



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

**MODELACIÓN DE MUROS ESBELTOS CON ABERTURAS CENTRALES A TRAVÉS  
DE UN ANÁLISIS NUMÉRICO NO LINEAL Y SU IMPACTO EN EL  
COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PEDRO DANIEL MORALES RIVERA

**PROFESOR GUÍA:**

LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

FABIÁN ROJAS BARRALES

RENÉ LAGOS CONTRERAS

SANTIAGO DE CHILE

2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: PEDRO DANIEL MORALES RIVERA  
FECHA: 09/10/2015  
PROF. GUÍA: LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

## MODELACIÓN DE MUROS ESBELTOS CON ABERTURAS CENTRALES A TRAVÉS DE UN ANÁLISIS NUMÉRICO NO LINEAL Y SU IMPACTO EN EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL.

La normativa chilena actual no considera en sus criterios de diseño las aberturas centrales a nivel basal en muros esbeltos de hormigón armado, siendo que este tipo de muros se realiza con frecuencia, ya sea por solicitudes de arquitectura o simplemente por condiciones de diseño. Es por ello que se torna de suma importancia su investigación y el análisis de su comportamiento. El presente trabajo de título estudia el impacto que generan las aberturas centrales a nivel basal en la estructura mediante un programa que realiza un análisis de elementos finitos no lineal. Se analizan una serie de muros esbeltos con diferentes dimensiones de la abertura sometidos a un análisis tipo pushover monotónico creciente para obtener la respuesta carga-deformación llegando a una deriva de techo del 2%. En total fueron analizados 99 muros, 10 muros con aberturas de diferentes tamaños (desde un piso de altura con ancho de 10% del ancho del muro hasta 3 pisos de altura con un ancho de 60% del ancho del muro), y un muro sin abertura. Estos 11 muros se realizaron para 3 relaciones de aspecto ( $RA=2.5, 5$  y  $7.5$ ) y para 3 modelos diferentes. Con los datos obtenidos se estudia el comportamiento de cada uno de los muros, para lograr cuantificar el impacto que genera la abertura.

En un comienzo se determina de qué manera afectan la cuantía y longitud de la armadura longitudinal de borde de la abertura en la formación y ubicación de la rótula plástica a lo alto del muro, luego se determina el impacto que genera la abertura en las deformaciones máximas por compresión y tracción. Para ello se busca un factor de amplificación que incluya el efecto del corte y el efecto de la abertura en las deformaciones obtenidas con modelos de flexión, a partir de muros continuos desde la base que se realizan en la etapa de diseño. Con estos resultados es posible determinar cuándo se debe utilizar la expresión o cuando simplemente es necesario considerar la abertura con un análisis de flexión (Modelo de fibras). Se entregan recomendaciones con el fin de facilitar la elección al momento de diseñar muros con abertura.

Las expresiones obtenidas para estimar las deformaciones por compresión y tracción fueron calibradas para muros con aberturas de un piso y ancho de abertura de hasta un 60% del ancho del muro, los errores asociados a estas expresiones fueron 25% y 40% respectivamente, dichos errores corresponden a la variación porcentual promedio entre la curva calibrada y la curva obtenida con el programa. Si bien la expresión para las deformaciones por compresión es una buena estimación, se recomienda realizar un análisis de flexión tradicional considerando la abertura, ya que al comparar los resultados de todos los muros con abertura analizados con un modelo de flexión versus un modelo de flexión más corte, se tiene que el error asociado es de un 20%.

Dado que el presente trabajo consiste sólo en el estudio de resultados analíticos, se pretende dar pie a una futura investigación experimental relacionada al tema.

## **Dedicatoria**

A Pedro Florentino Rivera Arancibia,  
siempre te recordaré Tatita...

## **Agradecimientos**

A mis Padres, Jessica Rivera Silva y Victor Morales Troncoso: sin duda alguna, el fin de esta etapa es fruto de su apoyo incondicional, gracias por entregarme las herramientas necesarias para lograr todo lo que he logrado, han sido un pilar fundamental y el ejemplo a seguir durante toda mi vida, simplemente son los mejores.

A mi hermana, Catalina Morales Rivera, gracias por la paciencia y por la ayuda que me brindaste en todo momento, eres el mejor regalo que me han dado en la vida.

A toda mi familia que de alguna u otra manera ha formado parte de este proceso, gracias por cada uno de los buenos momentos que hemos compartido, a mis infinitos primos, mi hermano, mis tíos, mis abuelas, y finalmente, a mis abuelos que siempre están con nosotros.

A mis amigos, los del colegio y del liceo que hasta el día de hoy seguimos en contacto; a los de la villa que han estado ahí toda la vida; y finalmente, a todos los amigos de la universidad desde los que conocí en la Sección 7 el año 2009, quienes llegaron para quedarse el 2011 y los que el día de hoy forman parte del querido Centro de Madres. Gracias por todo.

Gracias a Matias Ahumada y Emilio Peña por la ayuda brindada desde un comienzo y por darse el tiempo de responder todas mis dudas.

Gracias a mis Profesores Guía y Co-guía, Leonardo Massone y Fabián Rojas, por todo su apoyo, tiempo y consejos para sacar adelante este trabajo.

## **Tabla de Contenido**

1	Introducción.....	1
1.1	Objetivos.....	3
1.1.1	Objetivo general.....	3
1.1.2	Objetivos específicos.....	3
1.2	Metodología.....	4
1.3	Alcances.....	5
2	Revisión bibliográfica.....	6
2.1	Shiu, K.N., et al 1981.....	6
2.2	Ali, A., and Wight, J.K. 1990.....	8
2.3	Taylor, C.P. and Wallace, J.W. 1995.....	10
2.4	Ahumada, M.G. 2014.....	11
3	Modelación de muros con aberturas centrales.....	14
3.1	SAFE Toolbox.....	14
3.2	Materiales.....	15
3.2.1	Hormigón.....	15
3.2.2	Acero.....	20
3.3	Antecedentes generales.....	22
3.3.1	Características Muros.....	22
3.3.2	Características Modelos utilizados.....	28
4	Resultados y recomendaciones para muros con abertura.....	29
4.1	Rótula plástica a lo largo del muro.....	29
4.2	Deformaciones Verticales unitarias Caso Base.....	33
4.3	Perfil de deformaciones a nivel basal.....	36
4.4	Efecto de la abertura en el Modelo B para diferentes relaciones de aspecto.....	40
4.4.1	Análisis de respuesta global: Carga versus Deformación.....	40
4.4.2	Análisis de respuesta local: Deformaciones unitarias Verticales.....	43
4.5	Efecto de la abertura en el Modelo CV para diferentes relaciones de aspecto.....	45
4.5.1	Análisis de respuesta global: Carga versus Deformación.....	45
4.5.2	Análisis de respuesta local: Deformaciones unitarias Verticales.....	47
4.6	Efecto de la abertura en el Modelo SV para diferentes relaciones de aspecto.....	50
4.6.1	Análisis de respuesta global: Carga versus Deformación.....	50
4.6.2	Análisis de respuesta local: Deformaciones unitarias Verticales.....	52

4.7	Resultados analíticos muros con abertura: Efecto de la abertura más el efecto del corte.....	55
4.7.1	Deformaciones verticales máximas por compresión. ....	55
4.7.2	Deformaciones verticales por tracción. ....	63
4.8	Comparación resultados Modelo B versus Modelo SV.....	66
4.9	Comparación Resultados Modelo CV versus Modelo SV. ....	67
4.10	Muros analizados con modelos lineales. ....	69
4.11	Recomendaciones. ....	71
5	Conclusiones.....	72
	Bibliografía.....	74
	Anexos.....	76

## Índice de tablas

Tabla 3.1: Dimensiones de las aberturas. ....	26
Tabla 4.1: Variación porcentual muros con abertura versus caso base, Modelo B y RA=2.5. ....	42
Tabla 4.2: Variación porcentual muros con abertura versus caso base, Modelo B y RA=5. ....	42
Tabla 4.3: Variación porcentual muros con abertura versus caso base, Modelo B y RA=7.5. ....	42
Tabla 4.4: Esquema de aberturas y sus respectivas áreas. ....	54
Tabla 4.5: Variación porcentual promedio de amplificación con respecto al caso base, RA=5. ...	54
Tabla 4.6: Variación porcentual promedio entre Modelo B y Modelo SV, RA=2.5. ....	66
Tabla 4.7: Variación porcentual promedio entre Modelo B y Modelo SV, RA=5. ....	66
Tabla 4.8: Variación porcentual promedio entre Modelo B y Modelo SV, RA=7.5. ....	67
Tabla 4.9: Variación porcentual promedio entre Modelo CV y Modelo SV, RA=2.5.....	68
Tabla 4.10: Variación porcentual promedio entre Modelo CV y Modelo SV, RA=5.....	68
Tabla 4.11: Variación porcentual promedio entre Modelo CV y Modelo SV, RA=7.5.....	68
Tabla 4.12: Variación porcentual promedio entre Modelo lineal B y Modelo lineal SV, RA=5..	69

## Índice de figuras

Figura 1.1: Daños debido a irregularidades en el primer piso Torre Bosquemar, Concepción.....	1
Figura 2.1: Muro sin aberturas CI-1 (a) y Muro con aberturas PW-1 (b).....	6
Figura 2.2: Carga-Desplazamiento de techo CI-1 versus PW-1.....	7
Figura 2.3: Deformaciones reforzamiento vertical a nivel basal, Muro CI-1 (a) y Muro PW-1(b).....	7
Figura 2.4: Muro sin aberturas W-1.....	8
Figura 2.5: Muros con aberturas W-2, W-3 y W-4.....	9
Figura 3.1: Histéresis para el modelo del hormigón. Massone (2006).....	15
Figura 3.2: Modelo constitutivo para el hormigón en compresión usando la curva base de Thorenfeldt (1987).....	16
Figura 3.3: Modelo constitutivo para el hormigón en tracción usando la ecuación de Belarbi & Hsu (1994).....	16
Figura 3.4: Efecto de ablandamiento por compresión. Belarbi & Hsu (1995).....	18
Figura 3.5: Modelo constitutivo para el acero. Menegotto & Pinto (1973).....	20
Figura 3.6: Variables geometría muros.....	22
Figura 3.7: Discretización elementos.....	24
Figura 3.8: Relaciones de aspecto muros.....	25
Figura 3.9: Aberturas realizadas.....	26
Figura 3.10: Representación ejes longitudinales muro sin abertura.....	27
Figura 3.11: Representación ejes longitudinales muro con aberturas.....	27
Figura 3.12: Modelos realizados.....	28
Figura 4.1: Rótula plástica sobre abertura, con refuerzo de borde hasta el piso 3.....	29
Figura 4.2: Curvatura sobre abertura, con refuerzo de borde hasta el piso 9.....	30
Figura 4.3: Curvatura muro C1_20%, RA=5.....	31
Figura 4.4: Curvatura muro C1_40%, RA=5.....	31
Figura 4.5: Curvatura muro C2_20%, RA=5.....	32
Figura 4.6: Curvatura muro C2_40%, RA=5.....	32
Figura 4.7: Deformaciones máximas por compresión caso base RA=5.....	33
Figura 4.8: Deformación máxima por tracción caso base para los diferentes modelos, RA=5.....	34
Figura 4.9: Carga-Desplazamiento Caso base para los diferentes modelos, RA=5.....	35
Figura 4.10: Deformación Vertical sobre una capa Muro sin abertura con Modelo B, RA=5.....	36
Figura 4.11: Deformación Vertical sobre una capa Caso C1_10%, RA=5.....	37
Figura 4.12: Deformación Vertical sobre una capa Caso C1_40%, RA=5.....	37
Figura 4.13: Deformación Vertical sobre una capa Caso C2_40%, RA=5.....	38
Figura 4.14: Deformación Vertical sobre una capa Caso C2_60%, RA=5.....	38
Figura 4.15: Carga-Desplazamiento Casos Modelo B, RA=2.5.....	40
Figura 4.16: Carga-Desplazamiento Casos Modelo B, RA=5.....	41
Figura 4.17: Carga-Desplazamiento Casos Modelo B, RA=7.5.....	41
Figura 4.18: Deformaciones máximas por compresión Casos Modelo B, RA=2.5.....	43
Figura 4.19: Deformaciones máximas por compresión Casos Modelo B, RA=5.....	44
Figura 4.20: Deformaciones máximas por compresión Casos Modelo B, RA=7.5.....	44
Figura 4.21: Carga-Desplazamiento Casos Modelo CV, RA=2.5.....	45
Figura 4.22: Carga-Desplazamiento Casos Modelo CV, RA=5.....	46
Figura 4.23: Carga-Desplazamiento Casos Modelo CV, RA=7.5.....	47
Figura 4.24: Deformaciones máximas por compresión Casos Modelo CV, RA=2.5.....	48
Figura 4.25: Deformaciones máximas por compresión Casos Modelo CV, RA=5.....	48

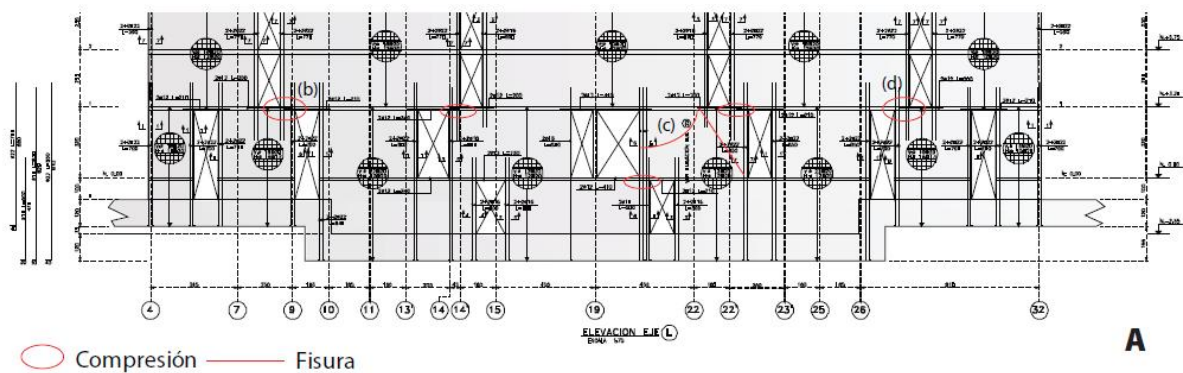


Figura 4.26: Deformaciones máximas por compresión Casos Modelo CV, RA=7.5. ....	49
Figura 4.27: Deformación vertical Eje 2 modelo CV Caso base, RA=5. ....	49
Figura 4.28: Carga-Desplazamiento Casos Modelo SV, RA=2.5. ....	50
Figura 4.29: Carga-Desplazamiento Casos Modelo SV, RA=5. ....	51
Figura 4.30: Carga-Desplazamiento Casos Modelo SV, RA=7.5. ....	51
Figura 4.31: Deformaciones máximas por compresión Casos Modelo SV, RA=2.5. ....	52
Figura 4.32: Deformaciones máximas por compresión Casos Modelo SV, RA=5. ....	53
Figura 4.33: Deformaciones máximas por compresión Casos Modelo SV, RA=7.5. ....	53
Figura 4.34: Casos utilizados para la calibración del Factor de amplificación. ....	55
Figura 4.35: Amplificaciones para incorporar el efecto del corte y de la abertura al modelo de flexión. ....	56
Figura 4.36: Deformación amplificada caso base RA=2.5, incluye efecto del corte (CB SV*). ...	57
Figura 4.37: Deformación amplificada caso base RA=5, incluye efecto del corte (CB SV*). ....	57
Figura 4.38: Deformación amplificada caso base RA=7.5, incluye efecto del corte (CB SV*). ...	57
Figura 4.39: Comparación resultados numéricos y analíticos. Casos C1, RA=2.5. Curva analítica que incluye el efecto de la abertura más el efecto del corte (*). ....	60
Figura 4.40: Comparación resultados numéricos y analíticos. Casos C1, RA=5. Curva analítica que incluye el efecto de la abertura más el efecto del corte (*). ....	61
Figura 4.41: Comparación resultados numéricos y analíticos. Casos C1, RA=7.5. Curva analítica que incluye el efecto de la abertura más el efecto del corte (*). ....	62
Figura 4.42: Deformaciones verticales por tracción Casos C1, RA=5. Modelo SV. ....	63
Figura 4.43: Deformaciones verticales por tracción Casos C2, RA=5. Modelo SV. ....	64
Figura 4.44: Deformaciones verticales por tracción Casos C3, RA=5. Modelo SV. ....	64
Figura 4.45: Ubicación del daño, zonas en tracción. ....	65
Figura 4.46: Comparación Modelos B y SV para el caso C2_20%, RA=5. ....	66
Figura 4.47: Comparación Modelos CV y SV para el caso C1_20%, RA=5. ....	67
Figura 4.48: Comparación Modelos CV y SV para el caso C2_20%, RA=5. ....	68
Figura 4.49: Comparación entre Modelo lineal y Modelo No lineal, Caso C1_20% con RA=2.5. ....	69
Figura 4.50: Comparación entre Modelo lineal y Modelo No lineal, Caso C1_20% con RA=5. ....	70
Figura 4.51: Comparación entre Modelo lineal y Modelo No lineal, Caso C1_20% con RA=7.5. ....	70

# 1 Introducción.

Las características sísmicas del país hacen que la ingeniería estructural se encuentre en un trabajo constante. El estudio de los muros de hormigón armado es de suma importancia ya que estos corresponden a uno de los principales componentes en el diseño de estructuras.

En la actualidad, los códigos usados en la normativa chilena incluyen disposiciones de diseño para muros solidos continuos desde la base, pero no existe requerimiento alguno para controlar las irregularidades que se incorporan (puertas y ventanas), siendo que en la mayoría de las edificaciones se realiza con frecuencia este tipo de aberturas. Dichas irregularidades generan cambios de rigidez importantes entre los pisos del edificio, lo que conlleva una concentración importante de esfuerzos y deformaciones. Es por esto que los muros con aberturas deben ser estudiados en detalle, ya que se trata de zonas críticas que pueden sufrir daños importantes durante un terremoto. En la Figura 1.1 se puede apreciar lo mencionado anteriormente, se muestra un edificio que sufrió daños durante el terremoto del 2010 [9].



**Figura 1.1: Daños debido a irregularidades en el primer piso Torre Bosquemar, Concepción.**

La presente investigación de los muros con aberturas centrales tiene su inicio en el trabajo de título de Ahumada (2014), quien trabajó con el mismo modelo analítico, con el cual obtuvo que para un muro con aberturas centradas, la compresión máxima será mayor a la de un muro rectangular, mientras que la tracción máxima será menor. Además obtuvo que se desarrolla una rótula plástica en la sección crítica del muro (donde termina el refuerzo de la aberturas).

En cuanto al trabajo a desarrollar, se modelará una cierta cantidad de muros con el programa de elementos finitos no lineal desarrollado en MATLAB (Rojas 2012), en éste se discretizan los muros en elementos rectangulares tipo membrana con 3 grados de libertad por nodo, dos desplazamientos (Vertical y Horizontal) y una rotación en el plano, obteniéndose un total de 12 grados de libertad por elemento. Se trabaja también, con una interpolación de campo combinado para las deformaciones en el interior de los elementos.

Para llevar a cabo la modelación se deben ingresar las propiedades de los materiales a utilizar en los muros y sus características, en este se utilizan los resultados obtenidos en una recopilación de las características de los muros de hormigón armado diseñados en Chile (Estay 2008). Una vez modelados los muros se realiza el análisis del comportamiento de los muros para cada uno de los casos, se estudian en profundidad las deformaciones en las zonas en compresión y de manera general las deformaciones en las zonas en tracción, con el fin de cuantificar el impacto que producen las aberturas en el comportamiento del muro. Se busca calibrar factores que permitan amplificar y/o reducir las deformaciones a partir de muros continuos desde la base, de tal manera de conseguir una ecuación que incorpore el efecto de la abertura sumado al efecto del corte que ya fue estudiado para muros sin aberturas por Ahumada (2014). Posterior a esto es posible definir si es necesario considerar la abertura en el análisis, generando recomendaciones para su diseño.

En este trabajo de título se proponen métodos simples de amplificación a las deformaciones máximas por compresión y tracción de un muro sin abertura para diferentes relaciones de aspecto, con el fin cuantificar las deformaciones al momento de incorporar la abertura al muro.

## **1.1 Objetivos.**

### **1.1.1 Objetivo general.**

Estudio y análisis del comportamiento de muros esbeltos de hormigón armado con aberturas centrales en la base mediante análisis de elementos finitos no lineal bajo carga monotónica creciente tipo “pushover”.

### **1.1.2 Objetivos específicos.**

- Estudiar el desarrollo de la rótula plástica a lo alto del muro en relación a la cuantía y longitud de la armadura de borde de las aberturas.
- Estudiar y cuantificar el impacto que generan las aberturas centrales en el comportamiento de los muros esbeltos: Deformaciones en tracción y compresión. Se consideran como parámetros de interés principalmente las dimensiones de la abertura.
- Calibrar factores que nos permitan obtener la amplificación y/o reducción que sufren las deformaciones de un muro continuo desde la base, tanto en la zona de tracción como en compresión, al incorporarle la abertura.
- Establecer cuando es necesario considerar la abertura en el análisis y dar recomendaciones generales de diseño.

## 1.2 Metodología.

El análisis de los muros esbeltos con aberturas centrales es realizado con un programa de elementos finitos no lineal correspondiente a un conjunto de herramientas SAFE Toolbox para Matlab desarrollado por Rojas (2012), este software permite modelar la respuesta biaxial de paneles de hormigón armado. Se utiliza un análisis tipo “pushover” para obtener la respuesta carga-deformación así como también las deformaciones unitarias en todo el muro.

A continuación se muestran los pasos a seguir:

1-. Revisión bibliográfica de análisis experimentales desarrollados a muros esbeltos con aberturas. Se estudian los casos experimentales desarrollados por Shiu (1981), Ali and Wight (1990) y los desarrollados por Taylor and Wallace (1995). También se estudian los resultados analíticos obtenidos por Ahumada (2014). (Ver capítulo 2).

2-. Estudio del programa SAFE Toolbox, su enfoque teórico y los parámetros a utilizar en la modelación de los muros; Algoritmo de solución, propiedades de los materiales, tipos de elementos finitos y grados de libertad. (Ver Capítulo 3).

3-. Modelación de una gran cantidad de casos, se analizaron muros con diferente tamaño de abertura y diferentes relaciones de aspecto. Además se estudian 3 modelos diferentes. (Ver Capítulo 3).

4-. Análisis de los resultados obtenidos de diversos muros con abertura, con el fin de cuantificar el impacto producido por la abertura. Dicho análisis se enfoca en las deformaciones máximas por compresión, ya que éstas son fundamentales al momento de llevar a cabo un diseño. (Ver capítulo 4).

5-. Calibración de expresiones que permitan estimar las deformaciones de muros con aberturas a partir de las deformaciones del muro rectangular sólido. (Ver Capítulo 4).

### **1.3 Alcances.**

#### **Capítulo 1: Introducción.**

Se realiza una descripción del presente trabajo de título, sin profundizar demasiado en cada tema. Se expresa la motivación del tema a estudiar, se detallan los objetivos y la metodología aplicada.

#### **Capítulo 2: Revisión bibliográfica.**

Se estudian trabajos e investigaciones desarrollados anteriormente por otros autores, que tengan relación con el presente trabajo de título. En esta oportunidad se revisan trabajos experimentales y analíticos de muros con aberturas a nivel basal.

#### **Capítulo 3: Modelación de muros con aberturas centrales.**

En este capítulo se describe el programa utilizado para el análisis de los muros esbeltos de hormigón armado con aberturas centrales. También se muestran las leyes constitutivas de los materiales utilizados y se detallan todos los casos analizados: Descripción de su geometría, características principales, discretización utilizada y explicación de los modelos.

#### **Capítulo 4: Resultados y recomendaciones muros con aberturas centrales.**

Se analizan los resultados de las deformaciones máximas por compresión y tracción obtenidas en todos los muros con diferentes relaciones de aspecto. Se estudia el impacto que genera la incorporación de la abertura en el muro, logrando calibrar expresiones que permitan obtener las deformaciones de un muro con abertura que incluye el efecto del corte a partir de un muro sin abertura analizado con un modelo de flexión. Se incluyen ciertas recomendaciones.

#### **Capítulo 5: Conclusiones.**

Se presentan las conclusiones de mayor relevancia de todo el trabajo, el efecto de incorporar la abertura más el efecto del corte en muros esbeltos sin aberturas y las recomendaciones de diseño pertinentes.

## 2 Revisión bibliográfica.

### 2.1 Shiu, K.N., et al 1981.

#### “Earthquake Resistant Structural Walls-Tests of Walls With and Without Openings.”

El principal objetivo de esta investigación es determinar los efectos que producen las aberturas sobre las tensiones y la capacidad de deformaciones de los muros estructurales sometidos a la simulación de cargas sísmicas.

En este estudio se realizaron 2 muros de seis pisos con una escala de 1:3, con y sin aberturas. Las dimensiones fueron 5.5 [m] de alto, 1.9 [m] de ancho y 106[mm] de espesor. El muro sin aberturas, denominado CI-1 (Figura 2.1(a)) fue diseñado de acuerdo a las recomendaciones de la UBC y de la ACI. El muro con aberturas, denominado PW-1 (Figura 2.1(b)) tiene 6 aberturas, una en cada piso, éstas corresponden a aberturas tipo ventanas y abarcan un 8.3% del área total del muro. Ambos especímenes tienen un 6% de armadura longitudinal de borde y se encuentran confinados de la misma manera en toda la altura del muro, presentan estribos espaciados 34[mm] en el primer y segundo piso, luego de esto el espaciamiento aumenta a 102[mm]. Los materiales utilizados fueron hormigón estructural  $f'_c = 20,7$ [MPa] (3000psi) y acero GR 60 (414 [MPa]). El muro PW-1 fue reforzado de acuerdo a las prácticas tradicionales de diseño (no presenta refuerzo vertical de borde en la abertura), luego de esto se les aplicó carga cíclica con el fin de observar su comportamiento y realizar comparaciones entre ambos.

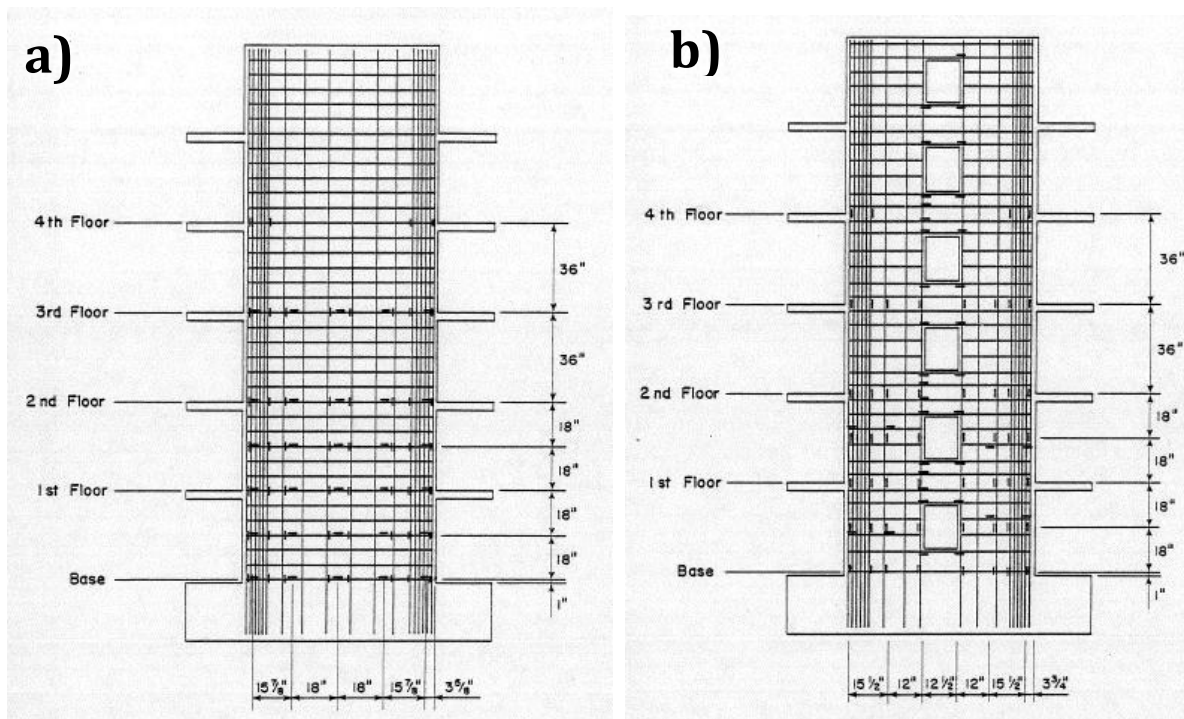


Figura 2.1: Muro sin aberturas CI-1 (a) y Muro con aberturas PW-1 (b).

La principal conclusión fue que estas aberturas no afectan significativamente el comportamiento de este tipo de muros, pero los resultados de este estudio no pueden ser generalizados a otro tipo de configuraciones de muros con aberturas. Se obtuvo que la que la capacidad de carga de ambos muros fue similar, el muro sólido CI-1 superó en un 14% la capacidad de carga del muro con aberturas PW-1 (Figura 2.2). Por otro lado, ambos especímenes mostraron grandes y similares deformaciones a nivel basal (Figura 2.3), así como también exhibieron una capacidad de disipación de energía similar. Se observaron diferentes modos fallas en cada muro, el muro sólido presentó grietas horizontales en el primer piso debido al efecto de cizalle del corte mientras que el muro con abertura sufrió el efecto de falla por corte-compresión en los elementos de borde. Por lo tanto la capacidad de ambos muros se vio limitada por el efecto del corte.

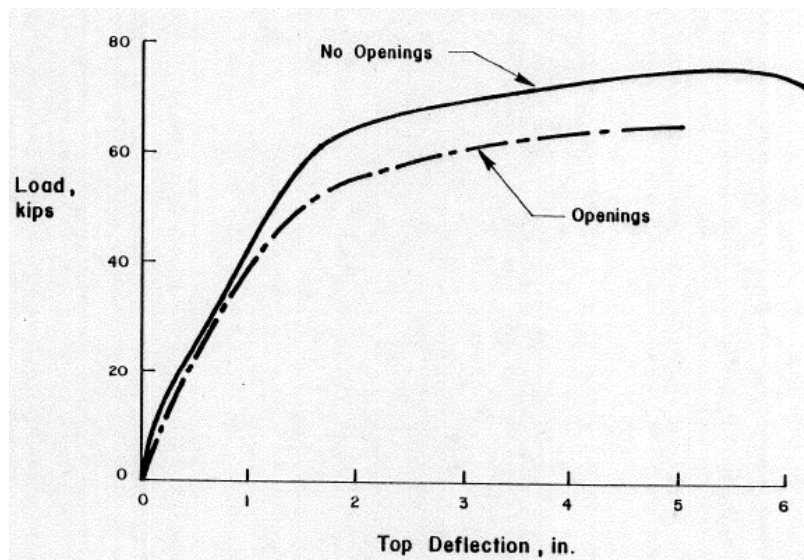


Figura 2.2: Carga-Desplazamiento de techo CI-1 versus PW-1.

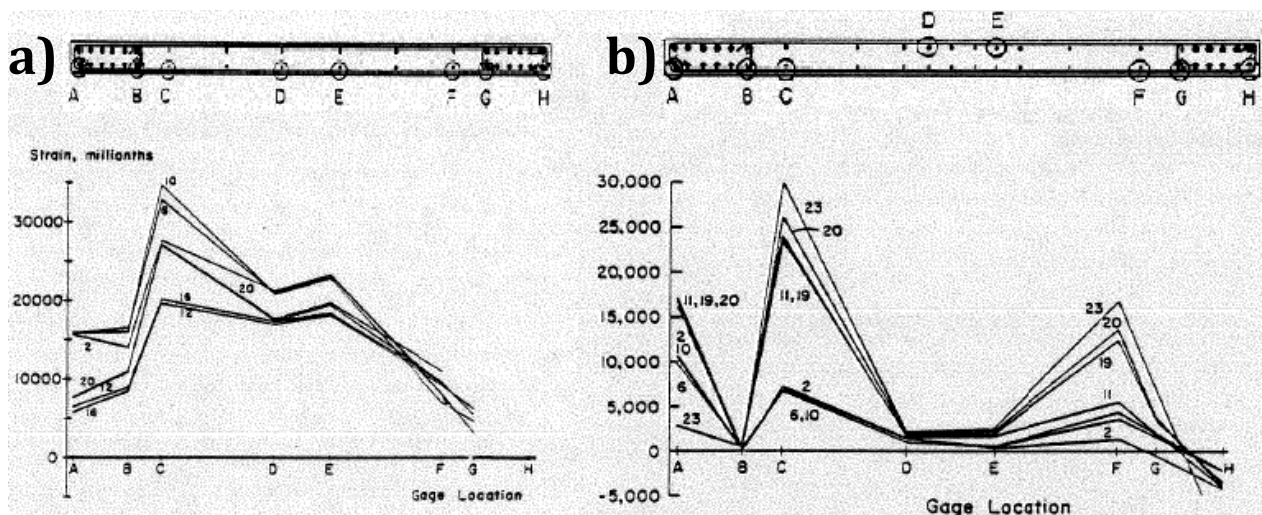


Figura 2.3: Deformaciones reforzamiento vertical a nivel basal, Muro CI-1 (a) y Muro PW-1(b).



## 2.2 Ali, A., and Wight, J.K. 1990.

### “Reinforced Concrete Structural Walls With Staggered Opening Configurations Under Reversed Cyclicloading.”

El principal objetivo de esta investigación es determinar los efectos que producen diferentes configuraciones con aberturas escalonadas de tipo puerta en las tensiones, rigidez y capacidad de deformación de los muros estructurales sometidos a cargas cíclicas.

Este estudio experimental se realizó como parte de un proyecto que incorporó el estudio de algunos edificios en Chile que experimentaron el terremoto del 3 de marzo de 1985. Dentro de las principales características de estos edificios se encontraba la gran cantidad de muros estructurales usados y la configuración de aberturas escalonadas.

El estudio experimental consintió en 4 muros de hormigón armado de 5 pisos realizados en escala 1:5, tipo “barbell shaped”. El espécimen W-1 no tiene aberturas (Anexo A- 1), mientras que los especímenes W-2, W-3 y W-4 tienen aberturas tipo puerta piso a piso escalonadas y separadas horizontalmente un 30% , 15% y 10% del ancho del muro (Figura 2.5). Los materiales utilizados fueron hormigón estructural  $f'_c = 35$ [MPa] (5000psi) y acero GR 60 (414 [MPa]), más características de los especímenes se muestran en el Anexo A- 1. Todos los muros fueron sometidos a carga axial constante y carga cíclica aplicada en la cabeza del muro.

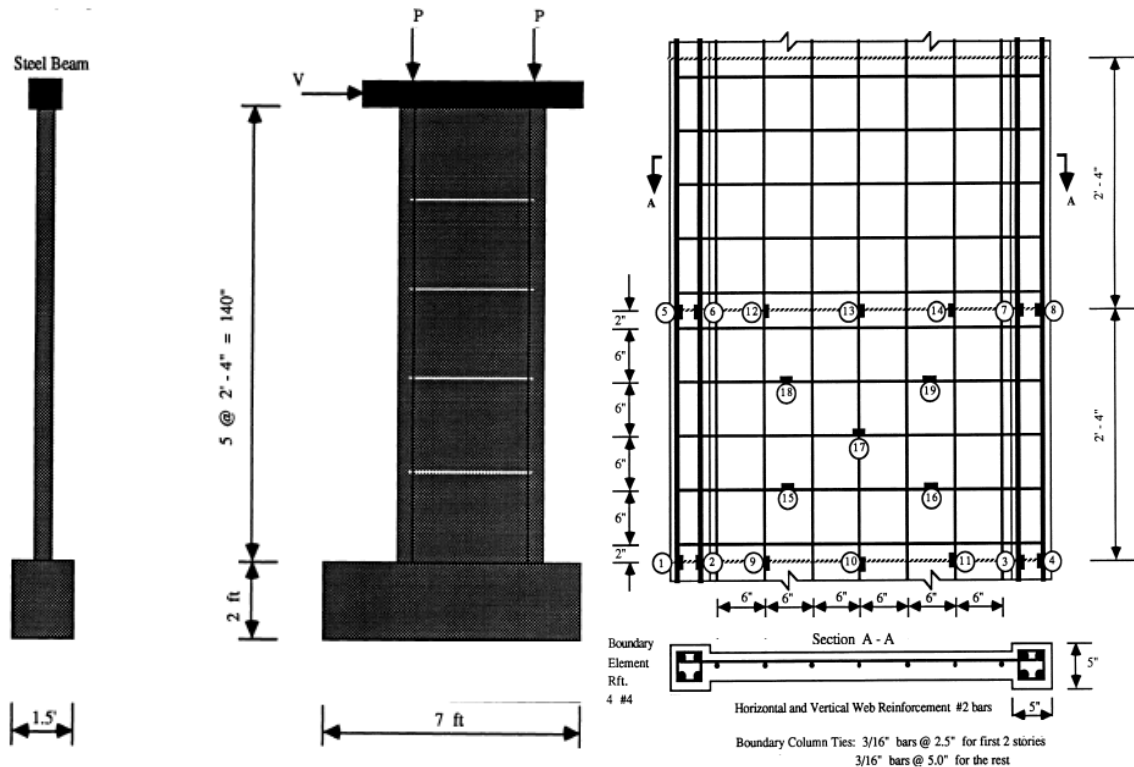


Figura 2.4: Muro sin aberturas W-1.

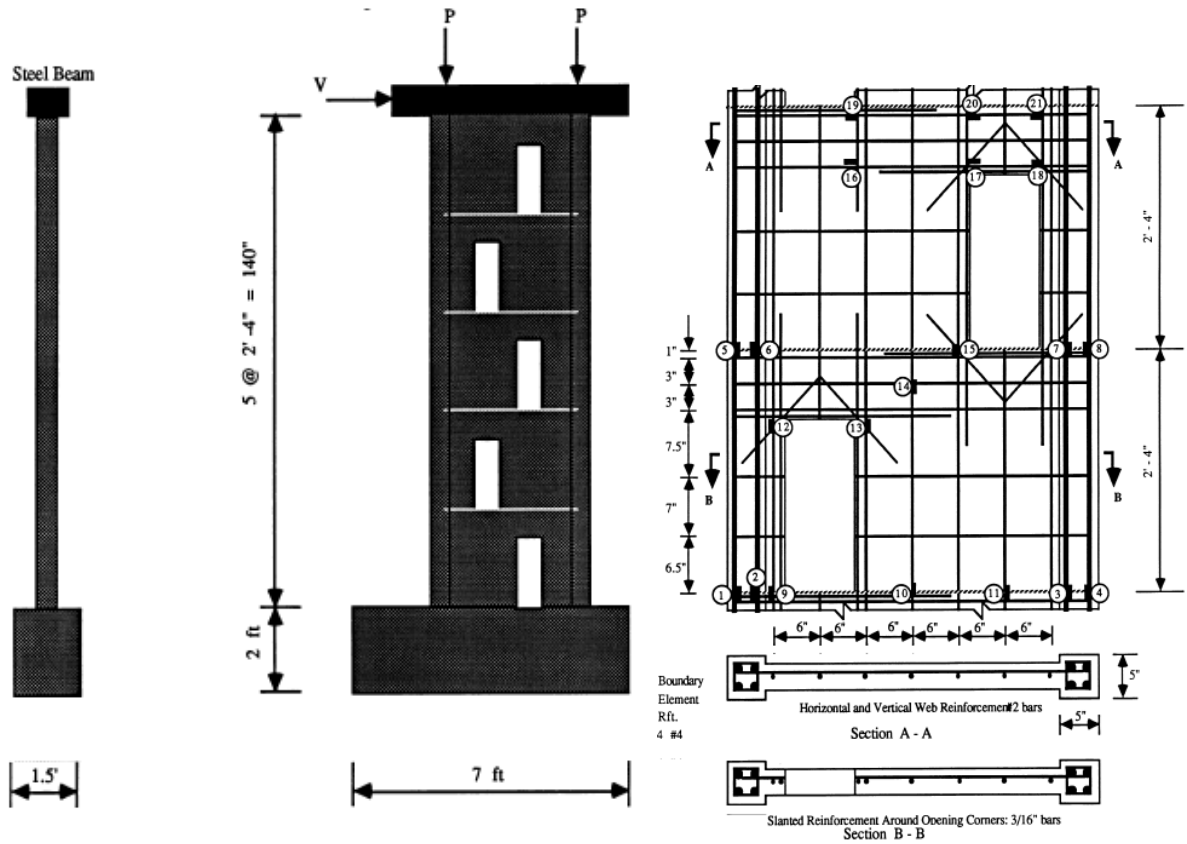


Figura 2.5: Muros con aberturas W-2, W-3 y W-4.

Los principales resultados de este estudio fueron que todos los muros exhibieron un comportamiento dúctil. La fluencia de los elementos de borde ocurrió aproximadamente para una deriva de techo de 0.75% en todos los casos, así como también se alcanza una deriva de techo promedio de 1% sin que los muros sufran daños significativos. Para derivas de techo superiores, 1.5% - 2%, es necesario confinar los elementos de borde pues los 3 muros con aberturas experimentaron una falla del tipo corte compresión entre la abertura y la zona en compresión en el primer piso.

Todo lo anterior se puede generalizar considerando los siguientes supuestos: La relación de aspecto de los muros debe ser de al menos 3, las cuantías deben ser menores a 0.35% para al alma del muro y menores a 4% para columnas de borde.

### 2.3 Taylor, C.P. and Wallace, J.W. 1995.

#### “Design of Slender Reinforced Concrete Structural Walls With Openings.”

El foco de esta investigación es el diseño de muros esbeltos de hormigón armado con perforaciones basales, pues es ahí donde se concentran las deformaciones sin inelásticas. Dentro de esto, el principal objetivo es evaluar el análisis seccional que asume secciones planas para escoger el refuerzo longitudinal principal, también evaluar el método basado en desplazamientos para la selección de la armadura transversal de borde y evaluar el modelo puntal-tensor para la selección de la armadura de corte.

Para llevar a cabo este estudio experimental se realizaron 2 muros: El Muro RW3-O de sección rectangular y el Muro BW1-O de sección rectangular más delgada con bordes robustos (“barbell shaped”). Ambos muros de 4 pisos realizados a una escala de 1:4 con una abertura tipo puerta descentrada, sometidos a una carga cíclica en la cabeza del muro y a carga axial constante. Los materiales utilizados fueron hormigón estructural  $f'_c = 27,6$ [MPa] (4000psi) y acero GR 60 (414 [MPa]). El ancho de la abertura corresponde al 25% del ancho del muro.

El espécimen RWO-3 tenía una abertura de 12[in] (305[mm]) de ancho por 27[in] (686[mm]) de alto, contaba con 8 barras No 3 (9.5 [mm]) como armadura longitudinal de borde, presentaba estribos de 3/16[in] (4.8 [mm]) espaciados 2[in] (51[mm]) hasta una altura de 55[in] (1.4 [m]). La armadura distribuida vertical estaba formada por una doble malla No 2 (6.4 [mm]) espaciada cada 7.5 [in] (191[mm]) en el piso 2 y 3, para el resto del muro el espaciamiento fue de 5[in] (127[mm]). En cuanto a la armadura distribuida horizontal se tenían barras No 2 espaciadas 5[in] hasta la mitad del primer piso, luego 3.75 [in] hasta la mitad del segundo piso, 7.5 [in] hasta el tercer piso y finalmente 3.75 [in] en el cuarto piso. El espécimen detallado se muestra en el Anexo A- 2.

El espécimen BW1-O 3 tenía una abertura de 9[in] (229[mm]) de ancho por 20[in] (508[mm]) de alto, contaba con 4 barras No 4 (13 [mm]) como armadura longitudinal de borde, presentaba estribos de 3/16[in] (4.8 [mm]) espaciados 3[in] (76[mm]) hasta una altura de 42[in] (1.07 [m]). Para el resto del muro los estribos estaban espaciados 6[in] (152 [mm]). La armadura distribuida vertical estaba formada por una malla No 2 (6.4 [mm]) espaciada cada 4 [in] (102[mm]) en el primer piso y sobre el primer piso el espaciamiento era 6 [in] (152[mm]). En cuanto a la armadura distribuida horizontal se tenían barras No 2 espaciadas 4[in] (102[mm]) hasta los 38[in] (965[mm]), luego 6[in] (152[mm]) hasta los 72[in] (1.83 [m]) y finalmente 3[in] (76[mm]) para el resto del muro. El espécimen detallado se muestra en el Anexo A- 3.

Uno de los resultados interesantes es que los muros con este tipo de abertura en la base pueden exhibir un comportamiento estable de su histéresis y una ductilidad significativa. Además, el ancho de la abertura no influye de manera significativa en el comportamiento del muro al comparar los resultados con el de un muro sólido. Se concluye además que con el método de secciones planas utilizado se predijo de buena manera la respuesta momento-curvatura de los muros estudiados, por lo que considerar secciones planas para el diseño a flexión es acertado. Se debe aclarar que los resultados se refieren al tamaño específico de la abertura, pues no se realizaron especímenes con aberturas de otros tamaños.

## 2.4 Ahumada, M.G. 2014.

### “Modelación en elementos finitos de muros esbeltos de hormigón armado con discontinuidades en la base. Recomendaciones para el diseño.”

Este trabajo se enfoca en muros esbeltos de hormigón armado con discontinuidades en la base. Uno de sus objetivos es generar un modelo que permita cuantificar los efectos del corte en las deformaciones de la zona donde se concentren los daños para muros sin aberturas actuando bajo cargas tipo “pushover”.

En cuanto al modelo, se implementó un análisis de flexión utilizando vigas rígidas en cada capa de elementos, con el fin de forzar las deformaciones de las secciones transversales a una línea recta, es decir, que se cumpla la hipótesis de Bernoulli. Estos resultados se comparan con los obtenidos al aplicar un modelo que incluya el efecto del corte en el muro y los principales resultados fueron que para muros con relación de aspecto bajas, estamos hablando de un rango entre 2 y 3, las deformaciones por compresión del modelo que incluye el corte son hasta 3 veces mayores que las del modelo que utiliza la hipótesis de Bernoulli. En cuanto a las deformaciones por tracción se obtuvo que las del modelo por flexión se encuentran por debajo de las del modelo por corte, llegando a alcanzar diferencias de un 30%. Se analizaron las variables que influyen en el efecto del corte para luego calibrar 2 modelos, uno completo y uno más simplificado para efectos de diseño.

$$\varepsilon_c = F_c \cdot \varepsilon_{cr^*} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$F_c = 3.96 \cdot \Delta_p^{0.26} \left( \frac{h_w}{l_w} \right)^{-0.42} \rho_b^{0.09} \Gamma_l^{-0.22} K_c^{-0.15} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

$\varepsilon_c$  = Deformación por compresión muro sin abertura que incorpora efecto del corte.

$\varepsilon_{cr^*}$  = Deformación por compresión muro sin abertura analizado por modelo de flexión.

$F_c$  = Factor de amplificación de compresión.

$\Delta_p = \frac{\delta_u - \delta_y}{h_w} = \text{Drift plástico.}$

$h_w$  = Altura del muro.

$l_w$  = Largo del 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 factor simplificado tiene la siguiente forma:

$$F_c = 9.69 \cdot \Delta_p^{0.29} \left( \frac{h_w}{l_w} \right)^{-0.23} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Mientras que para el factor de reducción de la tracción se tiene un modelo simplificado de la forma:

$$F_t = 0.6 \left( \frac{h_w}{l_w} \right)^{0.18} \quad \text{Ecuación 2.4}$$
$$\varepsilon_t = F_t \cdot \varepsilon_{tr}^*$$

Para calcular el drift plástico se recurre a las ecuaciones de Alfaro [3].

$$\delta_y = \alpha \cdot \phi_y \cdot h_w^2 \quad \text{Ecuación 2.5}$$

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_y}{\xi l_w} = K \frac{\varepsilon_y}{l_w} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Donde:

$\alpha = \text{Coeficiente.}$

$K = \text{Coeficiente.}$

$\varepsilon_y = \text{Deformación de fluencia.}$

$l_w = \text{Largo total del muro.}$

Los coeficientes se calculan como:

$$K = 1.25 + 1.69 \frac{P}{f_c' A_g} + 0.65 \rho_b \quad \text{Ecuación 2.7}$$

$$\alpha = 0.33 \cdot \rho_b^{0.14} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Donde:

$A_g$  = Área transversal muro.

$\rho_b$  = Cuantía de refuerzo de borde.

$P$  = Carga axial.

$f'_c$  = Resistencia a compresión del hormigón.

De manera conservadora se pueden utilizar los coeficientes como  $K = 1.4$  y  $\alpha = 0.22$ , además al utilizar estos valores se debe corregir la Ecuación 2.5 de la siguiente manera:

$$\delta_y^* = \left( 1 + 0.9 \left( \frac{l_p}{h_w} \right)^{0.23} \right) \delta_y \approx 1.4 \delta_y \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Finalmente en este trabajo de título se dio inició a un análisis de muros con aberturas centrales. Se estudiaron casos con aberturas centrales con refuerzo longitudinal de borde hasta los pisos 2, 3 y 9, y una cuantía de refuerzo de 2.5%. Se concluye que al reforzar hasta los pisos 2 y 3 se produce una rótula plástica a lo largo del muro, específicamente el daño se concentra a la altura del cambio de refuerzo de borde de la abertura, mientras que al reforzar hasta el piso 9 la rótula plástica desaparece. Se recomienda estudiar con mayor detalle la cuantía óptima de refuerzo de borde, pues es sumamente recomendable con un apropiado desarrollo en la altura del muro.

### **3 Modelación de muros con aberturas centrales.**

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

El conjunto de herramientas SAFE toolbox para Matlab utilizados para realizar la modelación de los muros en el presente trabajo de título fue desarrollado por Rojas [6]. Se realiza un análisis numérico no lineal en base a elementos finitos, las herramientas que se encuentran disponibles permiten modelar elementos tipo cascarón (“Shell”), éstos corresponden a elementos cuadriláteros planos y delgados que trabajan dentro y fuera del plano, y elementos tipo membrana que corresponden a elementos cuadriláteros que solo trabajan en el plano. Ambos elementos están formados por capas que incluyen cuatro nodos y permiten reproducir el comportamiento no lineal del hormigón armado, para ello se representan las diferentes capas que tiene el muro incorporándoles las respectivas leyes constitutivas de los materiales: El hormigón y las mallas de acero en ambas direcciones. En el presente trabajo de título se utilizan los elementos tipo membrana, formados por cuatro nodos que presentan en total doce grados de libertad: Tres desplazamientos horizontales, tres desplazamientos verticales y tres giros en el plano, y a esto se le suma una interpolación de campo combinado para las deformaciones en el interior del elemento que consta nueve puntos de cuadratura por elemento. Esto nos permite tener una deformación suavizada dentro del elemento, evitando que se produzcan concentraciones de deformaciones muy altas que puedan generar la plastificación de éste. Los elementos consideran adherencia completa entre las capas de hormigón ortotrópico y acero, cuyos materiales son modelados con leyes constitutivas biaxiales.

Se debe discretizar el muro en una gran cantidad de elementos. Mientras más elementos, más preciso es el modelo, pero a su vez mayor es el tiempo de análisis. Una vez discretizado, se calcula la matriz de rigidez interna del material ya que si se tienen cada uno de estos elementos de manera individual y luego se conectan unos con otros a través de sus nodos, se obtiene una relación de deformaciones que permite encontrar como es la deformación interna de la estructura. Lo mismo se puede hacer para calcular las tensiones que van a resistir los elementos.

La herramienta computacional toolbox dispone de algoritmos de solución para problemas no lineales con control de desplazamientos y control de fuerzas. En esta ocasión se utilizaran cargas bajo control de desplazamientos, aplicando una carga puntual en la cabeza del muro, es decir un análisis estático tipo pushover, ya que se trata de una carga lateral monotónica creciente. El modelo utiliza el algoritmo de solución de Newton Raphson, este algoritmo fue modificado por Peña (2015), quién implementó el algoritmo NRMTI (Newton Raphson modificado con tangente inicial). Además incorporó un factor de convergencia de carga que busca reducir la oscilación en torno a la respuesta al momento de iterar para encontrar la convergencia. El uso del algoritmo NRMTI en conjunto con el factor de convergencia de carga, logra evitar problemas de convergencia, lo que es de suma importancia ya que permite reducir los tiempos de análisis hasta en un 90%, por lo menos para control de carga estática.

### 3.2 Materiales.

Se presentan a continuación todos los parámetros utilizados en la incorporación de los materiales al modelo, se muestran las leyes constitutivas uniaxiales utilizadas para la representación del comportamiento de hormigón y del acero que serán asignadas a los elementos para llevar a cabo el análisis numérico.

#### 3.2.1 Hormigón.

El modelo constitutivo utilizado para representar el comportamiento en el plano del hormigón corresponde a un modelo ortotrópico que incluye agrietamiento en base a las deformaciones promedio uniaxiales en las direcciones principales. Se asume que las direcciones principales de deformación coinciden con las direcciones principales de tensión.

La ley constitutiva uniaxial del hormigón fue desarrollada para carga estática y luego se extendió para carga cíclica, ambas desarrolladas por Massone (2006). El modelo cíclico es el utilizado en el presente trabajo (Figura 3.1) y está compuesto por 2 ecuaciones, una es la envolvente de compresión y otra es la envolvente de tracción. En la Figura 3.2 se tiene la envolvente de compresión que corresponde a la propuesta por Thorenfeldt (1987), y en la Figura 3.3 se tiene la envolvente de tracción que corresponde a la desarrollada por Belarbi & Hsu (1995).

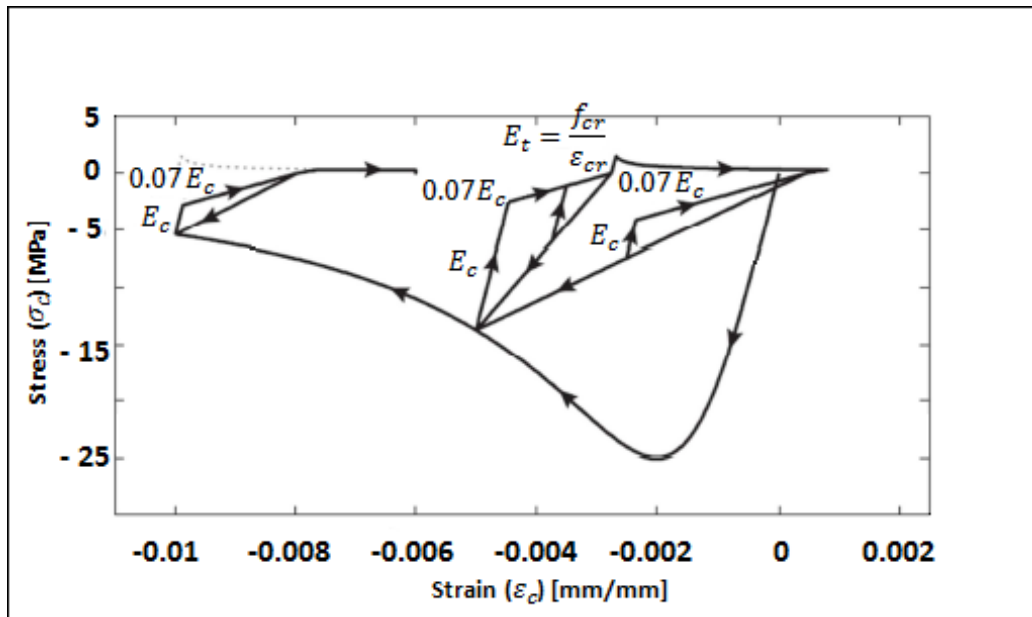


Figura 3.1: Histéresis para el modelo del hormigón. Massone (2006).



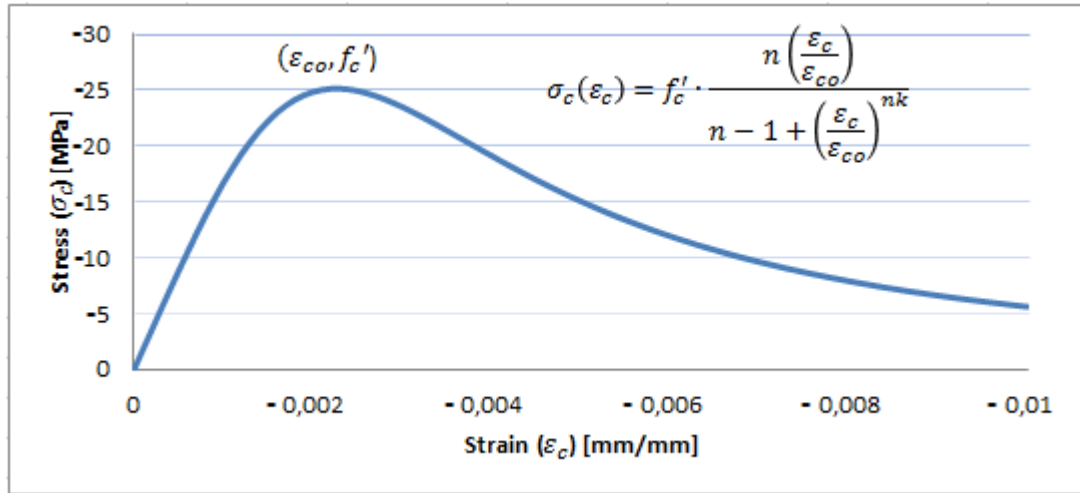


Figura 3.2: Modelo constitutivo para el hormigón en compresión usando la curva base de Thorenfeldt (1987).

Los parámetros  $n$  y  $k$  que aparecen en la Figura 3.2 tienen diferentes valores dependiendo del autor que calibra el modelo, para este trabajo de título se utilizara  $n$  de acuerdo a la calibración de Saatcioglu & Razvi (1992). Por lo tanto el valor para hormigón no confinado en el modelo se usa como  $n = 3.13$ . Mientras que el parámetro  $k$  se utiliza en base al trabajo de Rojas (6), por simplicidad se utiliza en el modelo  $K = 1$ .

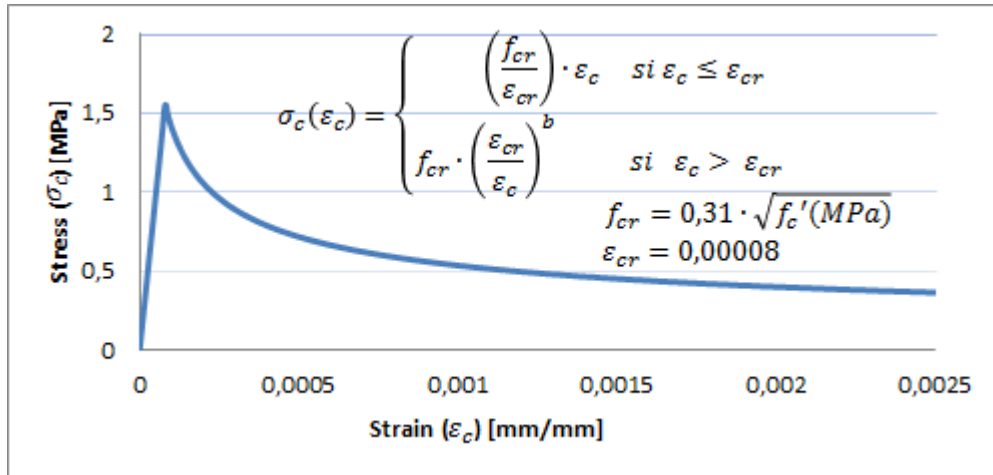


Figura 3.3: Modelo constitutivo para el hormigón en tracción usando la ecuación de Belarbi & Hsu (1994).

El parámetro  $b$  que aparece en la Figura 3.3 permite variar la inclinación de la zona descendente de la envolvente en tracción, Belarbi & Hsu (1994) propusieron los siguientes valores:

$b = 0.6$  Para hormigón no confinado.

$b = 0.4$  Para hormigón confinado.

Las deformaciones plásticas remanentes en compresión del material son tomadas son incorporadas mediante la expresión siguiente:

$$\varepsilon_p^c = \varepsilon_m^c \left( 1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon_m^c}{\varepsilon_{co}}\right)\alpha_c} \right) \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde  $\alpha_c$  es un parámetro que determina la cantidad de deformación plástica en el hormigón y se utiliza con el valor:

$$\alpha_c = 0.32$$

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

$$\varepsilon_p^t = \varepsilon_m^t \left( 1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon_m^t}{\varepsilon_{cr}}\right)\alpha_t} \right) \quad \text{Ecuación 3.2}$$

$$\alpha_t = 0.08$$

Los valores de las deformaciones plásticas tanto en compresión como en tracción son tomados en base al trabajo de Rojas (2012).

Además de las leyes constitutivas uniaxiales para deformaciones promedio en las direcciones principales, el modelo debe considerar otros efectos importantes, como el ablandamiento del hormigón, puesto que se reduce la resistencia a la compresión en una dirección debido a la tracción generada en la dirección perpendicular. Esto se considera con la expresión desarrollada por Belarbi & Hsu (1995):

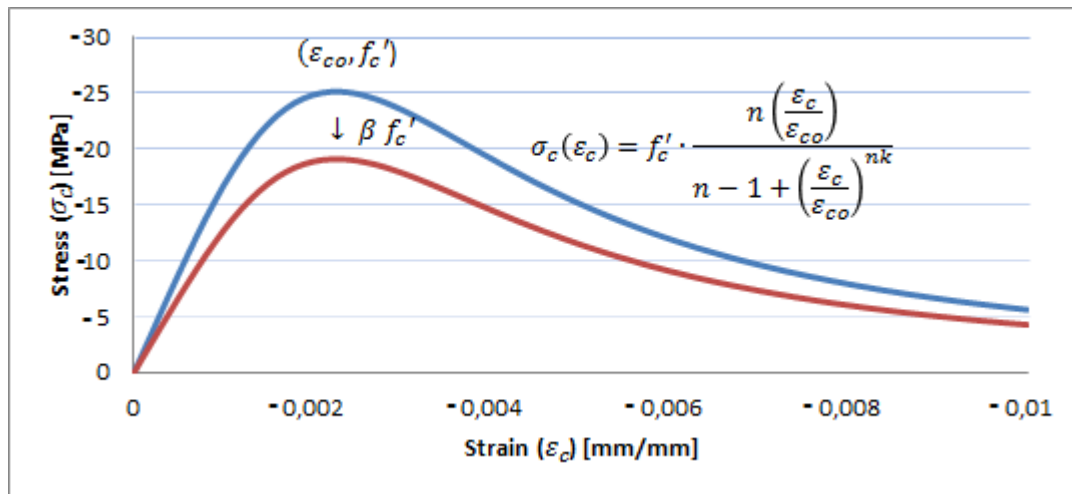


Figura 3.4: Efecto de ablandamiento por compresión. Belarbi & Hsu (1995).

$$\beta = \frac{k}{\sqrt{1 + k_{\theta} \varepsilon_{tensión}}} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde:

$\beta$  = Factor de reducción por ablandamiento.

$\varepsilon_{tensión}$ : Deformación por tracción en el hormigón.

$k$  y  $k_{\theta}$ : Parámetros que definen el factor de reducción.

Dichos parámetros de la Ecuación 3.3 se establecen de acuerdo a Belarbi & Hsu (1995) y Rojas (2012) como:

$$k = 1.$$

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

Otro efecto a considerar corresponde al confinamiento, ya que la incorporación de estribos al modelo aumenta la capacidad de deformación y la resistencia a compresión del hormigón. Se utilizan expresiones simples para asimilar este efecto. El aumento en resistencia y en ductilidad es aproximado por las expresiones de Saatcioglu & Razvi (1992):

$$f'_{cc} = f'_c + k_1 f_{le} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

$$k_1 = 6.7(f_{le})^{-0.17} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

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

**Ecuación 3.6**

$$k_2 = 0.26 \cdot \sqrt{\frac{b_c}{s} \frac{b_c}{s_l} \frac{1}{f_l}} \leq 1$$

**Ecuación 3.7**

Donde:

$b_c$  = ancho del elemento confinado.

$s_l$  = Espaciamiento lateral de barras longitudinales apoyadas.

$A_s$  = Area de 1 estribo.

$s$  = Espaciamiento de estribos.

Dado que los elementos tipo membrana funcionan en capas, no basta solo con agregar los estribos al modelo, ya que el comportamiento del hormigón toma otra curva al encontrarse confinado y por ende su capacidad de deformación del hormigón se ve aumentada acorde a la Ecuación 3.8:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{01} \cdot (1 + 5k)$$

**Ecuación 3.8**

Donde:

$$K = \frac{k_1 \cdot f_{le}}{f'_c}$$

**Ecuación 3.9**

### 3.2.2 Acero.

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

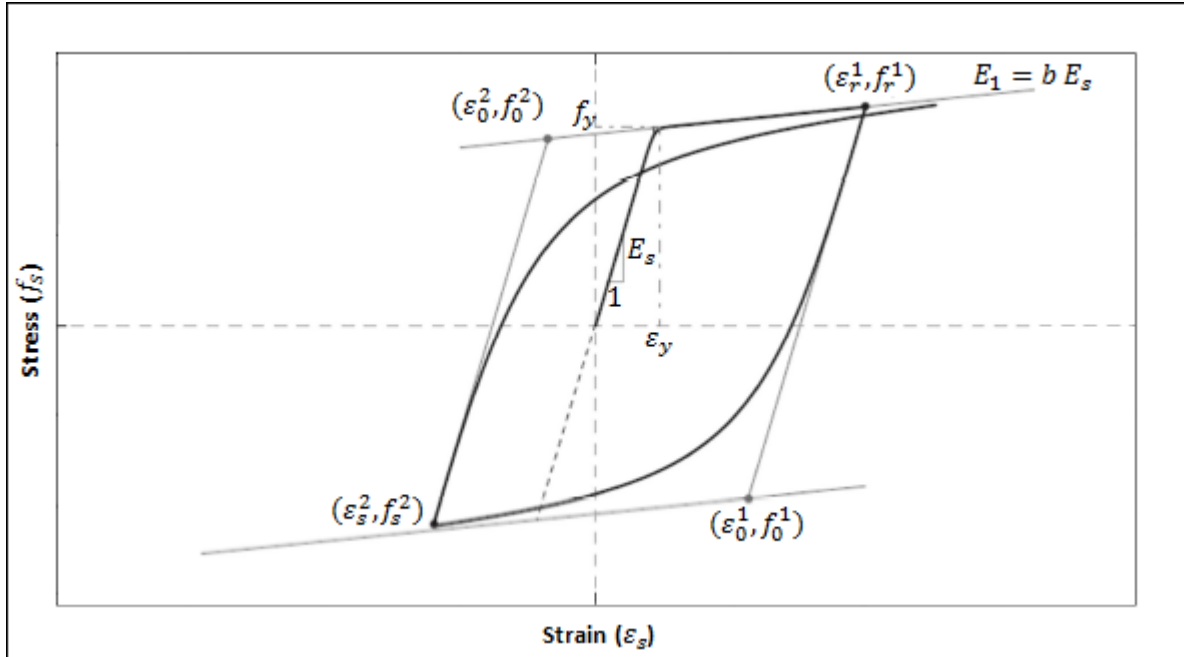


Figura 3.5: Modelo constitutivo para el acero. Menegotto & Pinto (1973).

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 se define así:

$$f_s^*(\varepsilon_s^*) = b\varepsilon_s^* + \frac{(1-b)\varepsilon_s^*}{(1 + (\varepsilon_s^*)^R)^{\frac{1}{R}}} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

$$\varepsilon_s^* = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

$$f_s^* = \frac{f_s - f_r}{f_0 - f_r} \quad \text{Ecuación 3.12}$$

$$R = R_0 - \frac{a_1 \xi}{a_2 + \xi} \quad \text{Ecuación 3.13}$$

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

$$\begin{aligned}
 R_0 &= 18 \\
 a_1 &= 16.2 \\
 a_2 &= 0.15
 \end{aligned}$$

El valor de  $\xi$  se calcula como sigue:

$$\xi = \left| \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_0}{\varepsilon_y} \right| \quad \text{Ecuación 3.14}$$

Donde  $\varepsilon_m$  es la mínima o máxima deformación del ultimo cambio de dirección de carga (dependiendo si se esta 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 de la siguiente manera:

$$f_y^{average} = (0.91 - 2B)f_y \quad \text{Ecuación 3.15}$$

$$b_{average} = b_{bare}(0.8 + 10B) \quad \text{Ecuación 3.16}$$

$$B = \frac{1}{\rho} \left( \frac{f_{cr}}{f_y} \right)^{1.5} \quad \text{Ecuación 3.17}$$

Y  $b_{bare}$  corresponde a la razón de 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 3.15 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.

Todo lo relacionado a materiales descrito anteriormente corresponde a las características del modelo de muros realizado por Ahumada (2014).

### 3.3 Antecedentes generales.

En un comienzo se realizaron once muros esbeltos de hormigón armado con diferente tamaño de aberturas, diez muros con aberturas de diferentes tamaños y un muro continuo sin abertura correspondiente al caso base. Luego se realizaron tres modelos para cada y finalmente todas las combinaciones anteriores se repitieron para tres relaciones de aspecto diferentes, con lo que se tiene un total de 99 muros.

#### 3.3.1 Características Muros.

En la Figura 3.6 se puede apreciar las variables que determinan las dimensiones de los muros y su abertura.

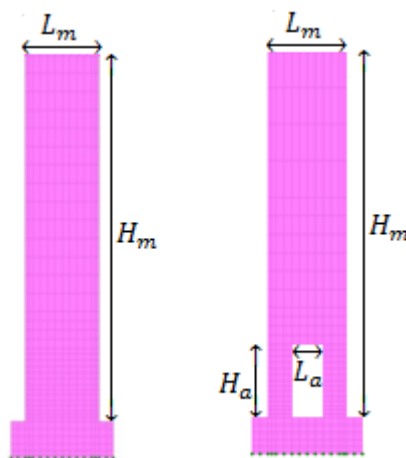


Figura 3.6: Variables geometría muros.

Donde:

$H_m$ : Altura del muro.

$L_m$ : Ancho del muro.

$H_a$ : Altura de la abertura.

$L_a$ : Ancho de la abertura.

$RA$ : Relación de aspecto =  $\frac{H_m}{L_m}$ .

Otros parámetros de los muros se detallan a continuación:

- Espesor ( $e$ ): 0.3[m]
- Largo de confinamiento: 10% del largo del muro.

- Cuantía armadura longitudinal borde muro ( $\rho_l$ ): 2.5% del elemento de borde.
- Cuantía armadura longitudinal borde abertura ( $\rho_{lb}$ ): 0.3125% del elemento de borde, corresponde a la octava parte de la armadura longitudinal de borde del muro.
- Cuantía armadura vertical distribuida ( $\rho_v$ ): 0.25% del elemento.
- Cuantía armadura horizontal distribuida ( $\rho_h$ ): 0.25% del elemento.
- Cuantía horizontal de borde ( $\rho_{hb}$ ): 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.
- Altura piso: 2.5[m]
- Disposición armadura longitudinal: En los elementos de borde del muro se dispone de armadura longitudinal en todos los pisos, mientras que en el borde de la abertura la armadura longitudinal de borde se dispone hasta el piso 4 para todos los modelos. La armadura se considera con una adherencia de 100% en todos los casos.
- Pedestal: Se considera un pedestal de hormigón elástico. Con una rigidez de  $4700\sqrt{f'_{c_p}}$  [MPa],  $f'_{c_p} = 45$  [MPa]
- $f'_c = 30$ [MPa]
- $\varepsilon_0 = 0.0025$
- $f_y = 420$ [MPa]
- $\varepsilon_y = 0.0021$
- Pendiente 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).
- Carga lateral puntual incremental en la cabeza del muro.
- Carga Axial:  $0.05 \cdot A_g \cdot \sqrt{f'_c}$ .
- Discretización Muros: La discretización utilizada fue de 12 elementos en la horizontal, en la vertical la cantidad de elementos varía de acuerdo al piso, el primer piso tiene 8



elementos; el segundo piso tiene 6; el tercer piso tiene 4 el; el cuarto, quinto y sexto piso tienen 2 elementos y desde el séptimo piso se tiene un elemento por piso. Esta discretización se utiliza para todos los muros, independiente de su altura y la cantidad de elementos disminuye hacia arriba debido a que se necesita apreciar el comportamiento del muro en la base y alrededor de la abertura. Mientras más elementos el análisis es más preciso, pero a su vez se tiene un mayor tiempo de análisis. Al duplicar la cantidad de elementos en el primer piso, se obtiene que las diferencias en cuanto a deformaciones no superan el 5%. En la Figura 3.7 se puede apreciar la discretización señalada anteriormente.

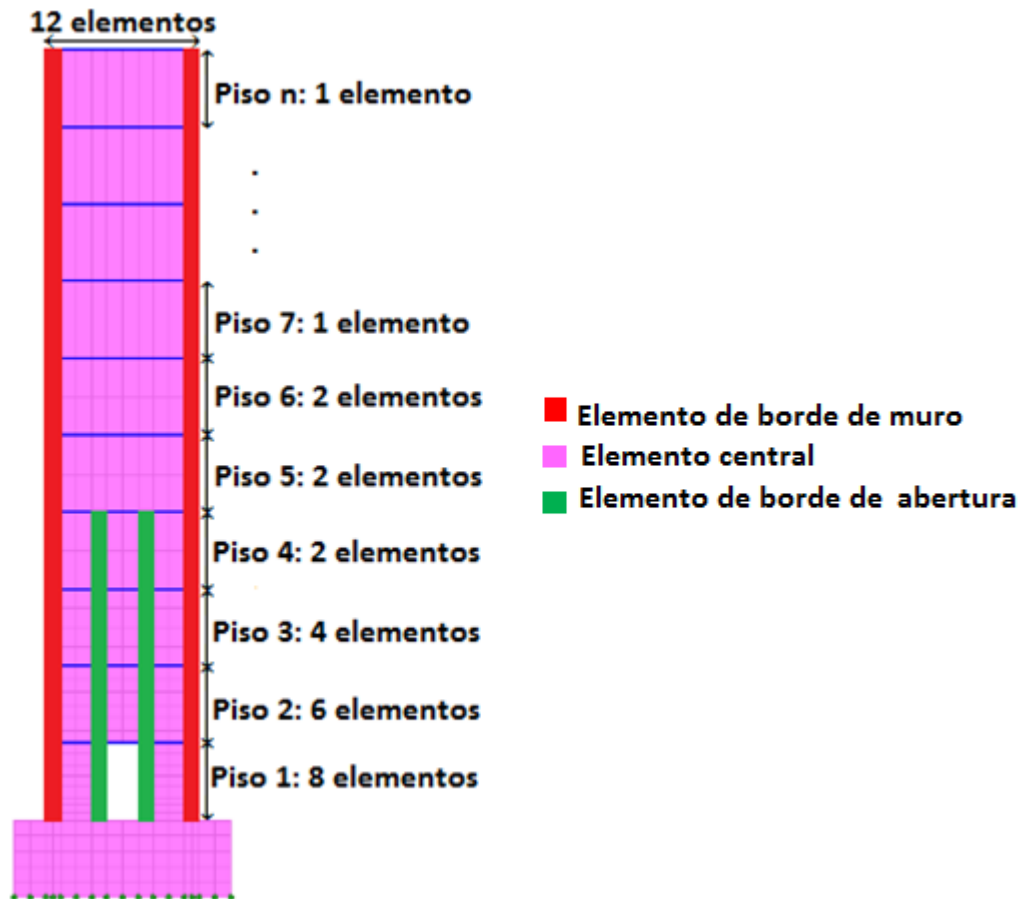


Figura 3.7: Discretización elementos.

Los muros están formados por 3 tipos de elementos: Elementos de borde de muro, Elementos centrales y Elementos de borde de abertura (Figura 3.7: Discretización elementos..

Los Elementos de borde de muro se encuentran confinados hasta el tercer piso. Están definidos con hormigón confinado, poseen cuantía de armadura longitudinal ( $\rho_l$ ), cuantía de armadura horizontal distribuida ( $\rho_h$ ) y además la cuantía horizontal de borde ( $\rho_{hb}$ ) hasta el tercer piso. Sobre el tercer piso están definidos con hormigón no confinado y poseen las mismas cuantías, pero esta vez sin cuantía horizontal de borde.

Los Elementos centrales se encuentran definidos con hormigón no confinado y poseen cuantía de armadura distribuida en ambas direcciones ( $\rho_v$  y  $\rho_h$ ).

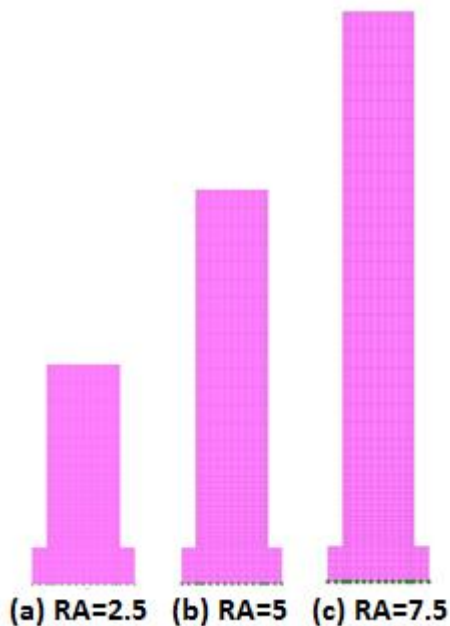
Los Elementos de borde de abertura se encuentran confinados hasta el tercer piso. Están definidos con hormigón confinado, poseen cuantía de armadura longitudinal ( $\rho_{lb}$ ), cuantía de armadura horizontal ( $\rho_h$ ) y además la cuantía horizontal de borde ( $\rho_{hb}$ ) hasta el tercer piso. En el cuarto piso están definidos con hormigón no confinado y poseen las mismas cuantías, pero esta vez sin cuantía horizontal de borde.

En la Figura 3.8 podemos ver los Casos base, correspondiente a Muros rectangulares sin aberturas para las diferentes relaciones de aspecto. Estos muros solo se encuentran definidos con Elementos de borde de muro y Elementos centrales. Sus características son:

$$H_m = \text{Altura muro} = \begin{cases} (a) 12.5[m] = 5 \text{ pisos} \\ (b) 25[m] = 10 \text{ pisos} \\ (c) 37.5[m] = 15 \text{ pisos} \end{cases}$$

$$L_m = \text{Largo muro} = 5[m]$$

$$RA = \begin{cases} (a) 2.5 \\ (b) 5 \\ (c) 7.5 \end{cases}$$



**Figura 3.8: Relaciones de aspecto muros.**

Luego, a dichas configuraciones se les realizaron diferentes aberturas de dimensiones  $H_a$  y  $L_a$  (Tabla 3.1), y por lo tanto se incorporaron al modelo los Elementos de borde de abertura dando como resultando cada uno de los casos que se detallan en la Figura 3.9, lo Casos C1 corresponden a aberturas de un piso, los Casos C2 corresponden a aberturas de 2 pisos y los casos

C3 corresponden a aberturas de 3 pisos. Los porcentajes de cada caso corresponden al ancho de la abertura con respecto al ancho del muro.

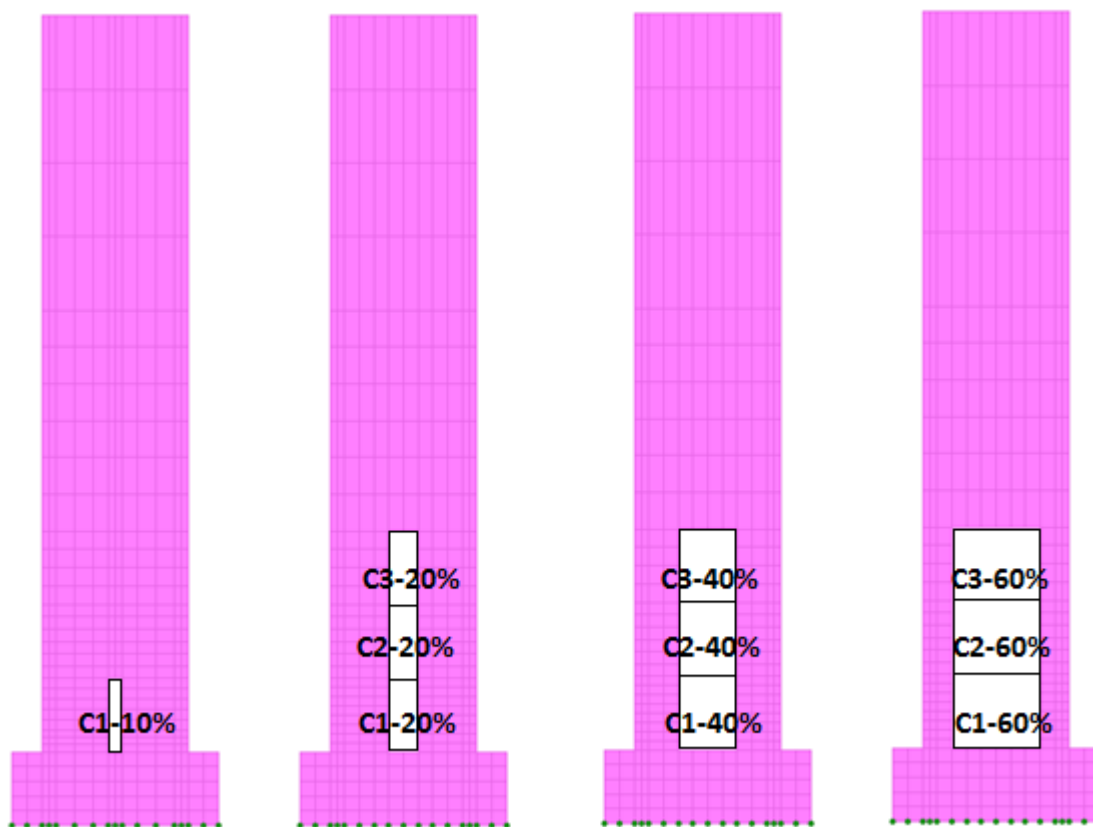


Figura 3.9: Aberturas realizadas.

Tabla 3.1: Dimensiones de las aberturas.

Caso	$H_a[m]$	$L_a[m]$	$\acute{A}REA_a[m^2]$
C1_10%	2,5	0,5	1,25
C1_20%	2,5	1	2,5
C1_40%	2,5	2	5
C1_60%	2,5	3	7,5
C2_20%	5	1	5
C2_40%	5	2	10
C2_60%	5	3	15
C3_20%	7,5	1	7,5
C3_40%	7,5	2	15
C3_60%	7,5	3	22,5

Una vez detallado cada uno de los casos se definen los ejes longitudinales de los muros. Para el caso base tendremos 2 ejes longitudinales, uno en cada borde de muro tal como aparece en la Figura 3.10, mientras que para los casos con aberturas tendremos 4 ejes longitudinales, 2 ubicados en los bordes del muro y 2 ubicados en los bordes de la abertura como se muestra en la Figura 3.11.

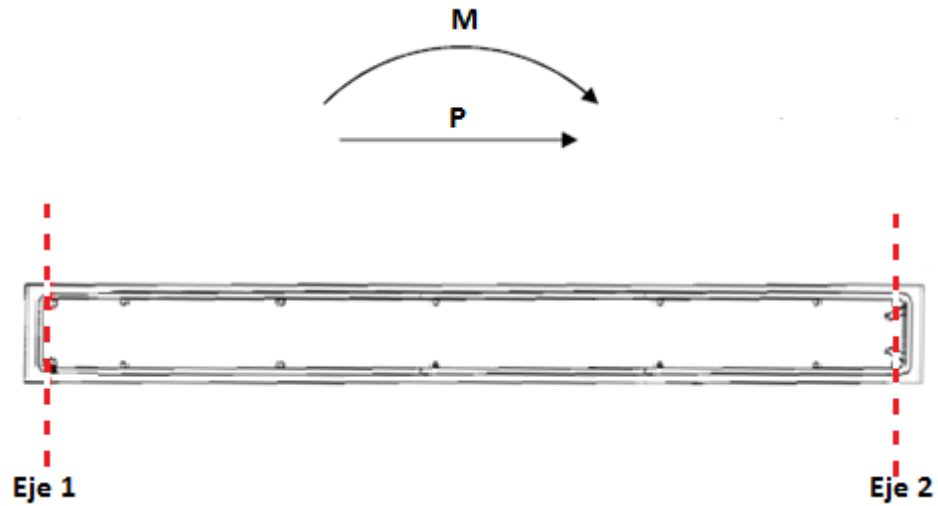


Figura 3.10: Representación ejes longitudinales muro sin aberturas.

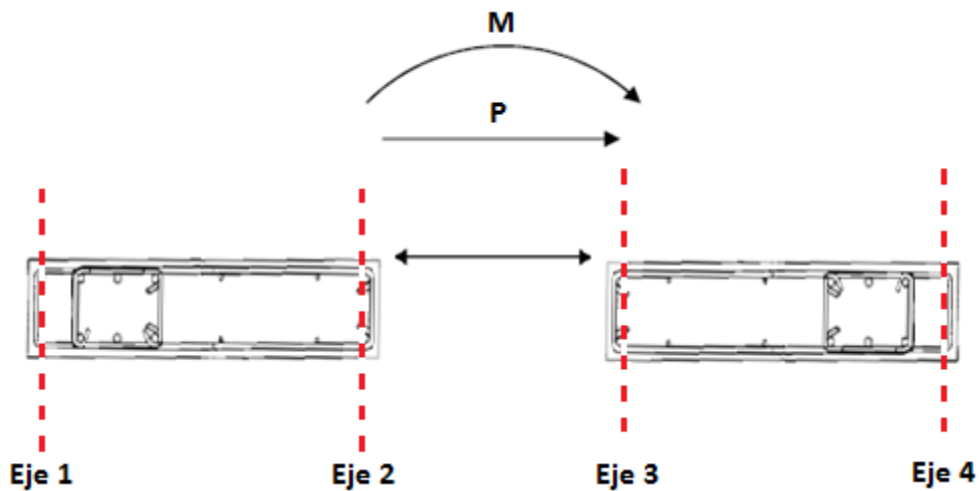


Figura 3.11: Representación ejes longitudinales muro con aberturas.

### 3.3.2 Características Modelos utilizados

En la Figura 3.12 se aprecian los modelos mencionados anteriormente y a continuación se realiza la descripción de cada uno de ellos:

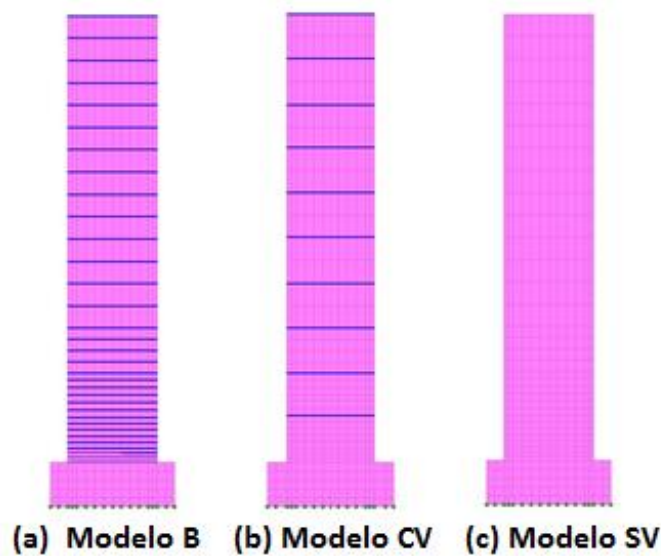


Figura 3.12: Modelos realizados.

Modelo B: Este modelo corresponde a un muro esbelto de hormigón armado, al cual se le incorporan, vigas rígidas en cada capa de elementos, esto se realiza para generar un modelo de flexión, forzando así la hipótesis de Bernoulli en que las secciones planas permanecen planas. Es por esto que cada vez que se utilice este modelo aparecerá la letra B, asociada a Bernoulli. Se debe considerar que al momento de incluir la abertura en el modelo, las vigas no cruzan de un extremo al otro del muro.

Las características de las vigas son:

*Material = Hormigón Elástico.*

$h = 200[mm]$  = Altura viga.

$b = 300[mm]$  = *Espesor del muro.*

$E = 10^7[Mpa]$ .

Modelo CV: Este modelo corresponde a un muro esbelto de hormigón armado, al cual también se le incorporan vigas rígidas, pero esta vez piso a piso. Las vigas tienen las características mencionadas anteriormente y están ubicadas cada 2.5 [m]. Cada vez que se utilice este modelo aparecerán las letras CV, asociadas a modelos con vigas. Este modelo se realiza con el fin de simular las losas piso a piso.

Modelo SV: Este modelo corresponde a un muro esbelto de hormigón armado sin vigas rígidas, esto se realiza para generar un modelo que incluya los efectos de flexión + corte. Cada vez que se utilice este modelo aparecerán las letras SV, asociadas a modelos sin vigas.

## 4 Resultados y recomendaciones para muros con abertura.

En un comienzo, sólo se realizó el análisis de once muros, 10 con diferentes aberturas y 1 sin abertura, correspondiente al caso base. Todos de 10 pisos y con una relación de aspecto RA=5.

### 4.1 Rótula plástica a lo largo del muro.

Debido a que esta investigación tiene su inicio con el trabajo de título de Ahumada (2014), se decidió analizar los casos: C1\_20% – C1\_40% – C2\_20% – C2\_40% con cuantía de armadura longitudinal de borde de abertura  $\rho_{lb} = 2.5\%$ . En dicho trabajo se tiene que al reforzar el borde de la abertura hasta el piso 3, se produce una rótula plástica en la sección crítica (cambio de armadura, Figura 4.1), pero si luego el refuerzo se prolongaba hasta el piso 9, la rótula plástica que se producía en la sección crítica desaparecía, Figura 4.2.

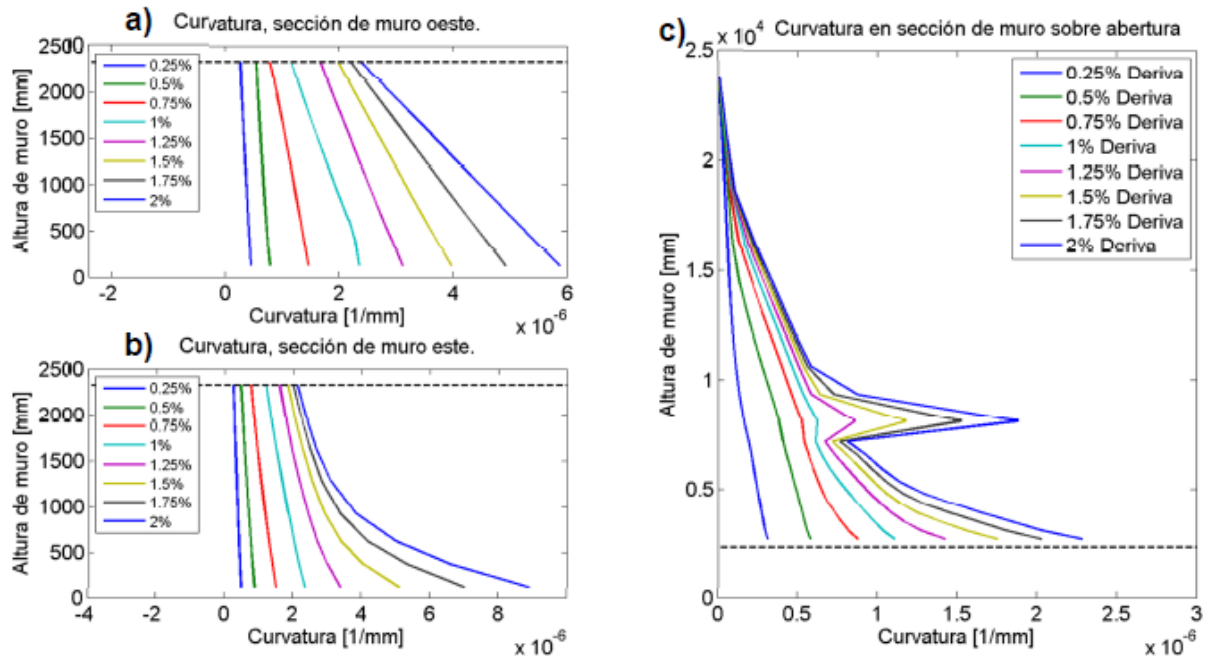
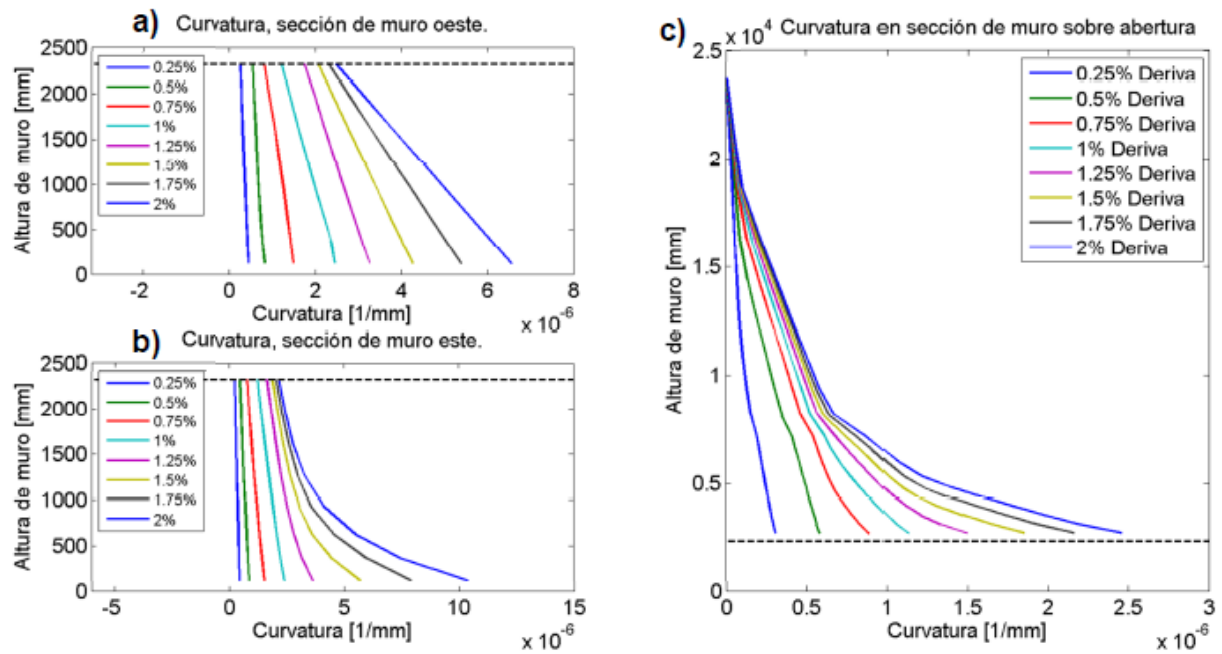


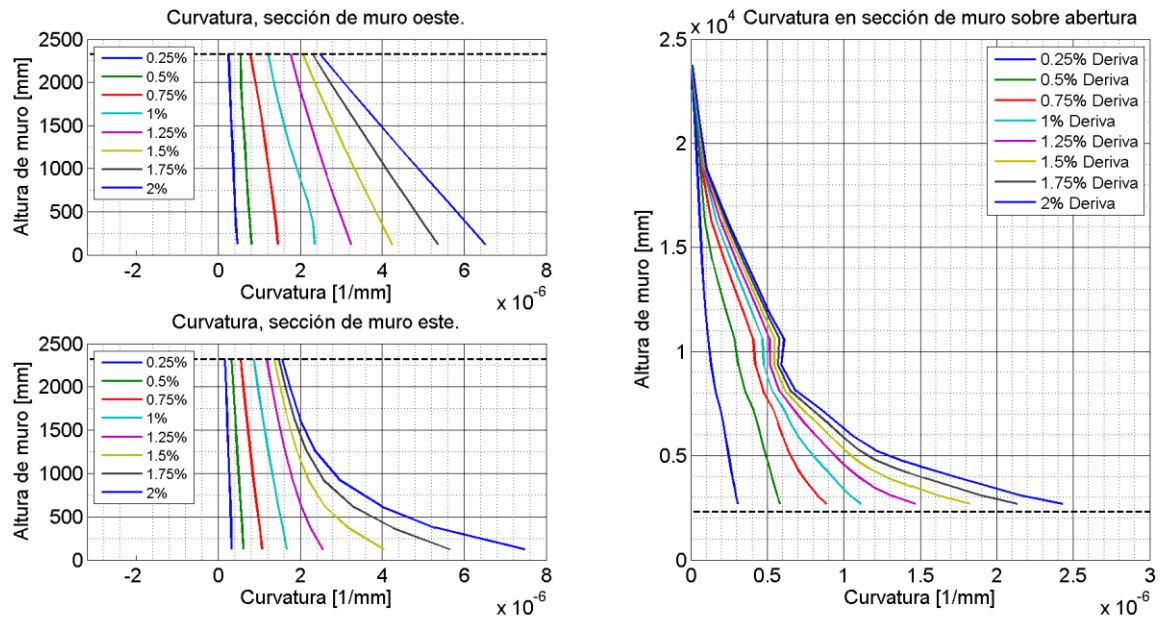
Figura 4.1: Rótula plástica sobre abertura, con refuerzo de borde hasta el piso 3.



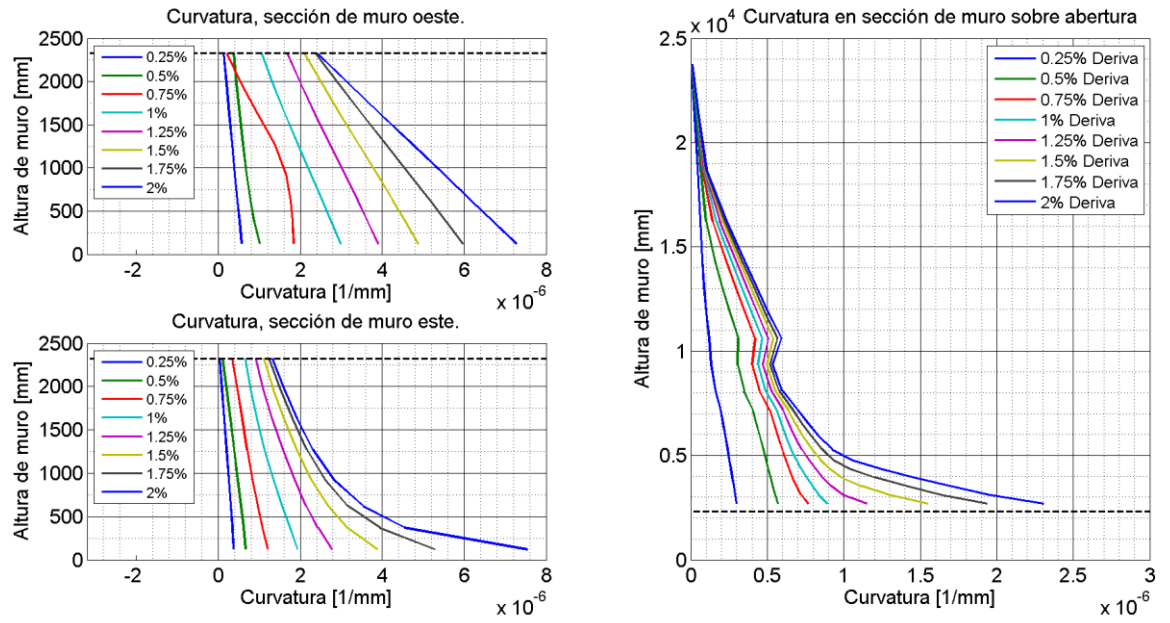
**Figura 4.2: Curvatura sobre abertura, con refuerzo de borde hasta el piso 9.**

Llegar hasta el piso 9 con el refuerzo longitudinal de borde está lejos de ser una solución real del problema, puesto que tanto la cuantía como la longitud del refuerzo son demasiado conservadoras e inviables económicamente. Primero se buscó una longitud de refuerzo que disminuyera considerablemente la rótula plástica que se formaba, llegando a la conclusión que bastaba con prolongar el refuerzo longitudinal de borde de la abertura hasta el piso 4 para que la rótula desapareciera completamente.

Desde la Figura 4.3 hasta la Figura 4.6 se presentan los resultados de curvatura para cada uno de los casos analizados. Se puede apreciar claramente que la rótula plástica que se producía sobre la abertura, específicamente donde se ubicaba el cambio de refuerzo, desaparece:



**Figura 4.3: Curvatura muro C1\_20%, RA=5.**



**Figura 4.4: Curvatura muro C1\_40%, RA=5.**



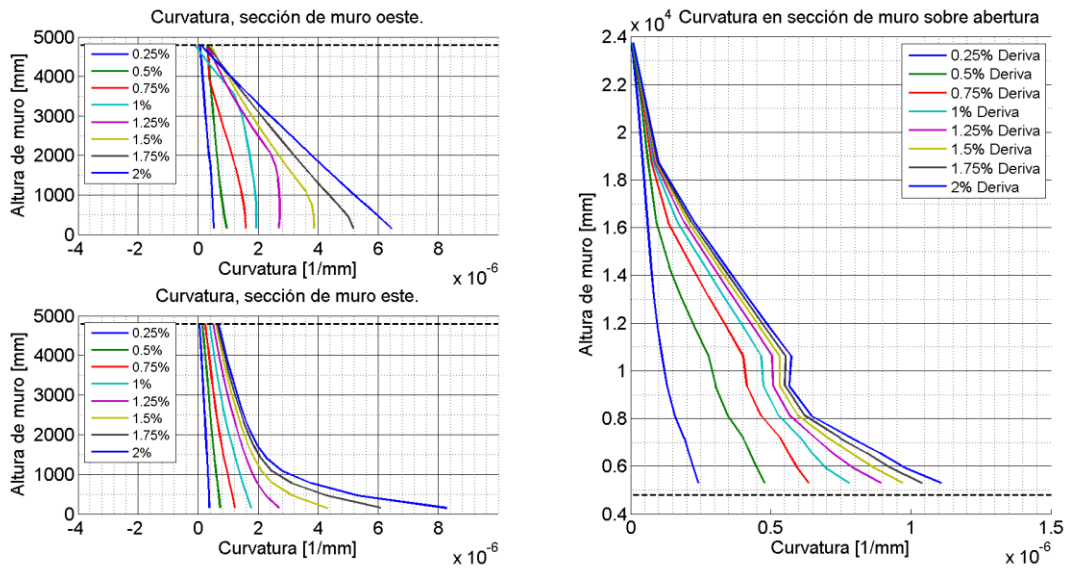


Figura 4.5: Curvatura muro C2\_20%, RA=5.

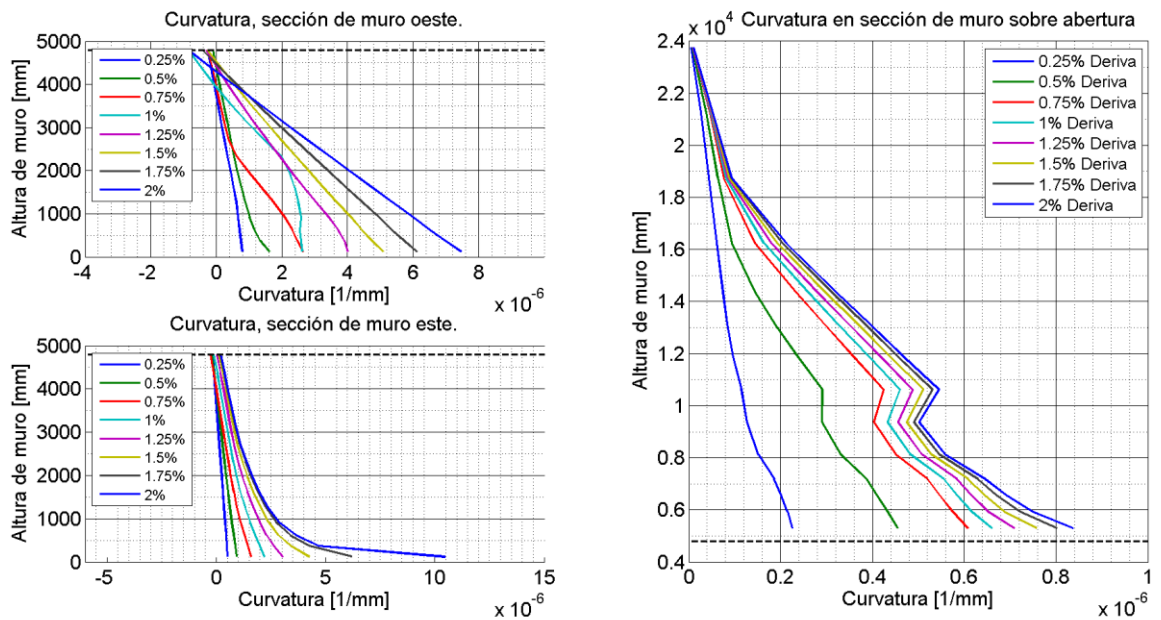


Figura 4.6: Curvatura muro C2\_40%, RA=5.

Se debe recordar que la curvatura se calculó como la diferencia entre las deformaciones de los extremos del muro dividido por la distancia que los separa:

$$\phi = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{L_m}$$

Ecuación 4.1

Luego se buscó una cuantía longitudinal de borde de abertura que se acercara a la realidad constructiva de nuestro país, por lo que se decidió reducir el 2.5% a la octava parte, 0.3125%. Este valor sigue siendo superior a lo que se utiliza en el día a día, pero se acerca bastante, por lo que nos permite hablar de una cuantía fuerte para los bordes del muro y una cuantía débil para los bordes de la abertura. Además, con dicha cuantía tampoco se produce la rótula plástica a lo alto del muro (Anexo A- 4 y Anexo A- 5).

Cabe mencionar que estos 4 casos fueron analizados con el Modelo B con el fin de obtener resultados consistentes con la investigación anterior.

#### 4.2 Deformaciones Verticales unitarias Caso Base.

Al analizar el caso base, correspondiente a un Muro sin abertura, aplicando los 3 modelos realizados (Figura 3.12), se obtienen interesantes resultados de las deformaciones máximas de tracción y compresión. Ambas deformaciones máximas se obtienen a nivel basal, en los elementos 1 de sus respectivos ejes, Figura 3.10.

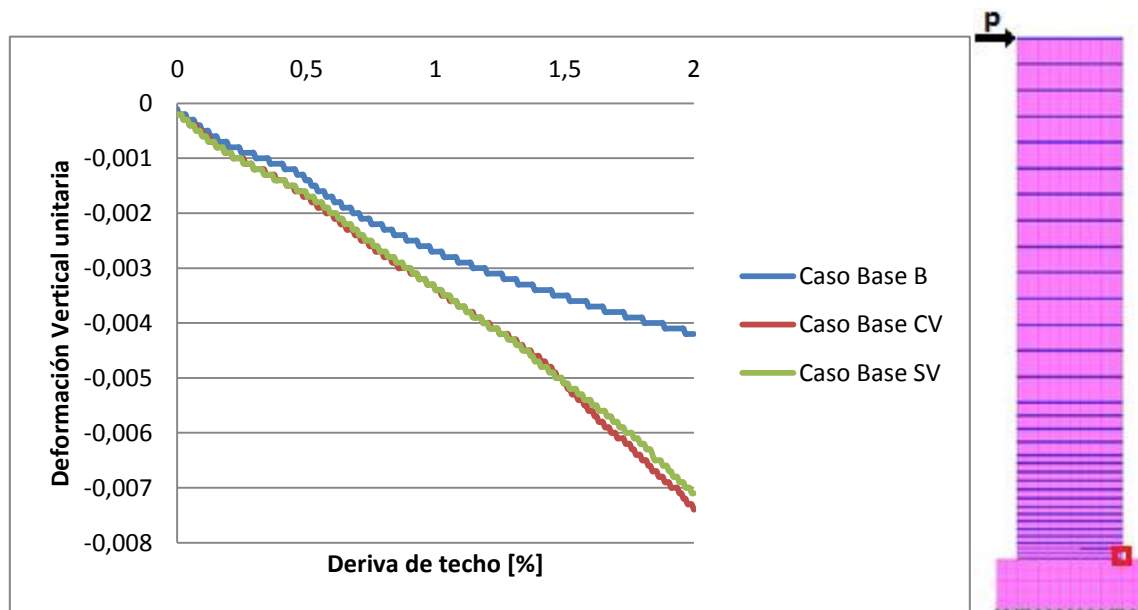


Figura 4.7: Deformaciones máximas por compresión caso base RA=5.

En la Figura 4.7 se aprecia que al aplicar el Modelo B al caso base, las deformaciones máximas de compresión son las menores, distanciándose un 69% del Modelo SV y un 76% del Modelo CV para una deriva de techo de 2%. Esto nos indica que el efecto del corte en muros continuos desde la base es importante y además que la incorporación de las vigas piso a piso no afecta el comportamiento de las máximas deformaciones por compresión.

En la Figura 4.8 se aprecia que al aplicar el Modelo B al caso base, las deformaciones máximas de tracción son las mayores, distanciándose un 17% del Modelo CV y un 27% del Modelo SV para una deriva de techo de 2%.

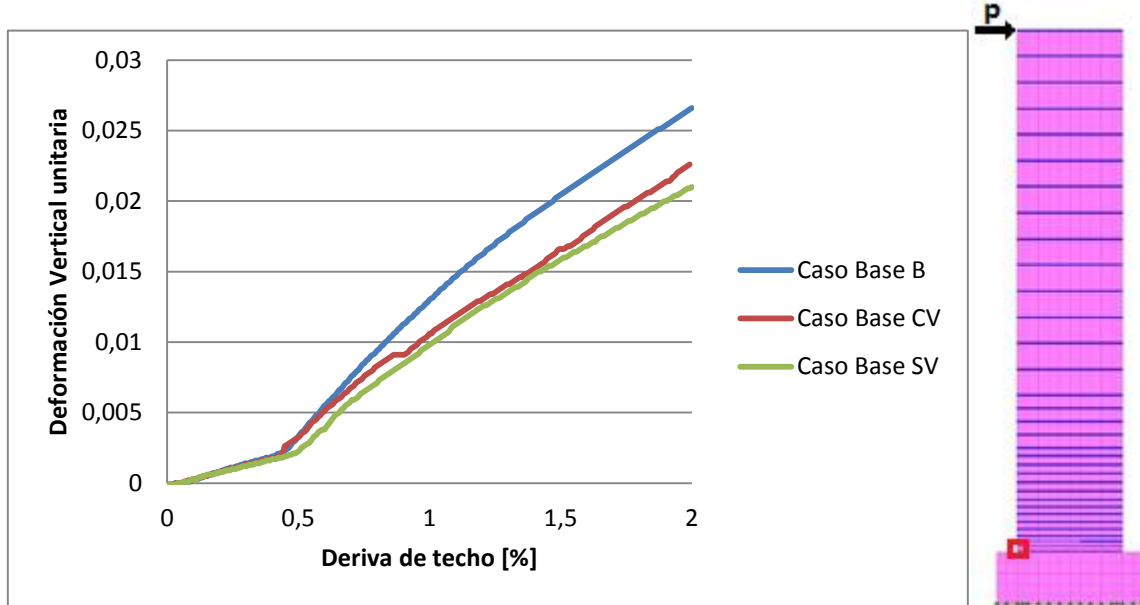
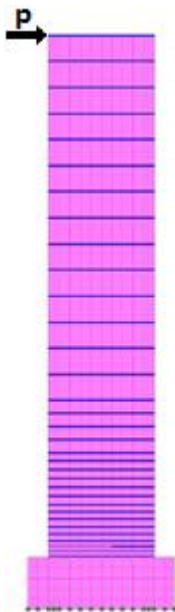
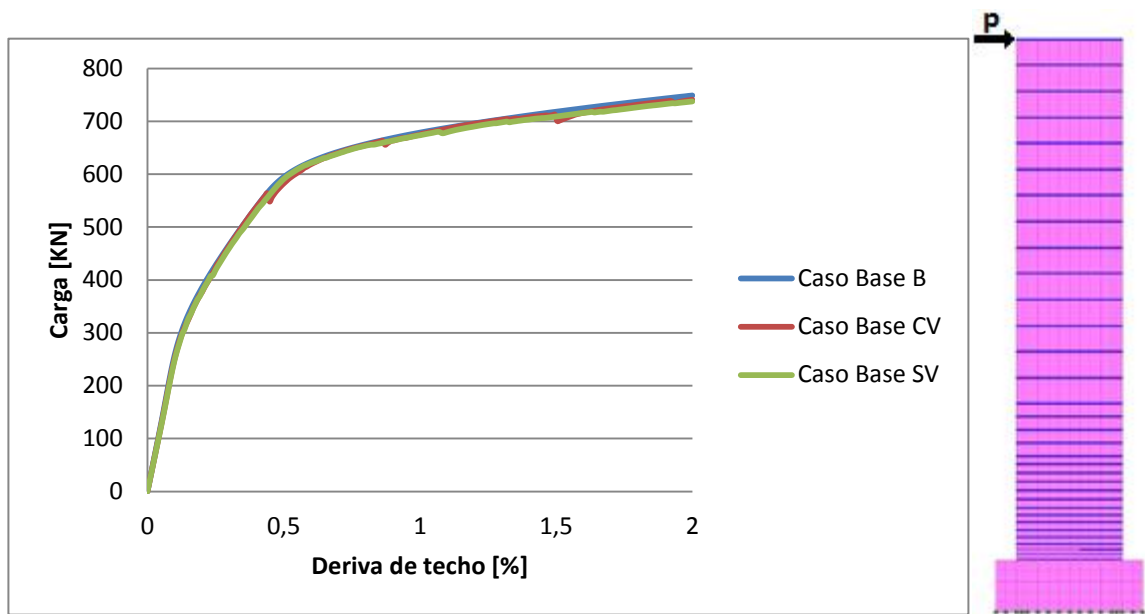


Figura 4.8: Deformación máxima por tracción caso base para los diferentes modelos, RA=5.



En cuanto a la

Figura 4.9, se aprecia que al aplicar los 3 Modelos al caso base, todos toman prácticamente la misma carga, por lo tanto la incorporación de las vigas no afecta la resistencia de los muros sin abertura.



**Figura 4.9: Carga-Desplazamiento Caso base para los diferentes modelos, RA=5.**

### 4.3 Perfil de deformaciones a nivel basal.

Se realiza el Perfil de deformaciones basales en la primera capa de elementos de cada muro para diferentes derivas de techo, con el fin de cuantificar el impacto que genera incorporar la abertura en el muro e ir aumentando su tamaño. Dada la gran cantidad de casos se mostraran los resultados obtenidos para el caso base, y para los casos C1\_10%, C1\_40%, C2\_40%, C2\_60% del muro con relación de aspecto RA=5.

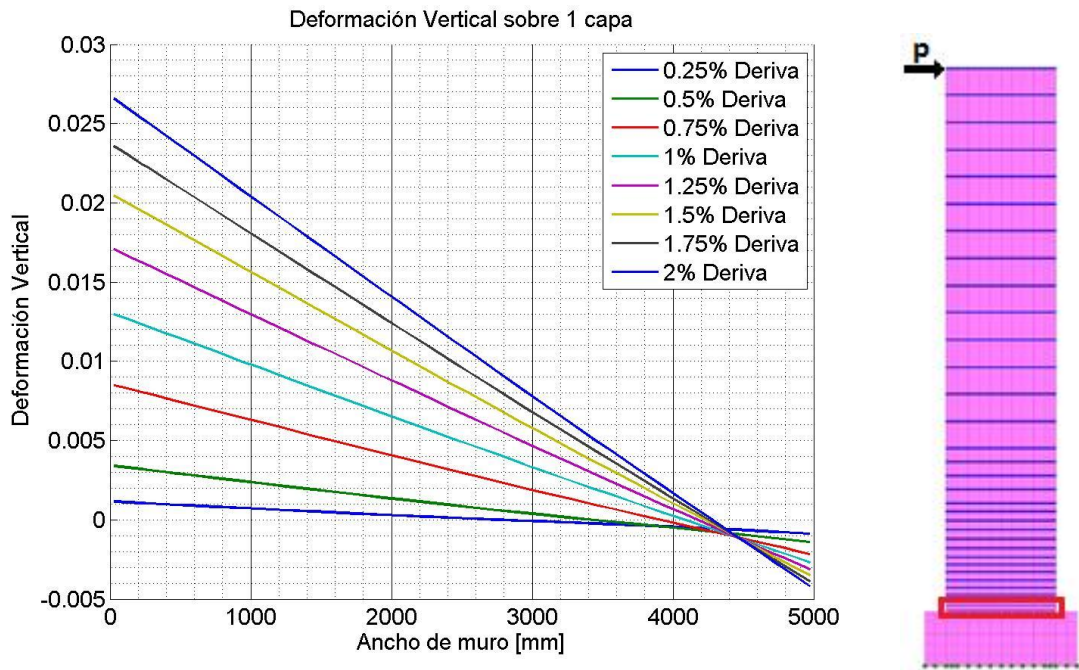


Figura 4.10: Deformación Vertical sobre una capa Muro sin abertura con Modelo B, RA=5.

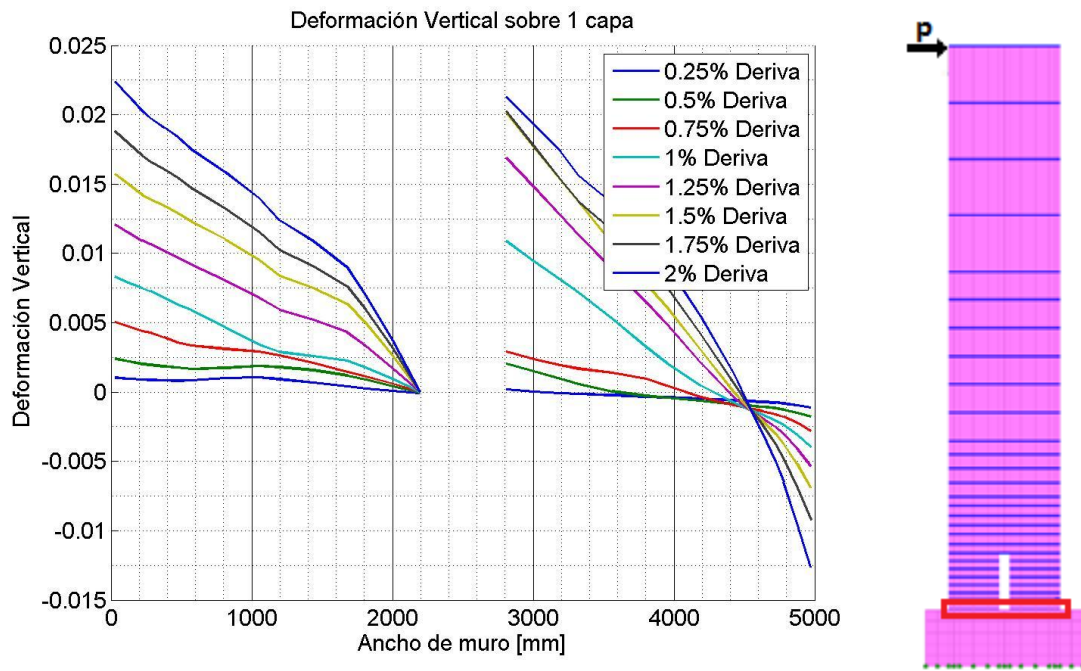


Figura 4.11: Deformación Vertical sobre una capa Caso C1\_10%, RA=5.

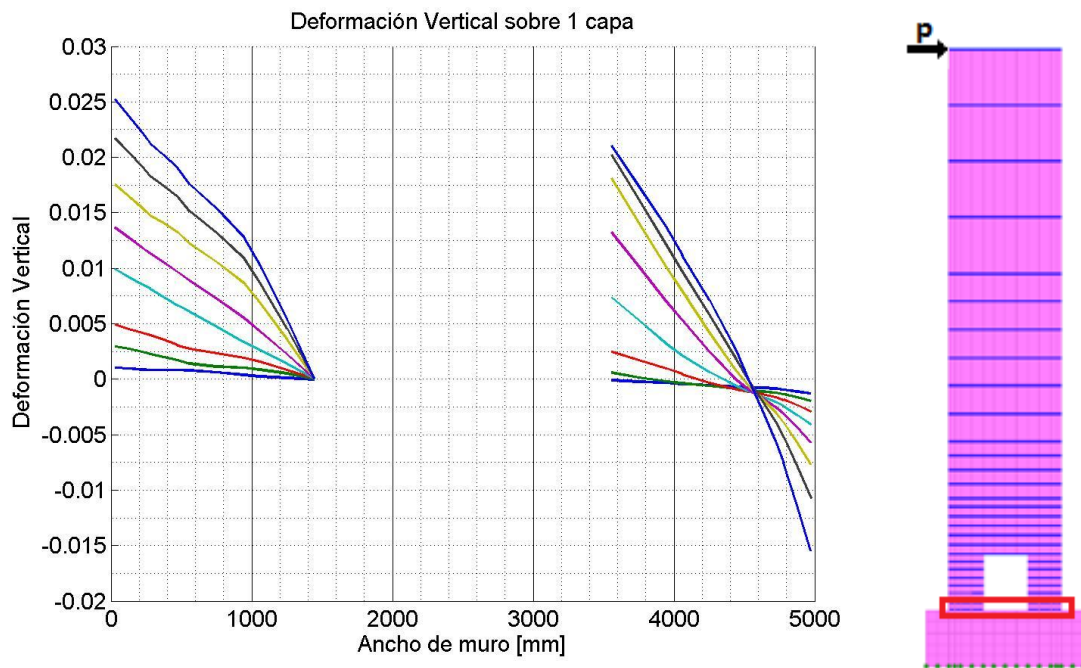


Figura 4.12: Deformación Vertical sobre una capa Caso C1\_40%, RA=5.

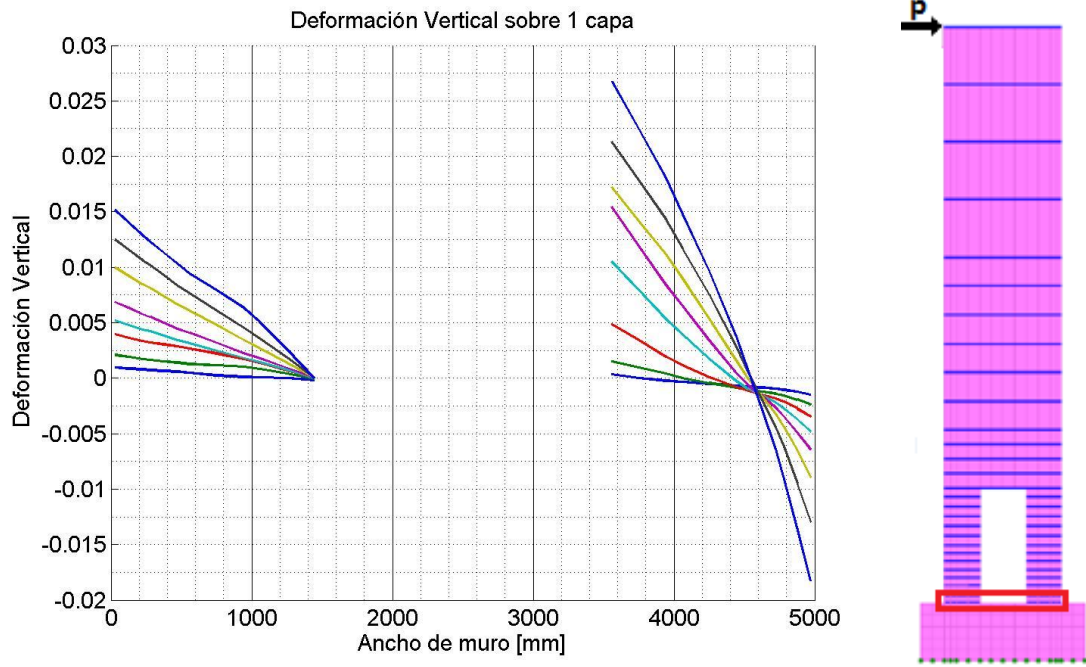


Figura 4.13: Deformación Vertical sobre una capa Caso C2\_40%, RA=5.

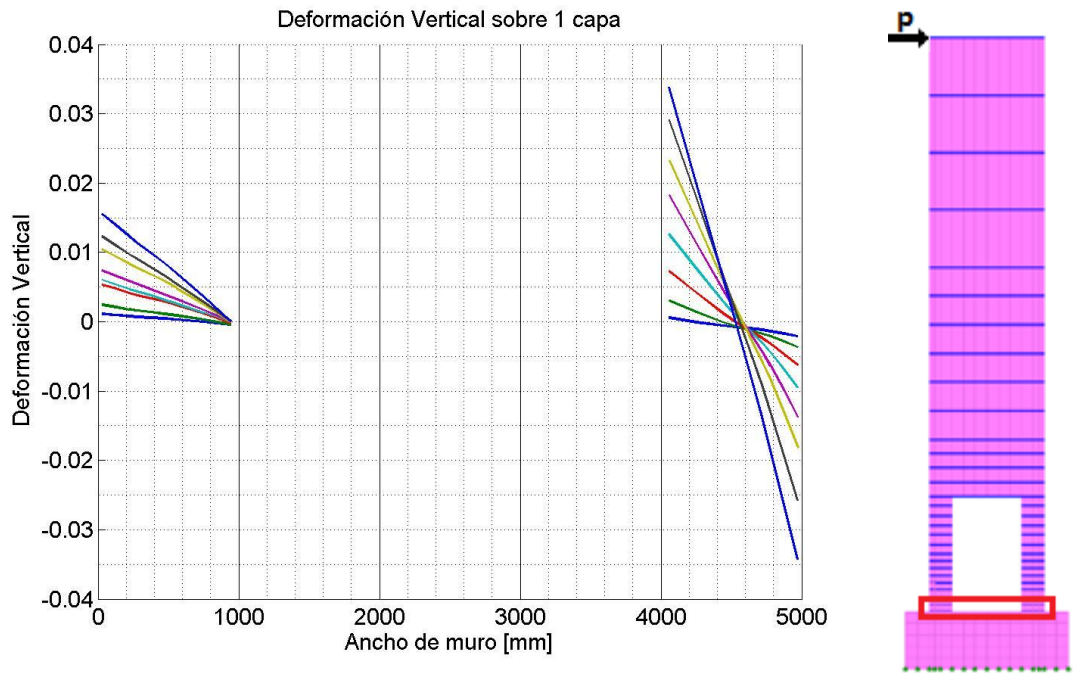


Figura 4.14: Deformación Vertical sobre una capa Caso C2\_60%, RA=5.

En la Figura 4.11, Figura 4.12, Figura 4.13 y Figura 4.14 se logra apreciar en forma general que al agregar la abertura e ir aumentando su tamaño, las deformaciones máximas por compresión van aumentando a medida que crece la abertura, mientras que las deformaciones máximas por tracción tienden a aumentar en la base del eje 1 para aberturas de 1 piso y cambian de ubicación para aberturas de 2 o más pisos, ubicándose en base del eje 3. Es posible realizar un análisis detallado de las deformaciones máximas por compresión, puesto que estas siempre se ubican en el mismo lugar, elemento 1 del Eje 4, mientras que para las deformaciones por tracción la ubicación de la deformación máxima cambia a medida que aumenta la deriva de techo y el tamaño de la abertura (Revisar casos desde Anexo A- 7 hasta Anexo A- 16).

Luego se estudiaron cada uno de los casos para muros con tres relaciones de aspecto diferentes, el primer muro corresponde a un muro de 5 pisos por lo que su relación de aspecto es de 2.5, el segundo muro tiene 10 pisos y su relación de aspecto es 5 y el último muro es de 15 pisos con una relación de aspecto de 7.5 tal como se muestra en la Figura 3.8. Se obtuvieron las deformaciones de estos 3 muros aplicando cada uno de los modelos en cada uno de los casos.



#### 4.4 Efecto de la abertura en el Modelo B para diferentes relaciones de aspecto.

Una vez establecida la cuantía y longitud de armadura longitudinal de borde de las aberturas, se analizaron todos los casos utilizando el Modelo B, muros con vigas en todos los elementos para forzar la hipótesis de Bernoulli.

##### 4.4.1 Análisis de respuesta global: Carga versus Deformación.

En la Figura 4.15 se logra apreciar que para muros cortos, en este caso un muro de 5 pisos, se tiene que la resistencia disminuye considerablemente al incorporar aberturas grandes como C2\_60%, C3\_40% y C3\_60%.

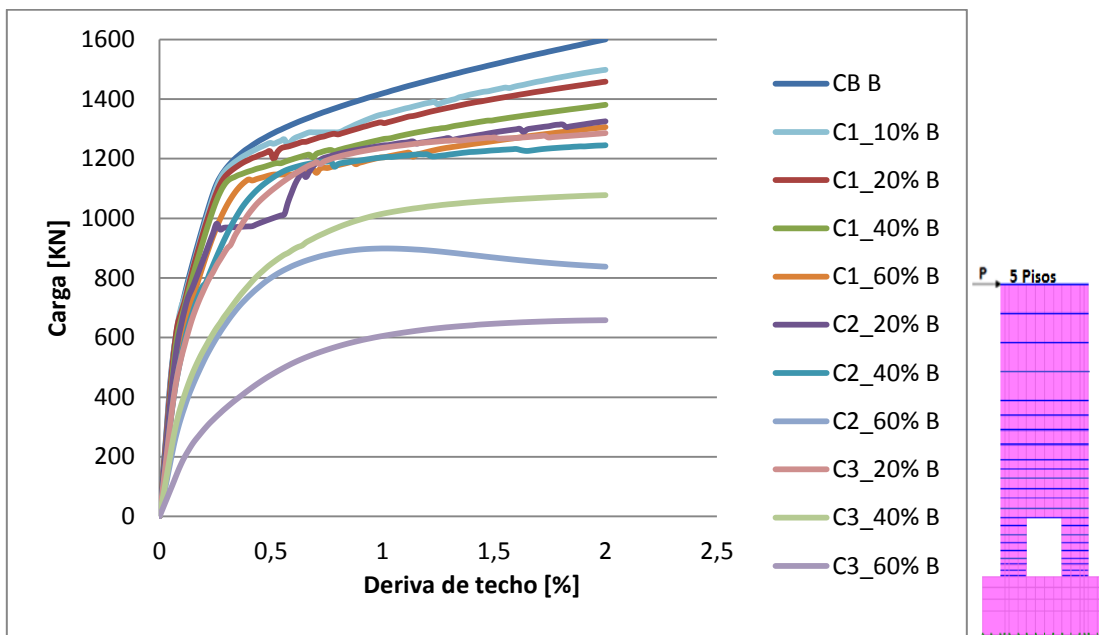


Figura 4.15: Carga-Desplazamiento Casos Modelo B, RA=2.5.

En la Figura 4.16 se aprecia que para muros con relación de aspecto RA=5 las resistencias de cada uno de los casos disminuyen prácticamente un 50% en comparación con los muros de relación de aspecto RA=2.5. Esto se debe a que mientras más pequeño sea el muro, más rígido será, por el contrario mientras más alto sea el muro, más flexible será, por lo tanto en un caso es necesario aplicar mayor carga para llegar a la misma deriva de techo (Muro de 5 pisos) y en otro caso se necesitará menos carga (Muro de 15 pisos).

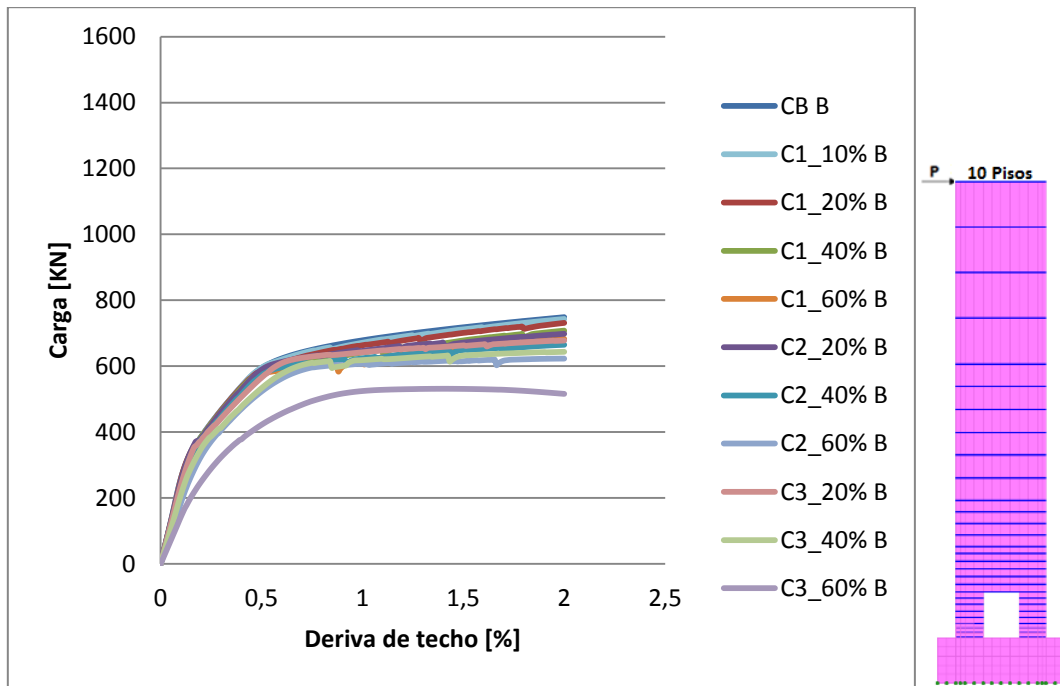


Figura 4.16: Carga-Desplazamiento Casos Modelo B, RA=5.

En la Figura 4.17 se aprecia que la resistencia de los muros disminuye hasta un 70% en comparación con los muros de relación de aspecto RA=2.5.

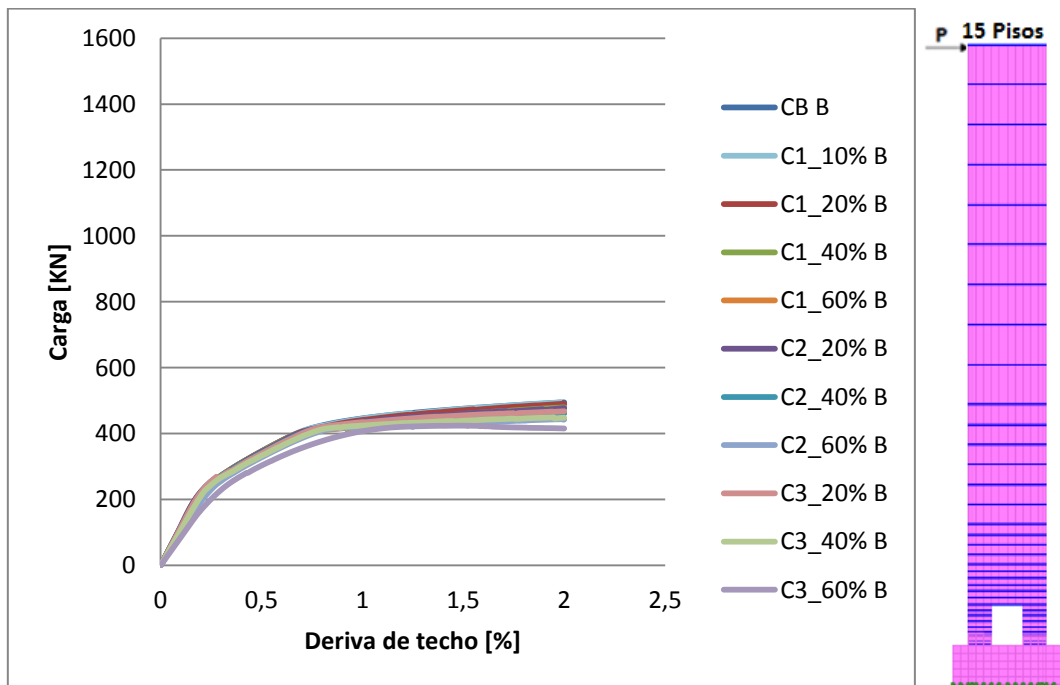


Figura 4.17: Carga-Desplazamiento Casos Modelo B, RA=7.5.

En general se aprecia que al incorporar la abertura utilizando el modelo B en un muro, independiente de su relación de aspecto, la resistencia de los muros disminuye a medida que aumentamos el área de la abertura. Esto se puede apreciar en la Tabla 4.1, Tabla 4.2 y Tabla 4.3, donde se muestran los valores correspondientes a la variación porcentual promedio de la carga para todo el rango de deriva de techo en cada uno de los casos con respecto al caso base.

**Tabla 4.1: Variación porcentual muros con abertura versus caso base, Modelo B y RA=2.5.**

Casos	10%	20%	40%	60%
C3		20,6[%]	51,4[%]	165,8[%]
C2		17,6[%]	21,7[%]	73,7[%]
C1	4,6[%]	6,6[%]	11,5[%]	18,5[%]



**Tabla 4.2: Variación porcentual muros con abertura versus caso base, Modelo B y RA=5.**

Casos	10%	20%	40%	60%
C3		6,4[%]	12,5[%]	40,0[%]
C2		4,4[%]	8,4[%]	16,4[%]
C1	0,7[%]	2,0[%]	4,8[%]	8,7[%]



**Tabla 4.3: Variación porcentual muros con abertura versus caso base, Modelo B y RA=7.5.**

Casos	10%	20%	40%	60%
C3		3,2[%]	6,4[%]	16,1[%]
C2		2,2[%]	4,7[%]	9,3[%]
C1	0,3[%]	0,9[%]	2,7[%]	5,9[%]



## 4.4.2 Análisis de respuesta local: Deformaciones unitarias Verticales.

### 4.4.2.1 Deformaciones por Compresión.

Teniendo las deformaciones verticales en todo el muro, se ubican las deformaciones máximas en la zona comprimida de cada uno de los casos.

Las deformaciones verticales en la zona comprimida siempre permanecen en el primer elemento del eje 4, por lo que su comportamiento se hace fácil de estudiar, en la Figura 4.18 se presenta un grafico con los resultados obtenidos para cada uno de los casos utilizando el modelo B e un muro con relación de aspecto RA=2.5, en él se aprecia que las deformaciones se amplifican con respecto al caso base en un rango que va desde un 270% hasta un 633%.

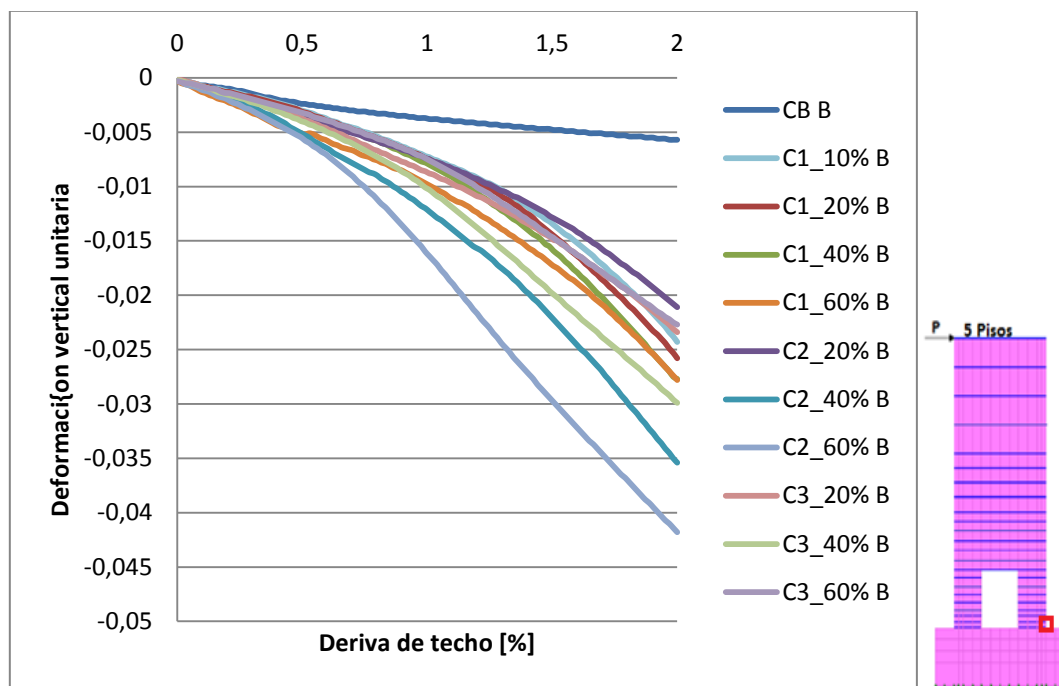
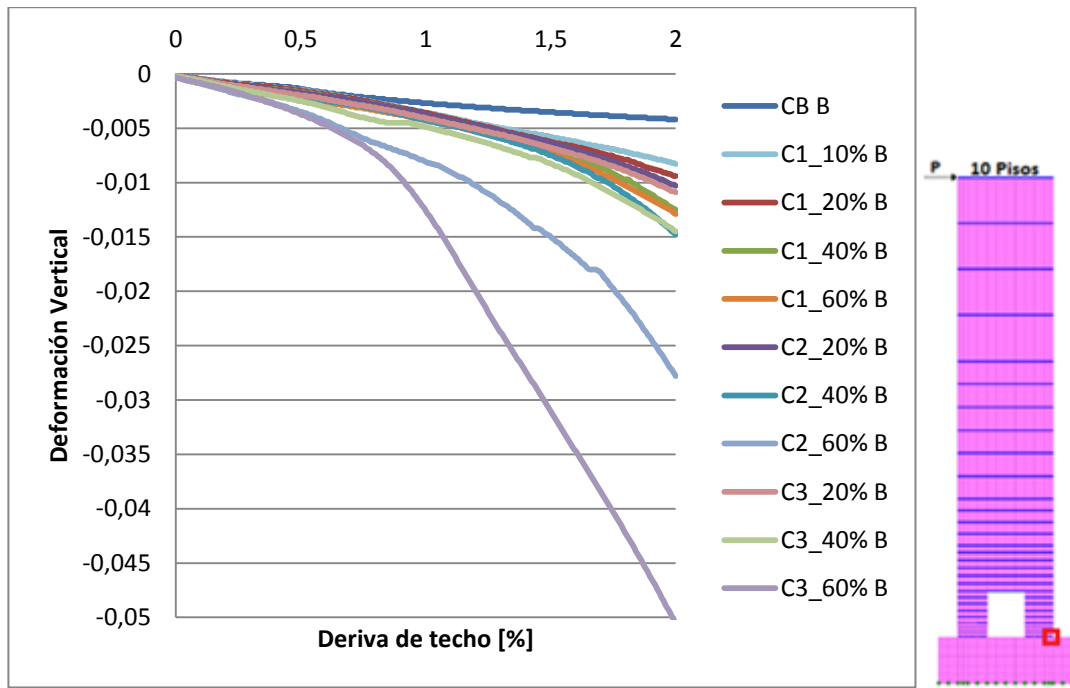


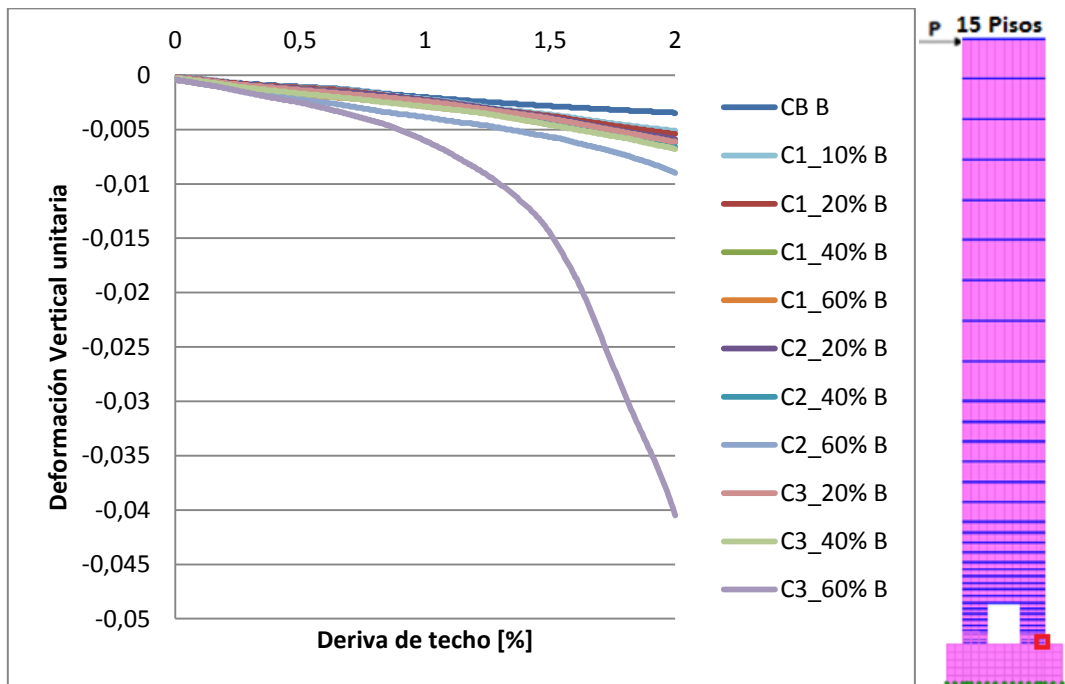
Figura 4.18: Deformaciones máximas por compresión Casos Modelo B, RA=2.5.

En la Figura 4.19 se aprecia que para derivas de techo de 2% en muros con relación de aspecto RA=5, las deformaciones verticales máximas en la zona de compresión se amplifican con respecto al caso base en un rango que va desde 98% para el caso C1\_10% correspondiente a la abertura más pequeña hasta un 1105% para el caso C3\_60% correspondiente a la abertura más grande.



**Figura 4.19: Deformaciones máximas por compresión Casos Modelo B, RA=5.**

En la Figura 4.20 se aprecia que para derivas de techo de 2% en muros con relación de aspecto RA=7.5, las deformaciones verticales máximas en la zona de compresión se amplifican con respecto a las deformaciones máximas del caso base en un rango que va desde 46% para el caso C1\_10% correspondiente a la abertura más pequeña hasta un 1057% para el caso C3\_60% correspondiente a la abertura más grande.



**Figura 4.20: Deformaciones máximas por compresión Casos Modelo B, RA=7.5.**

#### 4.5 Efecto de la abertura en el Modelo CV para diferentes relaciones de aspecto.

Se analizan todos los casos utilizando el Modelo CV. De esta manera es posible analizar el comportamiento del muro simulando que las vigas ubicadas en todos los pisos actúan como losas. En la realidad, las losas no son infinitamente rígidas tal como se diseñaron las vigas, por lo que este modelo nos permite acotar el rango de deformaciones en el extremo inferior.

##### 4.5.1 Análisis de respuesta global: Carga versus Deformación.

En la Figura 4.21 se aprecia claramente que la resistencia de los muros con relación de aspecto  $RA=2.5$  va disminuyendo a medida que se va aumentando el tamaño de la abertura, pues el caso C1\_10% tiene su curva de carga-deformación prácticamente igual al caso base, teniendo una variación porcentual promedio de 2.15% para todo el rango de deriva de techo, mientras que el caso C3\_60% tiene la curva más baja, llegando a una variación porcentual promedio de 20%, en todo el rango de deriva de techo.

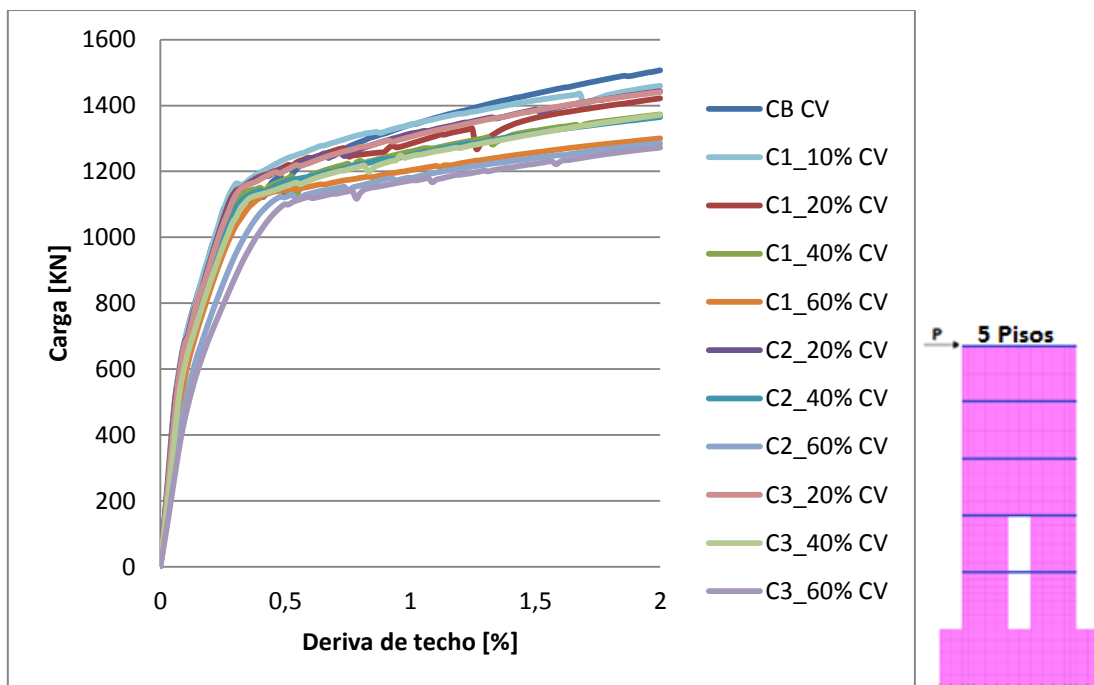
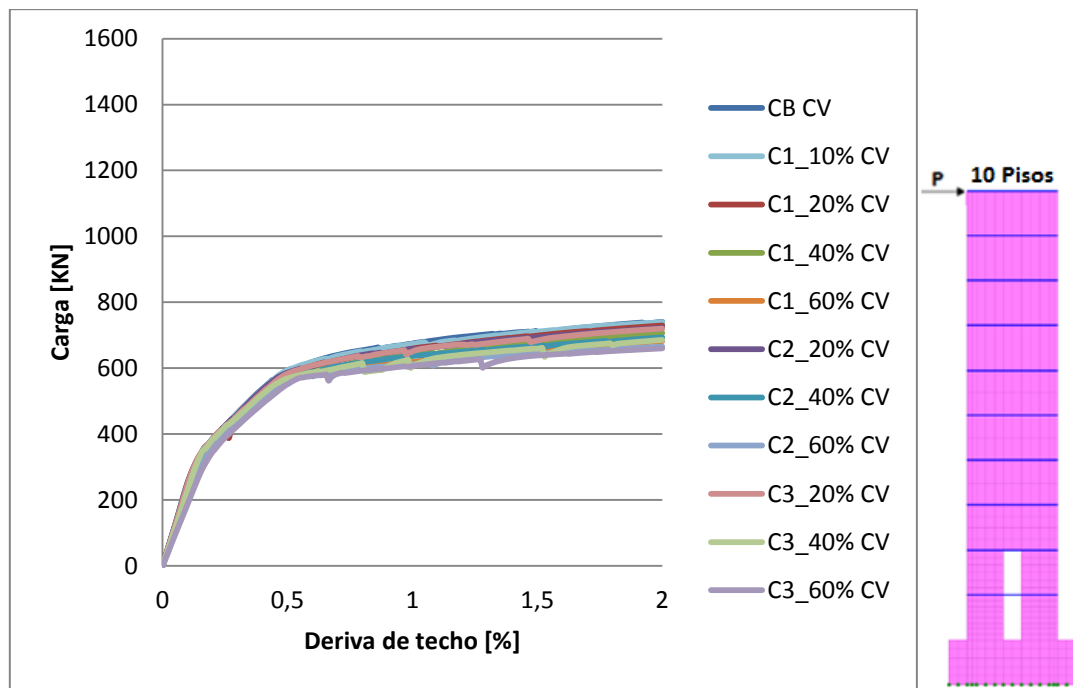


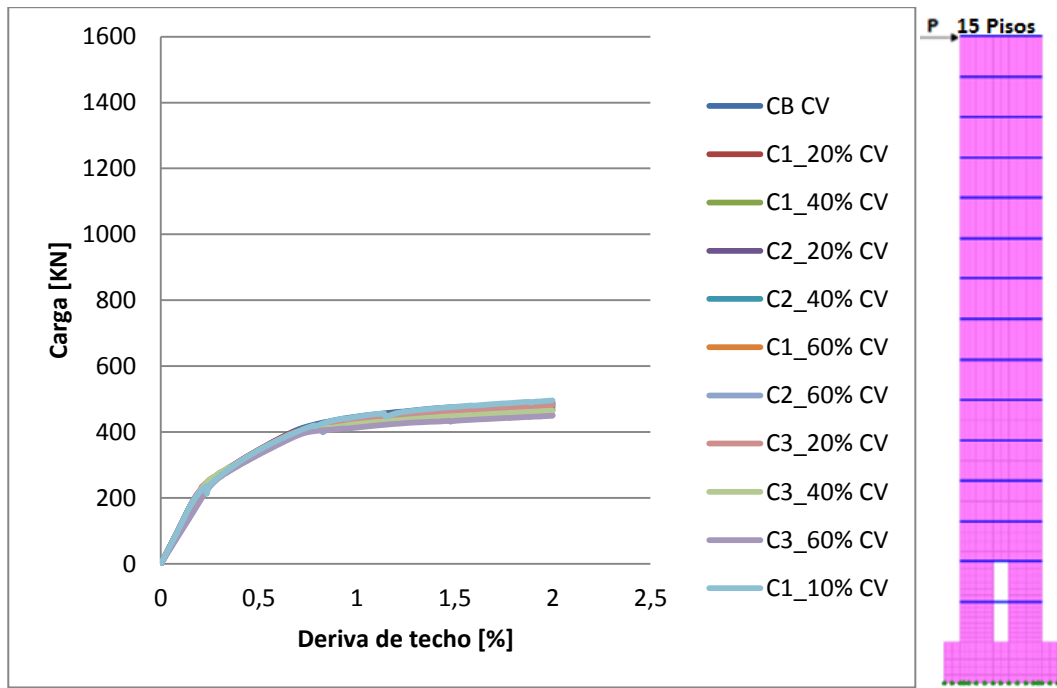
Figura 4.21: Carga-Desplazamiento Casos Modelo CV,  $RA=2.5$ .

En la Figura 4.22 se aprecia que las resistencias de los muros con relación de aspecto  $RA=5$  disminuyen hasta un 50% con respecto a los muros con relación de aspecto  $RA=2.5$ . Además se tiene que las resistencias disminuyen con respecto al caso base en un rango que va desde un 0.6% para el caso C1\_10% hasta un 12,2% para el caso C3\_60%, estos valores corresponden a la variación porcentual para todo el rango de deriva de techo.



**Figura 4.22: Carga-Desplazamiento Casos Modelo CV, RA=5.**

En la Figura 4.23 se aprecia que las resistencias de los muros con relación de aspecto RA=7.5 disminuyen hasta un 70% con respecto a los muros con relación de aspecto RA=2.5. Además se tiene que las resistencias disminuyen con respecto al caso base en un rango que va desde un 1% para el caso C1\_10% hasta un 8.1% para el caso C3\_60%, estos valores corresponden a la variación porcentual para todo el rango de deriva de techo.



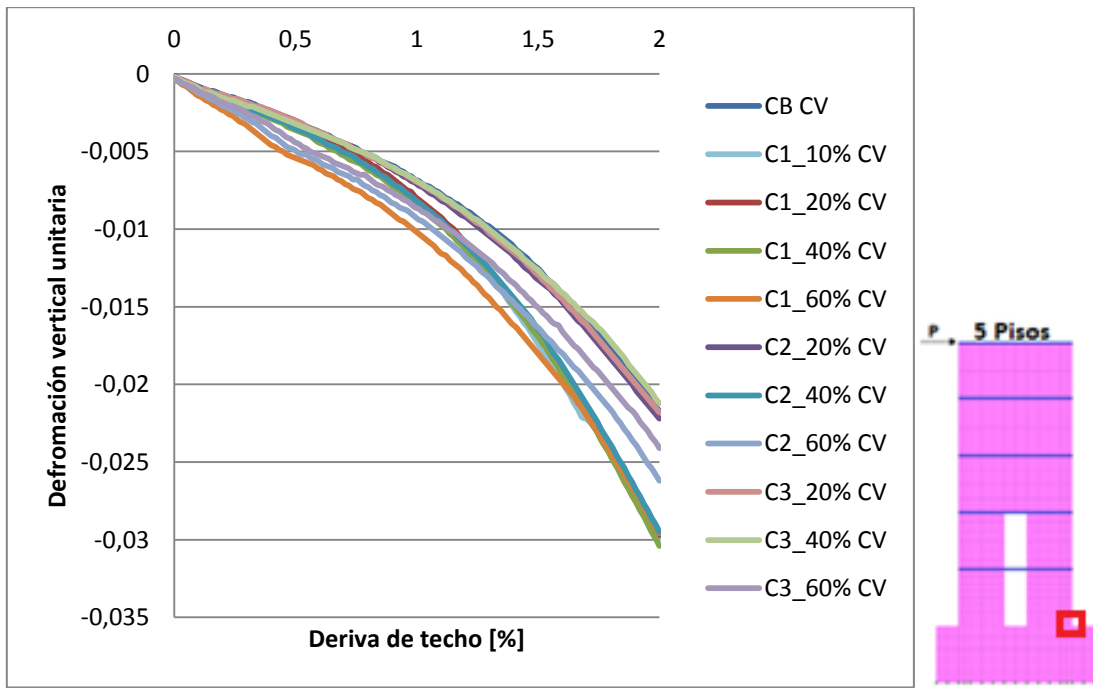
**Figura 4.23: Carga-Desplazamiento Casos Modelo CV, RA=7.5.**

## **4.5.2 Análisis de respuesta local: Deformaciones unitarias Verticales.**

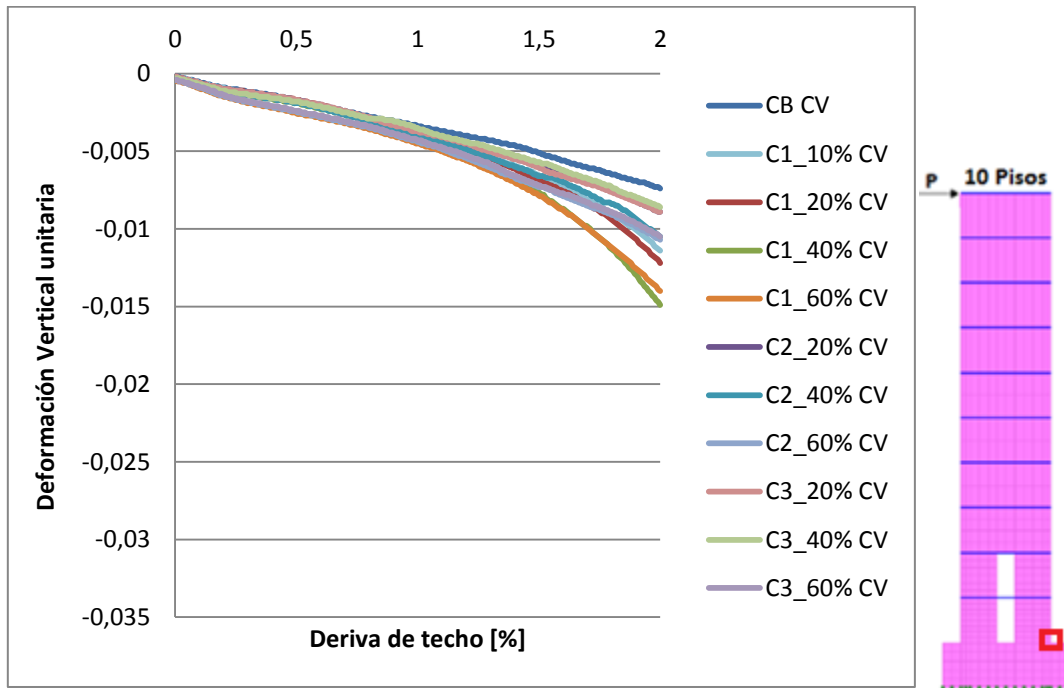
### **4.5.2.1 Deformaciones por Compresión.**

En la Figura 4.24, Figura 4.25 y Figura 4.26 se puede apreciar un comportamiento diferente a lo presentado anteriormente, esta vez las deformaciones verticales máximas por compresión se producen en las aberturas de un piso de altura. Esto se debe a que en éste modelo, las vigas que se encuentran piso a piso cruzan de un lado a otro cuando la abertura es de 2 o más pisos, esto hace que los muros ubicados a un costado de la abertura se acoplen, permitiendo que las deformaciones se concentren en el primer piso. Al analizar el Modelo CV en detalle, sucede algo interesante ya que las deformaciones a lo largo del muro, específicamente en el Eje 4 (Figura 3.11) tienen un comportamiento continuo para el Modelo B y para el Modelo SV mientras que para el Modelo CV se produce un efecto repetitivo piso a piso, Figura 4.27. Si bien los valores van disminuyendo a medida que aumenta la altura, se debe tener cuidado al momento de considerar solo la deformación máxima puesto que en el segundo piso también se podrían generar deformaciones importantes, sobretodo pensando en que las vigas usadas en el presente trabajo son un caso extremo que no representa la realidad de las losas usadas en el país. Esto nos lleva a pensar que al momento de diseñar los muros se deben considerar como parámetros la resistencia y rigidez que aporta la losa para generar un Modelo CV más cercano a la realidad.





**Figura 4.24: Deformaciones máximas por compresión Casos Modelo CV, RA=2.5.**



**Figura 4.25: Deformaciones máximas por compresión Casos Modelo CV, RA=5.**

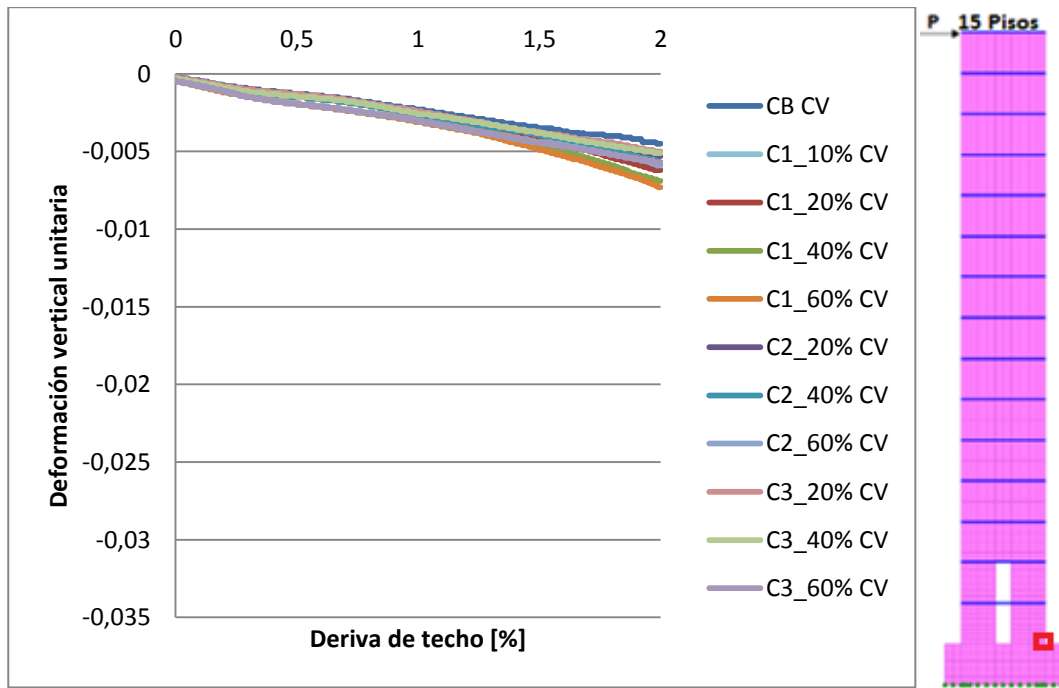


Figura 4.26: Deformaciones máximas por compresión Casos Modelo CV, RA=7.5.

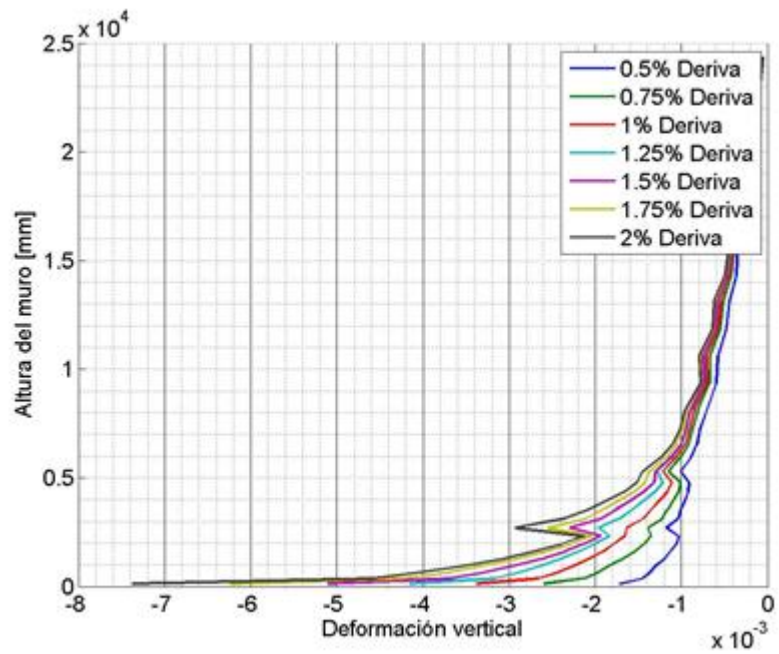


Figura 4.27: Deformación vertical Eje 2 modelo CV Caso base, RA=5.

#### 4.6 Efecto de la abertura en el Modelo SV para diferentes relaciones de aspecto.

En esta sección se analizan todos los casos aplicando el Modelo SV, muros sin vigas. Con el fin de incluir el efecto del corte en el análisis. Este es el modelo que más se acerca a la realidad y en comparación con los 2 modelos anteriores, se espera que en estos casos se tengan las mayores deformaciones por compresión.

##### 4.6.1 Análisis de respuesta global: Carga versus Deformación.

En la Figura 4.28 se aprecia que la resistencia de los muros disminuye a medida que aumenta el tamaño de la abertura pues para el caso C1\_10%, correspondiente a la abertura más pequeña, la variación porcentual promedio de la carga es de un 3.95% para todo el rango de deriva de techo, mientras que para el caso C3\_60%, correspondiente a la abertura más grande, la variación es de un 166%. Se aprecia nuevamente que para las 3 aberturas más grandes, la resistencia del muro disminuye considerablemente, es importante considerar que los casos C2\_60%, C3\_40% y C3\_60% pueden ser descartados ya que el tamaño de su abertura es excesivo para estos muros con relación de aspecto RA=2.5.

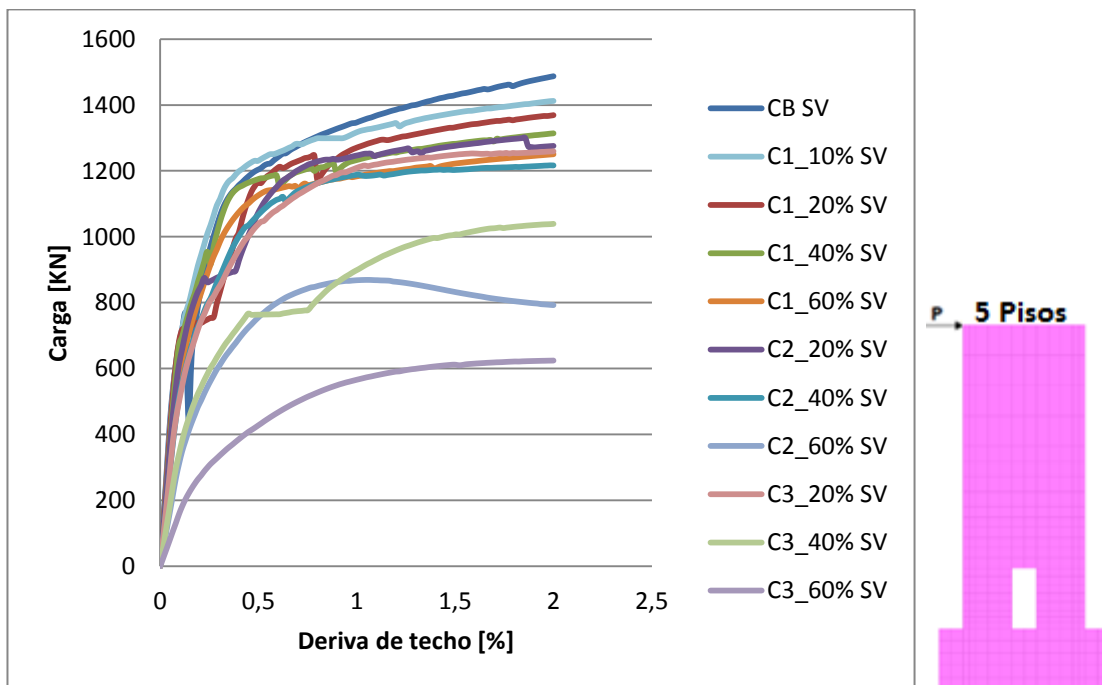


Figura 4.28: Carga-Desplazamiento Casos Modelo SV, RA=2.5.

En la Figura 4.29 y en la Figura 4.30 se aprecia que a medida que aumentamos el tamaño de la abertura la resistencia disminuye y además se tiene que la curva correspondiente a la resistencia del muro C3\_60% es la única que se escapa del resto por tratarse de la abertura más grande. Para los muros con relación de aspecto RA=5, los valores de la variación porcentual para todo el rango de deriva de techo al incorporar la abertura van desde un 1.3% para C1\_10% (abertura más pequeña) hasta un 40,1% para C3\_60% (abertura más grande), mientras que para

los muros con relación de aspecto RA=7.5 los valores van desde un 1% hasta un 8.1% respectivamente.

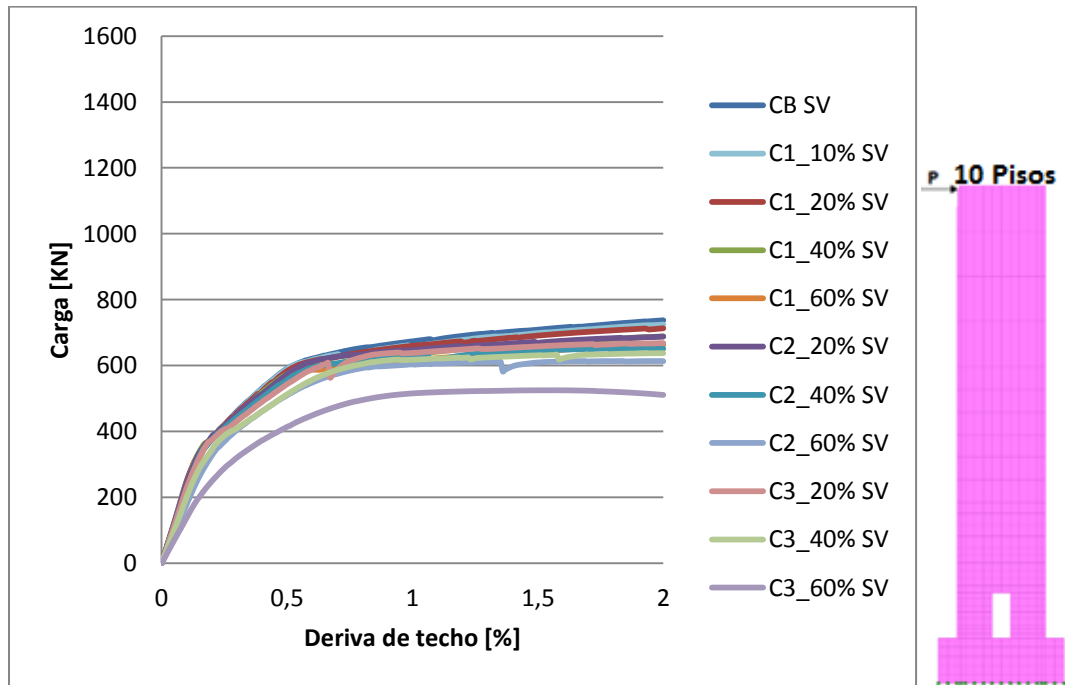


Figura 4.29: Carga-Desplazamiento Casos Modelo SV, RA=5.

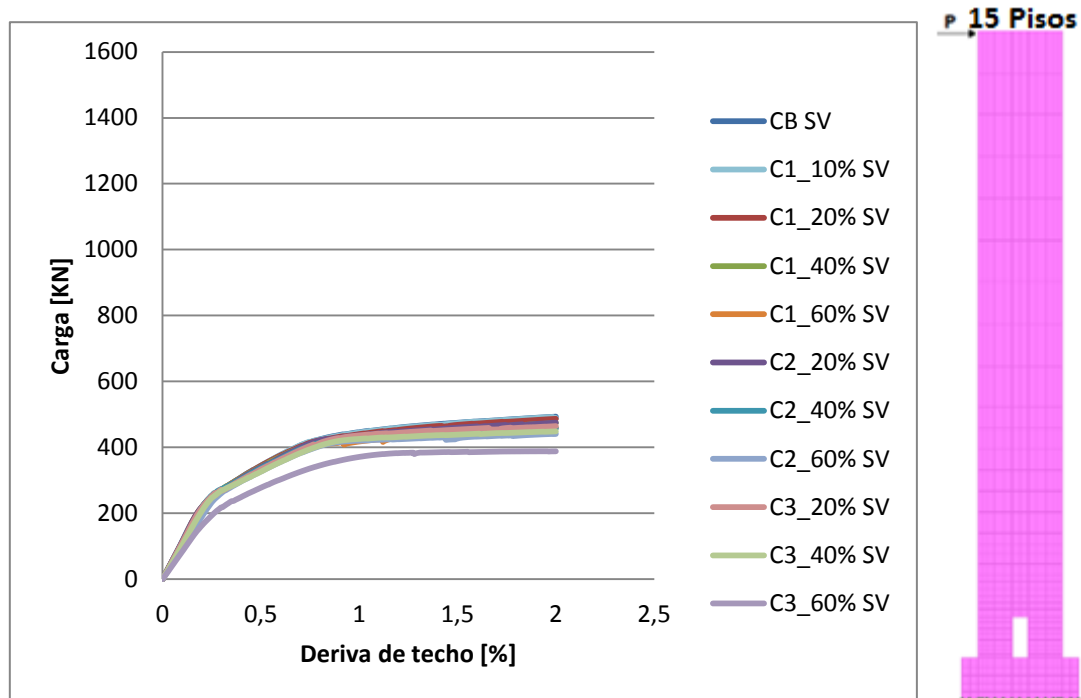
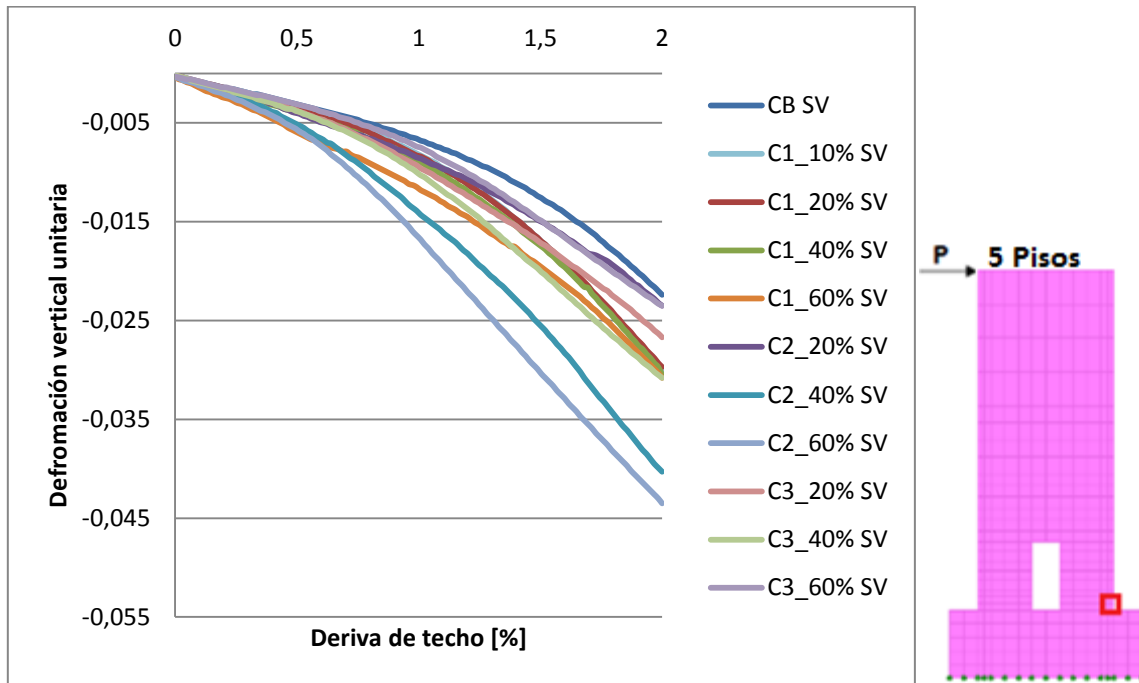


Figura 4.30: Carga-Desplazamiento Casos Modelo SV, RA=7.5.

## 4.6.2 Análisis de respuesta local: Deformaciones unitarias Verticales.

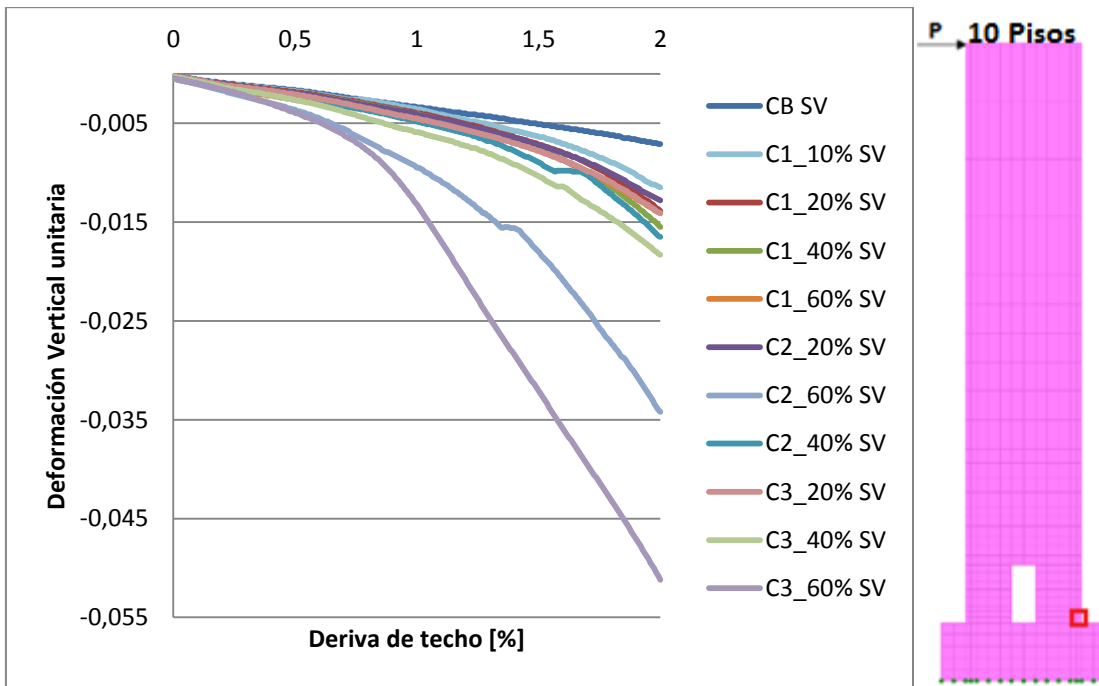
### 4.6.2.1 Deformaciones por Compresión.

En la Figura 4.31 se tiene que las deformaciones verticales máximas por compresión para los muros con relación de aspecto RA=2.5 se amplifican con respecto al caso base desde un 4.9% hasta un 94.2% para una deriva de techo del 2%. En esta figura no se aprecia una dependencia clara de la amplificación en las deformaciones con respecto al tamaño de la abertura para todos los casos, pero en las relaciones de aspecto siguientes es posible apreciar dicha dependencia.



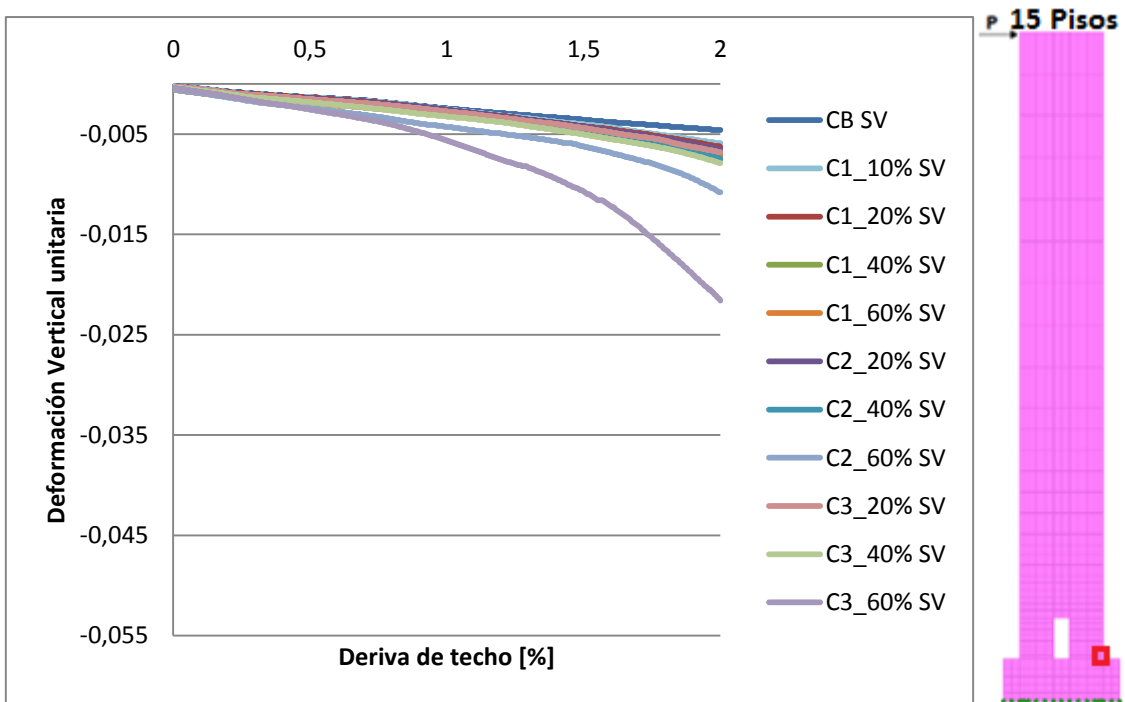
**Figura 4.31: Deformaciones máximas por compresión Casos Modelo SV, RA=2.5.**

En la Figura 4.32 es posible observar que la amplificación de las deformaciones máximas por compresión depende de manera proporcional al Área de la abertura. Se tiene que para derivas de techo de 2% las deformaciones verticales por compresión se amplifican desde un 62% para el caso C1\_10% (abertura más pequeña) hasta un 621% para el caso C3\_60% (abertura más grande).



**Figura 4.32: Deformaciones máximas por compresión Casos Modelo SV, RA=5.**

En la Figura 4.33 se vuelve a apreciar que la amplificación de las deformaciones depende del tamaño de la abertura y en los muros con ésta relación de aspecto se tiene que para derivas de techo de 2% las deformaciones verticales por compresión se amplifican desde un 28.3% para el caso C1\_10%(abertura más pequeña) hasta un 370% para le caso C3\_60%(abertura más grande).



**Figura 4.33: Deformaciones máximas por compresión Casos Modelo SV, RA=7.5.**

Para comprobar si efectivamente las deformaciones verticales por compresión aumentan a medida que aumentamos el área de la abertura, se calcula la variación porcentual promedio para todo el rango de deriva de techo en cada uno de los casos para las relaciones de aspecto RA= 5.

**Tabla 4.4: Esquema de aberturas y sus respectivas áreas.**

Aberturas				Áreas[m <sup>2</sup> ]			
	C3_20%	C3_40%	C3_60%		7,5	15	22,5
	C2_20%	C2_40%	C2_60%		5	10	15
C1_10%	C1_20%	C1_40%	C1_60%	1,25	2,5	5	7,5

**Tabla 4.5: Variación porcentual promedio de amplificación con respecto al caso base, RA=5.**

Porcentajes [%]			
	27,87	43,50	69,65
	22,66	35,76	63,56
13,27	20,46	26,41	35,61



En la Tabla 4.5 se aprecia que efectivamente las deformaciones se amplifican a medida que crece el tamaño de la abertura, pues si fijamos un ancho y variamos la altura o viceversa, se aprecia un aumento, por lo tanto el factor de amplificación si depende del área de la abertura. Con la Tabla 4.4 es posible apreciar cuales son las aberturas que tienen una misma área, por ejemplo el caso C1\_40% tiene un área de 5 m<sup>2</sup> al igual que el caso C2\_20%, y sus valores de amplificación son 26.41% y 22.66% respectivamente. Con esto se muestra que para áreas de abertura iguales se tienen deformaciones similares, sobre todo cuando se trata de áreas pequeñas.

Se determina trabajar solo con los Casos C1, debido a que dichos resultados presentan el comportamiento más consistente para las 3 relaciones de aspecto estudiadas. De esta manera se puede establecer una expresión simple para estimar las deformaciones de muros con aberturas de un piso y ancho de hasta un 60% del ancho del muro, tal como se muestra en la Figura 4.34. Para el resto de las aberturas se necesitarán ciertas recomendaciones.

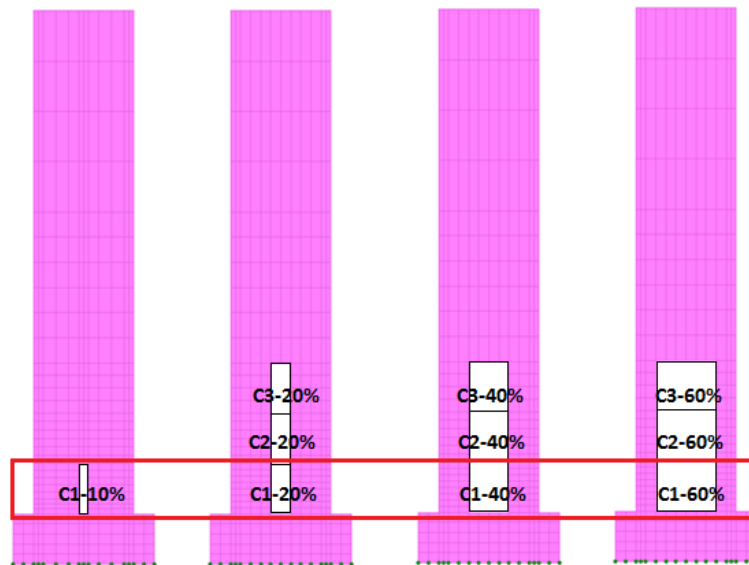


Figura 4.34: Casos utilizados para la calibración del Factor de amplificación.

#### 4.7 Resultados analíticos muros con abertura: Efecto de la abertura más el efecto del corte.

Con los resultados numéricos obtenidos para cada uno de los casos se buscan expresiones analíticas que nos permitan obtener las deformaciones verticales máximas por compresión y tracción en muros que incorporen el efecto de la abertura más el efecto del corte. Se busca estimar las deformaciones a partir de un modelo de flexión. El modelo de rótula plástica del ACI asume deformaciones por flexión solamente, por lo tanto el Modelo B (ver, Figura 3.12(a)) se acerca a este concepto debido a que cumple con la Hipótesis de Bernoulli en que secciones planas permanecen planas. Es importante aclarar que en la actualidad los modelos de flexión lineales son los más utilizados, pero el presente trabajo se enfoca en modelos no lineales.

##### 4.7.1 Deformaciones verticales máximas por compresión.

Una vez obtenidas las deformaciones máximas por compresión en todos los casos, la idea es encontrar un Factor de amplificación  $F(x)$  que incorpore el efecto de la abertura más el efecto del corte a los resultados obtenidos del caso base. Se busca una expresión del tipo:

$$\varepsilon_{\text{corte+abertura}} = F(x) \cdot \varepsilon_{cr^*} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde:

$\varepsilon_{cr^*}$ : Deformación Vertical máxima por compresión para un muro sin abertura.

$F(x)$ : Es un factor que incluye el Factor de amplificación por corte  $F_c$  y el Factor de amplificación por abertura  $F_a$ .

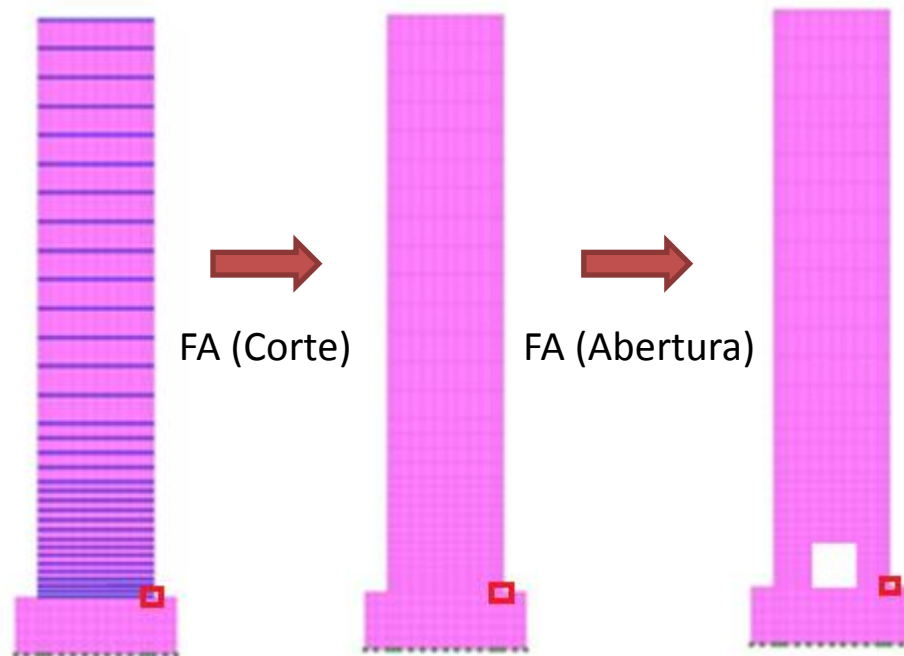
Por lo tanto se tiene:



$$F(x) = F_C \cdot F_a \quad \text{Ecuación 4.3}$$

$$\varepsilon_{\text{corte+abertura}} = F_C \cdot F_a \cdot \varepsilon_{cr*} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Para obtener dicho factor, se necesita pasar del modelo de flexión al modelo de flexión más corte y luego incorporar la abertura en el análisis, tal como se muestra en la Figura 4.35.



**Figura 4.35: Amplificaciones para incorporar el efecto del corte y de la abertura al modelo de flexión.**

Se procede de la siguiente manera:

- Ahumada (2014) desarrolló una expresión que permite amplificar las deformaciones de un Muro sin abertura incluyendo el efecto del corte, Ecuación 2.3. En la Figura 4.36, Figura 4.37 y Figura 4.38, se aprecia el resultado de dicha expresión. La curva Caso Base SV\* representa las deformaciones amplificadas que incluyen el efecto del corte  $\varepsilon_c$ , en el caso base y la curva Caso Base B corresponde a las deformaciones del caso base  $\varepsilon_{cr*}$ , aplicando modelo de flexión.

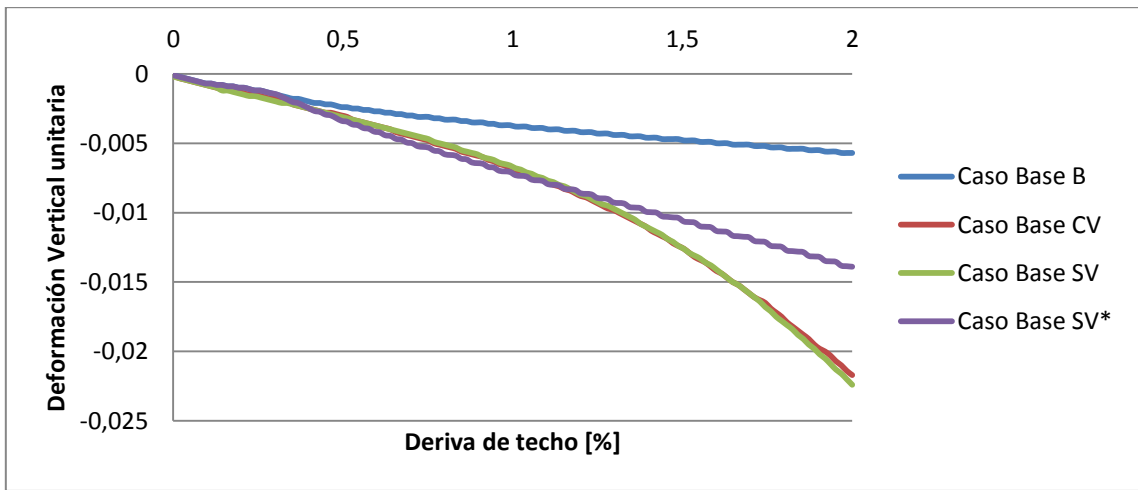


Figura 4.36: Deformación amplificada caso base RA=2.5, incluye efecto del corte (CB SV\*).

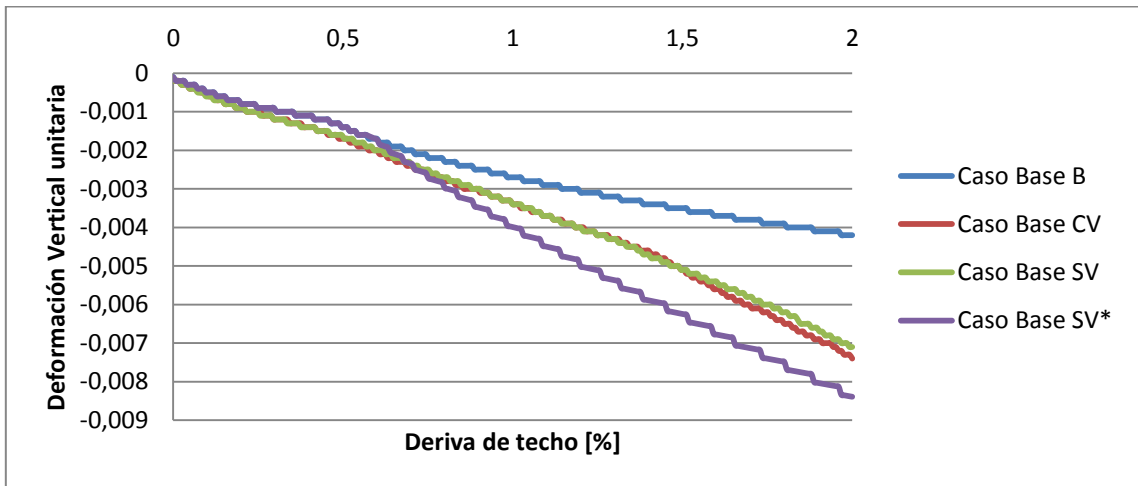


Figura 4.37: Deformación amplificada caso base RA=5, incluye efecto del corte (CB SV\*).

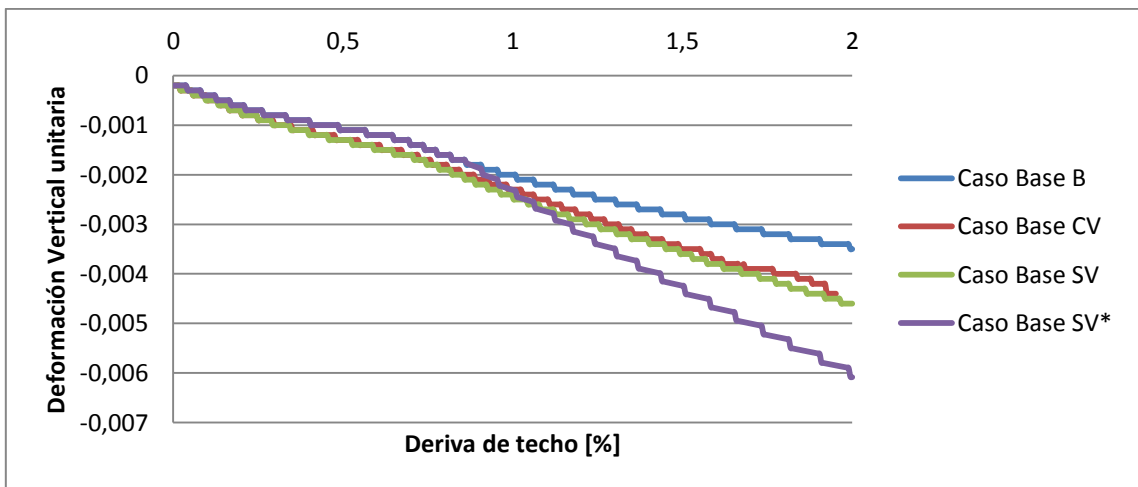


Figura 4.38: Deformación amplificada caso base RA=7.5, incluye efecto del corte (CB SV\*).

- Luego se desarrolló un factor para amplificar las deformaciones que incluyen el efecto del corte en muros sin aberturas  $\varepsilon_c$  y obtener las deformaciones de un muro que incluya el efecto de la abertura más el efecto del corte  $\varepsilon_{corte+abertura}$ . El factor es de la forma:

$$F_a = 1 + \beta \left( \frac{Area_{Abertura}}{Area_{piso}} \right)^\alpha \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Incorporando la Ecuación 2.3 y la Ecuación 4.5 en la Ecuación 4.4 se tiene la expresión final:

$$\varepsilon_{corte+abertura} = 9.69 \cdot \Delta_p^{0.29} \left( \frac{h_w}{l_w} \right)^{-0.23} \cdot \left( 1 + \beta \left( \frac{Area_{Abertura}}{Area_{piso}} \right)^\alpha \right) \cdot \varepsilon_{cr*} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

- Se vuelve necesario calibrar los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ . Para ello se ingresan todos los datos a la Ecuación 4.6, estos datos corresponden a las deformaciones máximas por compresión de todos los casos C1 para todo el rango de derivas de techo obtenidos, es decir, hasta un 2%. Luego se minimiza el error mediante el método de mínimos cuadrados, cuyo objetivo es minimizar la diferencia entre los valores analíticos obtenidos con el programa para los Casos SV (flexión + corte + abertura) y los valores  $\varepsilon_{corte+abertura}$  obtenidos con la ecuación calibrada.

Los parámetros una vez calibrados son:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.31 \\ \beta &= 0.64 \end{aligned}$$

- Finalmente se logra obtener una ecuación que permita amplificar las deformaciones de un muro rectangular sin aberturas, incorporándole el efecto del corte más el efecto de la abertura. Cuya restricción de uso es que las aberturas deben ser de un piso y ancho menor o igual a un 60% del muro.

La ecuación calibrada queda así:

$$\varepsilon_{corte+abertura} = 9.69 \cdot \Delta_p^{0.29} \left( \frac{h_w}{l_w} \right)^{-0.23} \cdot \left( 1 + 0.64 \left( \frac{Area_{Abertura}}{Area_{piso}} \right)^{0.31} \right) \cdot \varepsilon_{cr*} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

La Ecuación 4.7 responde de buena manera hasta cierto porcentaje de deriva de techo, dependiendo de la relación de aspecto del muro. En la Figura 4.39 se observa que para los casos C1 con una relación de aspecto RA=2.5 la expresión representa el comportamiento hasta un deriva de techo de 1.25%, luego de esto las deformaciones se subestiman. En el Figura 4.40 se observa que para los casos C1 con una relación de aspecto RA=5 la expresión representa el

comportamiento hasta una deriva de techo de 1.5%, luego de esto las deformaciones se subestiman. Finalmente en el Figura 4.41 se observa que para los casos C1 con una relación de aspecto  $RA=7.5$  la expresión representa el comportamiento hasta un 0.75% de la deriva de techo, luego de esto se comporta de manera conservadora.

En forma general si se calcula la variación porcentual promedio para los casos C1 de las diferentes relaciones de aspecto incluyendo todo el rango de deriva de techo (hasta un 2%) se tiene que la expresión calibrada tiene un error asociado de hasta un 25% en la estimación de las deformaciones máximas por compresión.

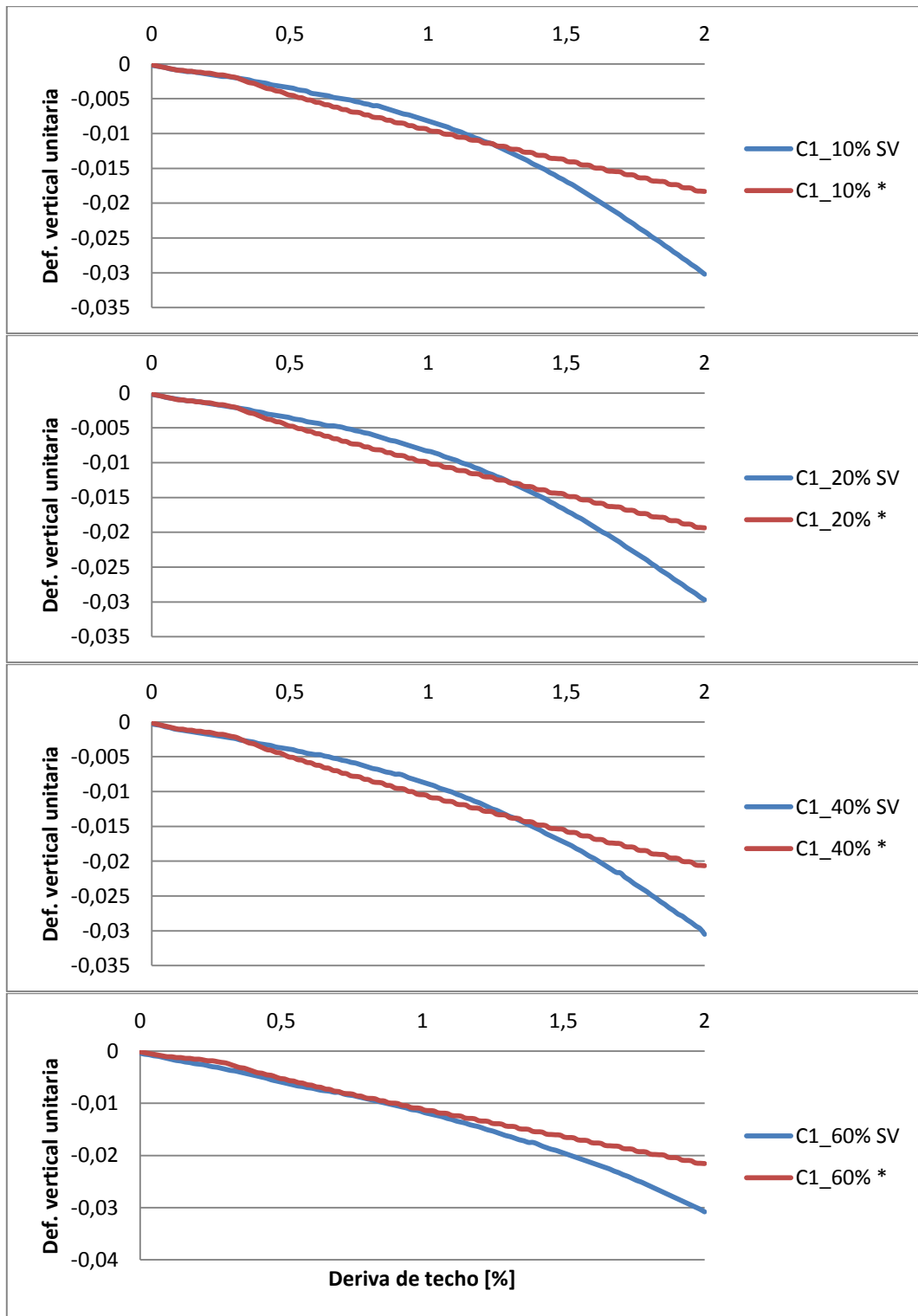


Figura 4.39: Comparación resultados numéricos y analíticos. Casos C1, RA=2.5. Curva analítica que incluye el efecto de la abertura más el efecto del corte (\*).

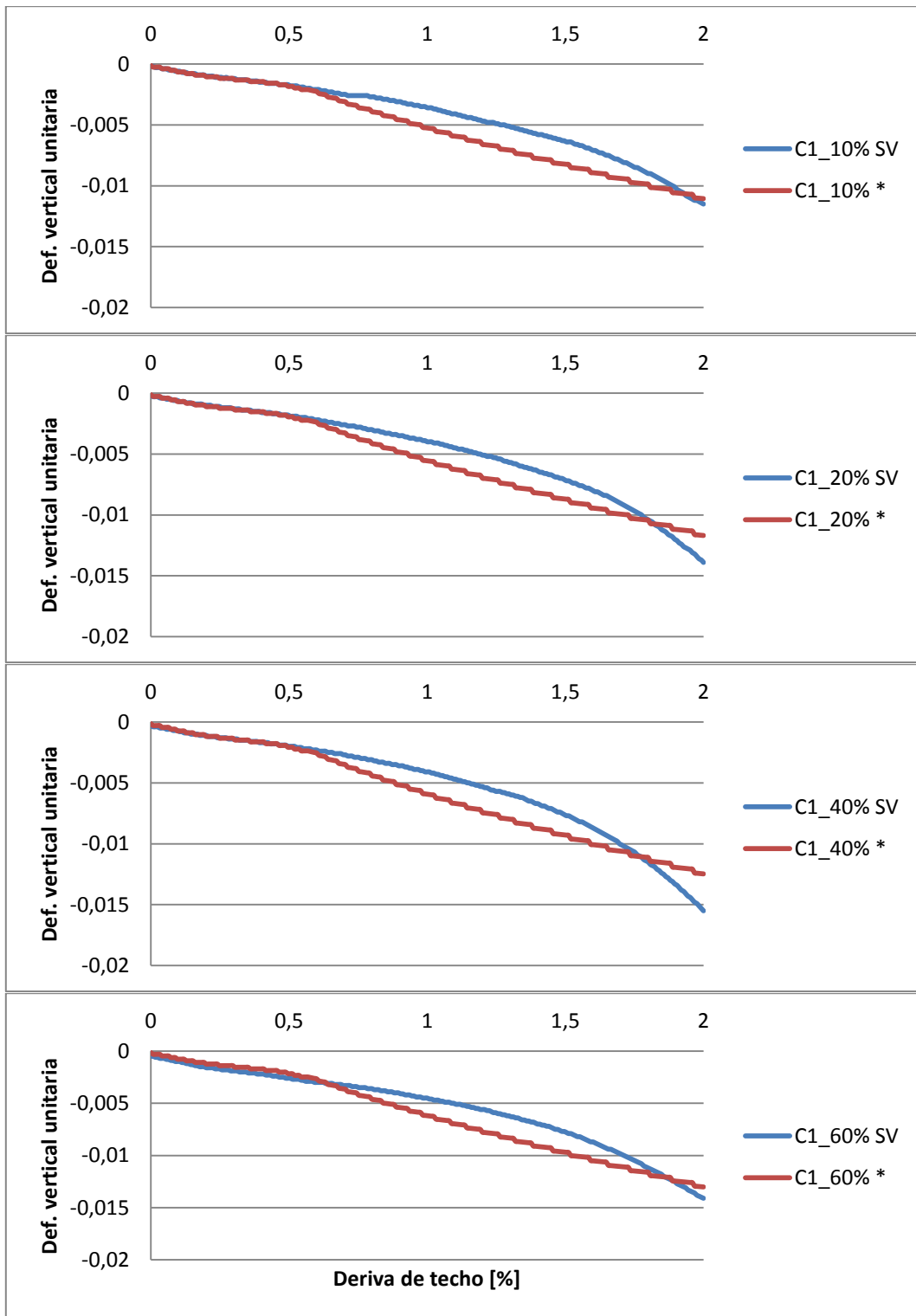


Figura 4.40: Comparación resultados numéricos y analíticos. Casos C1, RA=5. Curva analítica que incluye el efecto de la abertura más el efecto del corte (\*).

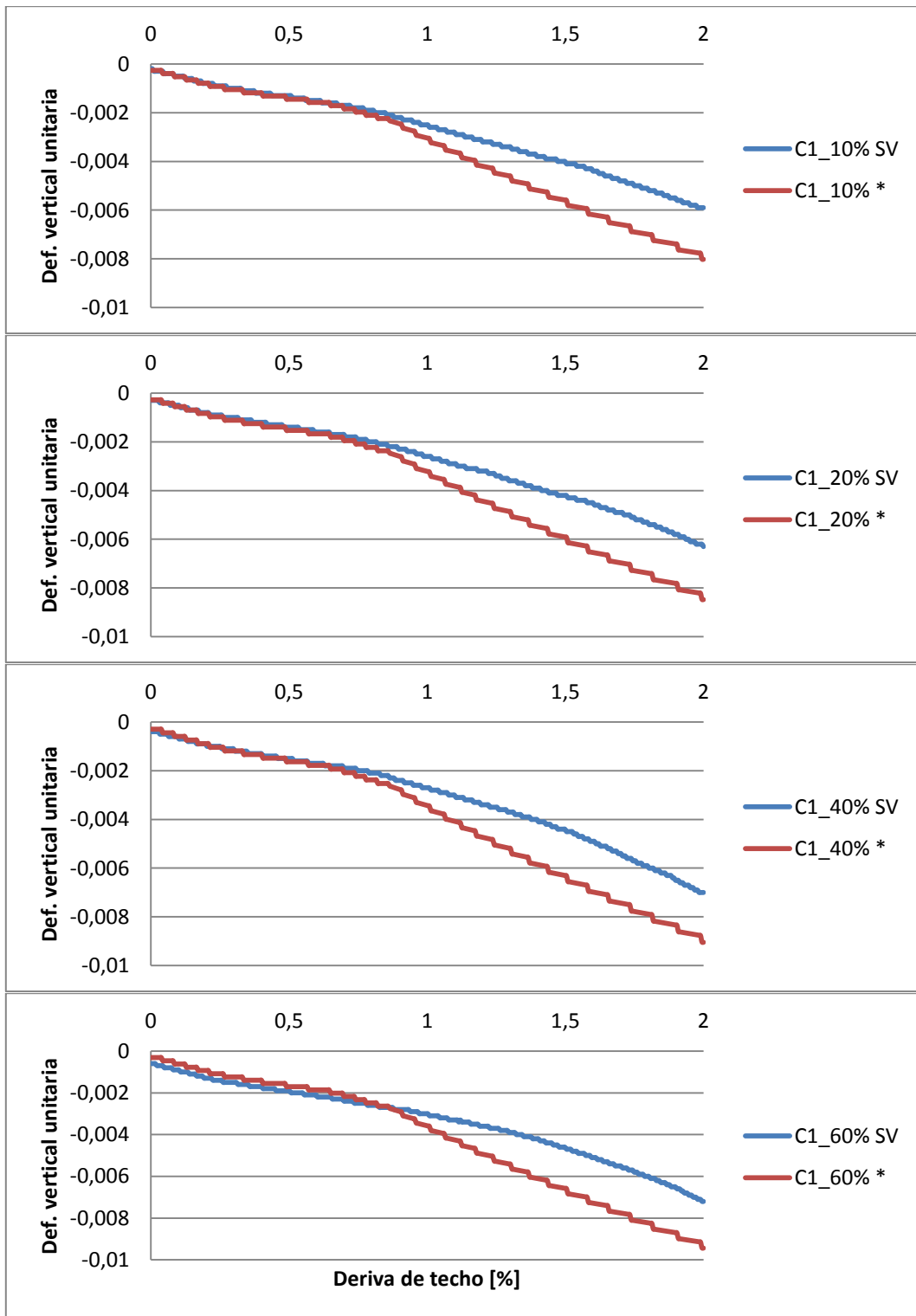


Figura 4.41: Comparación resultados numéricos y analíticos. Casos C1, RA=7.5. Curva analítica que incluye el efecto de la abertura más el efecto del corte (\*).

#### 4.7.2 Deformaciones verticales por tracción.

Para llevar a cabo este análisis, se graficaron las deformaciones verticales a lo largo de los Ejes longitudinales descritos en la Figura 3.11, dichos gráficos se encuentran desde Anexo A- 6 hasta Anexo A- 16. A continuación se realizará una descripción general de lo que sucede, para ello, se compararán los resultados obtenidos del Caso base usando el Modelo B con los resultados obtenidos en muros con aberturas analizados con el Modelo SV. Todos con una relación de aspecto RA=5.

De los gráficos se desprende que para el caso base, la deformación máxima por tracción se encuentra en el elemento 1 del Eje 1, pero al momento de incorporar la abertura se tienen diferentes casos:

- Si la abertura es de un piso: Las deformaciones por tracción se concentran en 3 zonas tal como se puede apreciar en la Figura 4.45, la primera es el elemento 1 del Eje 1 al igual que el caso base, la segunda es el elemento 8 del Eje 2 (elemento que se encuentra en el extremo superior izquierdo de la abertura) y la tercera es el elemento 1 del Eje 3. A pesar de esto se debe destacar que el máximo siempre se encuentra en el Eje 2 y va aumentando a medida que aumenta el tamaño de la abertura, llegando a un 50% de amplificación con la abertura más grande (C1\_60%) para una deriva de techo del 2%. Las otras zonas tienen deformaciones similares a la deformación máxima del caso base.

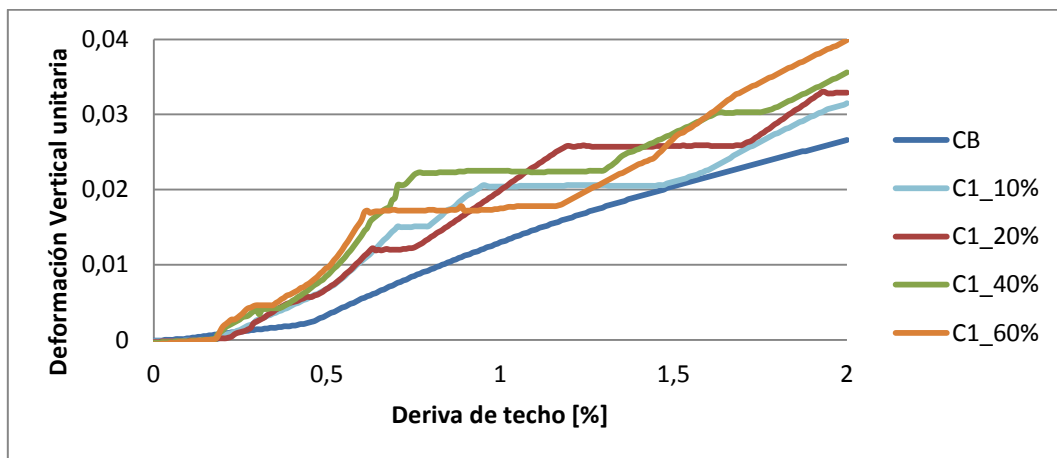
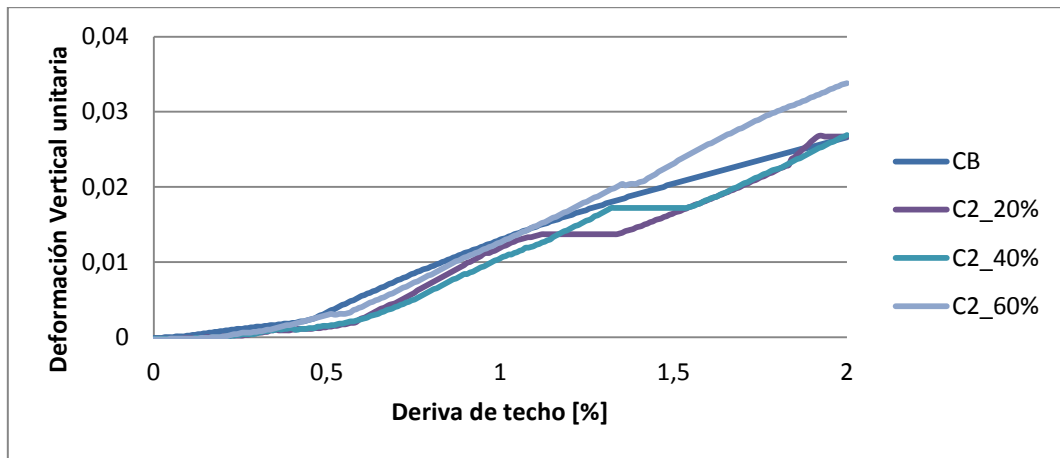


Figura 4.42: Deformaciones verticales por tracción Casos C1, RA=5. Modelo SV.

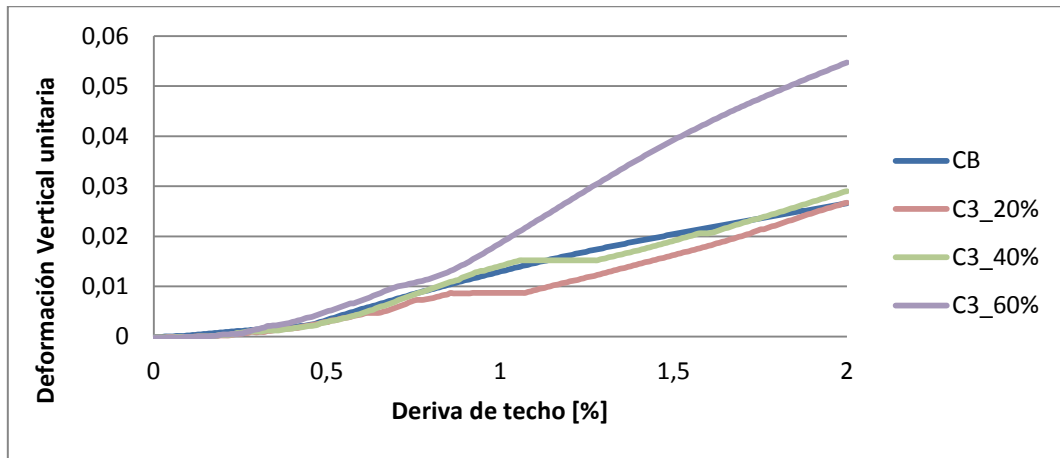
- Si la abertura es de dos pisos: Las deformaciones por tracción se concentran en 2 zonas. La primera es el elemento 14 del Eje 2 (elemento que se encuentra en el extremo superior izquierdo de la abertura) y la segunda es el elemento 1 del Eje 3. En este caso el máximo siempre se encuentra en el elemento 1 del Eje 3, las deformaciones parten cercanas al caso base llegando a una amplificación de 25% con la abertura más grande (C2\_60%) para una deriva de techo del 2% (Figura 4.43).





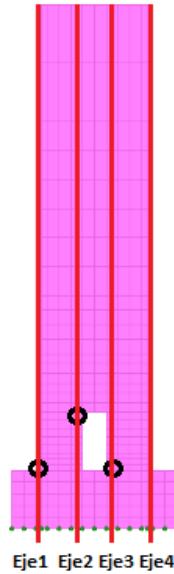
**Figura 4.43: Deformaciones verticales por tracción Casos C2, RA=5. Modelo SV.**

- Si la abertura es de tres pisos: Las deformaciones por tracción se concentran en 2 zonas al igual que el caso anterior. La primera es el elemento 18 del Eje 2 (elemento que se encuentra en el extremo superior izquierdo de la abertura) y la segunda es el elemento 1 del Eje 3. La deformación máxima siempre se encuentra en el elemento 1 del Eje 3, las deformaciones parte cercanas al caso base llegando a una amplificación de 100% con la abertura más grande para una deriva de techo del 2% (Figura 4.44).



**Figura 4.44: Deformaciones verticales por tracción Casos C3, RA=5. Modelo SV.**

Al eliminar los casos con aberturas más grandes del análisis (C2\_60% y C3\_60%) se tiene que las deformaciones por tracción más importantes se encuentran en las aberturas de un piso. En todos los casos C1, se tiene que las deformaciones por tracción se encuentran por sobre las deformaciones del caso base (Figura 4.42), por lo tanto también es posible encontrar una expresión simplificada que nos permita obtener la amplificación que produce la abertura más el efecto del corte.



**Figura 4.45: Ubicación del daño, zonas en tracción.**

Se procede a determinar un factor de amplificación que nos permita estimar las deformaciones por tracción para aberturas de un piso a partir de las deformaciones de un muro continuo desde la base analizado con un modelo de flexión. Para ello se realiza el mismo procedimiento que se utilizó para determinar la expresión que permite estimar las deformaciones por compresión, resultando la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{t(corte+abertura)} = 0.6 \cdot \left(\frac{h_w}{l_w}\right)^{0.18} \cdot \left(1 + 0.66 \left(\frac{Area_{Abertura}}{Area_{piso}}\right)^{0.1}\right) \cdot \varepsilon_{tr*} \quad \text{Ecuación 4.8}$$

En forma general si se calcula la variación porcentual promedio para los casos C1 de las diferentes relaciones de aspecto incluyendo todo el rango de deriva de techo (hasta un 2%) se tiene que la expresión calibrada tiene un error asociado de hasta un 40% en la estimación de las deformaciones máximas por tracción.

#### 4.8 Comparación resultados Modelo B versus Modelo SV.

Es interesante apreciar que sucedería si en vez de estimar las deformaciones por compresión a partir de Muros continuos desde la base, sólo se realizaran modelos de flexión para muros con aberturas. Debido a esto, se decide realizar una comparación entre el Modelo de flexión (B) y el Modelo de flexión más corte (SV) para así estimar la variación porcentual promedio que existe entre ambos modelos para todo el rango de deriva de techo.

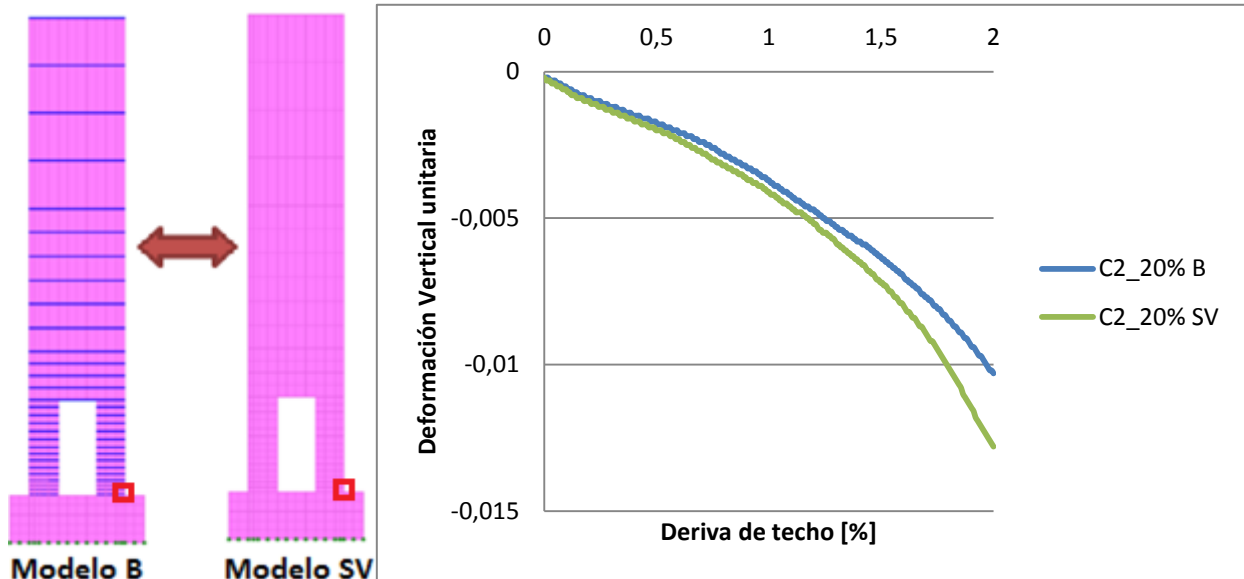


Figura 4.46: Comparación Modelos B y SV para el caso C2\_20%, RA=5.

Al comparar ambos modelos para cada uno de los casos, se tiene que las deformaciones del Modelo SV siempre son mayores a las del Modelo B, tal como se muestra en la Figura 4.46. Y además al calcular la variación porcentual promedio se tiene que en ningún caso el error asociado supera el 20%, tal como se muestra en la Tabla 4.6, Tabla 4.7 y Tabla 4.8.

Tabla 4.6: Variación porcentual promedio entre Modelo B y Modelo SV, RA=2.5.

Casos	10%	20%	40%	60%
C3		10,69 [%]	2,36 [%]	2,04 [%]
C2		14,54 [%]	12,00 [%]	3,53 [%]
C1	19,73 [%]	15,76 [%]	13,37 [%]	14,85 [%]

Tabla 4.7: Variación porcentual promedio entre Modelo B y Modelo SV, RA=5.

Casos	10%	20%	40%	60%
C3		14,34 [%]	11,42 [%]	5,32 [%]
C2		14,62 [%]	17,00 [%]	16,68 [%]
C1	13,73 [%]	18,81 [%]	14,32 [%]	9,63 [%]

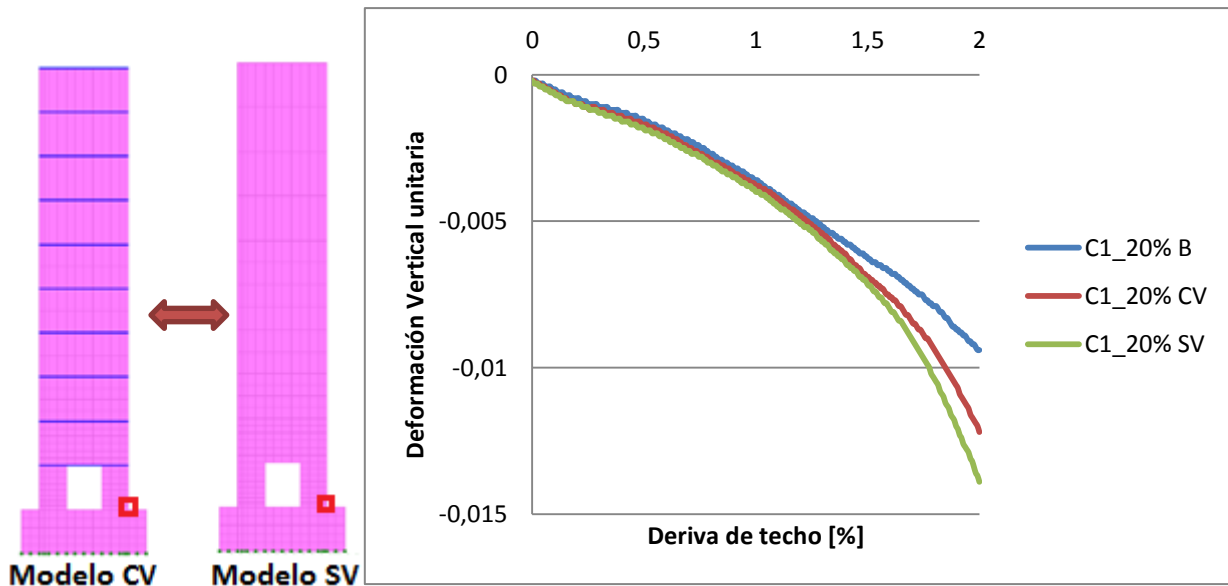
**Tabla 4.8: Variación porcentual promedio entre Modelo B y Modelo SV, RA=7.5.**

Casos	10%	20%	40%	60%
C3		12,42 [%]	12,34 [%]	15,06 [%]
C2		13,45 [%]	15,16 [%]	12,26 [%]
C1	15,47 [%]	15,99 [%]	13,64 [%]	8,99 [%]

#### 4.9 Comparación Resultados Modelo CV versus Modelo SV.

Dado que el Modelo CV tiene vigas rígidas que simulan el efecto de las losas en todos los pisos, se vuelve interesante estudiar cual es el impacto que dichas vigas generan en las deformaciones por compresión de muros con aberturas. Para ello se realiza la comparación entre el Modelo de flexión más corte SV y el Modelo CV, con el fin de estimar la variación porcentual promedio que existe entre ambos modelos para todo el rango de deriva de techo.

Al analizar cada uno de los casos se tienen 2 comportamientos, para aberturas de un piso las deformaciones obtenidas con el modelo CV se comportan de forma similar a las obtenidas con el modelo SV, Figura 4.47. La variación porcentual promedio para aberturas de un piso no supera el 10% en ningún caso, tal como se muestra en la Tabla 4.9, Tabla 4.10 y Tabla 4.11. Mientras que para aberturas de 2 y 3 pisos las deformaciones obtenidas con el Modelo CV son bastante menores a las obtenidas con el Modelo SV, incluso están por debajo de las obtenidas con el Modelo B, Figura 4.48.



**Figura 4.47: Comparación Modelos CV y SV para el caso C1\_20%, RA=5.**

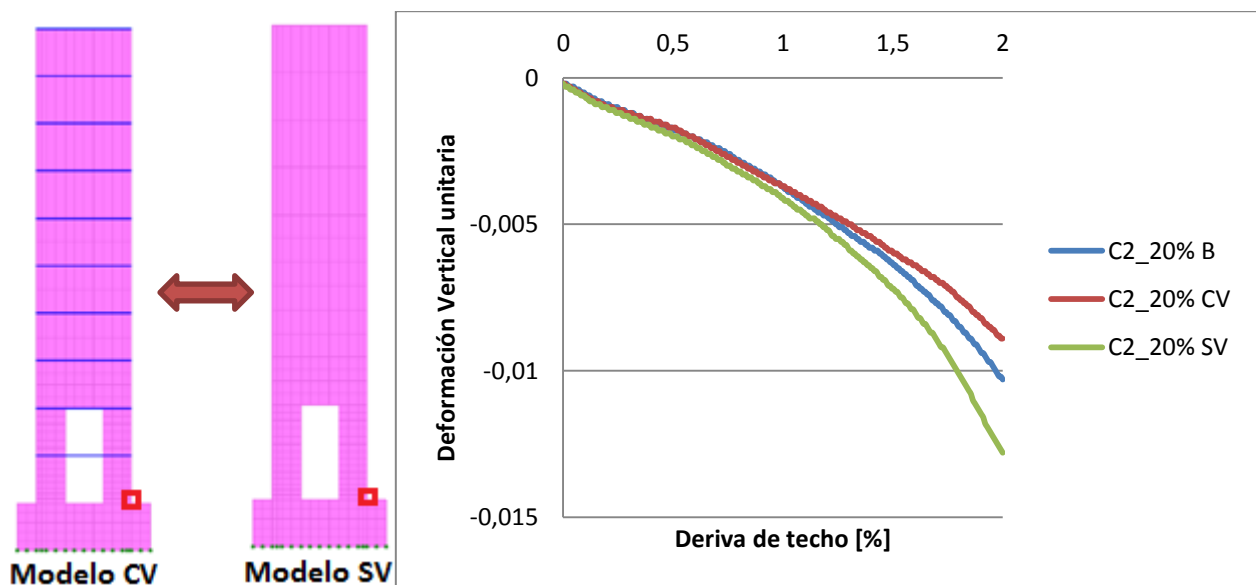


Figura 4.48: Comparación Modelos CV y SV para el caso C2\_20%, RA=5.

Tabla 4.9: Variación porcentual promedio entre Modelo CV y Modelo SV, RA=2.5.

Casos	10%	20%	40%	60%
C3		26,26 [%]	37,86 [%]	16,39 [%]
C2		17,38 [%]	49,55 [%]	55,11 [%]
C1	2,25 [%]	3,31 [%]	4,81 [%]	8,89 [%]

Tabla 4.10: Variación porcentual promedio entre Modelo CV y Modelo SV, RA=5.

Casos	10%	20%	40%	60%
C3		26,62 [%]	62,30 [%]	205,84 [%]
C2		17,62 [%]	31,06 [%]	108,94 [%]
C1	3,69 [%]	6,51 [%]	1,92 [%]	2,45 [%]

Tabla 4.11: Variación porcentual promedio entre Modelo CV y Modelo SV, RA=7.5.

Casos	10%	20%	40%	60%
C3		16,66 [%]	29,93 [%]	99,13 [%]
C2		11,39 [%]	15,82 [%]	38,95 [%]
C1	2,98 [%]	1,81 [%]	2,09 [%]	3,74 [%]

#### 4.10 Muros analizados con modelos lineales.

En general, los muros realizados en Chile son modelados en forma lineal. Es por esto que se decide realizar muros con aberturas utilizando modelo lineal simple, para luego comparar estos resultados con los modelos no lineales.

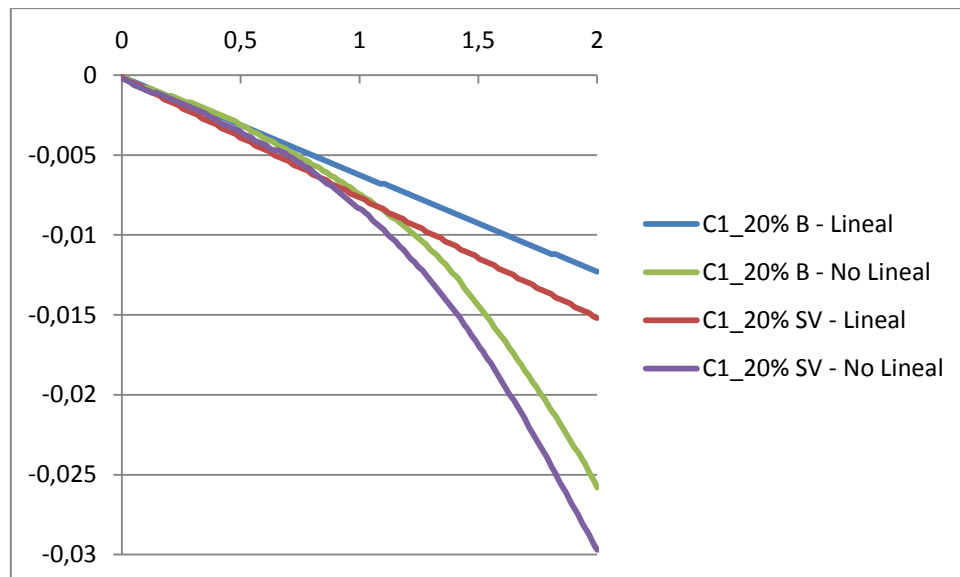
El modelo lineal considera un hormigón elástico en todos sus elementos con una rigidez de  $4700\sqrt{f'_c}$  [MPa], donde  $f'_c = 30$ [MPa].

Se analizaron todos los casos con aberturas para muros con relación de aspecto RA=5. La variación porcentual promedio entre las deformaciones por compresión obtenidas con el Modelo B y las obtenidas con el Modelo SV resulta ser menor a 25% para todos los casos (Tabla 4.12).

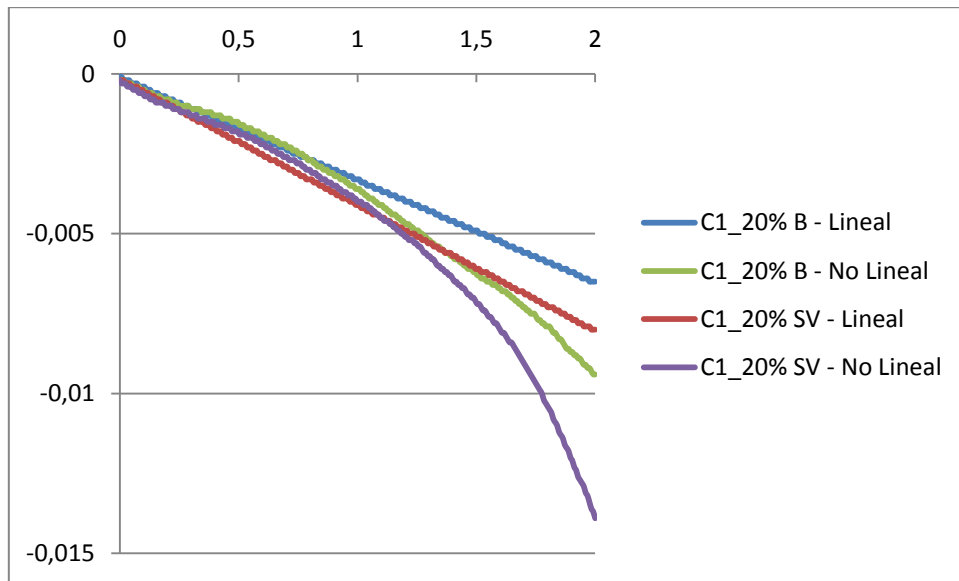
**Tabla 4.12: Variación porcentual promedio entre Modelo lineal B y Modelo lineal SV, RA=5.**

Casos	10%	20%	40%	60%
C3		19,68 [%]	15,43 [%]	8,17 [%]
C2		20,65 [%]	20,49 [%]	10,61 [%]
C1	23,81 [%]	24,72 [%]	22,98 [%]	12,94 [%]

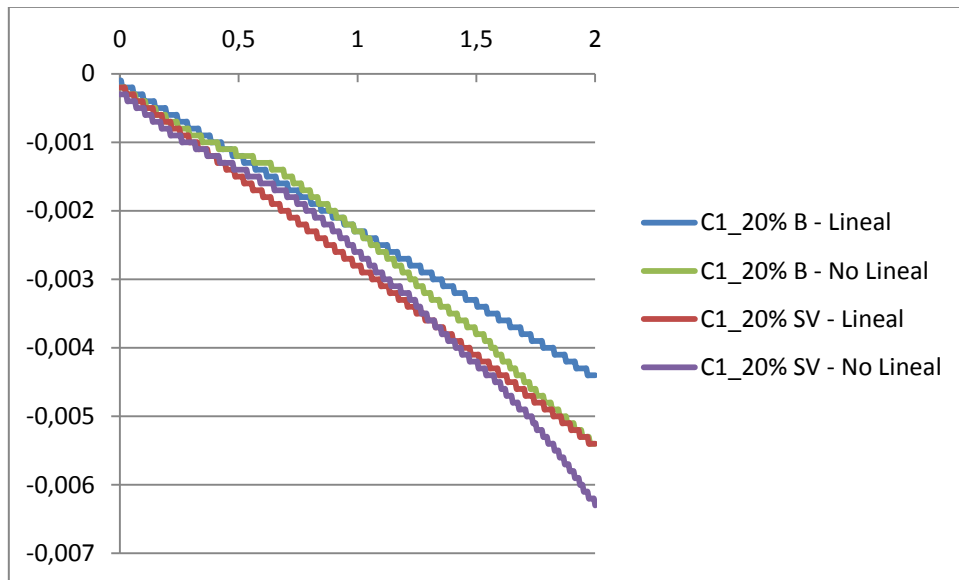
Para apreciar si los modelos no lineales tienen el mismo comportamiento que los modelos lineales en cuanto a las deformaciones por compresión del tramo lineal elástico, se decide graficar el Caso C1\_20% para cada relación de aspecto, tal como se muestra en la Figura 4.49, Figura 4.50 y Figura 4.51.



**Figura 4.49: Comparación entre Modelo lineal y Modelo No lineal, Caso C1\_20% con RA=2.5.**



**Figura 4.50: Comparación entre Modelo lineal y Modelo No lineal, Caso C1\_20% con RA=5.**



**Figura 4.51: Comparación entre Modelo lineal y Modelo No lineal, Caso C1\_20% con RA=7.5.**

Se aprecia que efectivamente ambos modelos, lineal y no lineal, tienen un comportamiento similar en el tramo elástico. Luego de esto, las deformaciones obtenidas con el modelo No lineal se separan de las obtenidas con el modelo lineal. A medida que disminuye la relación de aspecto del muro, la diferencia entre el modelo lineal y el modelo no lineal (variación porcentual promedio para todo el rango de deriva de techo) aumenta.

#### **4.11 Recomendaciones.**

La expresión para estimar las deformaciones máximas por compresión fue calibrada para aberturas de un piso con ancho de hasta un 60% y se debe considerar un error esperado de un 25%. Si se desea utilizar la expresión para aberturas de 2 o más pisos se deben considerar la siguiente recomendación:

- Para aberturas de 2 o 3 pisos con un ancho de abertura de hasta un 40% del ancho del muro, se tiene que considerar un error esperado de un 30%.
- Para aberturas de 2 o 3 piso con un ancho de abertura superior al 40% del ancho del muro, se recomienda no utilizar la expresión ya que al tratarse de deformaciones muy altas, el error esperado se encuentra por sobre el 40%, llegando en algunos casos a superar el 100%.

La expresión para estimar las deformaciones máximas por tracción también fue calibrada para aberturas de un piso con ancho de hasta un 60% y se debe considerar un error esperado de un 40%. No se recomienda utilizar esta expresión para aberturas de mayor tamaño, ya que como se vio en la sección de deformaciones por tracción, las mayores deformaciones se tienen en las aberturas de un piso en la misma ubicación.

Al comparar los resultados de deformaciones máximas por compresión obtenidos para los muros con un modelo de flexión (B) versus un modelo de flexión más corte (SV), se obtuvo que las variaciones porcentuales promedio para todo el rango de deriva de techo, no superan el 20% independiente del tamaño de la abertura. Por lo tanto se recomienda utilizar un modelo de flexión al momento de diseñar un muro con abertura (Modelo de fibras), considerando un error esperado de hasta un 20%.



## 5 Conclusiones.

Se realiza un estudio del impacto que genera la incorporación de aberturas centrales a nivel basal en muros continuos desde la base, dicho estudio se centra principalmente en el comportamiento de las deformaciones de cada uno de los casos.

Al momento de reforzar los bordes de la abertura, se debe prolongar el refuerzo longitudinal hasta por lo menos el piso 4 del muro. De esta manera se evita la formación de una doble rótula plástica a lo largo del muro.

Las deformaciones verticales máximas por compresión de todos los muros con aberturas siempre se producen en el borde de muro y a nivel basal, independiente del tamaño de la abertura. Mientras que las deformaciones máximas por tracción para muros analizados con modelo de flexión más corte (SV) se encuentran en el borde superior izquierdo de la abertura, el daño comienza a aparecer en esa zona y luego se propaga hacia el borde del muro (ver Anexo A- 17). Es importante destacar que para los muros analizados con el modelo con vigas en todos los pisos (CV), el daño siempre se concentra en el primer piso, comienza bajo la primera viga del primer piso y se propaga hacia el borde del muro (ver Anexo A- 18), este tipo de daños se puede relacionar con los daños observados en el terremoto del 2010, donde en algunos edificios se tenían grietas horizontales en los muros a mediana altura (ver Figura 1.1(c)).

Las deformaciones verticales máximas por compresión aumentan a medida que aumentamos el tamaño de la abertura y las deformaciones verticales máximas por tracción aumentan a medida que aumentamos el tamaño de la abertura, pero sólo para aberturas de un piso.

Al incorporar el efecto del corte en muros sin aberturas, se debe aplicar un factor de reducción a las deformaciones por tracción (Ahumada 2014), pero al aplicar el efecto de la abertura más el efecto del corte se tiene que las deformaciones son mayores a las del caso base, por lo tanto la principal conclusión del análisis de deformaciones por tracción es que al incorporar el efecto de la abertura en el análisis, se debe considerar un factor de amplificación.

Se logra cuantificar el impacto que genera incorporar la abertura y el efecto del corte a un muro continuo desde la base analizado con un modelo de flexión (B). Se desarrollaron dos expresiones que permiten estimar las deformaciones máximas por compresión y las deformaciones máximas por tracción para muros con aberturas de un piso con hasta un 60% de ancho en relación al ancho del muro. En general, se tiene que la expresión calibrada tiene un error asociado de hasta un 25% en la estimación de las deformaciones máximas por compresión. Mientras que la expresión para estimar las deformaciones por tracción tiene un error asociado del 40%. Dicho error se calcula como la variación porcentual promedio entre los resultados obtenidos con la expresión y los resultados obtenidos con el programa para los casos C1 de las diferentes relaciones de aspecto incluyendo todo el rango de deriva de techo (hasta un 2%).

La conclusión más relevante del presente trabajo de título es que para estimar las deformaciones verticales por compresión se puede utilizar un método de flexión simple que incluya la abertura y considerar un error esperado de a lo más 20%. Este valor fue calculado para todos los casos con abertura y corresponde a la variación porcentual promedio entre los muros analizados con un modelo de flexión (B) y los muros analizados con un modelo de flexión más corte (SV), utilizando todo el rango de deriva de techo.

Al momento de realizar la comparación entre las deformaciones obtenidas con el Modelo SV y las obtenidas con el Modelo CV, se puede apreciar que la incorporación de las vigas en todos los pisos no genera gran impacto si se trata de muros con aberturas de un piso, pues se tiene un error asociado de 10%.

Es necesario poner énfasis en que todas las conclusiones anteriores provienen del desarrollo de modelos no lineales. Debido a esto se entrega además un error esperado para poder realizar el diseño de muros con aberturas a partir de modelos de flexión lineales. Dicho error fue calculado como la variación porcentual promedio entre el Modelo lineal B y el Modelo lineal SV en cada uno de los casos y en ninguno de ellos supera el 25%.

## Bibliografía.

- [1]. ACI-318-08, "Building Code requirements for Reinforced Concrete", American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2008.
- [2]. AHUMADA C., M. G. 2014. "Modelación en elementos finitos de muros esbeltos de hormigón armado con discontinuidades en la base. Recomendaciones para el Diseño". Memoria para optar al título de ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 179p.
- [3]. ALFARO M., J.I. 2013. "Estimación del desplazamiento lateral elástico e inelástico de muros esbeltos mediante un modelo de rótula plástica basado en un modelo de fibras". Memoria para optar al título de ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 70p.
- [4]. 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.
- [5]. ESTAY D., C.G. 2008. "Características de muros de hormigón armado diseñados en Chile". Memoria para optar al título de ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 109p.
- [6]. ALI, A. and WIGHT, J.K. (1991), "Reinforced Concrete Structural Walls with Staggered Door Openings," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 5, pp. 1514-1531, May 1991.
- [7]. MARTI, P. (1985), "Basic Tools of Reinforced Concrete Beam Design", ACI Journal, Vol. 82, No. 1, pp. 46-56, January-February 1985.
- [8]. MASSONE, L., ALFARO, J. "Displacement and Curvature Estimation for Design of Reinforced Concrete Slender Walls". 2014.
- [9]. MASSONE, L. & ROJAS, F.(2012) "Mw = 8.8 Terremoto en Chile". Santiago. Maval. Cap. 8.
- [10]. PEÑA, E. (2015). "Implementación del programa SAFEPY de elementos finitos para análisis dinámico no lineal con factor de convergencia de carga" Tesis para optar al título de Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Sísmica (Tesis inédita). Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

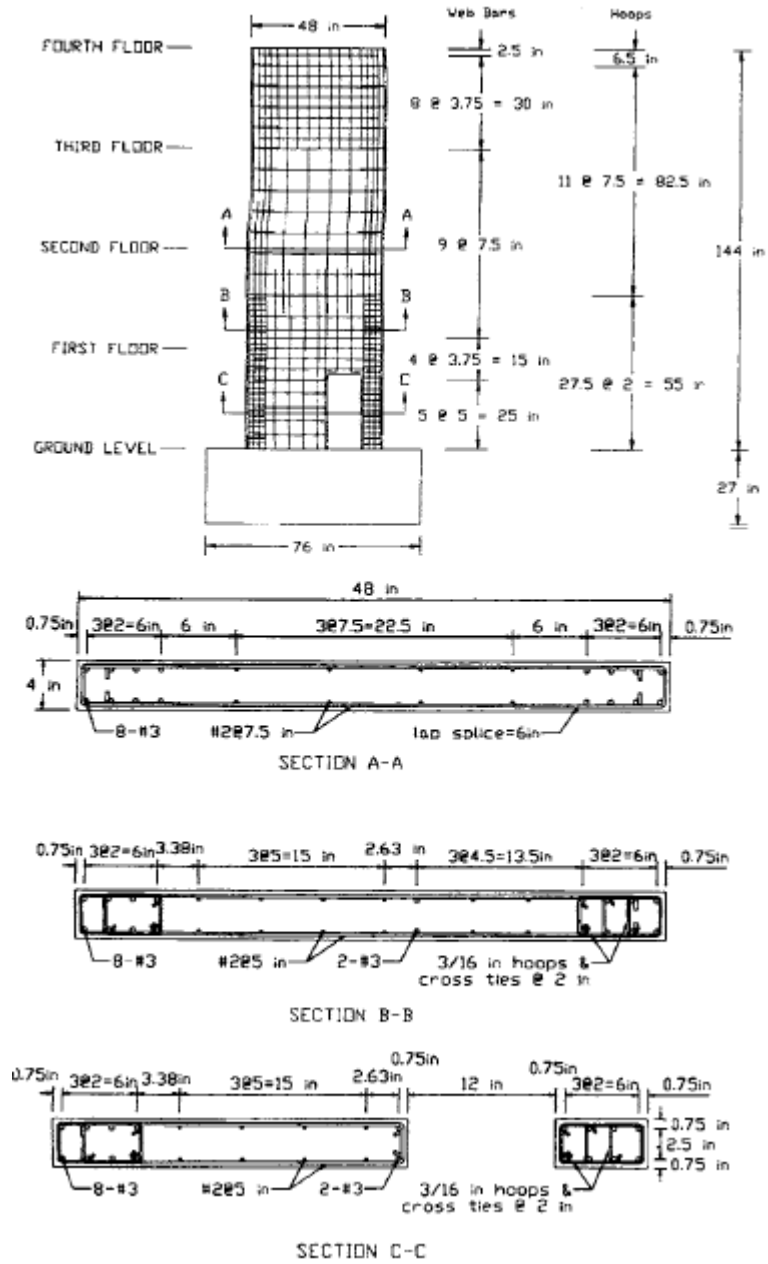
- [11]. POLANCO, P.2013. “Estudio experimental de Elementos de Borde de Muro”. Memoria para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- [12]. ROJAS B., F., “Development of a nonlinear quadrilateral layered membrane element with drilling degrees 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.
- [13]. SAATCIOGLU, M. & RAZVI, S.R. 1992, “Strength and Ductility of Confined Concrete”, Journal of Structural Engineering; ASCE, Vol. 118, No. 6, pp. 1590-1607, 1992.
- [14]. SHUI, K.N. 1981, “Earthquake Resistant Structural Walls – Tests of Walls With and Without Openings”, No. PCA R/D 1679, Construction Technology Laboratories.
- [15]. 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.
- [16]. 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.
- [17]. WALLACE, J.W. (1994), "New Methodology For Seismic Design of RC Shear Walls," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 3, March 1994.
- [18]. YAÑEZ, 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.

## Anexos.

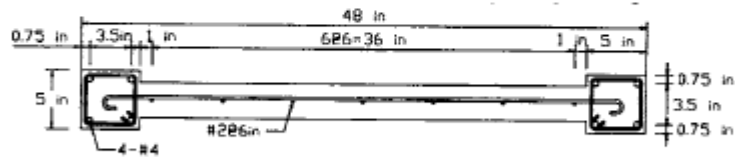
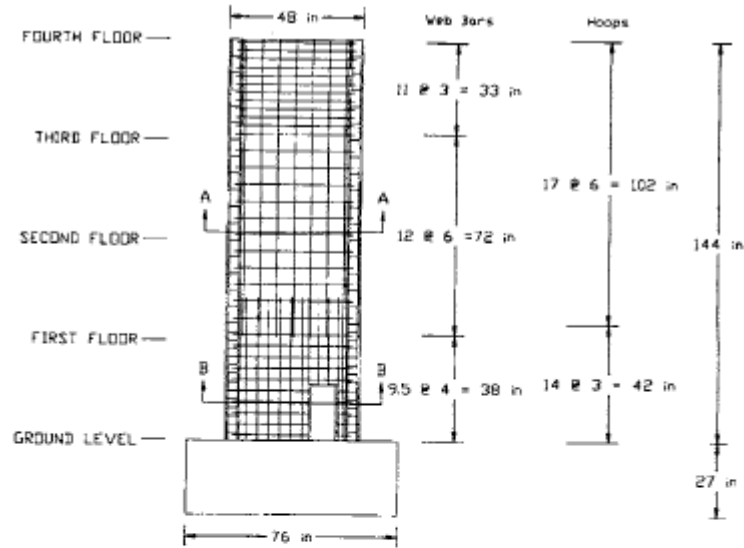
**Anexo A- 1: Comparación entre muro del edificio Almendral y los muros con aberturas realizados.**

	<b>Almendral Building</b>	<b>Specimen</b>
<b>X-Sectional Shape</b>	U Shaped	Barbell Shaped
<b>Height</b>	60.2 m	140 in.
<b>Wall Length</b>	10.0 m	48 in.
<b>Wall Aspect Ratio</b>	6.0	2.9
<b>Story Height</b>	2.55 m	28 in.
<b>Story Aspect Ratio</b>	0.25	0.58
<b>Web Reinf. Ratio (Hor)</b>	0.004 to 0.005	0.003
<b>Web Reinf. Ratio (Ver)</b>	0.002 to 0.003	0.003
<b>Boundary Element Reinf. Ratio (Longit)</b>	0.08 to 0.12	0.03
<b>Boundary Element Reinf. Ratio (Trans)</b>	0.0	0.004
<b>(Opening/Wall) Area</b>	7.55%	13.4%
<b>Lintel Beam Depth</b>	0.45 m	8 in.
<b>Angle Between Corners</b>	32 deg.	32 deg., 45 deg., 62 deg.

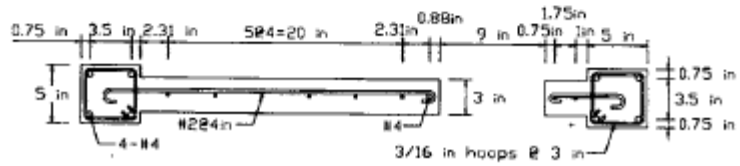
Anexo A- 2: Elevación y secciones transversales espécimen RW3-O



Anexo A- 3: Elevación y secciones transversales espécimen BW1-O

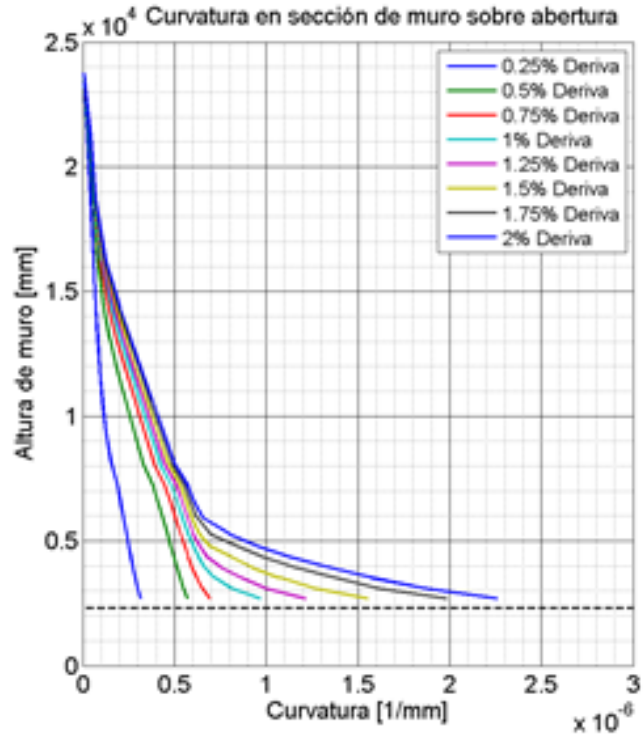


SECTION A-A

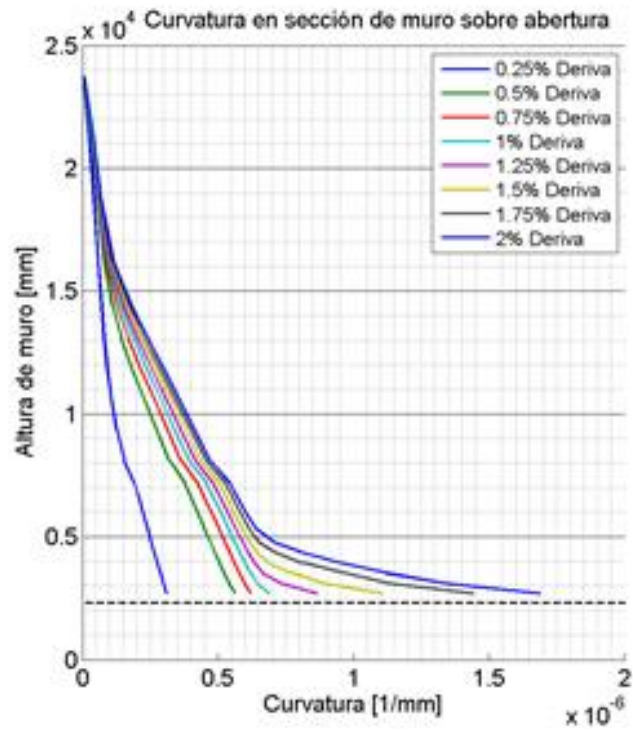


SECTION B-B

Anexo A- 4: Curvatura sobre la abertura caso C1\_20% con cuantía débil (0.3125%).

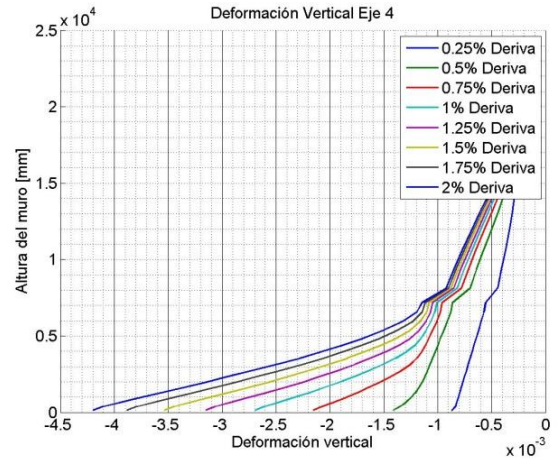
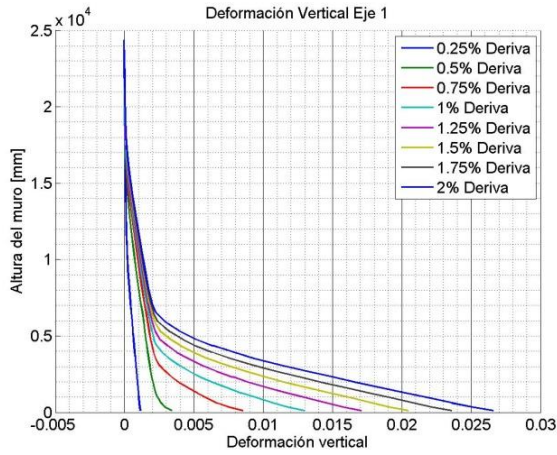


Anexo A- 5: Curvatura sobre la abertura caso C1\_40% con cuantía débil (0.3125%).

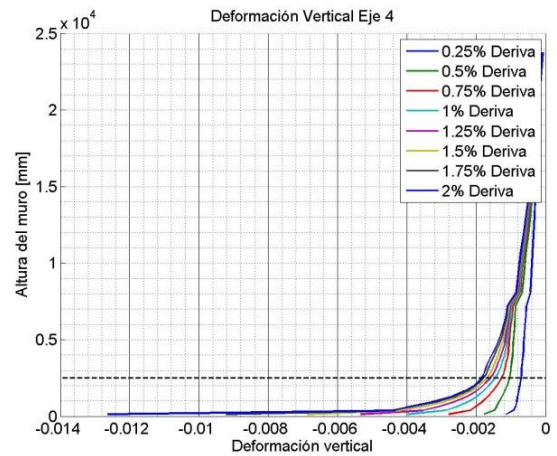
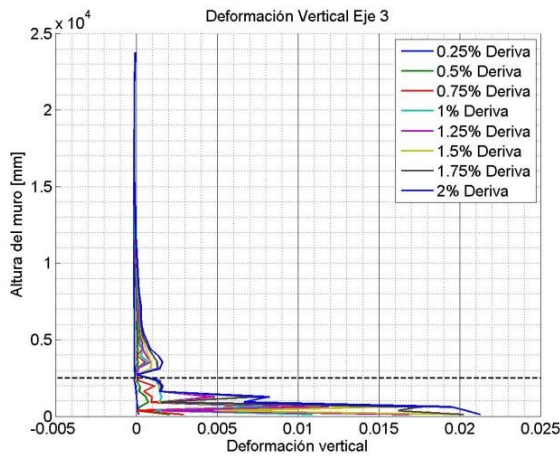
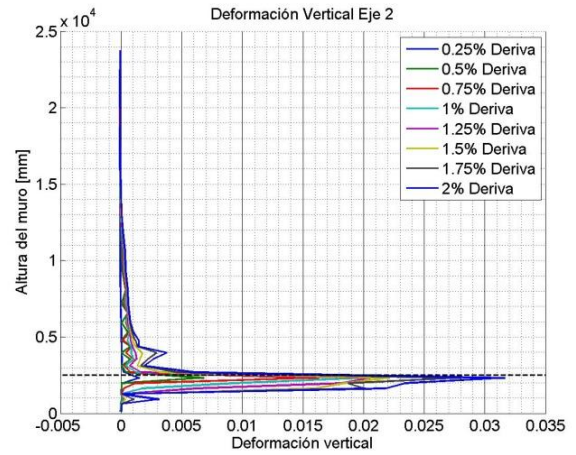
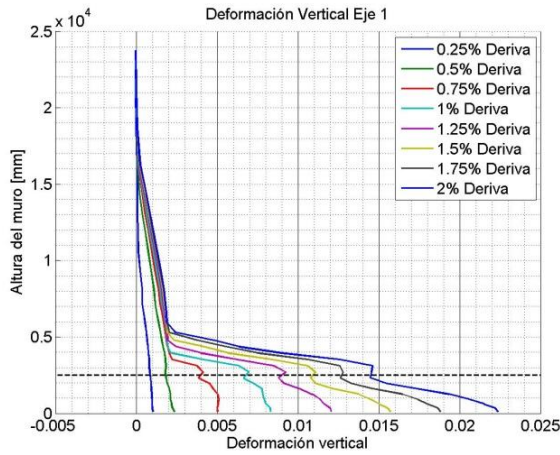




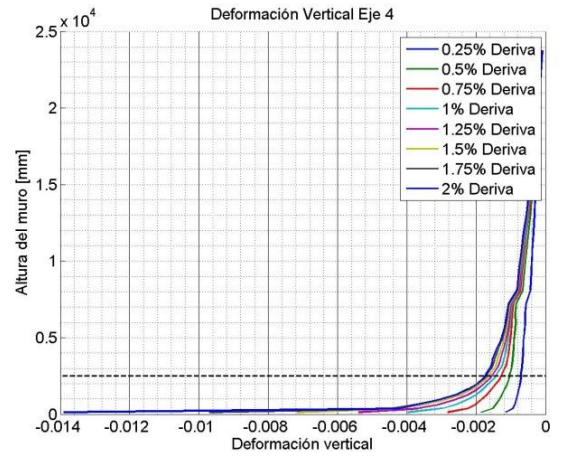
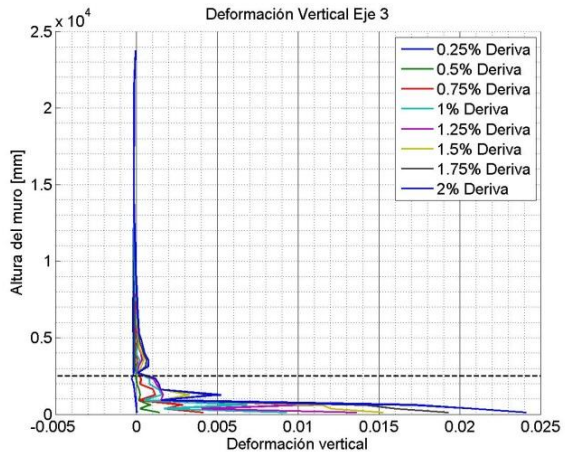
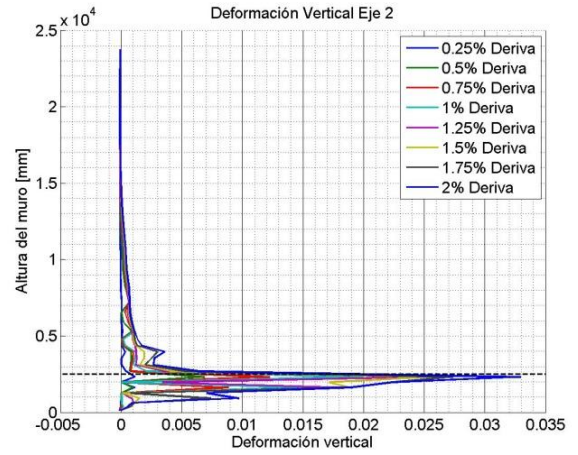
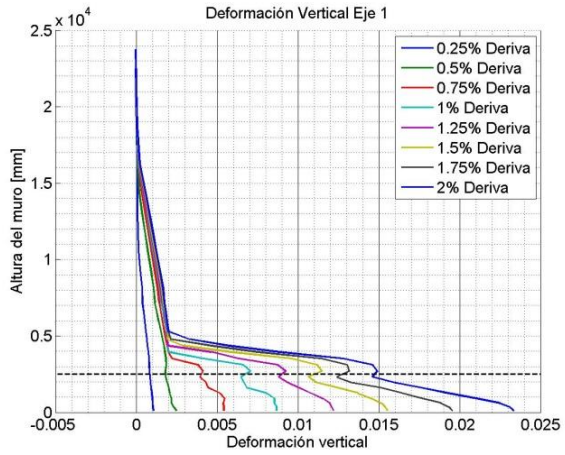
**Anexo A- 6: Deformación Vertical Ejes longitudinales Caso base RA=5, Modelo B.**



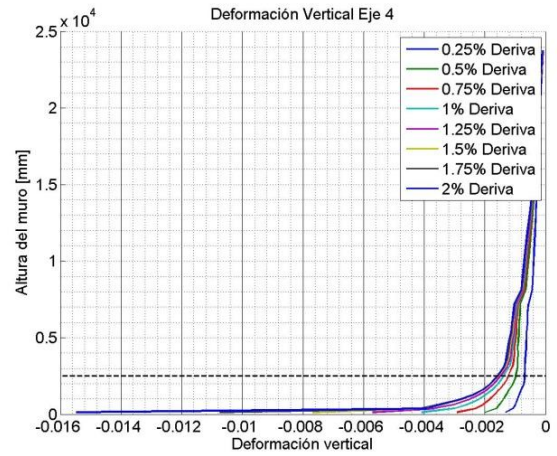
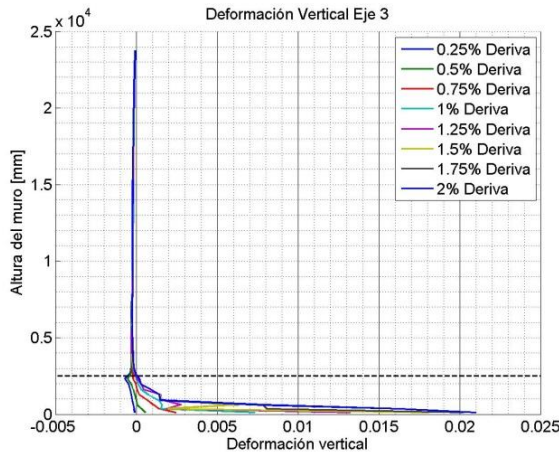
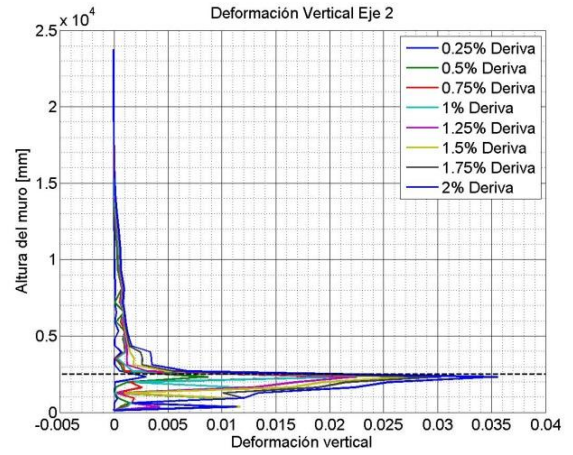
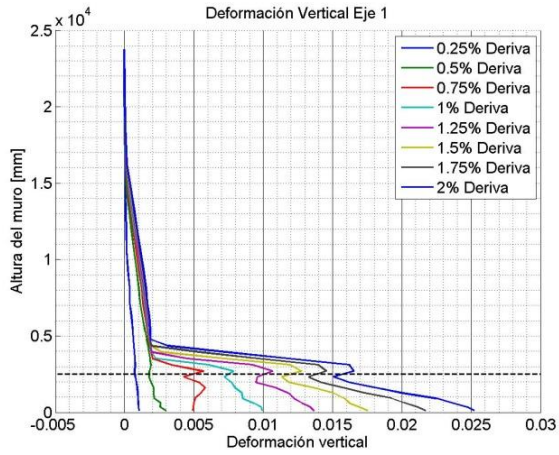
**Anexo A- 7: Deformación Vertical Ejes longitudinales Caso C1\_10%, RA=5, Modelo SV.**



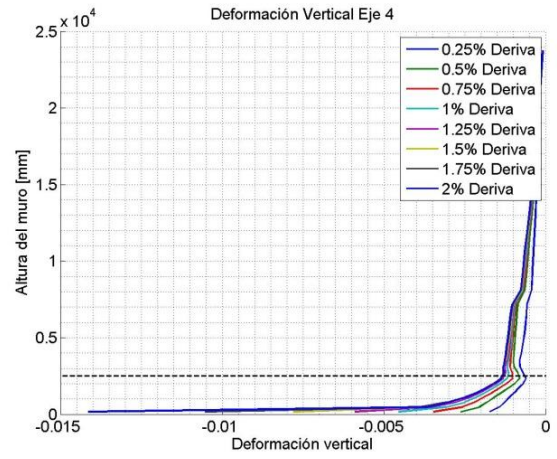
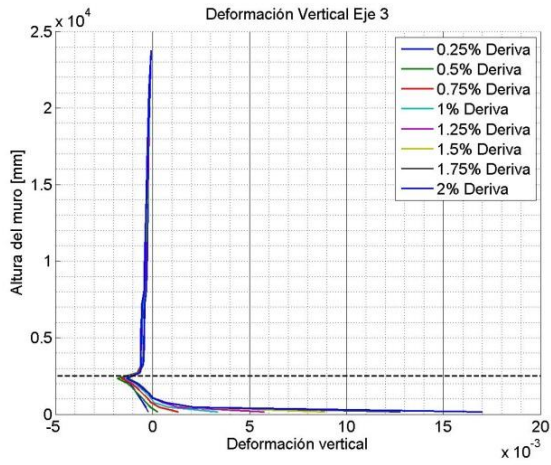
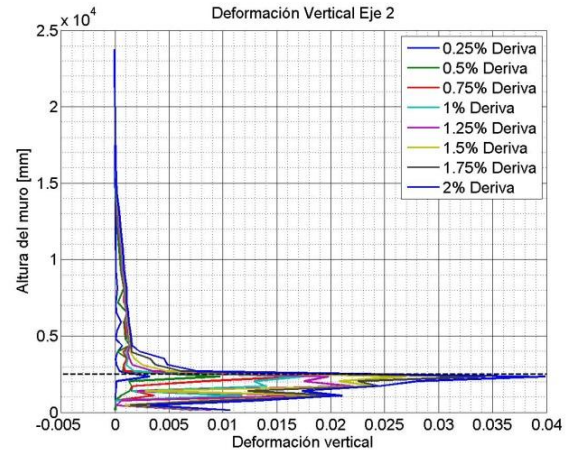
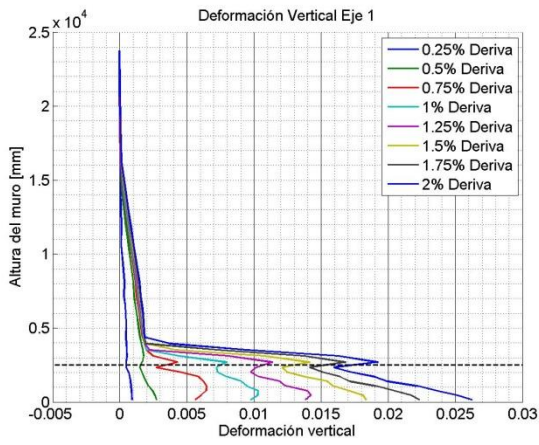
**Anexo A- 8: Deformación Vertical Ejes longitudinales Caso C1\_20%, RA=5, Modelo SV.**



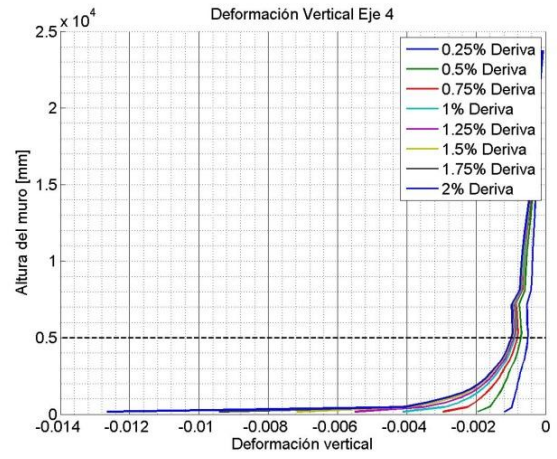
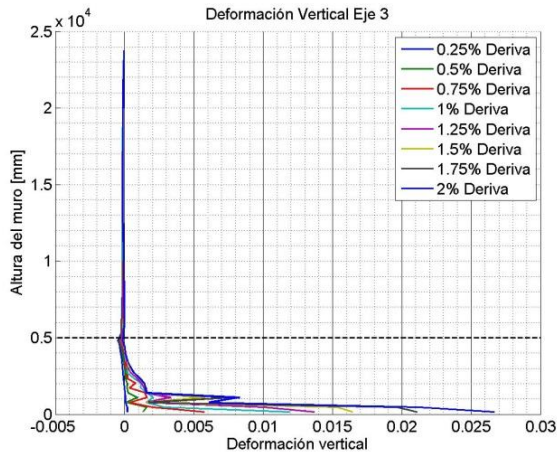
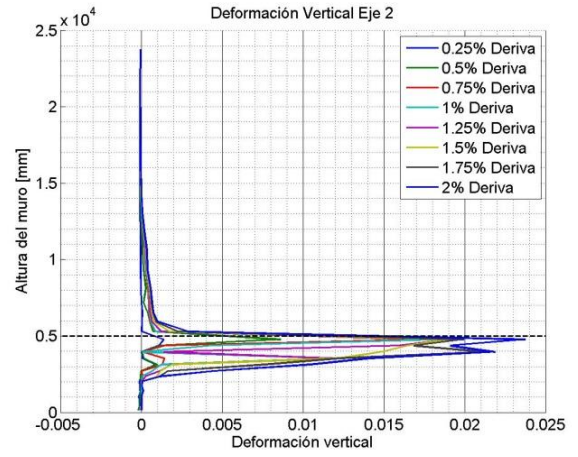
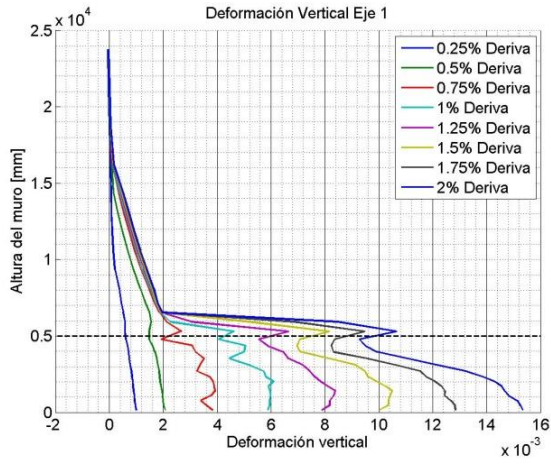
### Anexo A- 9: Deformación Vertical Ejes longitudinales Caso C1\_40%, RA=5, Modelo SV.



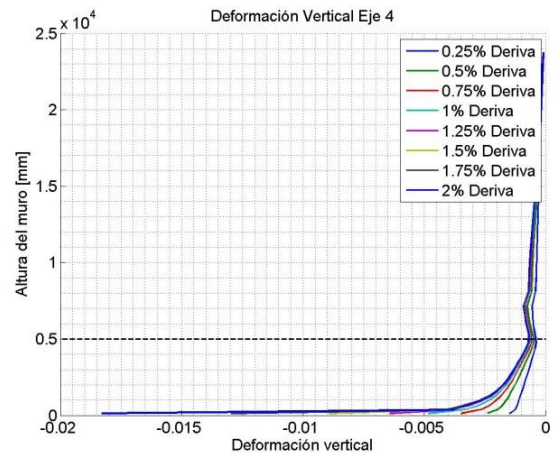
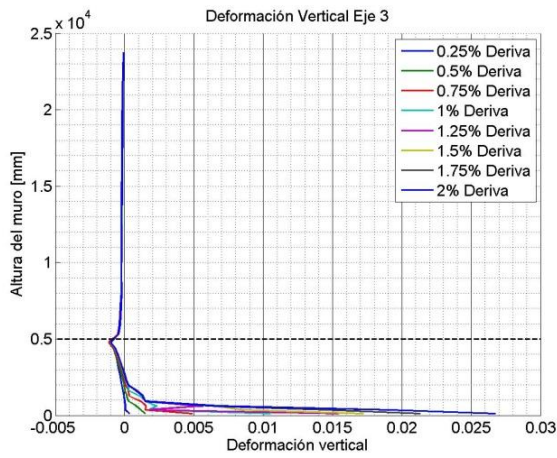
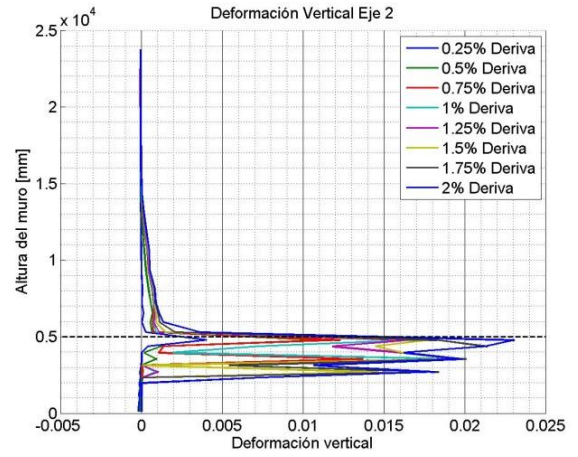
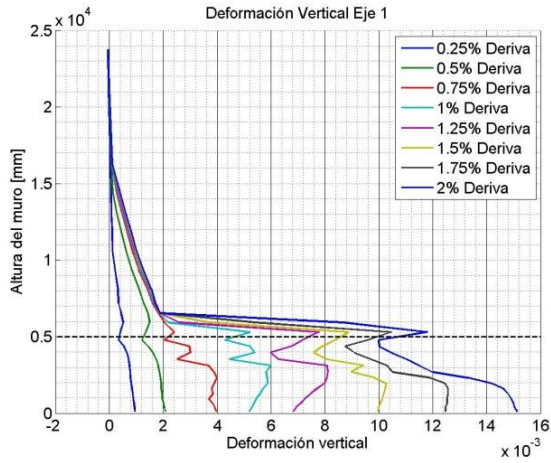
**Anexo A- 10: Deformación Vertical Ejes longitudinales Caso C1\_60%, RA=5, Modelo SV.**



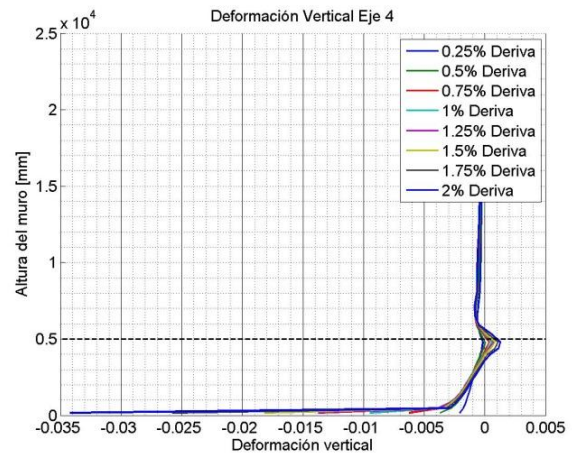
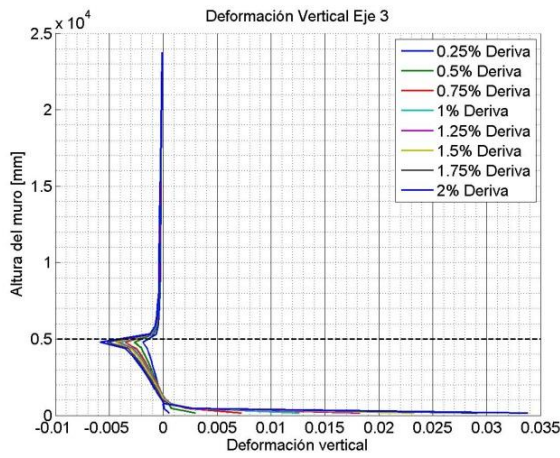
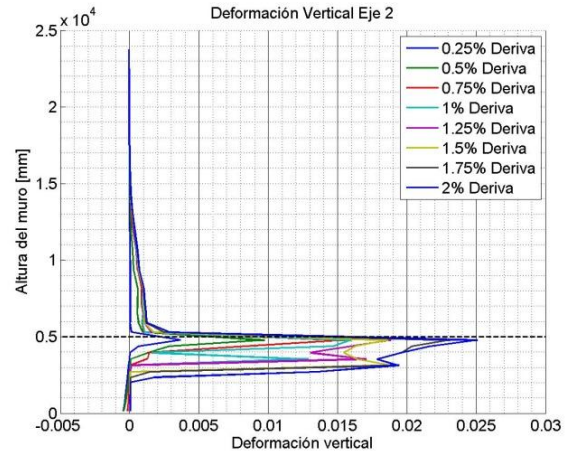
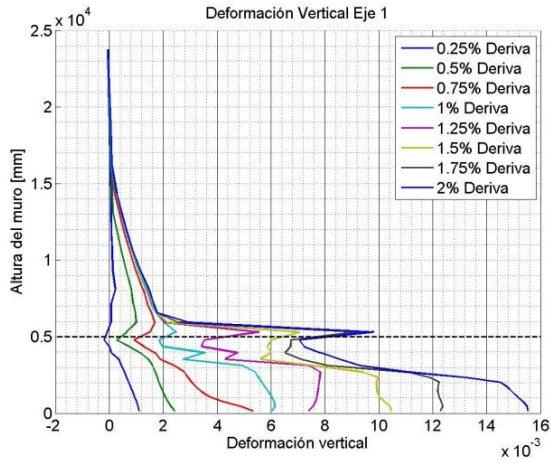
**Anexo A- 11: Deformación Vertical Ejes longitudinales Caso C2\_20%, RA=5, Modelo SV.**



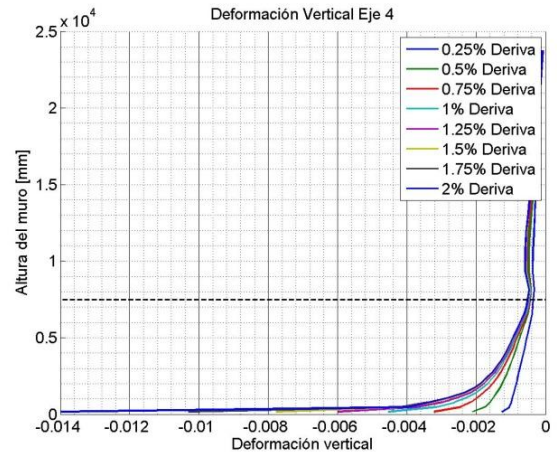
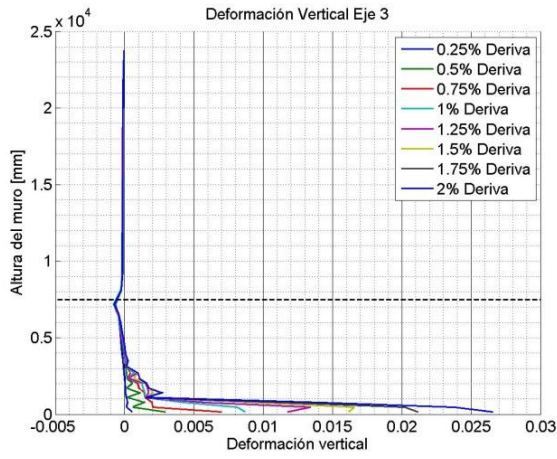
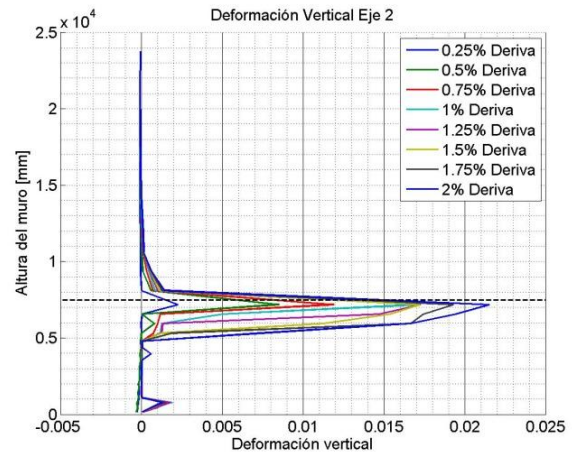
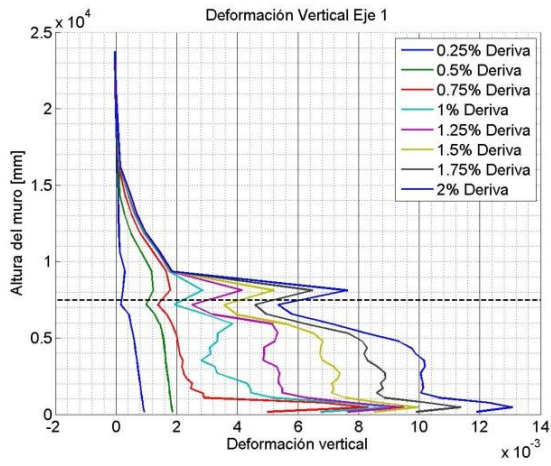
**Anexo A- 12: Deformación Vertical Ejes longitudinales Caso C2\_40%, RA=5, Modelo SV.**



**Anexo A- 13: Deformación Vertical Ejes longitudinales Caso C2\_60%, RA=5, Modelo SV.**

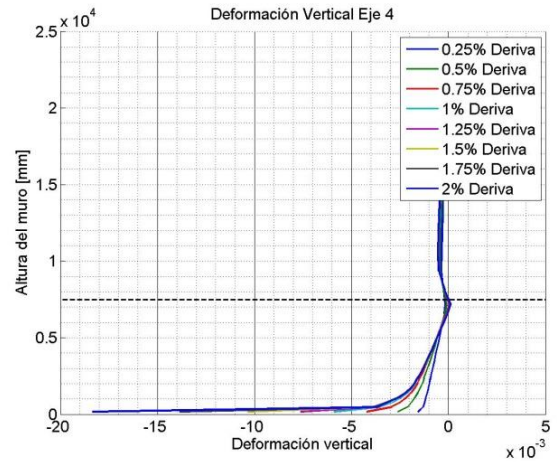
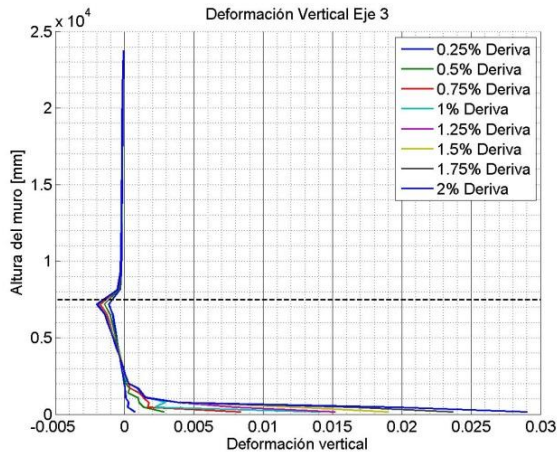
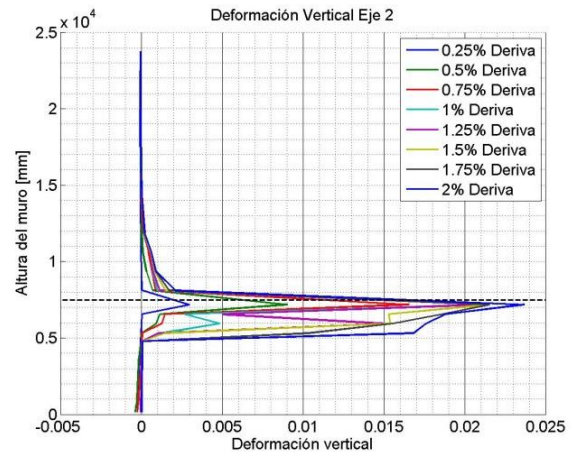
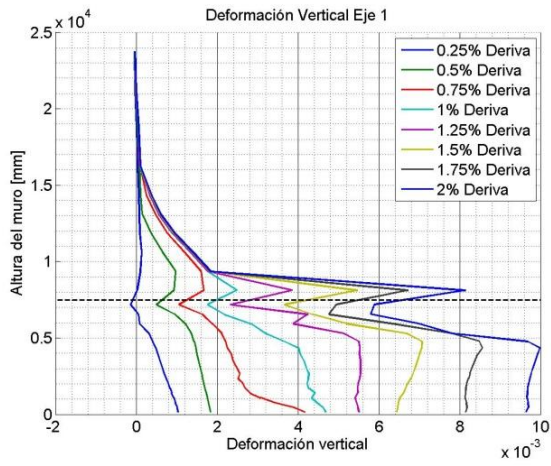


**Anexo A- 14: Deformación Vertical Ejes longitudinales Caso C3\_20%, RA=5, Modelo SV.**

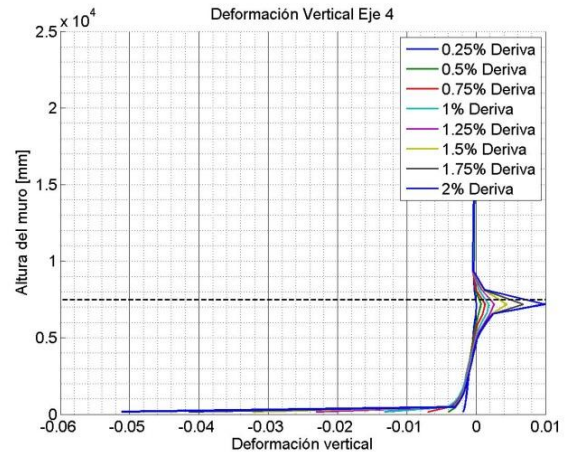
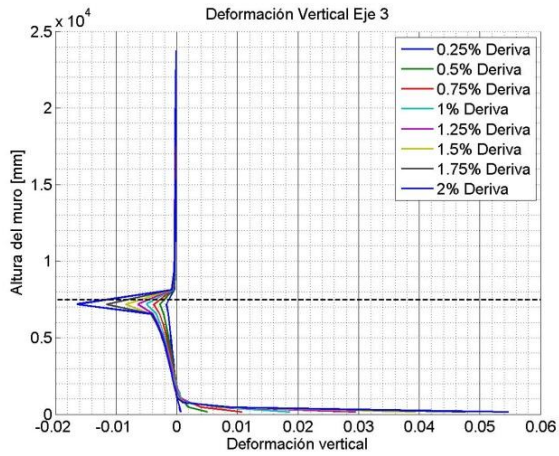
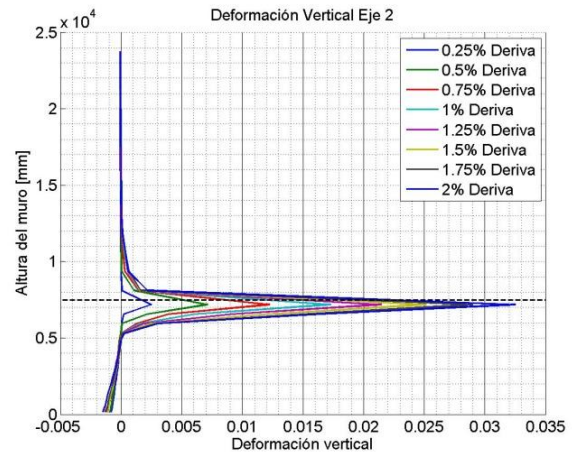
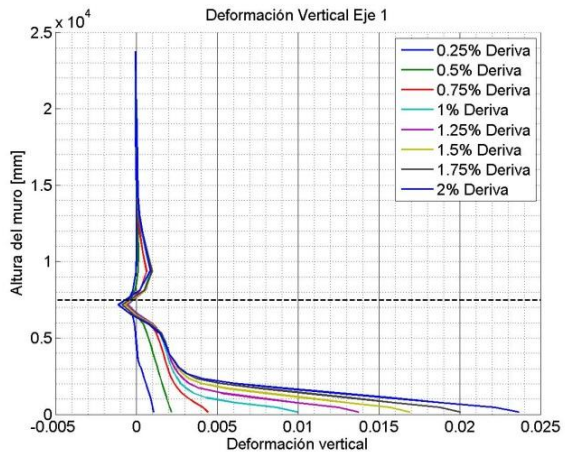




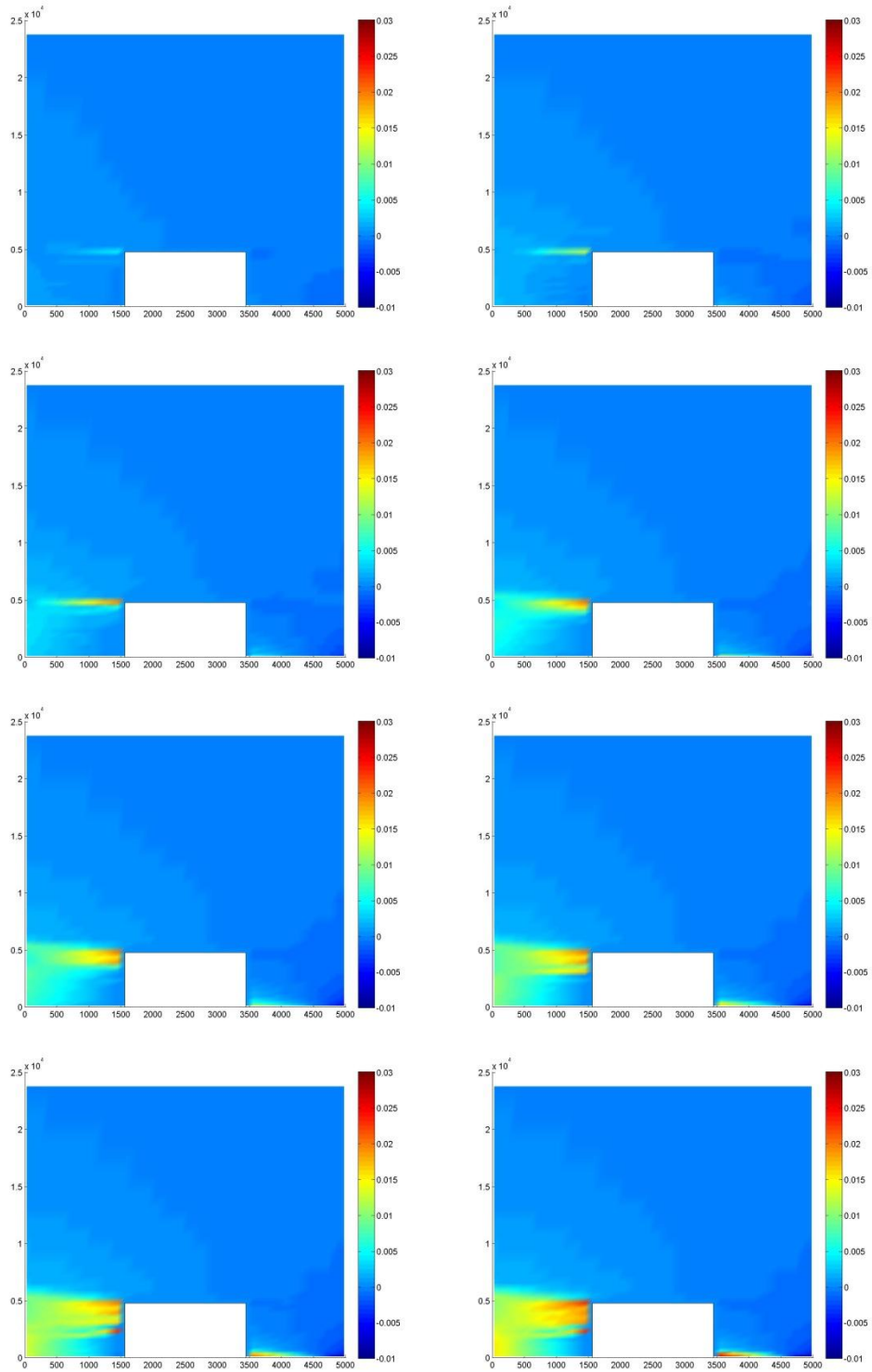
**Anexo A- 15: Deformación Vertical Ejes longitudinales Caso C3\_40%, RA=5, Modelo SV.**



### Anexo A- 16: Deformación Vertical Ejes longitudinales Caso C3\_60%, RA=5, Modelo SV.



**Anexo A- 17: Secuencia de deformaciones para deriva de techo entre 0.25% y 2%. C2\_40%,  
Modelo SV.**



**Anexo A- 18: Secuencia de deformaciones para deriva de techo entre 0.25% y 2%. C2\_40%,  
Modelo CV.**

