que el modelo calibrado para tracción (Ec. 5.5) aplicado al análisis de flexión tiene buena correlación con lo observado en el análisis de flexión + corte, si se considera la altura desde la sección que se está analizando hacia arriba y la deriva plástica calculada como:

$$\Delta_p = \frac{\delta_u - \delta_{y_{hp}}}{h_p}$$

Con  $h_p$  = altura del tramo desde la sección de análisis hacia arriba,  $d_{y_{hp}}$  desplazamiento de techo al momento de la fluencia en la sección de análisis.

No se encontró una buena correlación para el modelo calibrado de compresión en ninguna sección, el cual resulta ser excesivamente conservador.

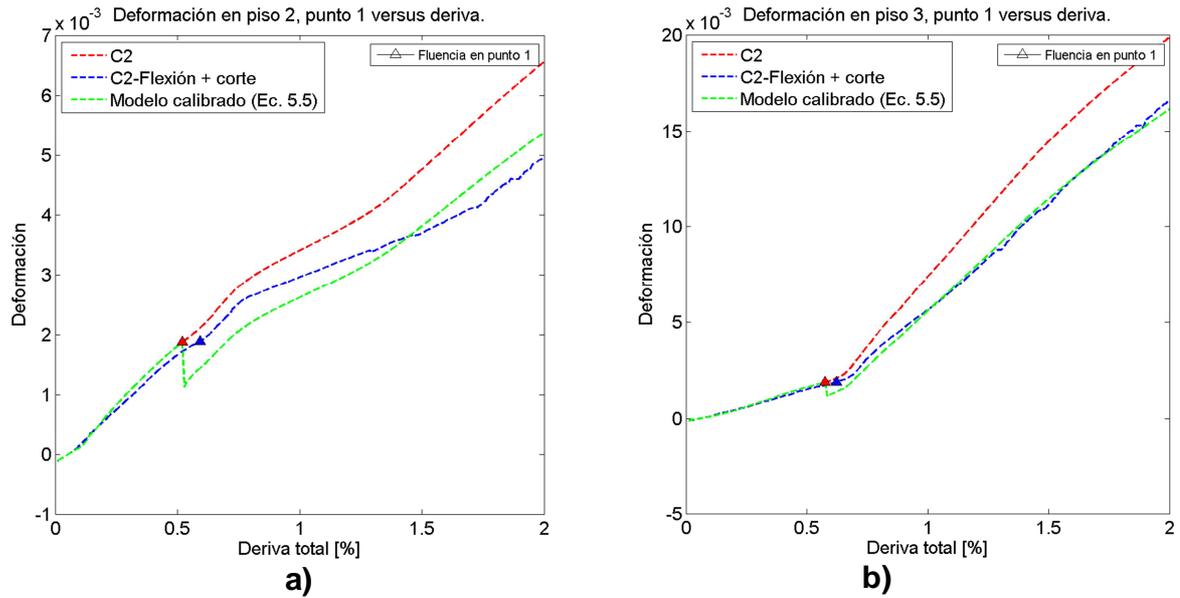


Figura 7.45: Deformación en punto 1, a) Piso 2 y b) Piso 3. Comparación con modelo calibrado de tracción.

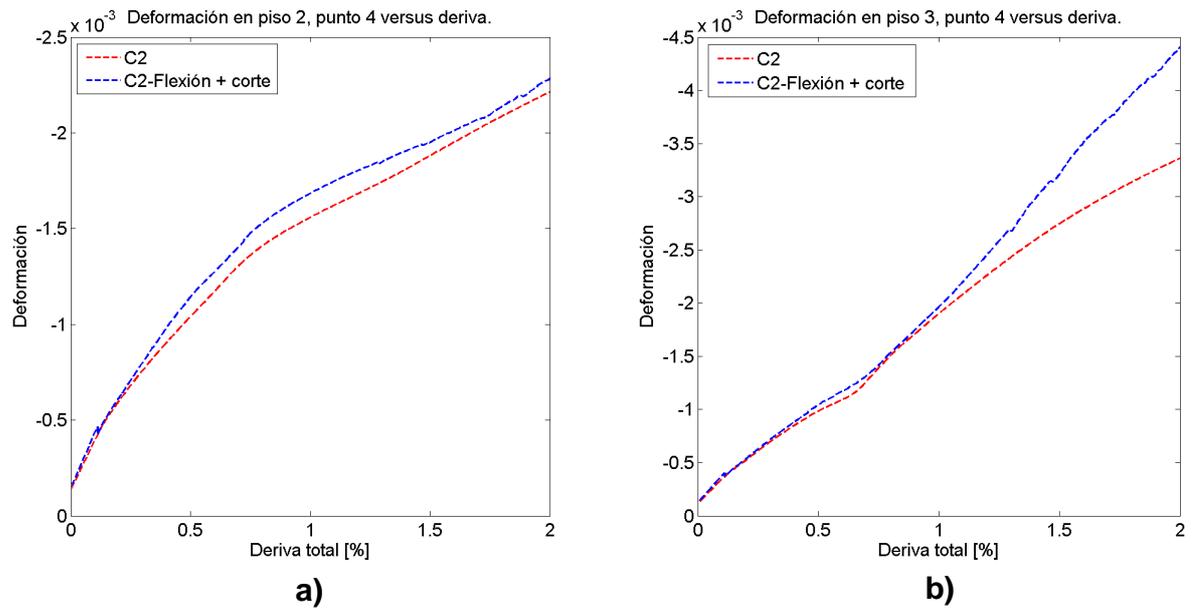
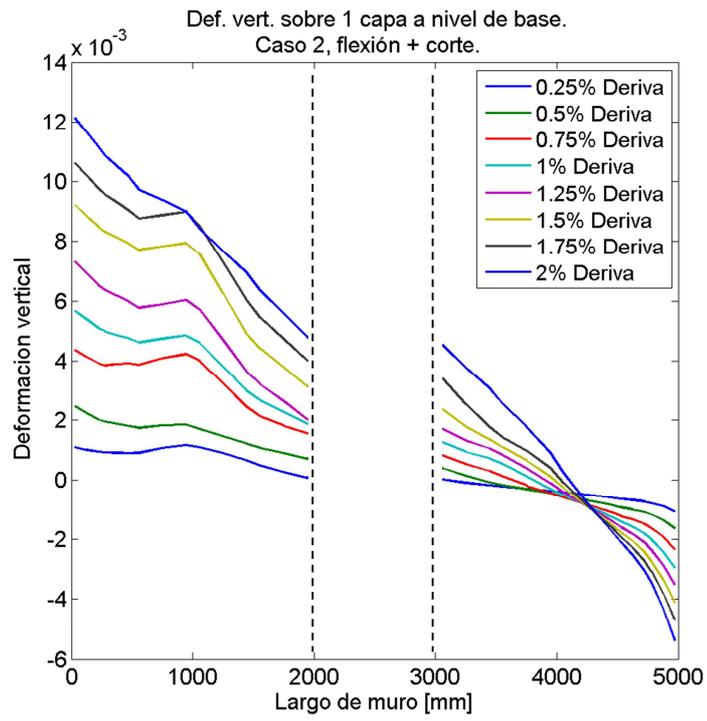


Figura 7.46: Deformación en punto 4, a) Piso 2 y b) Piso 3.

En general, se observa que el tramo por sobre la abertura tiene un comportamiento similar al observado para muros rectangulares en cuanto a efectos sobre las deformaciones de tracción. Los efectos de amplificación en deformaciones de compresión no son tan significativos como los observados en la base de muros rectangulares. En la base del muro, los efectos del corte no son significativos, salvo en la sección este de muro, en donde las tracciones máximas se ven reducidas y las compresiones amplificadas levemente. La Figura 7.47 muestra el perfil basal de deformación para el caso de análisis en flexión + corte.



**Figura 7.47: Perfil de deformaciones unitarias en la base. Muro con abertura centrada. Caso 2, en análisis de flexión + corte.**

## CAPÍTULO 8. CONCLUSIÓN.

Este trabajo de título presenta un análisis FEM no lineal de muros esbeltos de hormigón armado, implementado en Matlab a través del programa SAFE Toolbox que utiliza elementos planos tipo membrana de cuatro nodos, con leyes constitutivas no lineales para hormigón y acero, con cuyos resultados es posible calibrar ecuaciones numéricas que permitan cuantificar los efectos de la incorporación del corte en las deformaciones de los elementos estructurales, y validar hipótesis y modelos propuestos para la curvatura última de muros con aberturas en la base, tipo bandera, además de poder representar el comportamiento de muros con aberturas centradas en la base.

En primera instancia se valida la metodología utilizada mediante la comparación de los perfiles de deformación en la base obtenidos del análisis con los resultados de probetas experimentales que se pueden encontrar en la literatura. La metodología utilizada demostró poder representar el comportamiento esperado de muros esbeltos rectangulares y con discontinuidad, considerando secciones mixtas: hormigón confinado y no confinado; y cambios en las armaduras longitudinales y transversales, cumpliendo en términos generales con el objetivo buscado. La modelación no incluye los efectos que surgen debido a la penetración de deformaciones en la fundación ni el giro de la misma, pero se estiman de forma aproximada para hacer comparables los resultados experimentales, aunque se encontró que el aporte de estos componentes en el desplazamiento del muro no constituyen parte importante de la respuesta.

Se implementa un análisis de flexión utilizando vigas rígidas modeladas para limitar las deformaciones de las secciones transversales a una línea recta (hipótesis de Bernoulli), cuyos resultados se contrastan con los del análisis que incorporan las deformaciones de corte mediante un análisis “pushover” con carga puntual en el techo. Se encontró que las deformaciones de compresión en la base de un muro sometido a carga lateral puntual en el techo puede tomar valores de hasta 3 veces las estimadas por un análisis de secciones planas si la relación de aspecto es baja (2 a 3), y que además esta amplificación es altamente dependiente del nivel de deriva de techo plástico. Además se encontró que las deformaciones de tracción máximas en la base pueden verse subestimadas hasta un 30% por un análisis de flexión. Se implementa un análisis de las variables que influyen en la amplificación por corte, y se calibra un modelo numérico que permite de forma simple cuantificar la amplificación de la compresión y la reducción de la tracción debidas al corte. Se encontró que para el caso de la compresión, la deriva plástica, la relación de aspecto y el largo de calibre de la deformación tienen un efecto importante, mientras que en el caso de la tracción, la relación de aspecto es dominante por sobre todas las variables analizadas. En base a lo encontrado, se proponen dos modelos para estimar la amplificación de la compresión: un modelo simple útil para el diseño y un modelo más completo, útil para investigación experimental. El modelo completo para compresión es de la forma:

$$F_c = 3.96 \Delta_p^{0.26} \left( \frac{h_w}{l_w} \right)^{-0.42} \rho_b^{0.09} \Gamma_l^{-0.22} K_c^{-0.15}$$

Dónde:

$F_c$  = Factor de amplificación de compresión.

$$\Delta_p = \frac{d_u - d_y}{h_w} = \text{drift plástico}$$

$h_w$  = altura del muro

$l_w$  = largo de muro

$\rho_p$  = cuantía longitudinal de borde

$$\Gamma = \frac{g_l}{h_w} = \text{razón de largo de calibre de deformación}$$

$$K_c = \frac{c_c}{l_w} = \text{razón de largo de confinamiento de borde}$$

El modelo simplificado pretende ser útil para el diseño al eliminar las variables poco significativas y calibrarse para las deformaciones últimas, es decir, medidas en una altura de calibre mínima. El modelo simplificado tiene la forma siguiente:

$$F_c = 9.69 \Delta_p^{0.29} \left( \frac{h_w}{l_w} \right)^{-0.23}$$

Para la reducción de la tracción, se propone un modelo simplificado dependiente de la relación de aspecto:

$$F_t = 0.6 \left( \frac{h_w}{l_w} \right)^{0.18}$$

El modelo completo para compresión demostró tener una dispersión de 0.19 y un promedio de 1.02 para un rango entre 0.0 y 0.015 de deformación de compresión. Restringiendo el rango desde 0.003 a 0.015, la dispersión mejora a 0.13 y el promedio aumenta a 1.1, manteniéndose, en general, conservador. El modelo para tracción tiene un promedio de precisión de 0.99 y una desviación estándar de 0.09 para el rango de deformación de compresión entre 0 y 0.015 (rango de respuesta estable).

Se realiza un análisis de flexión, pushover, con carga puntual en el techo, para describir el comportamiento de muros con aberturas de borde en la base, o muros bandera. En el análisis se estudia la distribución de curvaturas en la altura y en función de la deriva para el rango elástico y plástico. Se encontró que los muros con aberturas en la base con alturas relativas menores al 20% de la altura del muro tienden a desarrollar una concentración de curvatura en toda la altura del tramo con sección reducida, siendo más notoria en el rango elástico, además de reducir considerablemente las deformaciones en el tramo con la sección completa. Este comportamiento causa que el desplazamiento de fluencia de un muro con abertura de borde se desarrolle tempranamente en relación a un muro rectangular de largo igual al largo basal del muro con abertura, y que la curvatura última en el rango plástico se vea aumentada para el mismo nivel de deriva. En base a esto, se estudia la efectividad de modelos para el desplazamiento elástico y curvaturas últimas en el rango plástico.

Para el análisis del rango elástico, se encontró que la curvatura de fluencia no se ve afectada por la abertura en ninguno de los casos de análisis en comparación a un muro rectangular, y se propone mantener expresiones pre-validadas en la literatura, en particular:

$$\phi_y = K \frac{\varepsilon_y}{l_w}$$

Con  $K = 1.4$  de forma conservadora.

Se estudia la efectividad de 3 modelos para el desplazamiento elástico: un modelo pre-validado para muros rectangulares, un modelo que considera una concentración rectangular de curvaturas en la base, análogo al de rótula plástica concentrada, con altura de rótula igual a la altura de la abertura y un modelo analítico determinado a partir de la doble integración en la altura de la curvatura de un modelo genérico sin agrietamiento con abertura en la base. Se determinó que el modelo analítico es el de mayor efectividad en todo el rango analizado si se le incorpora el

efecto del agrietamiento en la altura, pre-validado para muros rectangulares. El modelo propuesto tiene la forma:

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

Dónde:

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

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

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

El modelo propuesto demostró tener una dispersión (desviación estándar) de 0.13 y un promedio de precisión de 1.03 para el rango analizado, que va desde  $\lambda = 10\%$  a  $40\%$  y  $\eta = 6.67\%$  a  $20\%$ , y se recomienda su uso para aberturas en los rangos de  $\lambda = 10\% - 40\%$  con  $\eta = 10\% - 20\%$  y  $\lambda = 10 - 20\%$  con  $\eta = 5 - 10\%$ , donde demostró ser más preciso.

Para el rango plástico, se estudia la efectividad de tres propuestas: un modelo pre-validado para muros rectangulares, un modelo de rótula plástica concentrada rectangular con largo de rótula igual a la altura de la abertura y un modelo mixto, que limita el desarrollo de la rótula plástica a la altura de la abertura y considera el desplazamiento de fluencia propuesto para muros con abertura. Se encontró que el modelo para muros rectangulares (ecuaciones 2.1 a 2.5) es recomendable sólo para aberturas de largo menor al 10% del largo del muro y alturas mayores al 15% del muro. Como propuesta para el rango de aberturas de menor altura y mayor largo, se recomienda el modelo de rótula plástica concentrada rectangular con largo de rótula igual a la altura de la abertura:

$$\phi_u = \frac{d_u}{h_x \left( h_w - \frac{h_x}{2} \right)}$$

Que demostró estimar la curvatura última con un promedio de precisión igual 0.97 y dispersión (desviación estándar) de 0.15 en el rango recomendado. Este modelo constituye una solución simple y útil para un amplio rango de casos, que como recomendación debe limitarse a aberturas de largo relativo entre 20% y 40% con alturas relativas menores al 15%, y largos entre 10% y 20% con alturas relativas entre 10% y 15%

Como alternativa a los modelos tradicional y de rótula concentrada rectangular, se propone el modelo mixto (ecuaciones 6.9 a 6.14), con un rango de validez más amplio: largo relativo entre 10% y 40% con alturas relativas entre 5% a 20%. La precisión promedio en este rango para el modelo mixto es de 1 y desviación estándar de 0.29. Este modelo tiende a ser más conservador para derivas altas.

Se observaron los efectos de considerar las deformaciones de corte en muros bandera, y se estimó que si se considera una estimación del desplazamiento elástico relativamente acertada, las reducciones de tracción no debieran ser significativamente distintas a las de un muro rectangular, mientras que la amplificación de compresiones es en general levemente menor a las de muros rectangulares. Se recomienda utilizar en muros con abertura el modelo calibrado para muros rectangulares, que demostró dar buenos resultados para 2 casos de análisis: largos relativos de abertura de 40% con alturas relativas de 16.67% y 6.67%.

Se estudió el comportamiento de muros con aberturas basales de largo relativo de 10% en el alma del muro, considerando una abertura centrada, y una abertura descentrada en ambas direcciones, a través de un análisis de flexión, en modelos de 10 pisos y 5 metros de largo con refuerzo longitudinal en la abertura hasta el segundo piso, sometidos a carga lateral puntual en el techo (pushover). Además se estudió el efecto del desarrollo de la armadura longitudinal en la altura: considerando un caso con armadura hasta el piso 3 y un caso con armadura en toda la altura del muro. En el caso con la abertura descentrada se generan dos secciones basales de muro: de 3 m y 1 m respectivamente, con un total de 5 m de largo de muro. Se observó en general que la resistencia y rigidez del muro no se ven afectadas si se considera una armadura apropiada de flexión (refuerzo longitudinal de borde) en los bordes de la abertura para los casos de análisis, y que la resistencia del muro se ve favorecida considerablemente

por esta armadura. Se observó que utilizar este tipo de refuerzo para aberturas centrales debe hacerse con las precauciones necesarias respecto a desarrollo en la altura para evitar el efecto de doble rótula que nace como consecuencia de la discontinuidad de refuerzo, incluso si el refuerzo cubre la distancia estimada como altura de plastificación, o dos veces el largo de rótula plástica para muros rectangulares. Evitar la doble rótula plástica permite evitar tener que tomar precauciones respecto a la concentración de deformaciones en secciones superiores a la base del muro. Se observó que, al comparar un caso sin refuerzo longitudinal de borde en la abertura, con un caso con refuerzo longitudinal de borde en la abertura con cuantía igual a la del refuerzo de borde de muro, el refuerzo longitudinal entrega beneficios en la sección basal de muro que se ubica en la dirección de la carga lateral, limitando las deformaciones de tracción máximas de la sección, y limitando también las deformaciones de compresión máximas al limitar la curvatura basal a pesar de mover la línea neutra hacia el lado en tracción. La cuantía óptima para los bordes de abertura debe ser estudiada con mayor detalle, sin embargo, se concluye que es altamente recomendable su uso, con un apropiado desarrollo en altura.

En el caso que se disponga de armaduras longitudinales bien desarrolladas en la altura alrededor de la abertura, respecto de las deformaciones basales de un muro con abertura en el alma, se debe tener en consideración las situaciones siguientes:

- a. En un muro con abertura centrada, la compresión máxima será mayor a la de un muro rectangular del mismo largo total, mientras que la tracción máxima será menor. La curvatura de la zona traccionada se puede modelar como igual a la de un muro rectangular, mientras que la curvatura de la zona en compresión debe ser amplificada debidamente, y se espera que esta amplificación dependa de la cuantía longitudinal alrededor de la abertura. La deformación de tracción máxima de la sección basal ubicada en la dirección de la carga lateral es de magnitud similar a la deformación de tracción del borde ubicado al otro costado de la abertura para derivas plásticas bajas si las cuantías longitudinales de borde en la abertura son iguales a las de borde de muro. Un modelo simple para las deformaciones basales podría considerar que estos dos valores son iguales si se tienen las condiciones descritas en el análisis, sin embargo esto debe ser validado con mayor análisis de casos para concluir con mayor generalidad.
- b. En un muro con abertura descentrada, cuando la carga sísmica va en la dirección en que se ubica la abertura, la compresión máxima es ampliamente mayor que la obtenida en un muro rectangular, cuya amplificación, se espera sea altamente dependiente de las dimensiones relativas de la sección en compresión, de la ubicación de la abertura y en menor grado de la cuantía longitudinal dispuesta en los bordes de la abertura. La tracción máxima en

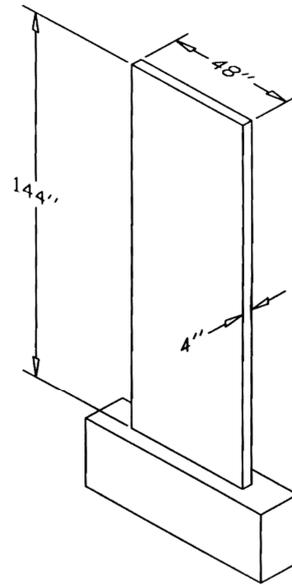
esta dirección de carga es similar a la de un muro rectangular. Cuando la dirección de carga es en sentido contrario a la dirección en que se sitúa la abertura, la compresión máxima será mayor a la de un muro rectangular, pero ampliamente menor a la compresión máxima obtenida en la dirección contraria. La deformación de tracción máxima en esta dirección de carga será menor a la de un muro rectangular, pero dependiente de la cuantía dispuesta alrededor de la abertura. Como regla general: bajo cargas laterales cíclicas, las tracciones máximas son siempre menores o iguales a las de un muro rectangular, mientras que las compresiones máximas serán siempre mayores.

## BIBLIOGRAFÍA

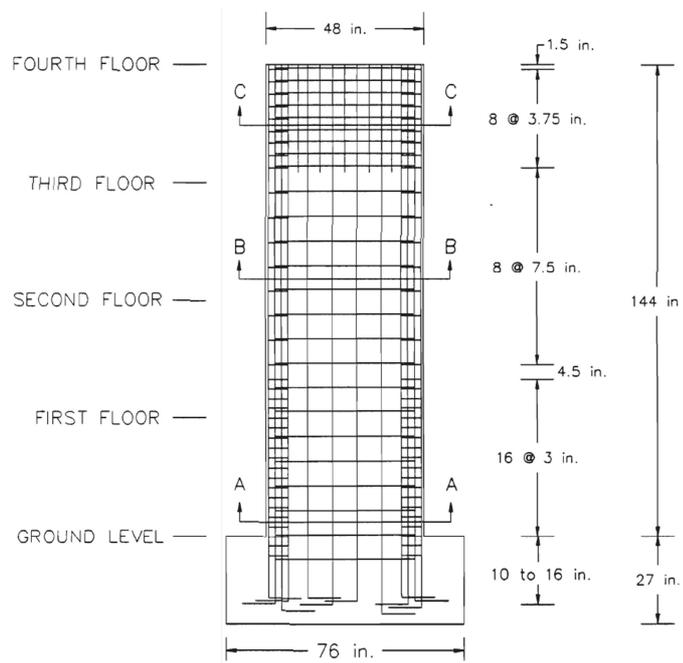
- (1) Taylor, C. P. and Wallace, J. W., "Design of slender reinforced concrete structural walls with openings", Project No. 92-3112, Department of civil Engineering, Clarkson University, Potsdam, NY 13699-5710, Dec. 1995.
- (2) Ali, A., and Wight, J. K., "Reinforced Concrete structural walls with staggered opening configurations under reverse cyclic loading", Report No. UMCE 90-05, Department of civil engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, April 1990.
- (3) Thomsen IV, J. H., and Wallace, J. W., "Displacement based design of RC Structural walls: an experimental investigation of walls with rectangular and T-shaped cross sections", Report No. CU/CEE-95/06, Department of civil and environmental engineering, Clarkson University, Potsdam, New York, June 1995.
- (4) Sittipunt, C., and Woods, S. L., "Influence of web reinforcement on the cyclic response of structural walls", ACI structural Journal, V. 92, No. 6, Nov.–Dec. 1995, pp. 745-756.
- (5) Yanez, F. V.; Park, R.; and Paulay, T., "Seismic behavior of reinforced concrete structural walls with regular and irregular openings", Pacific Conference on earthquake engineering, New Zealand, Nov. 1991.
- (6) Rojas B. , F., "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 Dissertation, University of Southern California, Los Angeles, California, August 2012
- (7) Turgeon, J. A., "The seismic performance of coupled reinforced concrete walls", Master of Science in Civil Engineering Thesis, University of Washington, 2011.
- (8) D. J. Carreira and C. Kuan-Han. Stress-strain relationship for plain concrete in compression. ACI Structural Journal, 82(6):797-804, 1985.
- (9) Massone, L., M. RC Wall Shear – Flexure Interaction: Analytical and Experimental Responses. Phd dissertation, University of California, Los Angeles, California, 2006.
- (10) Thorenfeldt E., Tomaszewicz, A., and Jensen, J., J. Mechanical Properties of high-strength concrete and application in design. In Symposium Utilization of High-Strength Concrete, Stavanger, Norway, 1987.
- (11) Belarbi, A., and Hsu, T., T. Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete. ACI Structural Journal, 91(4):465-474, 1994.
- (12) Belarbi, A., and Hsu, T., T... Constitutive laws of softened concrete in biaxial tension compression. ACI Structural Journal, 92(5):562-573, 1995.

- (13) Palermo, D. and Vecchio, F., J. Compression field modeling of reinforced concrete subjected to reversed loading: Formulation. *ACI Structural Journal*, 100(5):616-625, 2003.
- (14) Menegotto, M., and Pinto, P., E... Method of analysis of cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending. In *IABSE Symposium on the Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-Defined Repeated Loads*, Lisbon, 1973.
- (15) F. C. Filippou, E. G. Popov, and V. V. Bertero. Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints. UCB/EERC 83/19, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1983.
- (16) Paulay, T. The displacement capacity of reinforced concrete coupled walls". *Engineering Structures* 24. Pp. 1165-1175. 2002.
- (17) Massone, L., Alfaro, J. Displacement and Curvature Estimation for Design of Reinforced Concrete Slender Walls. 2014?.

**ANEXO.**



**Figura A - 1: Dimensiones probeta RW2. (Thomsen & Wallace, 1995)**



**Figura A - 2: Dimensiones y refuerzo RW2. (Thomsen & Wallace, 1995)**

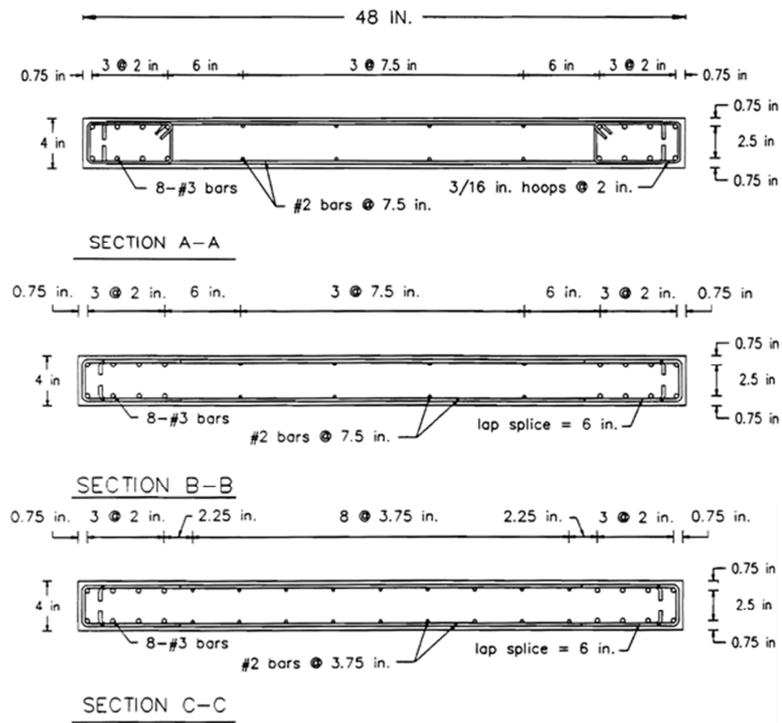


Figura A - 3: Detalle armadura RW2. (Thomsen & Wallace, 1995)

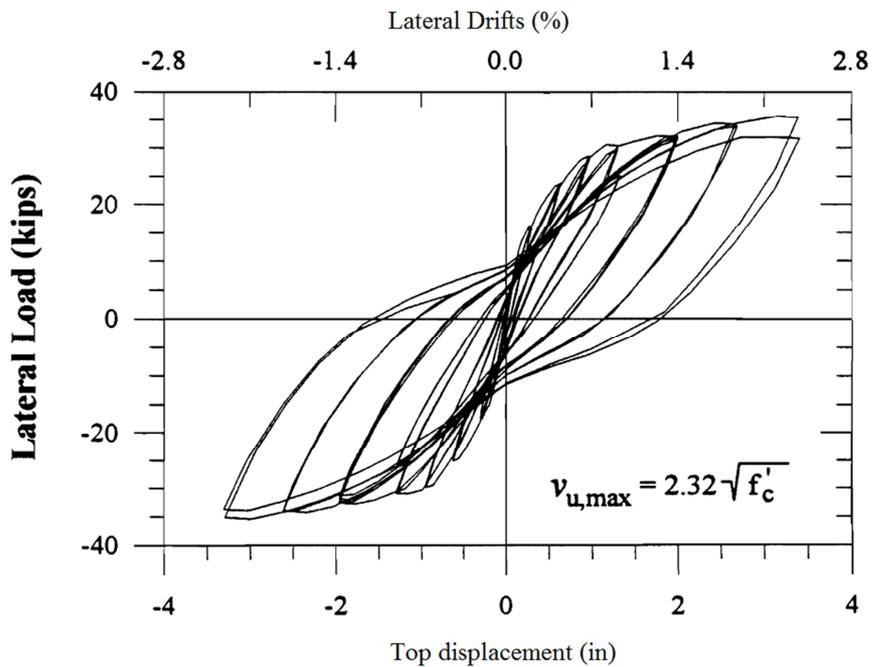


Figura A - 4: Carga lateral versus desplazamiento de techo (corregido por giro de pedestal, medido con potenciómetro) para RW2. (Thomsen & Wallace, 1995)

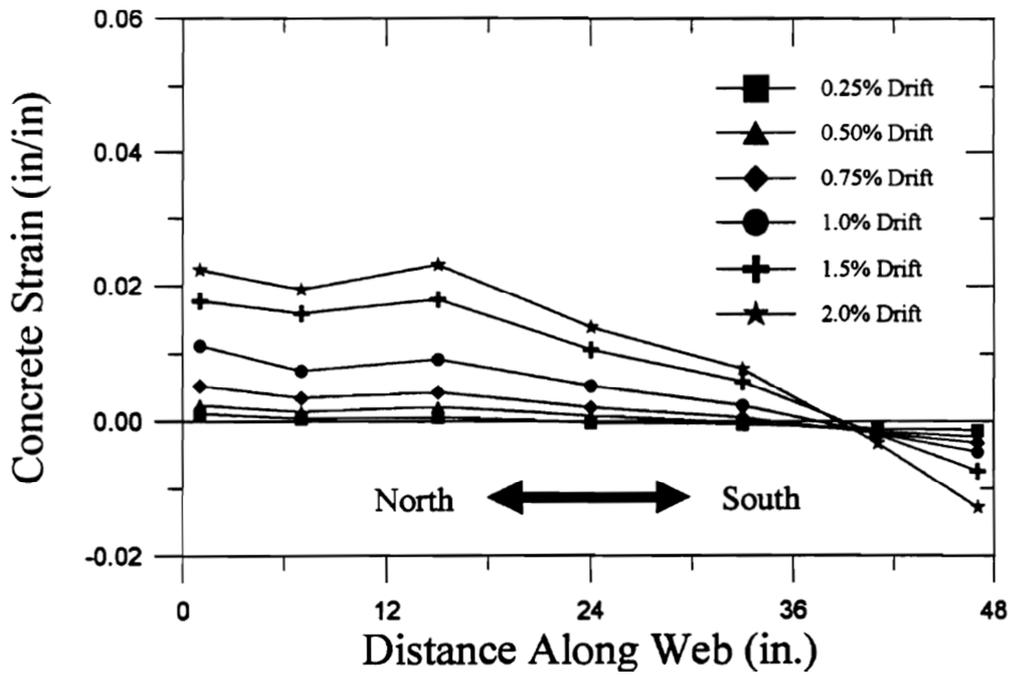


Figura A - 5: Perfiles de deformación vertical en la base según desplazamientos de techo nominales para RW2, medidos con LVDTs. (Thomsen & Wallace, 1995).

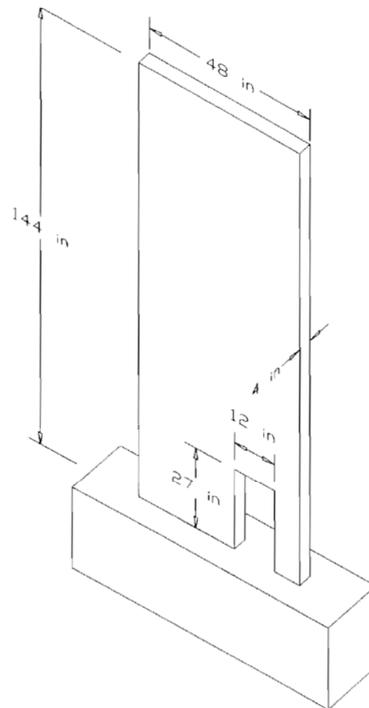


Figura A - 6: Dimensiones RW3-O. (Taylor & Wallace 1995).

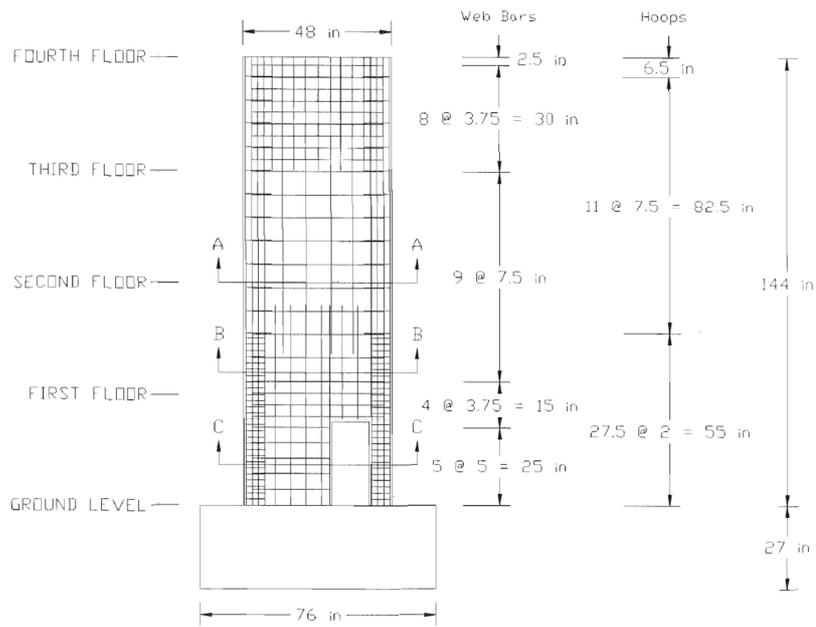


Figura A - 7: Dimensiones y refuerzo RW3-O. (Taylor & Wallace 1995)

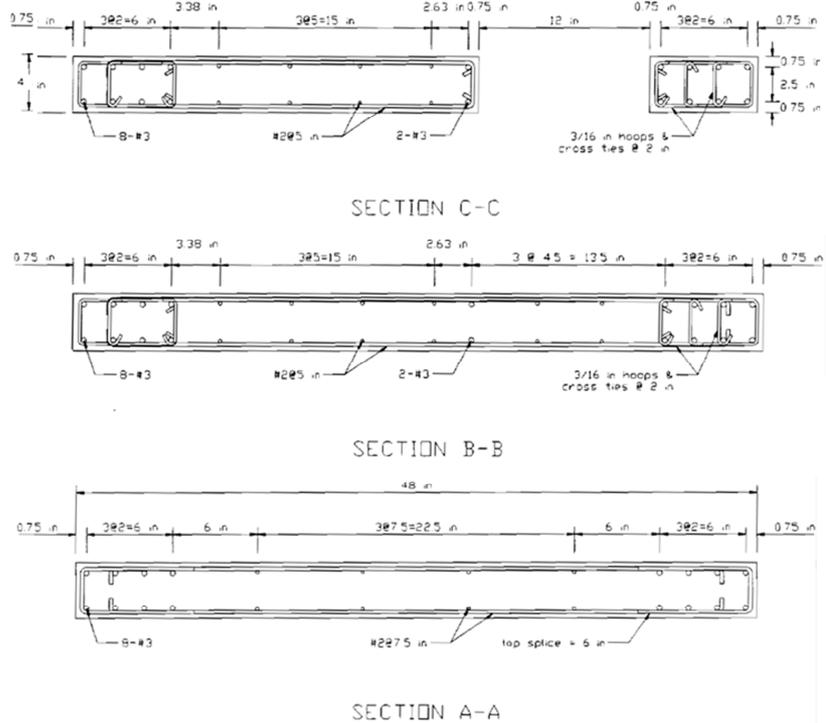


Figura A - 8: Detalle refuerzo RW3-O. (Taylor & Wallace 1995)

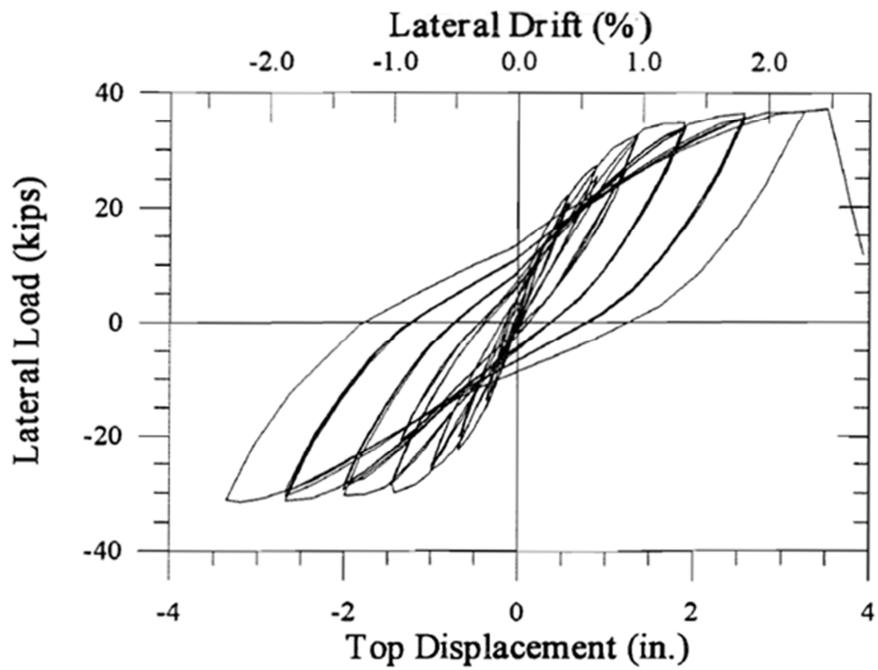


Figura A - 9: Carga lateral versus desplazamiento de techo para RW3-O. (Taylor & Wallace 1995)

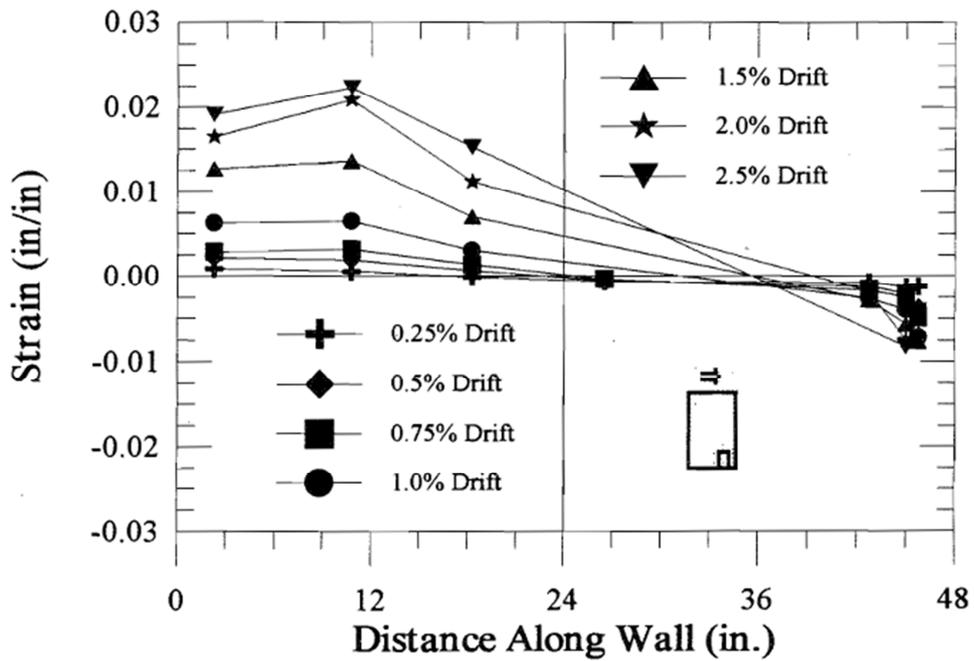


Figura A - 10: Perfil de deformaciones verticales en la base según desplazamiento de techo nominal. RW3-O. (Taylor & Wallace 1995)