



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

ANÁLISIS Y MODELACIÓN DE ENSAYOS DE MUROS CORTOS DE HORMIGÓN ARMADO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

GABRIEL ANDRÉS OPAZO DELGADO

SANTIAGO DE CHILE
2012



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

ANÁLISIS Y MODELACIÓN DE ENSAYOS DE MUROS CORTOS DE HORMIGÓN ARMADO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

GABRIEL ANDRÉS OPAZO DELGADO

PROFESOR GUÍA:

LEONARDO M. MASSONE SÁNCHEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

FERNANDO YÁÑEZ URIBE

AUGUSTO HOLMBERG FUENZALIDA

SANTIAGO DE CHILE

2012

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: GABRIEL OPAZO D.
FECHA: 27/01/2012
PROF. GUÍA: Sr. LEONARDO MASSONE S.

”ANÁLISIS Y MODELACIÓN DE ENSAYOS DE MUROS CORTOS DE HORMIGÓN ARMADO”

En el presente trabajo se valida un modelo de interacción flexión–corte, el cual es una modificación del modelo tradicional de fibras uniaxiales, agregándole un resorte de corte a cada fibra del elemento, de manera que considera elementos de hormigón tipo panel, con comportamiento biaxial, para obtener la interacción flexión–corte deseada. El modelo se aplica a muros cortos de hormigón armado, con relación de aspecto alto/ancho menor igual a uno, en voladizo, sujetos a cargas laterales en su plano, y con carga axial nula.

El objetivo principal de este trabajo consistió en validar la respuesta global, carga versus desplazamiento lateral superior, entregada por el modelo. Con este fin, se analizaron datos de la Universidad de Bogazici, Turquía, de siete ensayos realizados en muros cortos en voladizo y luego se procedió a la modelación de los mismos. Para ello, primero se caracterizaron los materiales usados en cada muro, y una vez definidas las leyes constitutivas fueron incorporadas a los modelos.

En general, los resultados obtenidos son coherentes con lo observado en los ensayos, mostrando cambios en la respuesta dependiendo de las propiedades de los materiales y las cuantías de armadura de los muros. En comparación a los resultados de los ensayos, la capacidad máxima obtenida con el modelo de interacción flexión–corte muestra un error promedio de 8,9%, e igual a 20% en el caso más desfavorable, y una desviación estándar de un 7,5% con respecto al total de casos.

Agradecimientos

Quiero agradecer principalmente a mi familia, mi padre, madre y hermanos, que me han brindado siempre su apoyo incondicional, cariño y paciencia.

También agradezco a mi profesor guía, por su paciencia y dedicación, y por brindarme la oportunidad de realizar esta memoria.

Índice

1. Introducción	8
1.1. Motivación	8
1.2. Objetivos	9
1.3. Metodología	9
1.4. Alcances por capítulo	10
1.4.1. Capítulo 1: Introducción	10
1.4.2. Capítulo 2: Descripción del modelo de interacción	10
1.4.3. Capítulo 3: Descripción del programa de ensayos	10
1.4.4. Capítulo 4: Resultados del programa experimental	10
1.4.5. Capítulo 5: Validación del modelo	10
1.4.6. Capítulo 6: Conclusiones	10
2. Descripción del modelo	11
2.1. Modelo de interacción	11
2.2. Modelación del acero de refuerzo	13
2.3. Modelación del hormigón	14
2.4. Modelación de resorte rotacional en la base	16
3. Descripción del programa de ensayos	19
3.1. Descripción general de los especímenes	21
3.2. Materiales	23
3.2.1. Acero de Refuerzo	23
3.2.2. Hormigón	26
3.3. Instrumentación	29
3.3.1. Cálculo de la expansión lateral y de las componentes de desplazamiento	30
4. Resultados del programa experimental	33
4.1. Observaciones experimentales y comportamiento de los especímenes	33
4.1.1. Espécimen S1	33
4.1.2. Espécimen S2, S3 y S6	35
4.1.3. Espécimen S4	41
4.1.4. Espécimen S5	42
4.1.5. Espécimen S7	44
4.2. Resultados carga versus desplazamiento	45
4.3. Componentes de desplazamiento	52
4.4. Expansión lateral	56

5. Validación del modelo	58
5.1. Comparación respuesta carga versus desplazamiento	59
5.2. Comparación de componentes de desplazamiento	65
5.3. Comparación de la expansión lateral	68
6. Conclusiones	79
Referencias	82
Anexo A	83
Anexo B	91
Anexo C	99
Anexo D	101
Anexo E	103

Índice de tablas

3.1. Resumen parámetros de las barras de acero	24
3.2. Capacidad del hormigón a compresión el día del ensayo	27
3.3. Propiedades de los especímenes	28
C.1. Detalle ciclos de desplazamiento	100
D.1. Equivalencia de nomenclatura	102

Índice de figuras

2.1. Modelo de interacción, elemento y panel (Massone, 2010)	12
2.2. Expansión lateral promedio	12
2.3. Panel de hormigón armado (Massone, 2010)	13
2.4. Modelo de muro en voladizo (Massone, 2010)	13
2.5. Modelo uniaxial del acero	14
2.6. Propiedades del hormigón, compresión (izq.) y tracción (der.)	16
2.7. Modelo de resorte rotacional, ajustado a análisis momento-curvatura	17
2.8. Rotación y deformación en la interfaz muro-pedestal	18
3.1. Disposición experimental (esquema)	20
3.2. Disposición experimental (Universidad de Bogazici)	20
3.3. Esquema de armadura y geometría de los especímenes	22

3.4. Sección transversal, espécimen S2 (típica)	22
3.5. Sección transversal, espécimen S3 (con ganchos en U)	22
3.6. Octavo espécimen (no ensayado)	23
3.7. Calibración del parámetro de endurecimiento, b	24
3.8. Barras de refuerzo, ensayos partida A	25
3.9. Barras de refuerzo, ensayos partida B	26
3.10. Componentes de desplazamiento bajo carga lateral	29
3.11. Instrumentación de los especímenes	30
3.12. Desplazamiento de flexión	30
3.13. Deformación por corte	31
3.14. Disposición de extensómetros en armadura de refuerzo, espécimen S2 (típico)	32
4.1. Especimen S1, fisuras	34
4.2. Especimen S1, falla por tracción diagonal (Deriva 1,40 %)	34
4.3. Primera fisura	36
4.4. Fisuras	37
4.5. Fisuras, estado más avanzado	38
4.6. Falla por compresión en la base	39
4.7. Falla por compresión en la base, nivel mayor de daño	40
4.8. Especimen S4, fisuras	41
4.9. Especimen S4, falla por compresión en la base	42
4.10. Especimen S5, fisuras	43
4.11. Especimen S5, falla por flexo-compresión	44
4.12. Especimen S7, fisuras y grieta en la interfaz muro-pedestal inferior	45
4.13. Especimen S7, falla por deslizamiento de la interfaz muro-pedestal inferior	45
4.14. Especimen S1, carga-desplazamiento	46
4.15. Especimen S2, carga-desplazamiento	46
4.16. Especimen S3, carga-desplazamiento	47
4.17. Especimen S4, carga-desplazamiento	47
4.18. Especimen S5, carga-desplazamiento	48
4.19. Especimen S6, carga-desplazamiento	48
4.20. Especimen S7, carga-desplazamiento	49
4.21. Resultados experimentales, comparación de cargas máximas	50
4.22. Resultados experimentales, deriva en $P_{máx}$ y deriva en $0,9P_{máx}$	51
4.23. Resultados experimentales, capacidad residual	52
4.24. Especimen S1, componentes de desplazamiento	53
4.25. Especimen S2, componentes de desplazamiento	53
4.26. Especimen S3, componentes de desplazamiento	54

4.27. Espécimen S5, componentes de desplazamiento	54
4.28. Espécimen S6, componentes de desplazamiento	55
4.29. Espécimen S4, componentes de desplazamiento	55
4.30. Espécimen S7, componentes de desplazamiento	56
4.31. Expansión lateral, 7 especímenes	57
5.1. Espécimen S1, gráfico carga versus desplazamiento corregido	59
5.2. Espécimen S2, gráfico carga versus desplazamiento corregido	60
5.3. Espécimen S3, gráfico carga versus desplazamiento corregido	60
5.4. Espécimen S4, gráfico carga versus desplazamiento corregido (resorte rotacional)	61
5.5. Espécimen S5, gráfico carga versus desplazamiento corregido	61
5.6. Espécimen S6, gráfico carga versus desplazamiento corregido	62
5.7. Espécimen S7, gráfico carga versus desplazamiento corregido (rótula plástica) . .	62
5.8. Comparación cargas máximas	63
5.9. Comparación de desplazamientos a la carga máxima	63
5.10. Comparación de deriva a la carga máxima	64
5.11. Comparación de desplazamientos a 90 % de la carga máxima	64
5.12. Comparación de deriva a 90 % de la carga máxima	65
5.13. Espécimen S1, comparación de componentes de desplazamiento	65
5.14. Espécimen S2, comparación de componentes de desplazamiento	66
5.15. Espécimen S3, comparación de componentes de desplazamiento	66
5.16. Espécimen S4, comparación de componentes de desplazamiento (resorte rotacional)	67
5.17. Espécimen S5, comparación de componentes de desplazamiento	67
5.18. Espécimen S6, comparación de componentes de desplazamiento	68
5.19. Espécimen S7, comparación de componentes de desplazamiento (resorte rotacional)	68
5.20. Espécimen S1, expansión lateral	69
5.21. Espécimen S2, expansión lateral	70
5.22. Espécimen S3, expansión lateral	71
5.23. Espécimen S4, expansión lateral (deriva corregida con resorte rotacional)	72
5.24. Espécimen S5, expansión lateral	73
5.25. Espécimen S6, expansión lateral	74
5.26. Espécimen S7, expansión lateral (deriva corregida con resorte rotacional)	75
5.27. Espécimen S1, gráfico $\epsilon_{x,máx}$ versus deriva	76
5.28. Especímenes S2, S3 y S6, gráfico $\epsilon_{x,máx}$ versus deriva	76
5.29. Especímenes S4, gráfico $\epsilon_{x,máx}$ versus deriva (resorte rotacional)	77
5.30. Especímenes S5, gráfico $\epsilon_{x,máx}$ versus deriva	77
5.31. Especímenes S7, gráfico $\epsilon_{x,máx}$ versus deriva (resorte rotacional)	78
A.1. Armadura espécimen S1	84

A.2. Armadura espécimen S2	85
A.3. Armadura espécimen S3	86
A.4. Armadura espécimen S4	87
A.5. Armadura espécimen S5	88
A.6. Armadura espécimen S6	89
A.7. Armadura espécimen S7	90
B.1. Pedestal espécimen S1	92
B.2. Pedestal espécimen S2	93
B.3. Pedestal espécimen S3	94
B.4. Pedestal espécimen S4	95
B.5. Pedestal espécimen S5	96
B.6. Pedestal espécimen S6	97
B.7. Pedestal espécimen S7	98
E.1. Especimen S4, carga vs. desp. corregido	104
E.2. Especimen S5, carga vs. desp. corregido	104
E.3. Especimen S7, carga vs. desp. corregido	105

1. Introducción

1.1. Motivación

Los muros de hormigón armado son usados habitualmente como elementos estructurales resistentes. Los métodos actuales de diseño, como el ACI-318, promueven un diseño sísmico que previene la falla por corte, considerada frágil, en favor de obtener un comportamiento más dúctil, como la falla por flexión .

En la práctica habitual de diseño estructural, es común separar el comportamiento de flexión y de corte, e incluso despreciar el efecto de éste último. Sin embargo, la experiencia experimental revela que el efecto del corte no siempre es despreciable, incluso en muros relativamente esbeltos, controlados por la falla en flexión (Massone & Wallace, 2004), debido a la interacción flexión-corte, lo que resulta en deformaciones de corte no lineales que contribuyen en el desplazamiento lateral del muro en su plano. En este escenario, conocer el comportamiento y la capacidad de los muros es importante, tanto para promover el comportamiento dúctil, como para estimar la rigidez del elemento y así su interacción con los demás elementos resistentes.

En la presente memoria se hace uso de un modelo de interacción flexión-corte (Massone *et al.*, 2006), para modelar muros cortos de hormigón armado sometidos a cargas cíclicas en el plano, y obtener una respuesta global (carga vs. desplazamiento lateral superior), que es comparada con los resultados de una batería de siete ensayos en muros cortos en voladizo realizados específicamente para tal efecto (Terzioglu, 2011). El modelo ya ha mostrado una respuesta razonable al ser contrastado con datos de ensayos en muros doblemente empotrados sometidos a cargas cíclicas en el plano (Massone *et al.*, 2009), por lo que en esta memoria se busca corroborar la respuesta del modelo con los datos obtenidos de ensayos de muros en voladizo.

El modelo de interacción flexión-corte consiste en una modificación del modelo tradicional de elementos con fibras uniaxiales agregándole un resorte de corte a cada fibra del elemento. Con esto, cada fibra es tratada como un panel con comportamiento bidimensional, sujeto a tensiones uniformes en su plano, normales y de corte, lo que resulta en la interacción flexión-corte deseada (Massone *et al.*, 2006). Complementario al modelo, se hace uso de una expresión calibrada mediante un modelo de elementos finitos convencional 2D (Massone, 2010), para estimar la expansión lateral en el plano del muro, que varía en la altura y según el desplazamiento lateral del mismo, y es necesaria para completar el campo de deformaciones del modelo de interacción flexión-corte.

Se cuenta con los resultados experimentales de ensayos realizados en la Universidad de Bo-

gazici, Turquía, en el marco del proyecto Fondecyt Iniciación 2008, No.11080010. Los datos corresponden a ensayos de 7 muros cortos en voladizo, con relaciones de aspecto (alto/ancho) 1/3, 1/2 y 1, sometidos a cargas cíclicas en el plano, correspondientes a las etapas 1 y 2 del proyecto, de un total de 3 etapas, estando aún la tercera etapa en curso al momento de escribir la presente memoria. Cada muro probeta cuenta con la instrumentación necesaria para medir los desplazamientos debido al corte y a la flexión, así como el desplazamiento lateral superior de los muros, y la expansión lateral.

1.2. Objetivos

El objetivo principal del trabajo es validar la respuesta global (carga vs. desplazamiento lateral superior) del modelo de interacción flexión-corte en muros cortos de hormigón armado en voladizo, sometidos a cargas cíclicas en el plano.

También se espera validar la expresión analítica calibrada usada para estimar la expansión lateral en el plano del muro.

Finalmente, se comparará la distribución de las componentes de flexión y corte en el desplazamiento lateral superior del muro, obtenidas de los ensayos, con las que predice el modelo.

1.3. Metodología

Para lograr el objetivo principal, se cuenta con los resultados experimentales de ensayos realizados en la Universidad de Bogazici, Turquía. Una vez analizados los datos de los ensayos, se pasa a la modelación de los muros con el modelo de interacción flexión-corte, el cual está implementado en el software de código abierto Opensees (Mazzoni *et al.*, 2005). Se modela cada muro según sus dimensiones, y las propiedades de los materiales.

Para validar la expresión analítica calibrada usada para estimar la expansión lateral de los muros, se compara ésta con los datos obtenidos de los ensayos, los cuales fueron realizados con la instrumentación necesaria, de manera que esta información se encuentra disponible.

Para comparar las componentes de flexión y corte, se tienen los resultados de los ensayos, los cuales se contrastan con los resultados de los modelos.

1.4. Alcances por capítulo

1.4.1. Capítulo 1: Introducción

Se introduce la motivación del presente trabajo, los objetivos, y la metodología usada.

1.4.2. Capítulo 2: Descripción del modelo de interacción

Se presenta una descripción del modelo de interacción, y de las hipótesis que usa.

1.4.3. Capítulo 3: Descripción del programa de ensayos

Se presenta una descripción detallada de los ensayos con cuyos resultados se está trabajando, geometría, cuantías de armadura, ciclos de carga, etc. y su instrumentación.

1.4.4. Capítulo 4: Resultados del programa experimental

Se muestran los resultados de los análisis hechos a los datos de los ensayos.

1.4.5. Capítulo 5: Validación del modelo

Se contrastan los resultados del modelo de interacción flexión–corte con los ensayos.

1.4.6. Capítulo 6: Conclusiones

Se presentan las conclusiones.

2. Descripción del modelo

2.1. Modelo de interacción

El modelo de interacción flexión-corte es una modificación del modelo tradicional de elementos con fibras uniaxiales. A cada fibra se le agrega un resorte de corte, con esto puede ser tratada como un panel con comportamiento bidimensional. Se asume que, en cada elemento, las secciones planas permanecen planas después de la deformación (hipótesis de Bernoulli) y que la distribución de corte es uniforme, mientras que la deformación por flexión se concentra a una altura $c \cdot h$, donde h es la altura del elemento (Figura 2.1). El valor de c se asume igual a 0,5 lo que equivale a asumir una distribución uniforme de la curvatura en la altura del elemento considerado. Esto permite caracterizar para cada panel, fijando los 6 grados de libertad posibles para un elemento, las componentes ϵ_y y γ_{yx} (γ_{xy}) del campo de deformaciones. Para obtener la componente que falta, ϵ_x , puede usarse cualquiera de las siguientes metodologías. La primera manera consiste en iterar sobre ϵ_x hasta alcanzar el equilibrio horizontal para un σ_x fijo (siendo σ_x la componente horizontal del campo de tensiones), el que puede ser asumido como 0, lo que sería consistente con las condiciones de borde del muro. Otra manera es asumir que $\epsilon_x = 0$, lo que es consistente con las condiciones impuestas por los pedestales sobre el muro, ya que el pedestal al ser de mayor tamaño, contiene la expansión lateral del muro en sus cercanías. Estudios realizados muestran que ninguna de las 2 metodologías expuestas es capaz de reproducir la respuesta de los muros de manera confiable (Massone *et al.*, 2006, 2009), es por esa razón que Massone (2010) entrega una expresión calibrada a partir de modelos de elementos finitos convencionales 2D, para estimar la expansión lateral promedio, asumiendo un valor constante en la sección transversal del muro en voladizo bajo cargas laterales. La expresión toma la forma de la ecuación 2.1, para el caso de muros en voladizo, donde la máxima deformación lateral depende de la cuantía de armadura horizontal del muro (ρ_h), y de la deriva (δ), definida como el desplazamiento lateral superior del muro dividido por la altura del mismo. La expresión impone la máxima deformación lateral a una altura $0,38h_w$, medida desde la base del muro, donde el momento es máximo, siendo h_w la altura total del muro.

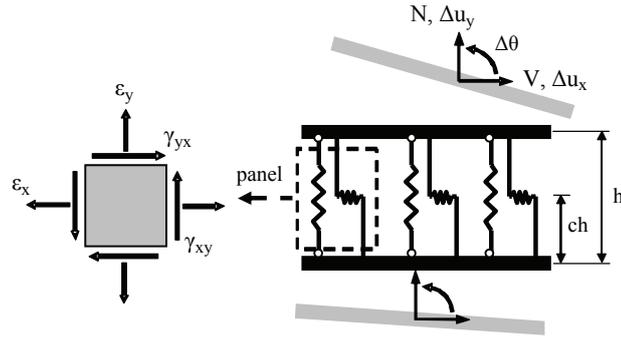


Figura 2.1: Modelo de interacción, elemento y panel (Massone, 2010)

$$\epsilon_{x,m\acute{a}x} = 0,0055(100\rho_h + 0,25)^{-0,44} \cdot (100\delta)^{1,4}$$

$$\frac{\epsilon_x(y)}{\epsilon_{x,m\acute{a}x}} = \begin{cases} \sin^{0,75} \left(\frac{y\pi}{0,76h_w} \right) & \text{si } 0 \leq y \leq 0,38h_w \\ \sin^{0,75} \left(\frac{(y + 0,24h_w)\pi}{1,24h_w} \right) & \text{si } 0,38h_w < y \leq h_w \end{cases} \quad (2.1)$$

donde:

h_w : Altura del muro

ρ_h : Cuantía de armadura horizontal del muro

δ : Deriva (desplazamiento lateral superior/altura)

$\epsilon_{x,m\acute{a}x}$: Máxima deformaci3n del muro

Las ecuaciones 2.1, permiten definir un perfil de deformaciones, según el nivel de la deriva del muro en voladizo (Figura 2.2).

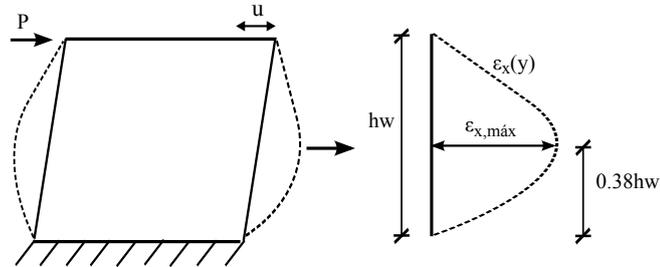


Figura 2.2: Expansi3n lateral promedio

Una vez completado el campo de deformaciones, en cada panel se aplica la ley constitutiva uniaxial del hormigón en la dirección de las tensiones principales, asumiendo que las direcciones principales de la deformación coinciden con las de la tensión. Para el acero, en cambio, se asume una ley constitutiva uniaxial en el sentido longitudinal de las barras. Aplicando el equilibrio, se recalculan las tensiones en las direcciones originales x e y en cada panel (Massone, 2010). Integrando sobre todos los elementos, se obtiene el estado de cargas, y de no ser el deseado, es necesario iterar sobre todo el muro (Figura 2.3).

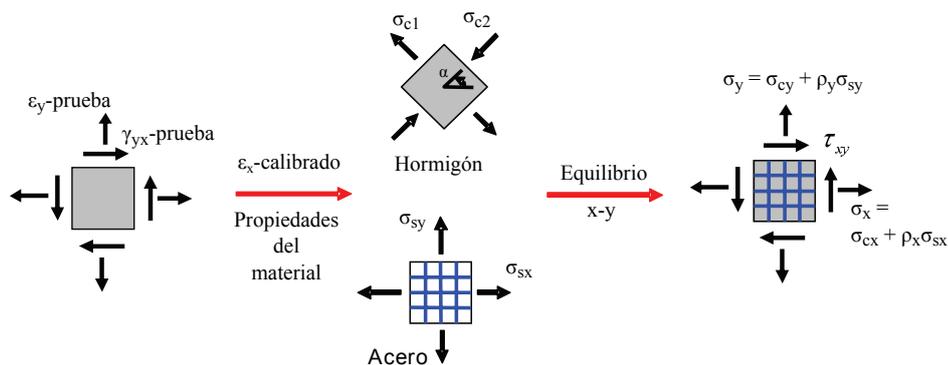


Figura 2.3: Panel de hormigón armado (Massone, 2010)

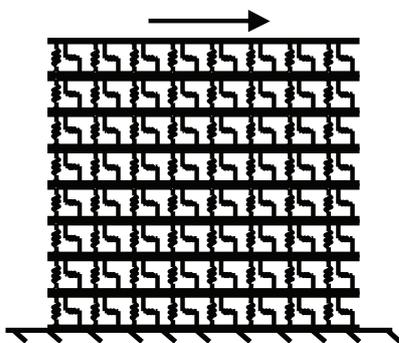


Figura 2.4: Modelo de muro en voladizo (Massone, 2010)

2.2. Modelación del acero de refuerzo

Para modelar el comportamiento del acero de refuerzo, se implementa el conocido modelo uniaxial de Menegotto y Pinto (1973). El modelo consiste en una curva — cuya curvatura depende del parámetro R — que tiende asintóticamente a 2 tramos rectos (Figura 2.5). El primer tramo recto tiene una pendiente E_s (Módulo de Young del acero) y el segundo tramo recto $E_p = bE_s$, donde b representa el endurecimiento del acero después de la fluencia. Siguiendo las recomendaciones propuestas por Belarbi & Hsu (1994), y usadas por Massone *et al.* (2006), la

tensión y deformación de fluencia efectiva para barras embebidas en hormigón (la intersección de la asíntota elástica y la de fluencia, f_n en la figura 2.5) es aproximadamente un 91 % de la tensión y deformación de fluencia de barras aisladas. El parámetro R se define según la ecuación 2.2 (Belarbi & Hsu, 1994), donde f_{cr} es la tensión de fisuración del hormigón, f_y la tensión de fluencia de la armadura, ρ es la cuantía de armadura en la dirección de la carga en el elemento de hormigón, y R queda limitado a un valor máximo de 25, el cual permite representar, para cualquier efecto práctico, una esquina aguda entre las dos asíntotas.

$$R = \frac{1}{9B - 0,2} \leq 25 \quad (2.2)$$

$$B = \frac{1}{\rho} \left(\frac{f_{cr}}{f_y} \right)^{1,5}$$

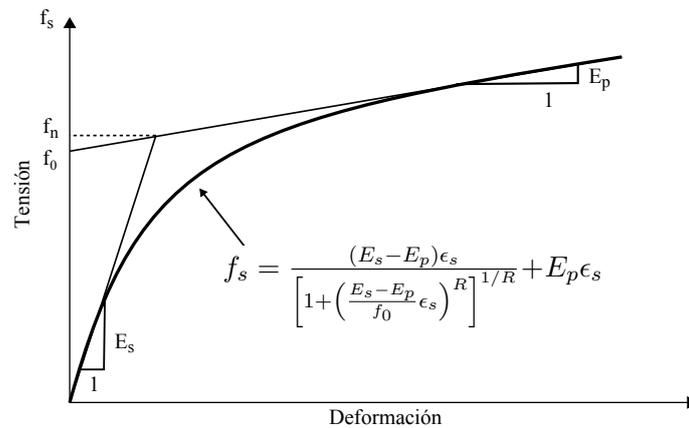


Figura 2.5: Modelo uniaxial del acero

2.3. Modelación del hormigón

Siguiendo la metodología propuesta por Massone *et al.* (2006), para obtener un comportamiento de panel, se debe asegurar que el modelo analítico incorpore el efecto de la reducción de la capacidad en compresión debido al agrietamiento producido por la tracción en la dirección ortogonal (*compression softening*), y el de las tensiones de tracción promedio después de la máxima capacidad en el hormigón, debido a la adherencia entre el acero y el hormigón entre las grietas (*tension stiffening*).

El comportamiento del hormigón en compresión es modelado usando como base la curva de

Thorenfeldt (Figura 2.6), calibrada por Collins & Porasz (1989) y Carreira & Chu (1985), a la que se le introduce un parámetro, β , que representa el efecto de la disminución de la capacidad en compresión producto del agrietamiento en la dirección ortogonal a la carga (*compression softening*), propuesto por Vecchio & Collins (1993),

$$\sigma_c = \beta f'_c \cdot \frac{n \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)}{n - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^{nk}} \quad (2.3)$$

$$\beta = \frac{1}{0,9 + 0,27 \frac{\epsilon_1}{\epsilon_0}}$$

donde, f'_c es la máxima capacidad del hormigón en compresión, ϵ_0 es la deformación del hormigón al nivel de máxima capacidad, estimada como $\epsilon_0 = 0,00078(f'_c(MPa))^{1/4}$, según propone Wee *et al.* (1996) y ϵ_1 es la deformación principal en tracción — el cociente ϵ_1/ϵ_0 es considerado positivo — y por último, en hormigones con f'_c relativamente altos ($f'_c \geq 20$ MPa), n y k se calculan como, de acuerdo a Collins & Porasz (1989):

$$n = 0,8 + \frac{f'_c(MPa)}{17}$$

$$k = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_0 \\ 0,67 + \frac{f'_c(MPa)}{62} & \text{si } \epsilon_0 < \epsilon \end{cases}$$

mientras que, según Carreira & Chu (1985), en hormigones con menor capacidad a la compresión ($f'_c < 20$ MPa), se usan las siguientes expresiones.

$$n = 1,55 + \left(\frac{f'_c(MPa)}{32,4} \right)^3$$

$$k = 1$$

Para definir el comportamiento del hormigón en tracción, se asume un comportamiento lineal hasta la tensión de fisuración, f_{cr} , y luego un decaimiento en la capacidad dado por la ecuación 2.4 (Figura 2.6), de acuerdo a lo propuesto por Belarbi & Hsu (1994).

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c \epsilon_c & \text{si } \epsilon_c \leq \epsilon_{cr} \\ f_{cr} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cr}} \right)^{0,4} & \text{si } \epsilon_c > \epsilon_{cr} \end{cases} \quad (2.4)$$

donde

$$\epsilon_{cr} = 0,00008$$

$$f_{cr} = 0,313 \sqrt{f'_c (\text{MPa})}$$

$$E_c = 3917 \sqrt{f'_c (\text{MPa})}$$

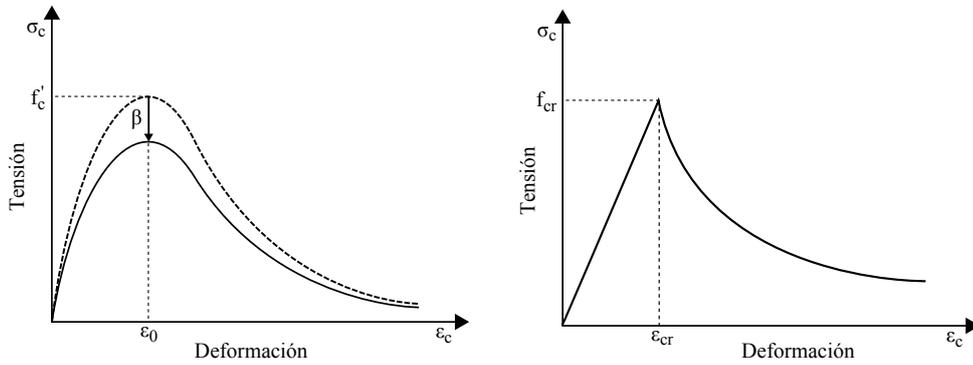


Figura 2.6: Propiedades del hormigón, compresión (izq.) y tracción (der.)

2.4. Modelación de resorte rotacional en la base

En la práctica, las componentes de desplazamiento de un muro bajo carga lateral son el deslizamiento y rotación en la interfaz muro-pedestal inferior, además del corte y flexión en el muro (ver figura 3.10). El deslizamiento se produce al generarse una grieta producto del momento en la interfaz muro-pedestal, y la rotación en la base se debe a la penetración de las deformaciones de las barras longitudinales en el pedestal inferior. Esto produce un desplazamiento y una rotación del muro como un cuerpo rígido, generando dos componentes de desplazamiento de techo adicionales al corte y flexión. Estas componentes adicionales de desplazamientos son cuantificables en la medida de que se disponga de la instrumentación adecuada (ver capítulo 3.3).

El modelo de interacción descrito en 2.1 otorga sólo las componentes de flexión y corte del muro, por lo cual para hacer comparables los resultados del modelo de interacción con los resultados experimentales, es necesario, o bien, restar estas componentes adicionales (rotación

y deslizamiento) al desplazamiento lateral total del muro, para aislar las componentes de corte y flexión, o también es posible modelar el fenómeno que produce el deslizamiento y la rotación.

Para modelar un resorte rotacional en la base, se opta por un modelo aproximado, que consiste en hacer una análisis momento-curvatura no lineal de la sección, para luego ajustar mediante mínimos cuadrados los parámetros, A , b , m_0 , y R de la curva representada por la ecuación 2.5 (similar a la de Menegotto y Pinto, figura 2.5), donde ϕ es la curvatura y M el momento.

$$M = \frac{A(1-b)\phi}{\left[1 + \left(\frac{A(1-b)}{m_0}\phi\right)^R\right]^{1/R}} + bA\phi \quad (2.5)$$

El ajuste se hace hasta el punto de máxima capacidad del ensayo, o equivalentemente, el máximo momento, M_{\max} , y a partir de ese punto, para momentos menores al máximo, la curva se devuelve por una línea recta hacia el origen, como se muestra en la figura 2.7.

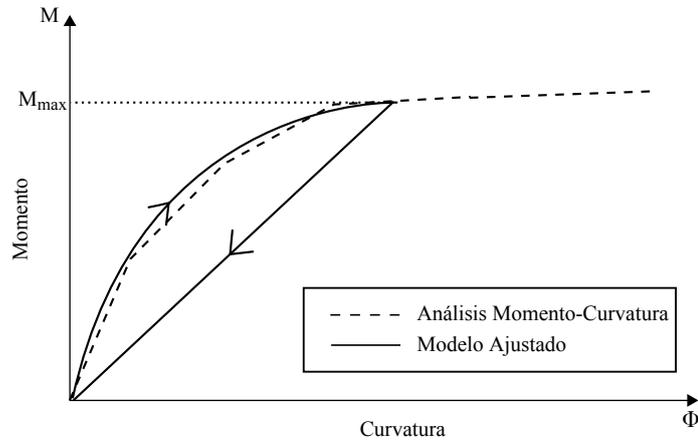


Figura 2.7: Modelo de resorte rotacional, ajustado a análisis momento-curvatura

Hecho esto, para llevar la curvatura a desplazamientos del extremo superior del muro, se asume que la penetración de las deformaciones de las barras longitudinales en el pedestal inferior es $l_d = 40\phi + 10$ donde l_d es el largo de desarrollo, en mm, y ϕ el diámetro de las barras de borde, también en mm. Luego, asumiendo que el punto de rotación en la base del muro coincide con la línea neutra del análisis momento-curvatura, de acuerdo a la figura 2.8, se tienen las siguientes relaciones,

$$\theta = \frac{\delta}{x}$$

$$\delta = \epsilon_s \frac{l_d}{2} = \phi x \frac{l_d}{2}$$
(2.6)

de donde

$$\theta = \phi \frac{l_d}{2}$$
(2.7)

y finalmente se obtiene que, la componente de desplazamiento debido a la rotación en la base, estimada mediante un resorte rotacional ajustado al análisis momento–curvatura, u_θ^A , es

$$u_\theta^A = \theta h_w = \phi h_w \frac{l_d}{2}$$
(2.8)

con h_w la altura del muro.

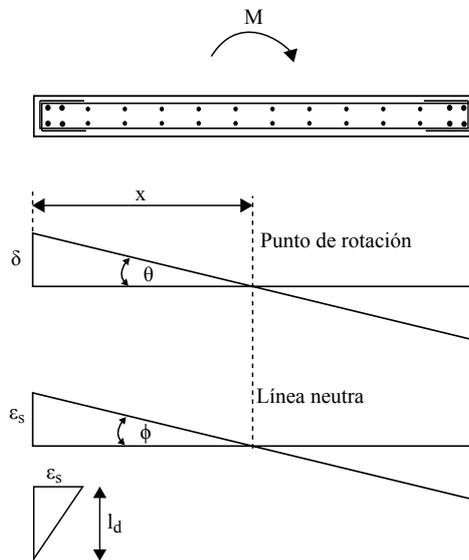


Figura 2.8: Rotación y deformación en la interfaz muro-pedestal

3. Descripción del programa de ensayos

El programa experimental fue llevado a cabo en la Universidad de Bogazici, Turquía, en el marco del proyecto Fondecyt Iniciación 2008, N°.11080010, e incluye el ensayo de 11 muros cortos de hormigón armado en voladizo, sometidos a cargas cíclicas en su plano. En el presente trabajo se analizan los resultados de los ensayos de 7 de los 11 muros, nombrados por simplicidad, especímenes $S1, S2, \dots, S7$. Una descripción de la batería completa de ensayos, se encuentra en la tesis de magíster de Tevfik Terzioglu, *Experimental Evaluation of the Lateral Load Behavior of Squat Structural Walls* (Terzioglu, 2011). Como referencia, se adjunta en el anexo D, tabla D.1, la equivalencia entre la nomenclaturas usadas.

Los 7 ensayos analizados en este trabajo fueron llevados a cabo en dos partidas consecutivas, A y B. La partida A comprende el ensayo de los especímenes $S1, S2$ y $S3$, y la partida B el de los especímenes $S4, S5, S6$ y $S7$. La partida B fue construida y ensayada en una fecha posterior a la A, y el acero de refuerzo comprado a un proveedor diferente, por lo cual se realizaron ensayos uniaxiales a las barras de refuerzo por separado para la partida A y para la B. Por otra parte, aproximadamente el mismo día del ensayo de cada espécimen, se ensayaron probetas del hormigón usado en su construcción.

Todos los especímenes fueron ensayados en posición vertical y sometidos a una carga horizontal cíclica cuasiestática, en el plano del muro, y carga vertical nula. Los especímenes se encuentran sobre un pedestal inferior, y bajo un pedestal superior, ambos de hormigón armado, y contruidos de manera tal que el muro y los pedestales forman una estructura monolítica. El pedestal inferior se encuentra postensado contra el suelo (10 tonf por conector), a fin de eliminar deslizamientos y rotaciones indeseables, y asegurar las condiciones de borde requeridas en el ensayo. El pedestal superior cumple la función de traspasar la carga del actuador horizontal al muro. El actuador horizontal transmite la carga al pedestal a través de 2 placas de acero dispuestas en cada extremo del pedestal, y sujetas a éste mediante pernos tensados que lo atraviesan completamente a través de sendos tubos de PVC. Además, se dispuso un soporte en el sentido perpendicular a la acción de la carga, a la altura del pedestal superior, para evitar desplazamientos de los muros fuera de su plano durante el ensayo (Figura 3.2).

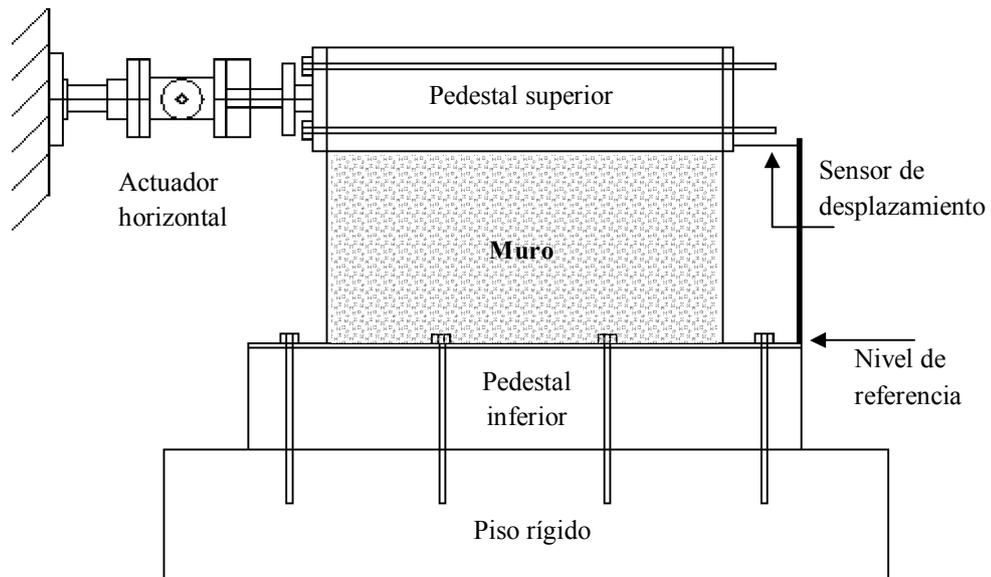


Figura 3.1: Disposición experimental (esquema)



Figura 3.2: Disposición experimental (Universidad de Bogazici)

Los ensayos se realizaron principalmente utilizando un control por desplazamiento, aumentando el nivel de deriva en 0,01 % para los primeros niveles, luego cada 0,05–0,1 % para los niveles intermedios, y 0,2–0,4 % para los últimos niveles, en general con 3 ciclos para cada nivel. Más detalles se pueden encontrar en el anexo C, tabla C.1

3.1. Descripción general de los especímenes

Los 7 especímenes ensayados miden 150 cm de largo (l_w) y tienen un espesor de 12 cm (t_w). Todos tienen una altura, h_w , de 75 cm, menos los especímenes S4 y S5 (50 y 150 cm de alto, respectivamente). Todos cuentan con malla longitudinal y transversal a 2 caras, en configuraciones $\phi 8@250$ ($\rho = 0,34\%$) ó $\phi 8@125$ ($\rho = 0,68\%$), y refuerzo de borde (ver figura 3.3). La cuantía de borde se estima en general considerando que el borde tiene un largo de 13 cm desde el extremo lateral del muro hacia el interior.

Los especímenes S1, S2, S3, S6 y S7 miden 75 cm de alto, y tienen una cuantía de armadura tanto longitudinal como transversal igual a 0,68 %, a excepción del espécimen S1 que tiene cuantía longitudinal y transversal igual a 0,34 %. Los cinco, menos el espécimen S7, tienen la misma cuantía de armadura de borde, $\rho_b = 5,16\%$ ($4\phi 16$), mientras que el S7 tiene una cuantía mucho menor $\rho_b = 0,64\%$ ($2\phi 8$). Por último, los especímenes S2, S3 y S6 son idénticos en cuanto a su geometría y cuantías de armadura, diferenciándose el S3 por tener ganchos en U puestos en la armadura transversal, en contraste a S1 y S2 (ver detalle en la figura A.3), que tienen ganchos en 180° . Por otra parte, el espécimen S4 es el de menor altura ($h_w = 50$ cm) y el S5 el más esbelto ($h_w = 150$ cm). El espécimen S6 es idéntico al espécimen S2, y se construyó porque existían dudas de que el espécimen S2 hubiera sido hormigonado correctamente. Los resultados posteriores indican que aparentemente no existían inconvenientes con la probeta S2.

La figura 3.3 muestra una esquema de la geometría y armadura dispuesta en cada uno de los 7 especímenes, la figura 3.4 un corte transversal típico, y la figura 3.5 la sección transversal del espécimen S3, como referencia. Adicionalmente, el detalle constructivo de cada espécimen se adjunta en el anexo A.

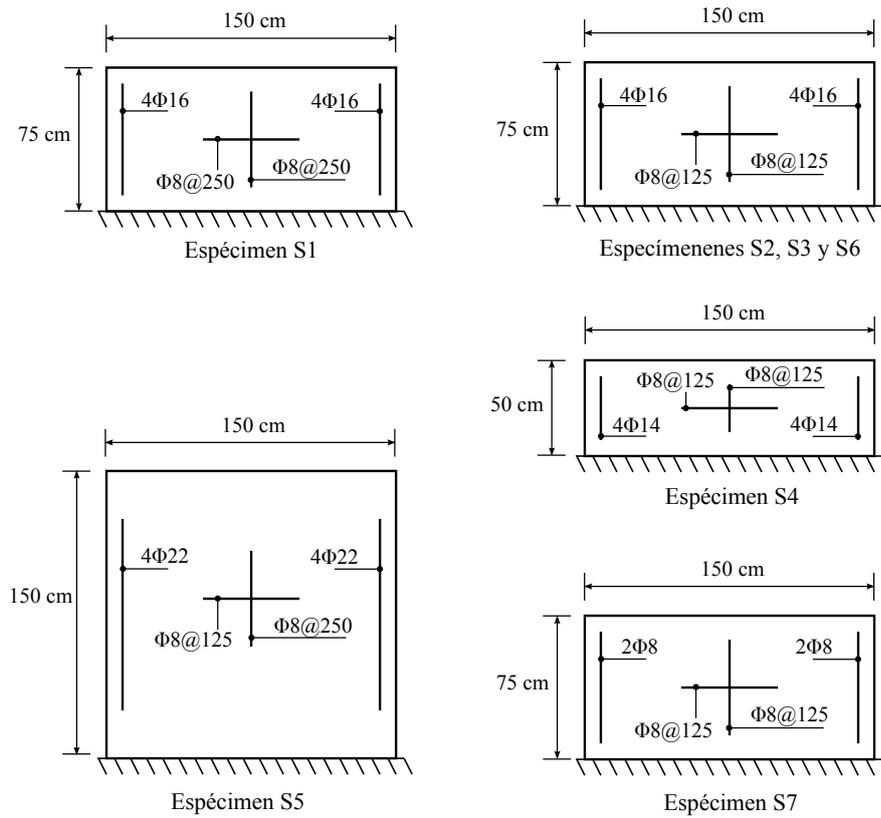


Figura 3.3: Esquema de armadura y geometría de los especímenes

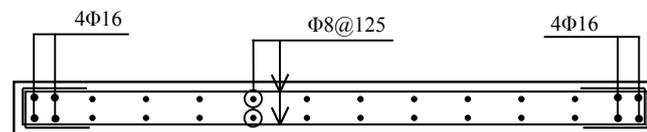


Figura 3.4: Sección transversal, espécimen S2 (típica)

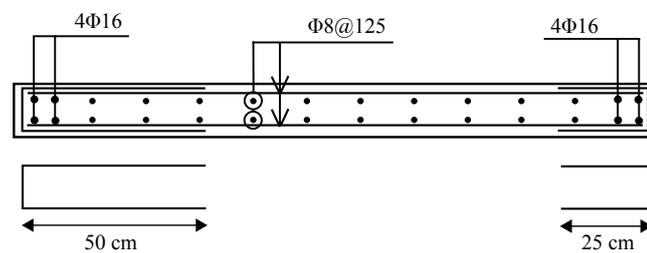


Figura 3.5: Sección transversal, espécimen S3 (con ganchos en U)

Por último, un octavo espécimen fue construido, pero no ensayado debido a problemas con el moldaje, como puede observarse en la figura 3.6.

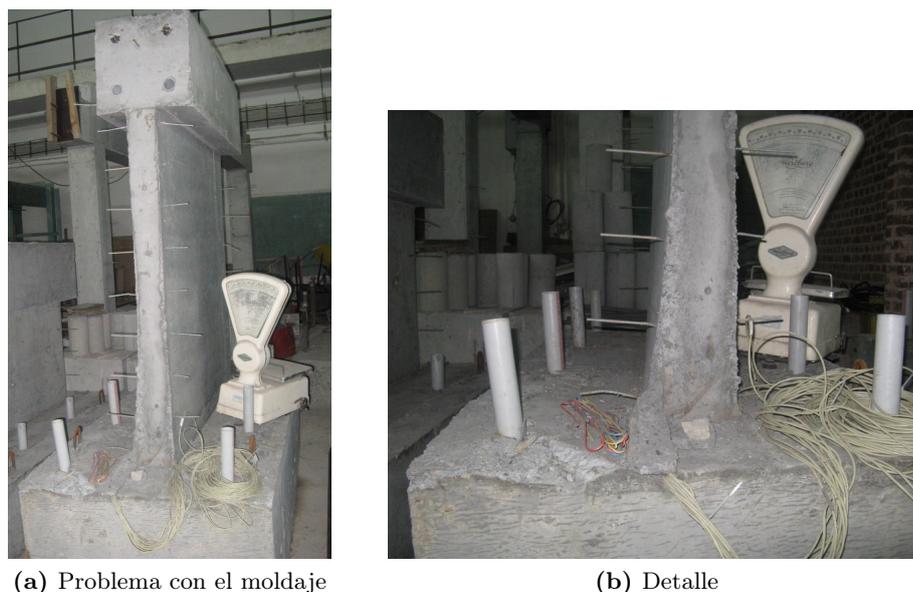


Figura 3.6: Octavo espécimen (no ensayado)

3.2. Materiales

En esta sección se detallan las propiedades del hormigón y acero de refuerzo usados en los especímenes. El detalle de cada espécimen — dimensiones, capacidad del hormigón en compresión al momento del ensayo, tensión de fluencia del acero, número de barras utilizadas — se resume en la tabla 3.3 al final de la sección.

3.2.1. Acero de Refuerzo

El acero de refuerzo utilizado en los especímenes corresponde a un acero similar al A63-42H usado en Chile. Se realizaron ensayos uniaxiales en el acero de refuerzo utilizado en los muros. La primera partida (A) corresponde sólo a barras de diámetro 8 y 16 mm y la segunda (partida B) a barras de 8, 14, 16 y 22 mm.

En primera instancia, para la partida A, se cuenta con los resultados de 3 ensayos uniaxiales para las barras de 8 mm y con 2 para las barras de 16 mm, en tanto, para la partida B, se cuenta con los resultados de 3 ensayos uniaxiales para cada diámetro de barra. De la totalidad de estos ensayos, se descartan los que muestran resultados inconsistentes, obteniéndose finalmente para la partida A,

- Barra de 8 mm, 3 ensayos.
- Barra de 16 mm, 2 ensayos.

y para la partida B

- Barra de 8 mm, 1 ensayos.
- Barra de 14 mm, 3 ensayos.
- Barra de 16 mm, 2 ensayos.
- Barra de 22 mm, 2 ensayos.

Una vez descartados los ensayos inconsistentes, el parámetro de endurecimiento, b , es calibrado mediante mínimos cuadrados, para cada ensayo, entre el punto aproximado en que comienza la fluencia ($f_{y,aprox}$), el cual se mantiene fijo, y el punto de máxima capacidad del ensayo ($f_{máx}$, ver figura 3.7). Finalmente, el parámetro b de la barra, es el promedio de los parámetros de endurecimiento encontrados para cada ensayo por separado y f_y es el promedio de los $f_{y,aprox}$. Además, en el tramo elástico, se impone un módulo de Young, E_s , igual a 200.000 MPa para corregir el efecto del deslizamiento de las mordazas sobre las barras al inicio del ensayo.

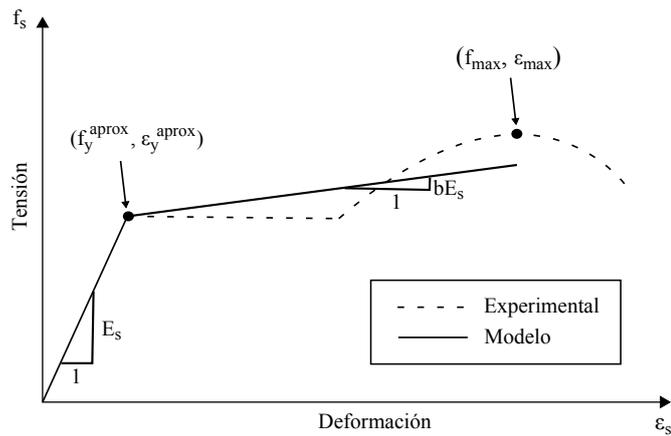


Figura 3.7: Calibración del parámetro de endurecimiento, b

Un resumen de los valores obtenidos se adjunta en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Resumen parámetros de las barras de acero

Barra	Partida A		Partida B	
	f_y (MPa)	b	f_y (MPa)	b
ϕ 8	481	0,0027	584	0,0069
ϕ 14	-	-	519	0,0083
ϕ 16	440	0,0053	473	0,0361
ϕ 22	-	-	528	0,0108

Gráficamente, el parámetro b calibrado, y los resultados corregidos de los ensayos en la barras aisladas, se observan en las figuras 3.8 y 3.9.

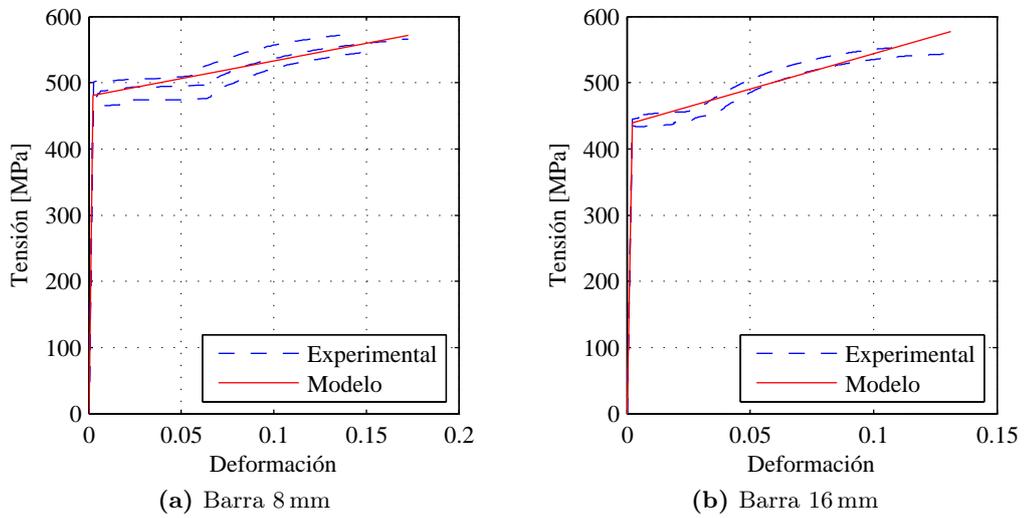


Figura 3.8: Barras de refuerzo, ensayos partida A

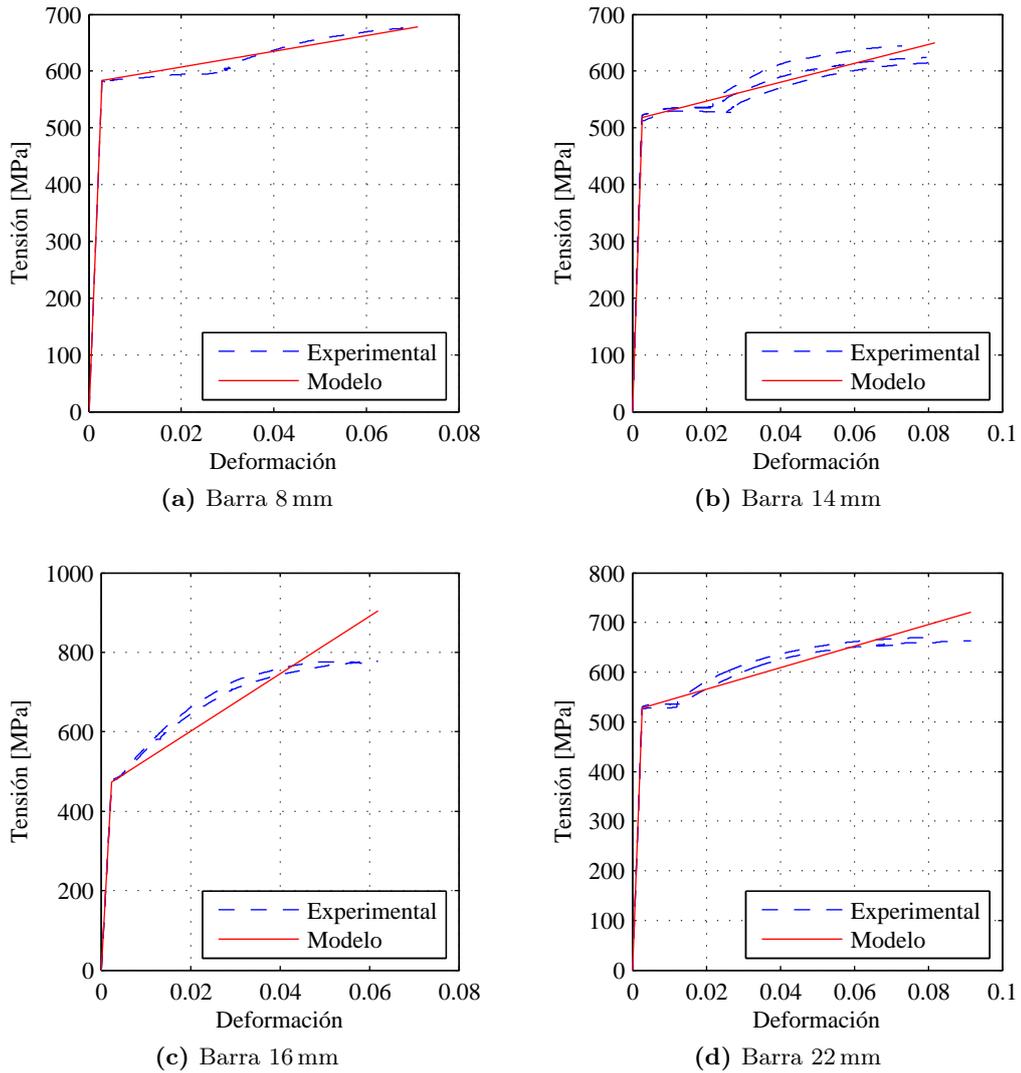


Figura 3.9: Barras de refuerzo, ensayos partida B

3.2.2. Hormigón

Para la construcción de los especímenes, se solicita un hormigón con una capacidad a compresión de 25 MPa, y un tamaño máximo de agregado igual a 1 cm. Para aumentar la trabajabilidad, fueron añadidos aditivos plastificantes a la mezcla, resultando en un asentamiento de cono de 17-20 cm para todas las muestras. Para cada muro, en general, 3 probetas de hormigón tamaño estándar (150x300 mm) fueron ensayadas el día de su ensayo. Los resultados promedio de dichos ensayos, se adjuntan en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Capacidad del hormigón a compresión el día del ensayo

Espécimen	f'_c (MPa)
S1	23,7
S2	25,8
S3	19,3
S4	34,8
S5	35,0
S6	29,0
S7	32,1

Finalmente, la tabla 3.3 muestra un resumen de las propiedades de cada espécimen.

Tabla 3.3: Propiedades de los especímenes

Especímen	t_w , cm	h_w , cm	l_w , cm	f'_c , MPa	Malla transversal		Malla longitudinal		Refuerzo de borde					
					Barras de refuerzo (n° barras)	f_y , MPa	ρ_t , %	Barras de refuerzo (n° barras)	f_y , MPa	ρ_l , %	Barras de refuerzo	A_{sb} , cm^2	f_y , MPa	ρ_b , %
S1	12	75	150	23,7	$\phi 8@250$ (3)	481	0,34	$\phi 8@250$ (5)	481	0,34	4 $\phi 16$	8,04	440	5,16
S2	12	75	150	25,8	$\phi 8@125$ (6)	481	0,68	$\phi 8@125$ (10)	481	0,68	4 $\phi 16$	8,04	440	5,16
S3	12	75	150	19,3	$\phi 8@125$ (6)	481	0,68	$\phi 8@125$ (10)	481	0,68	4 $\phi 16$	8,04	440	5,16
S4	12	50	150	34,8	$\phi 8@125$ (4)	584	0,68	$\phi 8@125$ (10)	584	0,68	4 $\phi 14$	6,16	519	3,95
S5	12	150	150	35,0	$\phi 8@125$ (12)	584	0,68	$\phi 8@250$ (5)	584	0,34	4 $\phi 22$	15,21	528	9,75
S6	12	75	150	29,0	$\phi 8@125$ (6)	584	0,68	$\phi 8@125$ (10)	584	0,68	4 $\phi 16$	8,04	473	5,16
S7	12	75	150	32,1	$\phi 8@125$ (6)	584	0,68	$\phi 8@125$ (10)	584	0,68	2 $\phi 8$	1,01	584	0,64

3.3. Instrumentación

Todos los especímenes están instrumentados con LVDTs (*Linear Variable Differential Transducers*) tipo DC (DCDTs), que son instrumentos que permiten estimar el desplazamiento relativo entre 2 puntos, al transformarlo desde una señal eléctrica. Los DCDTs son capaces de medir los desplazamientos con una sensibilidad de 1 millonésima de milímetro y de recoger datos hasta los 300 Hz. Esquemáticamente, la disposición de los DCDTs en los muros se muestra en la figura 3.11 (la disposición exacta de los instrumentos varía ligeramente en cada caso).

Para una mejor comprensión de la disposición de los instrumentos, en la figura 3.10 se muestra una descomposición del desplazamiento lateral superior de un muro bajo carga lateral en el plano, corte puro, flexión pura, deslizamiento y rotación. El deslizamiento se produce una vez formada la grieta producto del momento en la interfaz muro-pedestal, y la rotación en la interfaz se debe a la penetración de las deformaciones de las barras longitudinales en el pedestal inferior. La disposición de los instrumentos permite la medición de las componentes de desplazamiento de los muros, además de la expansión lateral promedio a diferentes alturas (H_1, \dots, H_n) y el desplazamiento del extremo superior del muro, con respecto al pedestal inferior (L , figura 3.11).

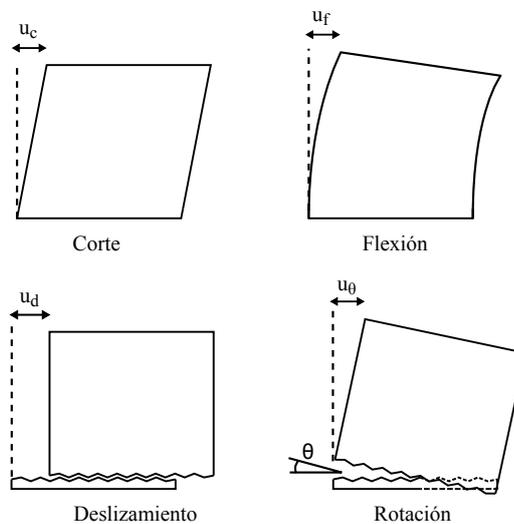


Figura 3.10: Componentes de desplazamiento bajo carga lateral

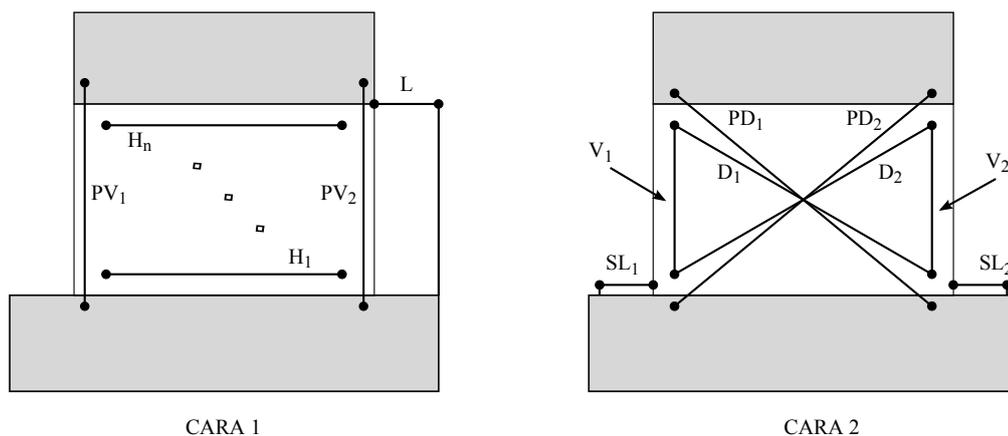


Figura 3.11: Instrumentación de los especímenes

3.3.1. Cálculo de la expansión lateral y de las componentes de desplazamiento

Los DCDTs verticales permiten estimar la rotación por flexión promedio en la altura, θ_f , tanto al interior del muro ($\theta_{f,muro}$, usando V_1 y V_2 en la ecuación 3.1), como global ($\theta_{f,global}$, de pedestal a pedestal, usando PV_1 y PV_2 en la ecuación 3.1). Luego para obtener la componente de desplazamiento por flexión pura (u_f), se supone que la rotación por flexión promedio del muro se concentra a una altura $\alpha \cdot h_w$ de la base del muro (ecuación 3.2), donde α se asume igual a 0,33; correspondiente con el centro de gravedad del diagrama de momento triangular del muro en voladizo sometido a una carga en su extremo.

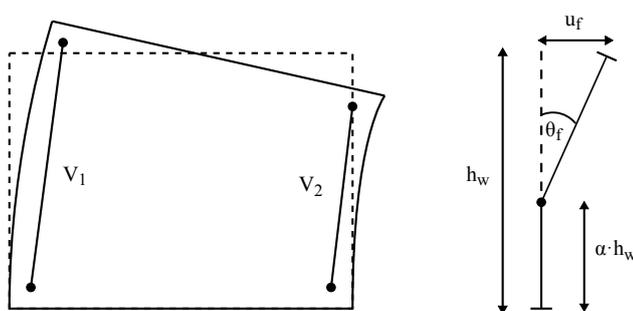


Figura 3.12: Desplazamiento de flexión

$$\theta_f = \arctan\left(\frac{V_1 - V_2}{l_w}\right) \quad (3.1)$$

$$u_f = (1 - \alpha)h_w\theta_f \quad (3.2)$$

La rotación en la interfaz, θ , es posible obtenerla tomando la diferencia entre la rotación por flexión del muro y la global, para luego obtener el desplazamiento asociado multiplicando por la altura del muro, de acuerdo a la ecuación 3.3.

$$\begin{aligned}\theta &= \theta_{f,global} - \theta_{f,muro} \\ u_{\theta} &= \theta h_w\end{aligned}\tag{3.3}$$

Los instrumentos SL1 y SL2 permiten conocer el desplazamiento producto del deslizamiento promedio (u_d) de los especímenes una vez formada la grieta por flexión en la interfaz entre el muro y el pedestal inferior.

$$u_d = \frac{SL_1 + SL_2}{2}\tag{3.4}$$

La componente de corte en el desplazamiento total (u_c) se obtiene asumiendo pequeñas deformaciones de acuerdo con la ecuación 3.5, en que D_0 es el largo de la diagonal del muro en su posición no deformada.

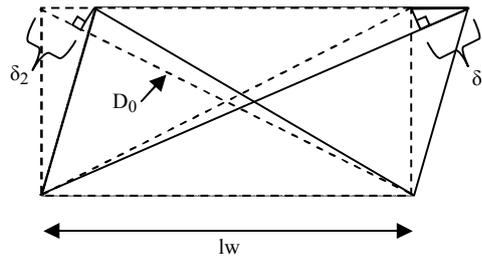


Figura 3.13: Deformación por corte

$$u_c = \frac{D_0(\delta_1 - \delta_2)}{2l_w}\tag{3.5}$$

La expansión lateral promedio a una altura fija en el muro se obtiene, dividiendo el alargamiento del instrumento H_i (ver figura 3.11) por el largo original del mismo, l_{H_i} , de acuerdo con

la ecuación 3.6.

$$\epsilon_{x,i} = \frac{\Delta H_i}{l_{H_i}} \quad (3.6)$$

Notas:

- Todos los especímenes cuentan con 5 DCDTs dispuestos para medir la expansión lateral (H_1 a H_5), menos el espécimen S5, que tiene 9 (H_1 a H_9).
- Los especímenes S1 y S3 no cuentan con los DCDTs diagonales de pedestal a pedestal (PD_1 y PD_2).

Por último, adicionalmente a los DCDTs, todos los especímenes cuentan con estampillas de deformación (*strain gages*) ubicados en la armadura de refuerzo, 13 en total para cada espécimen, dispuestos como se aprecia en la figura 3.14. Para efectos de esta memoria no presentan mayor relevancia. Mayor detalle al respecto puede encontrarse en Terzioglu (2011).

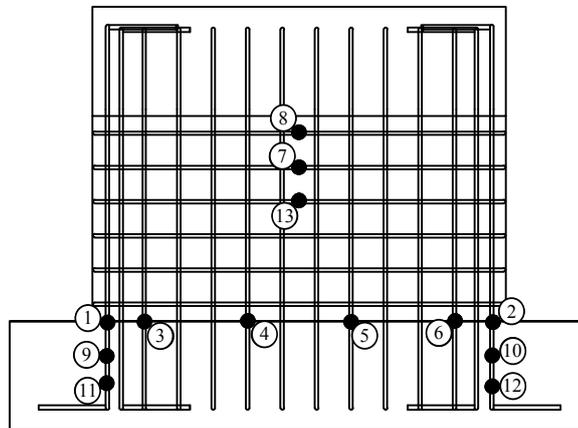


Figura 3.14: Disposición de extensómetros en armadura de refuerzo, espécimen S2 (típico)

4. Resultados del programa experimental

Se ensayaron 7 muros de hormigón armado en voladizo, sujetos a cargas cíclicas cuasiestáticas en su plano. El programa experimental se llevó a cabo en 2 partidas, A y B por simplicidad. La partida A comprende el ensayo de los especímenes S1, S2 y S3, y la B de S4, S5, S6 y S7. La partida B fue construida y ensayada en una fecha posterior a la A, y el acero de refuerzo comprado a un proveedor diferente, por lo cual se realizaron ensayos uniaxiales a las barras de refuerzo para la partida A y para la B. Por otra parte, el mismo día del ensayo de cada espécimen, se ensayaron probetas del hormigón usado en su construcción.

4.1. Observaciones experimentales y comportamiento de los especímenes

En el presente capítulo, se muestra en detalle el comportamiento de cada espécimen durante el ensayo, y el modo de falla particular de cada uno. Como es de esperar, en todos los casos los muros se comportan de manera similar ante los ciclos de carga en uno u otro sentido. En capítulos siguientes, se hará la comparación del comportamiento de los especímenes con los datos recopilados de los ensayos.

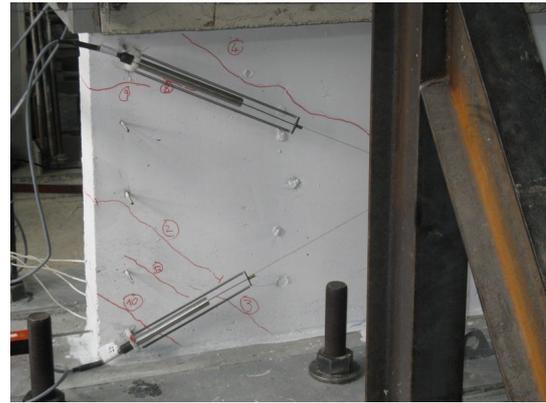
4.1.1. Especimen S1

El espécimen S1 tiene una cuantía de armadura tanto transversal como longitudinal $\rho_{t,l} = 0,34\%$ ($\phi 8@250$), y una cuantía de borde $\rho_b = 5,16\%$ ($4\phi 16$) (Igual geometría, pero la mitad de armadura vertical y longitudinal en comparación a los especímenes S2, S3 y S8, e igual cuantía de borde, ver figura 3.3).

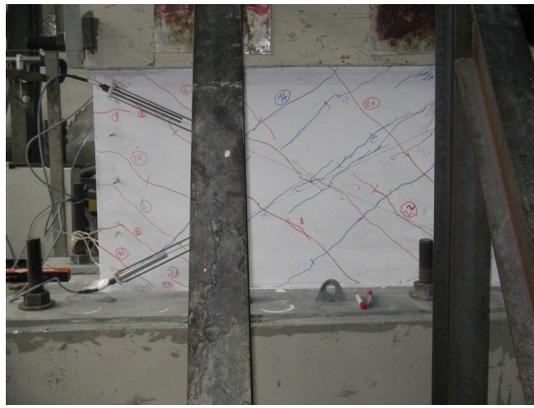
Las primeras fisuras que aparecen se originan en los extremos superiores del muro, entrando, en un ángulo de aproximadamente 45° respecto de la vertical, hacia el centro del muro. Dado que el muro es más ancho que alto (2:1), la fisura llega hasta aproximadamente la mitad del muro en la base (Figura 4.1-a). A medida que avanza el ensayo, nuevas fisuras aparecen, siempre con una dirección diagonal, primero por abajo de la primera fisura, cerca del extremo inferior (Figura 4.1-b), y luego por arriba, adentrándose hacia el centro del muro (Figura 4.1-c).



(a) Deriva 0,05 %



(b) Deriva 0,15 %



(c) Deriva 0,40 %

Figura 4.1: Espécimen S1, fisuras

A simple vista son apreciables pequeñas fisuras en la interfaz del muro con el pedestal, pero que no alcanzan mayor significancia. A medida que transcurre el ensayo, las fisuras en diagonal van aumentando su espesor, generándose, para ambas direcciones de carga, una marcada grieta que atraviesa el muro aproximadamente por la línea diagonal y que corresponde a un modo de falla por tracción diagonal (Figura 4.2).

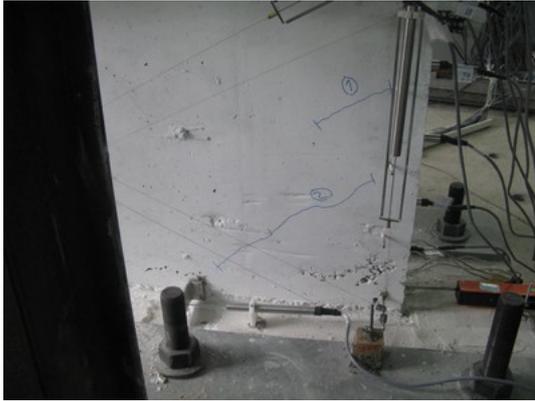


Figura 4.2: Espécimen S1, falla por tracción diagonal (Deriva 1,40%)

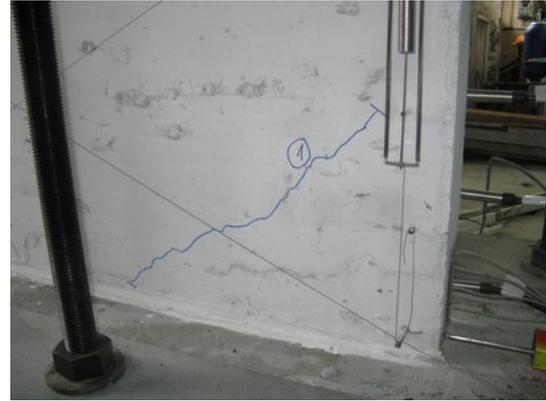
4.1.2. Espécímenes S2, S3 y S6

Se agrupan estos 3 especímenes porque son idénticos en geometría y cuantía de armadura (Cuantía transversal y longitudinal $\rho_{t,l} = 0,68\%$ ($\phi 8@125$), y de borde $\rho_b = 5,16\%$ ($4\phi 16$). Los especímenes S2 y S3 fueron ensayados en una fecha cercana entre sí, mientras el S6 fue ensayado posteriormente. Las únicas diferencias entre los especímenes son las capacidades del hormigón (ver tabla 3.2), las propiedades del acero de refuerzo (ya sea porque pertenecen a la primera o segunda partida de ensayos), y por último, el espécimen S3 difiere de los otros dos en la disposición de ganchos en U en la armadura transversal (ver figura A.3).

En términos generales, el comportamiento de los 3 especímenes es el mismo y como era de esperar, el modo de falla es el mismo. Para los 3 muros, ocurre la misma secuencia. La primera fisura aparece en el costado lateral inferior del muro en un ángulo aproximado de 45° , como se aprecia en la figura 4.3, luego las fisuras van subiendo en altura y metiéndose hacia el centro del muro (Figura 4.4). A medida que avanza el ensayo, las fisuras llenan el muro, pero no aumentan su espesor de manera significativa (Figura 4.5). Para niveles altos de deriva, el muro empieza a acumular daño en la base, de manera uniforme en el largo del muro, lo que corresponde a una falla por compresión en la base, como se ve en las figuras 4.6 y 4.7.



(a) Espécimen S2 (Deriva 0,05 %)



(b) Espécimen S3 (Carga 100 kN)



(c) Espécimen S6 (Carga 50 kN)

Figura 4.3: Primera fisura



(a) Espécimen S2 (Deriva 0,15 %)

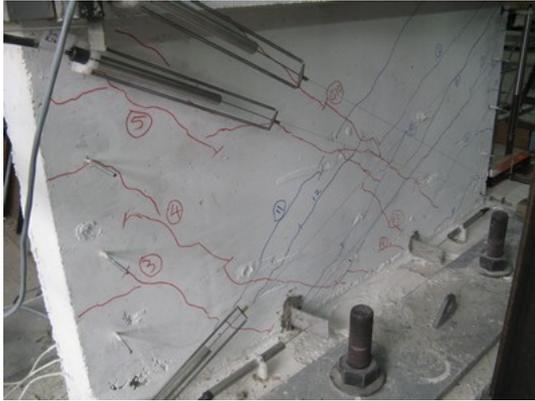


(b) Espécimen S3 (Deriva 0,10 %)

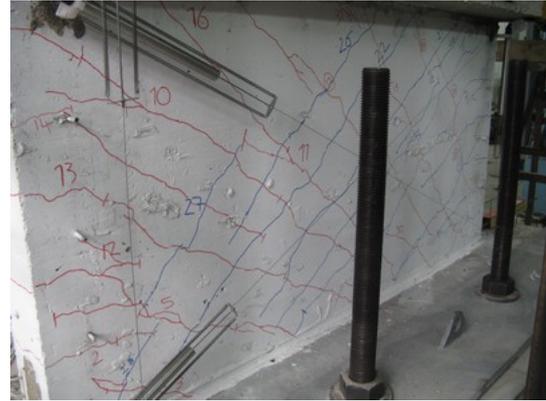


(c) Espécimen S6 (Deriva 0,20 %)

Figura 4.4: Fisuras



(a) Espécimen S2 (Deriva 0,30 %)



(b) Espécimen S3 (Deriva 0,40 %)



(c) Espécimen S6 (Deriva 0,60 %)

Figura 4.5: Fisuras, estado más avanzado



(a) Espécimen S2 (Deriva 1,0%)



(b) Espécimen S3 (Deriva 1,6%)



(c) Espécimen S6 (Deriva 1,4% aprox.)

Figura 4.6: Falla por compresión en la base



(a) Espécimen S2 (Deriva 1,6%)



(b) Espécimen S3 (Deriva 2,0% aprox.)



(c) Espécimen S6 (Deriva 2,0%)

Figura 4.7: Falla por compresión en la base, nivel mayor de daño

4.1.3. Espécimen S4

El espécimen S4 es el mas chato de todos, con una relación alto/ancho igual a 1/3. Tiene una cuantía de armadura transversal y longitudinal $\rho_{t,l} = 0,68\%$ ($\phi 8@125$), y de borde $\rho_b = 3,95\%$ ($4\phi 14$). La aparición de la primera fisura se observa en la figura 4.8-a. Las fisuras son en un ángulo de aproximadamente 45° y van avanzando desde el extremo lateral hacia el interior del muro a medida que aumentan los ciclos de carga, como se ve en la figura 4.8-b,c.



(a) Primera fisura (Deriva 0,05 %)



(b) Fisuras (Deriva 0,10 %)



(c) Fisuras (Deriva 0,30 %)

Figura 4.8: Espécimen S4, fisuras

El tamaño de las fisuras no aumenta significativamente a lo largo del ensayo. Las primeras señales de daño en el muro se ven primero, aproximadamente, en el centro del muro, y luego en los extremos laterales inferiores, como se aprecia en la figura 4.9-a,b. A partir de ahí, se empieza a generar una grieta en la base de forma más o menos uniforme (Figura 4.9-c), con una tendencia hacia el lado que falló primero, correspondiente a un modo de falla por compresión en la base.



(a) Daño al centro del muro (Deriva 1,4%)



(b) Daño borde lateral inferior (Deriva 1,6%)



(c) Daño más o menos uniforme (Deriva 1,8%)



(d) Daño uniforme (Deriva 4,0%)

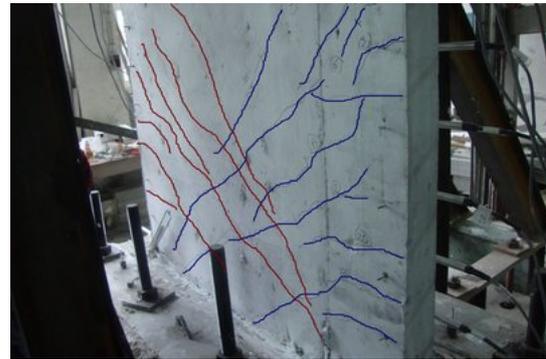
Figura 4.9: Espécimen S4, falla por compresión en la base

4.1.4. Espécimen S5

El espécimen S5 es el más esbelto de la batería de ensayos, con una relación alto/ancho igual a 1, y una cuantía de armadura transversal $\rho_t = 0,68\%$ ($\phi 8@125$), longitudinal $\rho_l = 0,34\%$ ($\phi 8@250$), y de borde $\rho_b = 9,75\%$ ($4\phi 22$). Presenta un comportamiento mayormente flexural. Las fisuras que se forman tienen una tendencia a ser horizontales en el borde lateral inferior del muro, variando a una posición diagonal, en aproximadamente 45° a medida que suben y se acercan al centro. Las primeras fisuras aparecen en los extremos laterales inferiores, como se ve en la figura 4.10-a, donde se han resaltado las fisuras digitalmente para una mejor visualización. Una vez que las fisuras se han extendido por todo el muro (Figura 4.10-b, fisuras resaltadas digitalmente), mantienen su tamaño, y se genera una grieta en la interfaz muro-pedestal inferior (Figura 4.10-c). Luego el muro empieza a acumular daño principalmente en los extremos laterales inferiores (Figura 4.11), correspondiente a una falla mayormente por flexo-compresión.



(a) Primera fisura (Deriva 0,05 %)



(b) Fisuras, estado más avanzado (Deriva 0,40 %)



(c) Grieta interfaz muro-pedestal inferior (Deriva 1,0 %)

Figura 4.10: Espécimen S5, fisuras



(a) Falla (Deriva 1,2%)



(b) Falla, nivel mayor de daño (Deriva 1,8%)

Figura 4.11: Espécimen S5, falla por flexo-compresión

4.1.5. Espécimen S7

El espécimen S7, es idéntico a los especímenes S2, S3 y S6 sólo que con una menor cuantía de armadura de borde $\rho_b = 0,64\%$ ($2\phi 8$). La primera fisura se produce en la interfaz muro-pedestal inferior, en el extremo lateral, como se aprecia en la figura 4.12-a. Luego las fisuras van subiendo en altura, variando desde los 0° hasta un ángulo acentuadamente menor a 45° con respecto a la horizontal cuando llegan al extremo lateral superior del muro (Figura 4.12-b). A éste nivel del ensayo, ya se ha formado una grieta en la interfaz muro-pedestal inferior (Figura 4.12-c), que crece hasta un tamaño aproximado de 1 cm. El muro no experimente vaciamiento de hormigón como en todos los otros especímenes. El modo de falla del muro es por deslizamiento (Figura 4.13).



(a) Primera fisura (Deriva 0,05 %)



(b) Fisuras, estado más avanzado (Deriva 0,30 %)



(c) Grieta interfaz muro-pedestal inferior (Deriva 1,0 %)

Figura 4.12: Espécimen S7, fisuras y grieta en la interfaz muro-pedestal inferior



(a) Detalle 1 (Deriva 1,4 %)



(b) Detalle 2 (Deriva 2,4 %)

Figura 4.13: Espécimen S7, falla por deslizamiento de la interfaz muro-pedestal inferior

4.2. Resultados carga versus desplazamiento

En ésta sección se muestran los gráficos carga–desplazamiento obtenidos de los ensayos. Se indica sobre los gráficos, tanto para los desplazamientos positivos como negativos, el punto de

máxima (mínima) capacidad del ensayo, un punto al comienzo de la degradación de capacidad, a un 90 % de la capacidad máxima (mínima), y además se fija un valor referencial de un 2 % de deriva para estimar la capacidad residual del ensayo. El punto a un 90 % de la capacidad máxima no necesariamente cae sobre la curva carga–deformación (ver figura 4.19, deriva positiva) puesto que el ensayo en general es controlado por desplazamiento y el punto fue estimado sobre la envolvente.

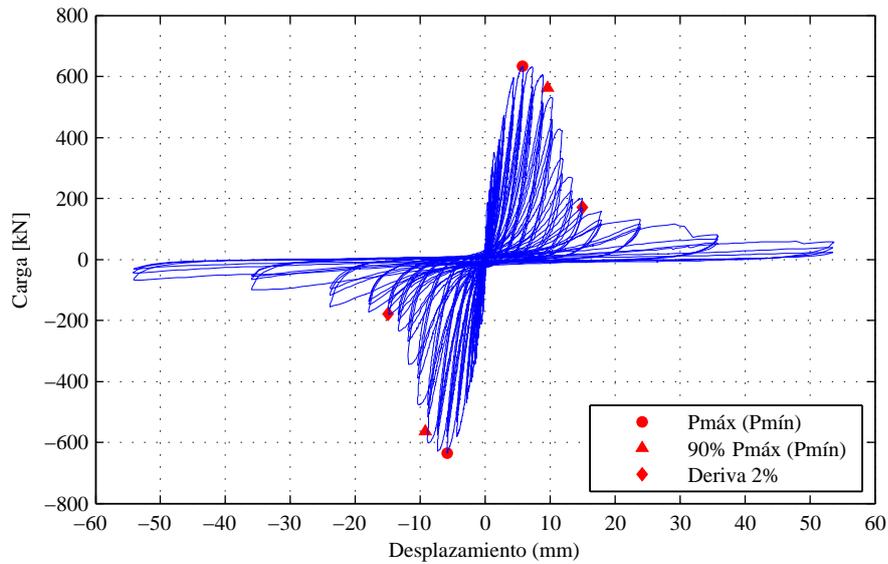


Figura 4.14: Espécimen S1, carga–desplazamiento

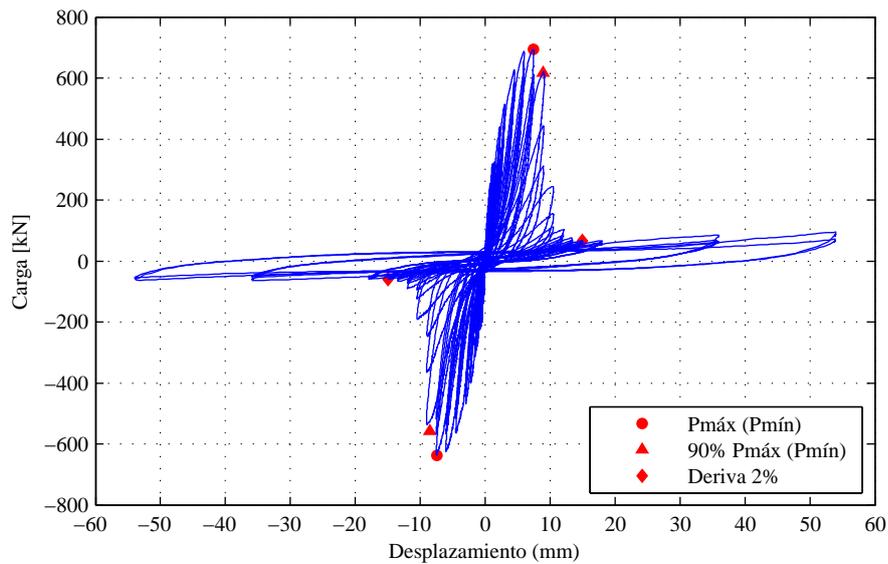


Figura 4.15: Espécimen S2, carga–desplazamiento

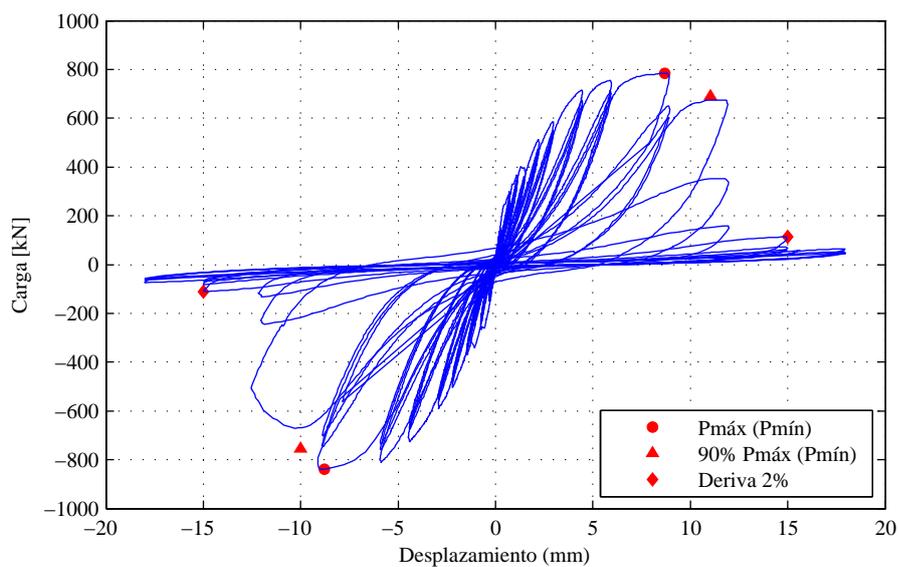


Figura 4.16: Especimen S3, carga-desplazamiento

En la figura 4.16 se observa el gráfico carga-desplazamiento del espécimen S3. Este muro tiene puestos ganchos en U en ambos extremos, como se observa en la figura 3.5. Como los ganchos tienen diferentes longitudes, es necesario aclarar su posición. En términos simples, si la carga es positiva hacia la derecha, el gancho más largo (50[cm]) está ubicado en el lado izquierdo del muro y el más corto (50[cm]) en el lado derecho. Se observa que, tanto en términos de capacidad máxima como de desplazamiento, el largo de los ganchos no tiene mayor relevancia.

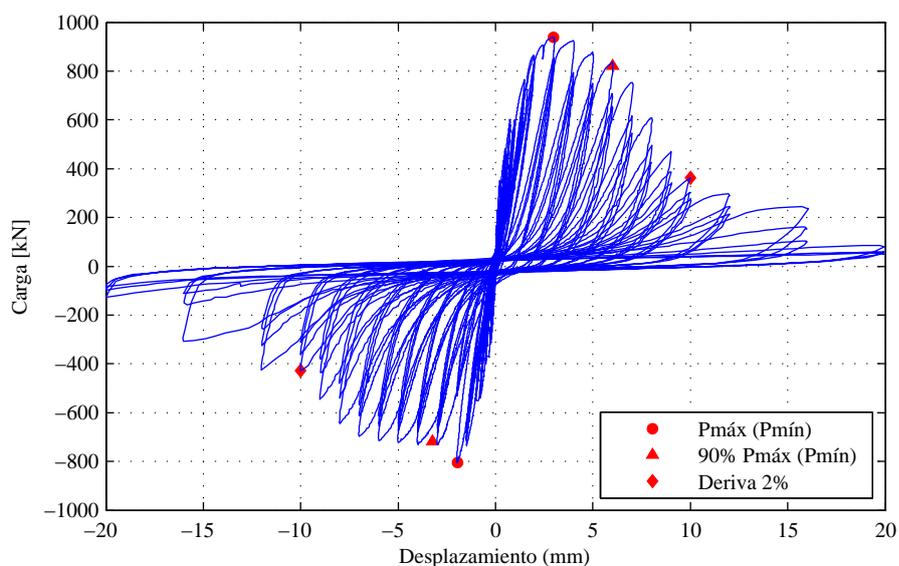


Figura 4.17: Especimen S4, carga-desplazamiento

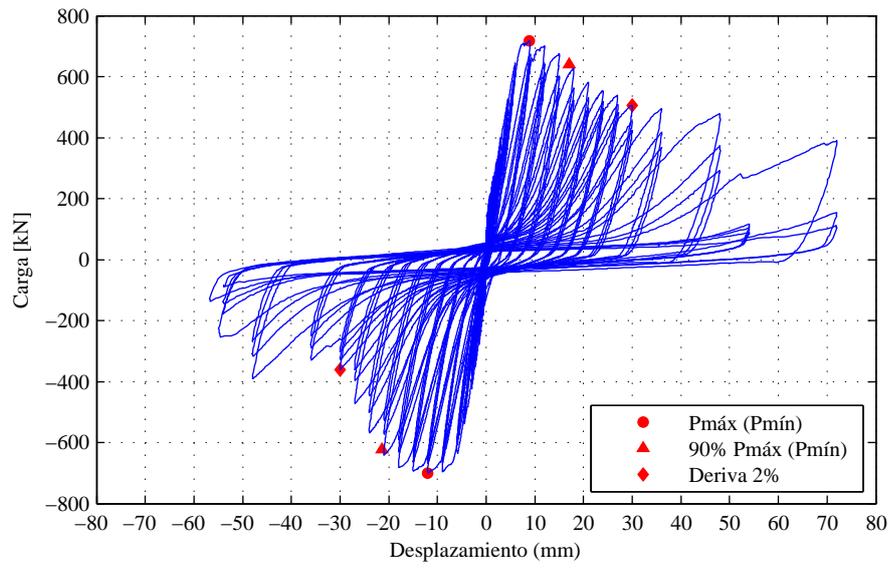


Figura 4.18: Espécimen S5, carga–desplazamiento

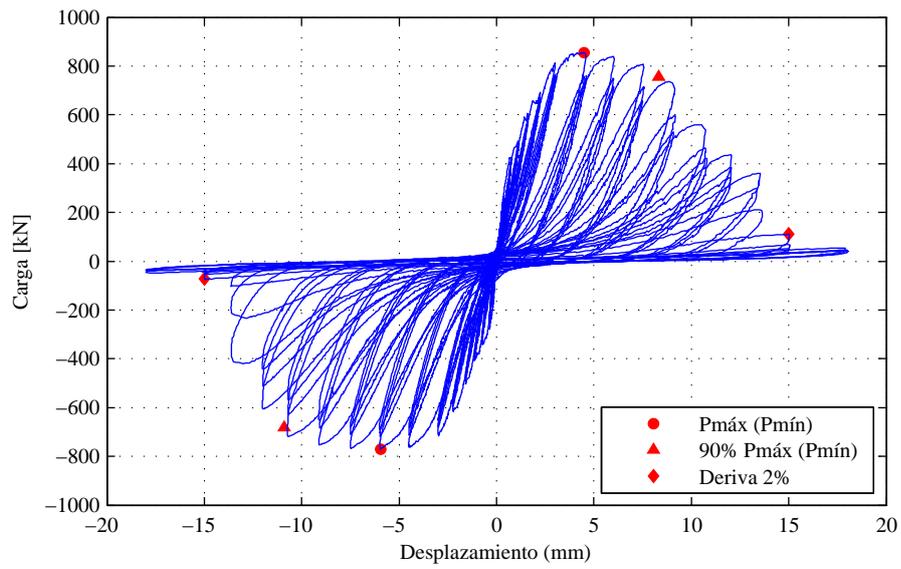


Figura 4.19: Espécimen S6, carga–desplazamiento

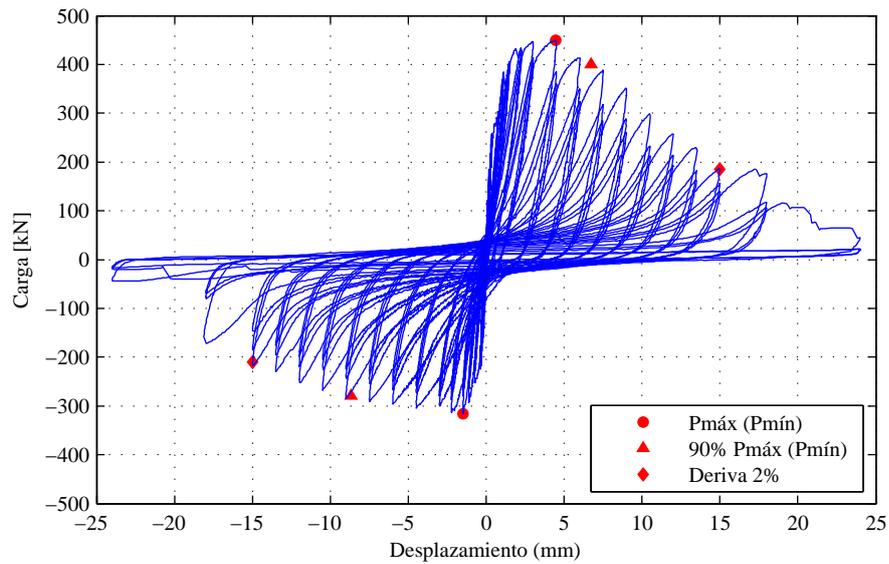


Figura 4.20: Espécimen S7, carga–desplazamiento

La figura 4.21 muestra una comparación de las cargas máximas de los ensayos. El espécimen S7 es el que tiene menor cuantía de armadura de borde ($2\phi 8$), y en promedio tiene la menor resistencia a la carga lateral. Los especímenes S2 y S6 presentan una capacidad similar, con diferencias atribuibles a la calidad del hormigón en cada caso, y las diferencias en las propiedades del acero en el caso del espécimen S6, mientras que el presenta S3 una capacidad mayor, sin mayores diferencias en las direcciones positiva y negativa de la carga (ver figura 3.5). El espécimen S1, de igual geometría que los 3 anteriores, igual cuantía longitudinal y de borde (ver figura 3.3), pero menor cuantía de armadura transversal ($\phi 8@250$), presenta una capacidad solo relativamente menor, aún cuando el modo de falla es completamente distinto.

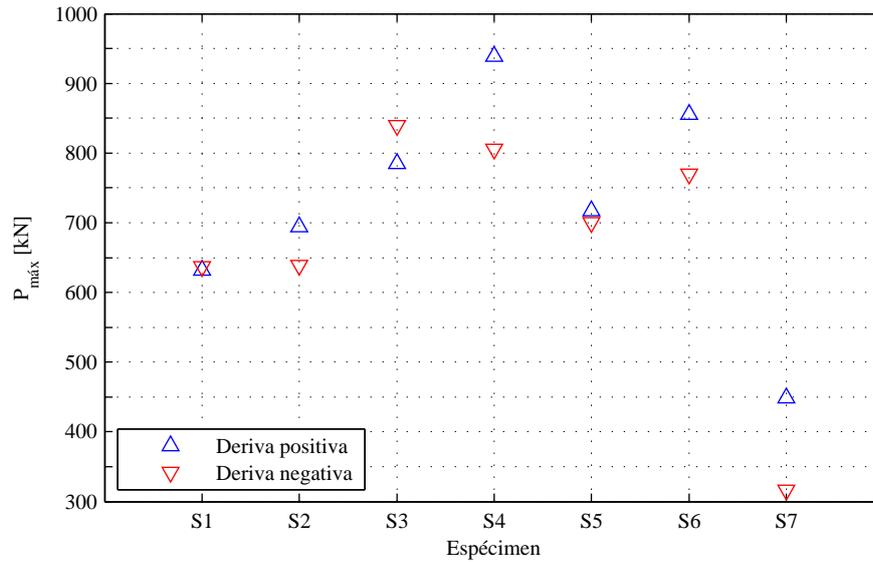
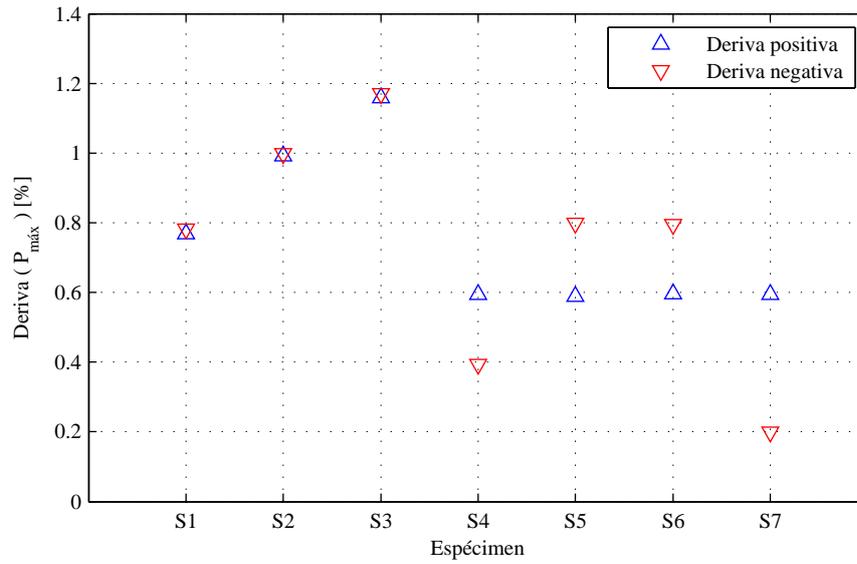
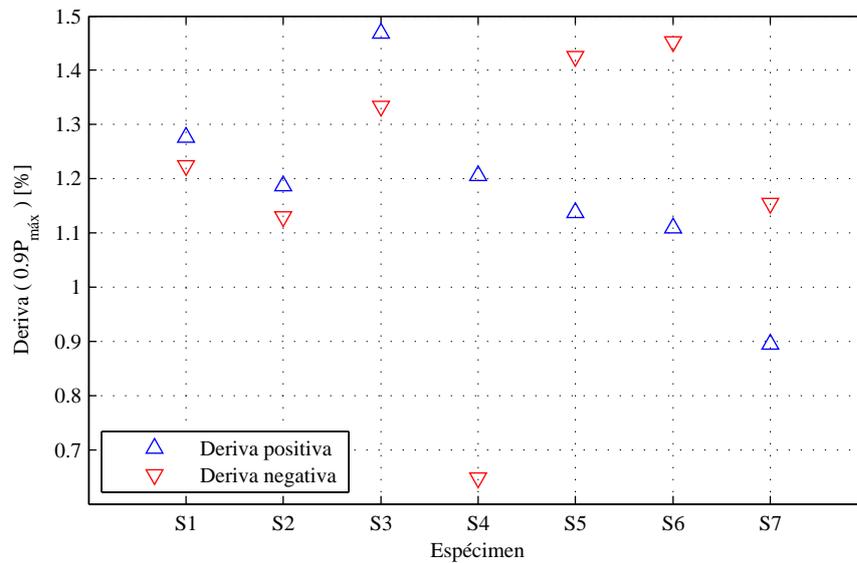


Figura 4.21: Resultados experimentales, comparación de cargas máximas

En la figura 4.22-a se observa el valor de la deriva a la máxima carga. El nivel de deriva a la carga máxima de los especímenes S1, S2 y S3 es prácticamente el mismo para la deriva positiva y negativa, en tanto los especímenes S4, S5 y S6 tienen diferencias relativas del orden de un 20 %, y el espécimen S7 de un 40 %. El espécimen S3 no muestra mayor diferencia entre la deriva positiva y negativa (ver figura 3.5). La figura 4.22-b muestra el valor de la deriva a un 90 % de la carga máxima, empezada la degradación de capacidad. En comparación con la figura 4.22-a se observa una tendencia general al distanciamiento relativo de los puntos correspondientes a la deriva positiva y negativa. En particular, los especímenes S1 y S2 muestran una buena correlación, con diferencias menores al 10 %, y el espécimen S3 una diferencia del orden de un 15 % aproximadamente. El espécimen S4 muestra una diferencia de un 55 %, y los especímenes S5, S6 y S7 no tienen diferencias menores a un 30 %



(a) Deriva en $P_{m\acute{a}x}$

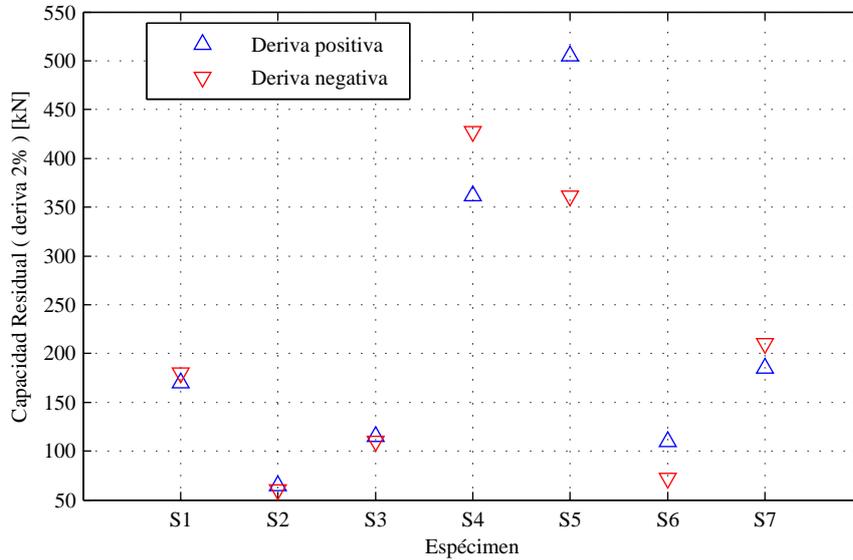


(b) Deriva en $0,9P_{m\acute{a}x}$

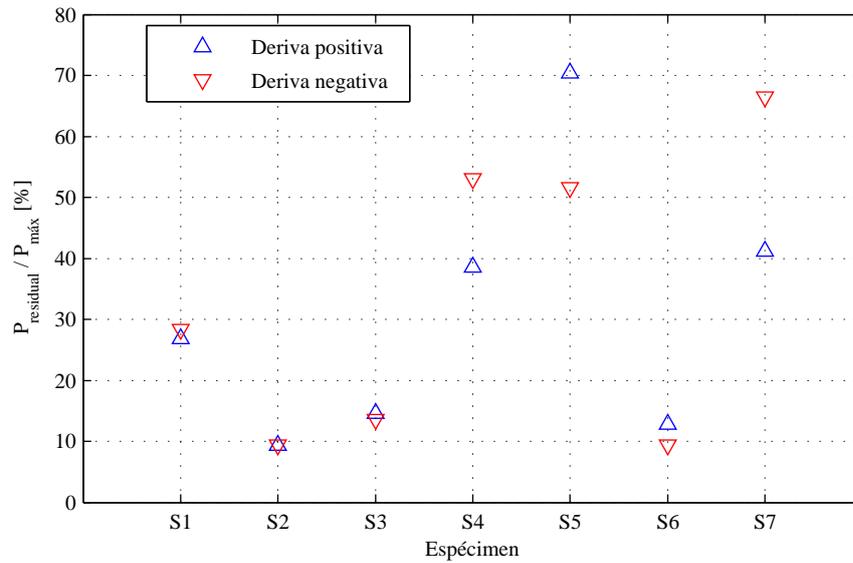
Figura 4.22: Resultados experimentales, deriva en $P_{m\acute{a}x}$ y deriva en $0,9P_{m\acute{a}x}$

Por último, la figura 4.23-a se muestra la capacidad residual de los especímenes ($P_{residual}$), definida anteriormente, como la capacidad del ensayo a una deriva de un 2 %. En la figura 4.23-b, se muestra la diferencia porcentual entre la capacidad máxima del ensayo y la residual, la que nos muestra el nivel de degradación de la capacidad de cada espécimen. Los especímenes S2, S3 y S6, que están fuertemente armados, presentan el comportamiento más frágil de la batería de ensayos, mostrando una capacidad residual de 10–15 % de la capacidad máxima. En cambio, el espécimen S1, con la mitad de armadura transversal que los anteriores 3, presenta una menor degradación de la capacidad para el mismo nivel de deriva. El espécimen S5, que es el más esbelto, presenta una capacidad residual del orden de un 60 %, en promedio, de la capacidad

máxima, siendo el espécimen con una menor degradación de capacidad, para un nivel de deriva de 2%. También los especímenes S4 y S7 presentan poca degradación.



(a)



(b)

Figura 4.23: Resultados experimentales, capacidad residual

4.3. Componentes de desplazamiento

En los gráficos a continuación se muestran las componentes de desplazamientos obtenidas en los ensayos, graficadas contra el desplazamiento total (desplazamiento lateral superior). Las componentes de desplazamiento son obtenidas como se detalla en el capítulo 3.3.1.

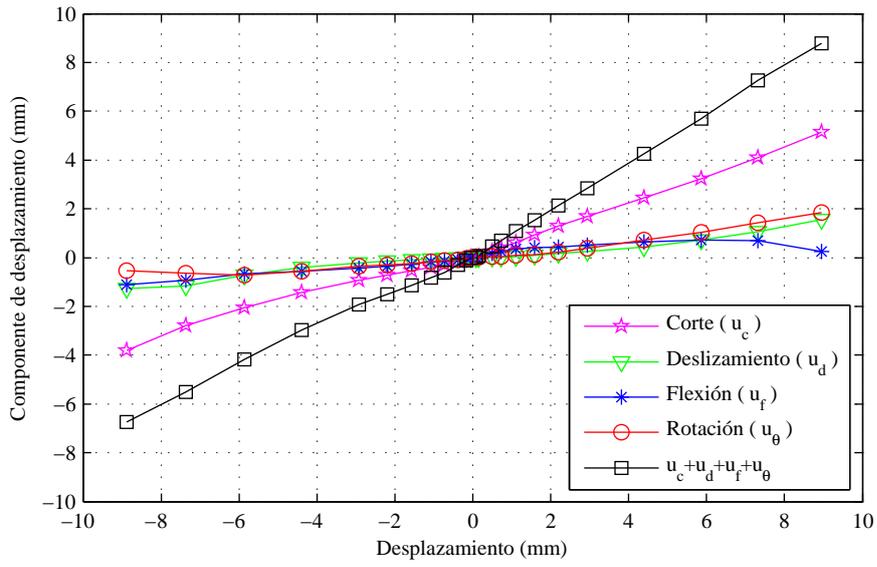


Figura 4.24: Espécimen S1, componentes de desplazamiento

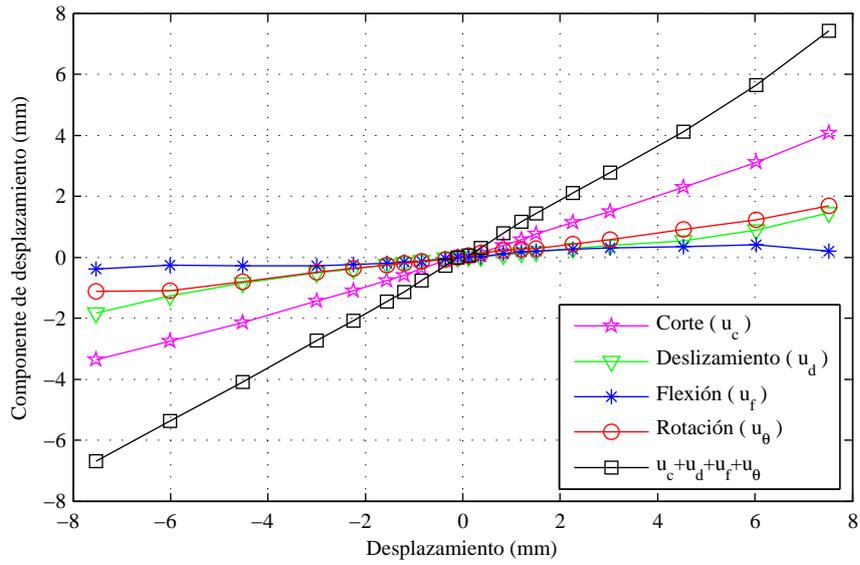


Figura 4.25: Espécimen S2, componentes de desplazamiento

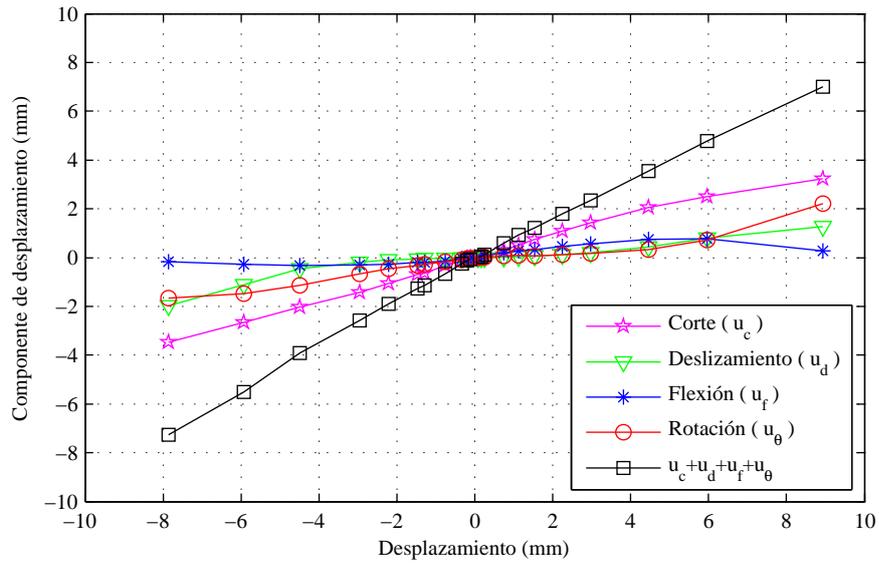


Figura 4.26: Espécimen S3, componentes de desplazamiento

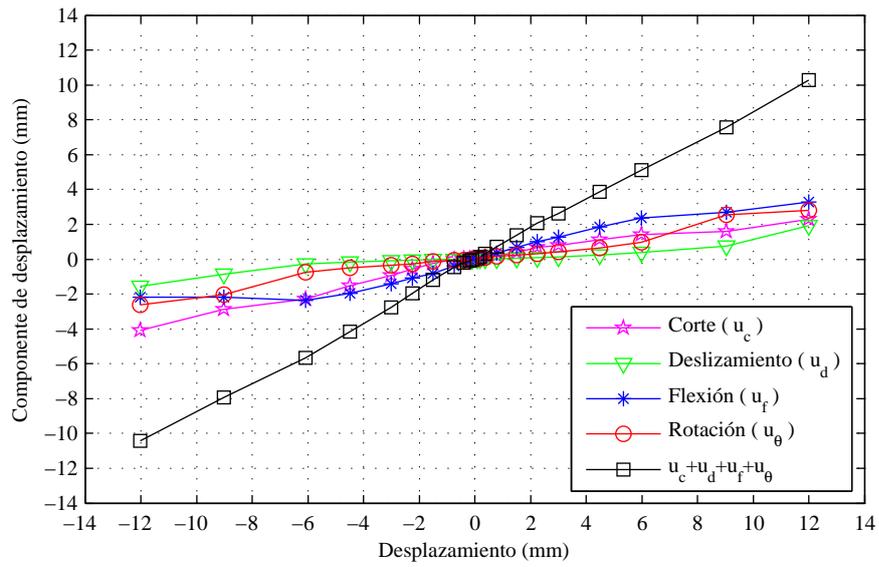


Figura 4.27: Espécimen S5, componentes de desplazamiento

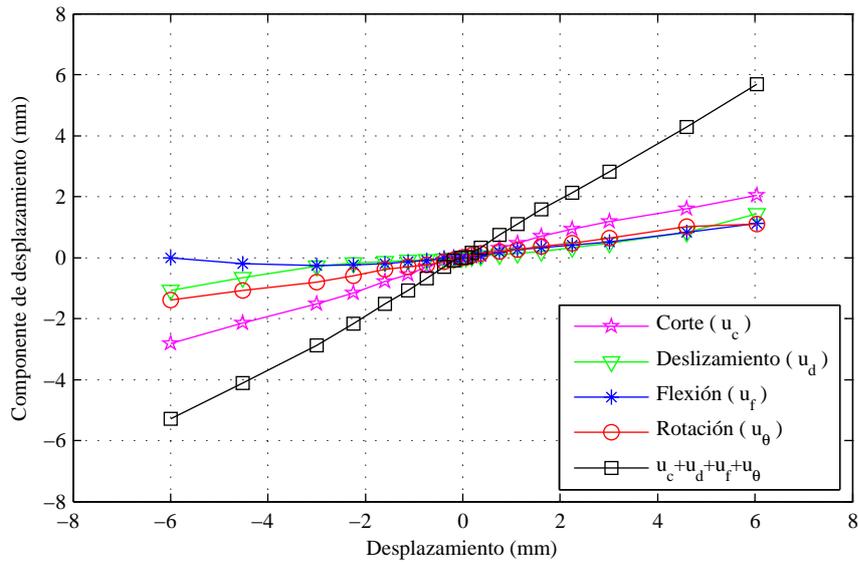


Figura 4.28: Espécimen S6, componentes de desplazamiento

En particular, los especímenes S4 y S7 presentan resultados no confiables en los sensores V_1 y V_2 (ver figura 3.11, capítulo 3.3), por lo cual no es posible obtener por separado la componente de desplazamiento por flexión del muro y la componente por rotación en la interfaz muro-pedestal. En éste caso, se presentan las componentes de corte, deslizamiento y flexión global (de pedestal a pedestal).

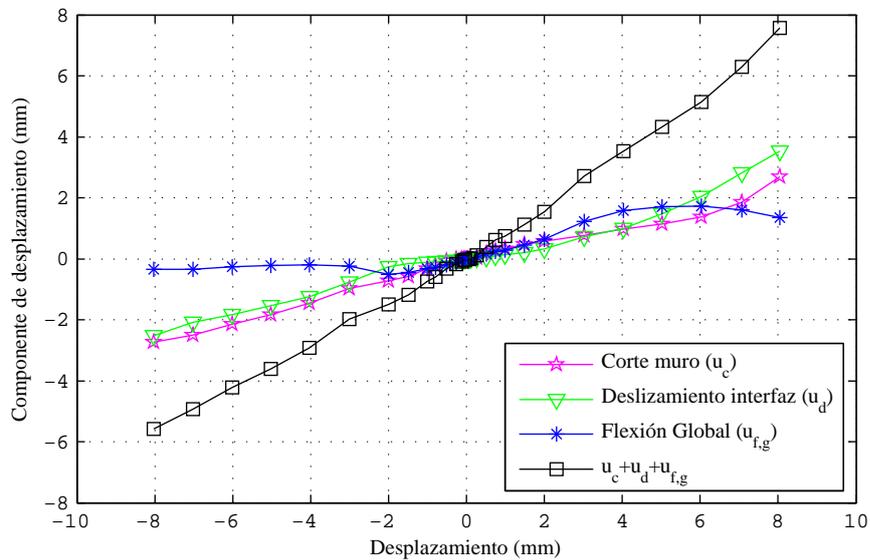


Figura 4.29: Espécimen S4, componentes de desplazamiento

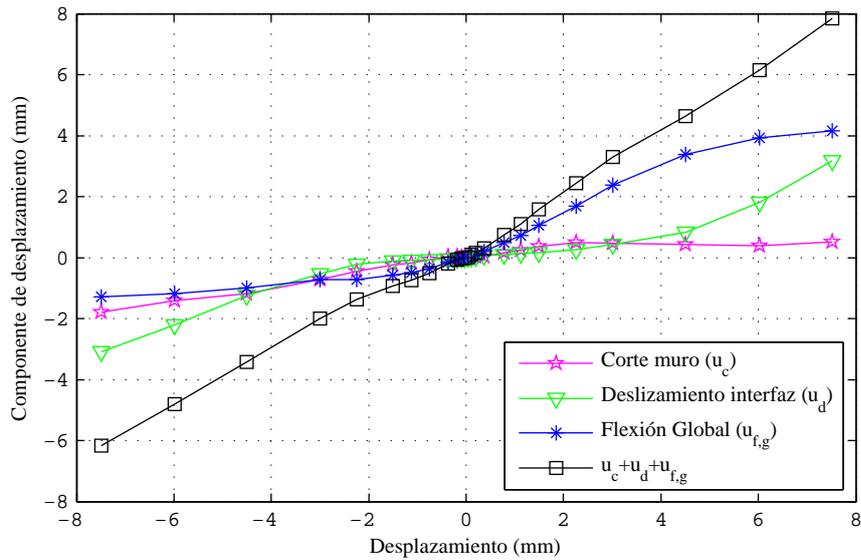


Figura 4.30: Especimen S7, componentes de desplazamiento

4.4. Expansión lateral

En la figura 4.31 se grafica la expansión lateral de cada ensayo, a una altura igual a $0,38h_w$ desde la base del muro, donde h_w es la altura total del muro, punto que corresponde, de acuerdo a la ecuación 2.1, a la máxima expansión lateral. Como los instrumentos para medir la expansión lateral no necesariamente están ubicados a esta altura desde la base ($H_1 a H_n$, ver figura 3.11), la expansión se obtiene mediante una interpolación lineal entre las medidas obtenidas con el instrumento por sobre y bajo la altura $0,38h_w$.

La tendencia general es a aumentar la expansión lateral de los muros a medida que aumenta el nivel de deriva. El espécimen S7 sale de la tendencia, se observa que aproximadamente a partir de un 1% de deriva la expansión lateral tiende a ser constante. Esto se explica por el modo de falla de este muro, que es por deslizamiento en la base, lo que hace que la expansión sea baja.

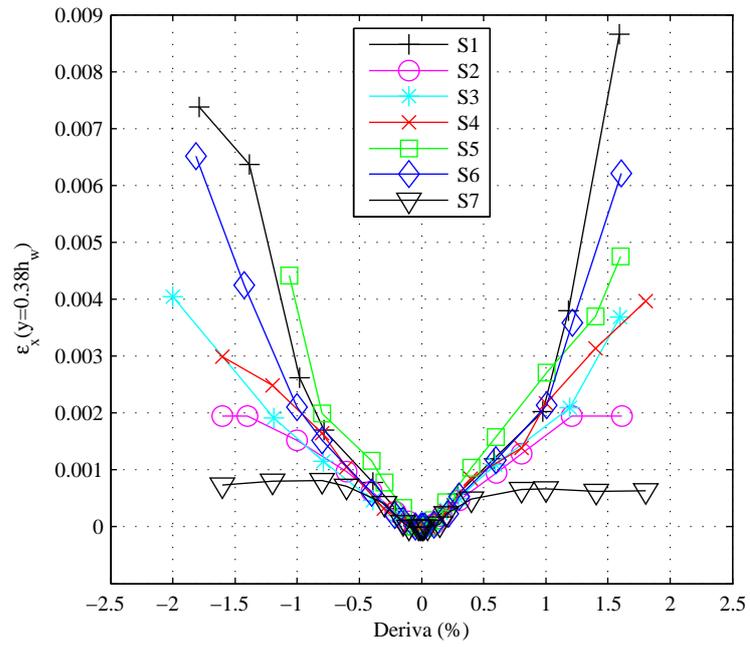


Figura 4.31: Expansión lateral, 7 especímenes

5. Validación del modelo

Es necesario aclarar como se contrasta el modelo con los resultados experimentales. El modelo de interacción es válido para modelar, valga la redundancia, el comportamiento de un muro en voladizo, perfectamente empotrado en su base. En la práctica, como se ha visto en el presente trabajo, en la base de los muros se genera una fisura, que permite tanto una rotación como un deslizamiento del muro como un cuerpo rígido (ver figura 3.10). El modelo de interacción flexión–corte descrito en el capítulo 2.1 no incorpora dicho efecto. Existen 2 maneras de resolver esta discrepancia: una es modelar directamente la rotación y/o deslizamiento en la base, y otra manera es restar del desplazamiento superior obtenido en los ensayos, las componentes atribuibles a la rotación y deslizamiento en la base, de manera que, suponiendo que las componentes del desplazamiento son en efecto producto solamente del deslizamiento, rotación en la base, flexión y corte, se puede obtener un resultado que es posible comparar con el modelo. Modelar el fenómeno del deslizamiento en la interfaz muro–pedestal inferior queda fuera del alcance de este trabajo, sin embargo, es posible modelar un resorte rotacional para modelar el efecto de la rotación en la base, como se explica en el capítulo 2.4.

En el presente trabajo, para contrastar los resultados del modelo con el de los ensayos, se opta por restar al desplazamiento lateral superior del muro, los efectos de la rotación y el deslizamiento, puesto que se cuenta con instrumentos dispuestos para tal propósito. Sin embargo, en el caso de los especímenes S4 y S7, los sensores V_1 y V_2 (ver figura 3.11) entregan información errónea y son descartados como información útil. Como se explica en el capítulo 3.3.1, para obtener la rotación en la base, es necesario restar a la flexión global (de pedestal a pedestal), el efecto de la flexión del muro (que depende de los DCDTs V_1 y V_2), es por esta razón, que para los especímenes S4 y S7, se incorpora al modelo un resorte rotacional en la base.

Con el valor estimado de la rotación en la base mediante el resorte rotacional, es posible calcular la componente de flexión del muro, restando a la flexión global, la componente de la rotación,

$$u_f^A = u_{f,g} - u_\theta^A \quad (5.1)$$

donde la “A” viene del *ajuste* mediante un resorte rotacional, para diferenciar ambos procedimientos, el que incluye un resorte, y el que no. En el presente capítulo, todos los gráficos están corregidos de una o la otra manera.

Como el modelo no es cíclico, para comparar los resultados con los ensayos, se toman los

puntos correspondientes a la envolvente de cada ensayo.

5.1. Comparación respuesta carga versus desplazamiento

Una vez hecha la corrección al desplazamiento total, como se explica anteriormente, se compara con el modelo de interacción y los resultados se observan en las siguientes figuras. La respuesta analítica se muestra hasta inicios de degradación de capacidad, ya que éste tipo de modelos sufre de localización del daño y por ende es dependiente de la discretización utilizada. Las figuras 5.4, 5.5 y 5.7 no muestran todos los ciclos corregidos, puesto a que llegado un cierto nivel de daño en los muros, los DCDTs que estiman el deslizamiento dejan de funcionar correctamente, y por lo tanto los gráficos se muestran hasta el punto en que los resultados son confiables.

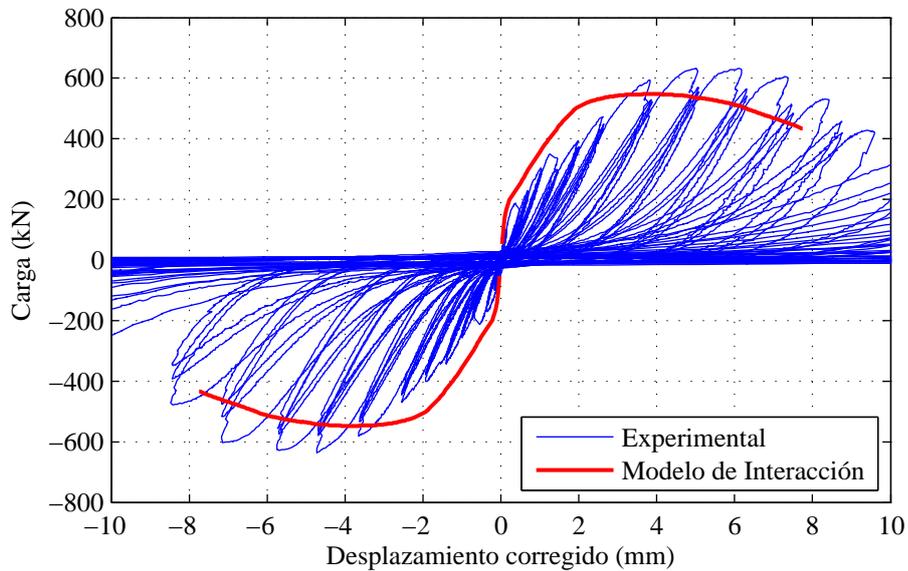


Figura 5.1: Especimen S1, gráfico carga versus desplazamiento corregido

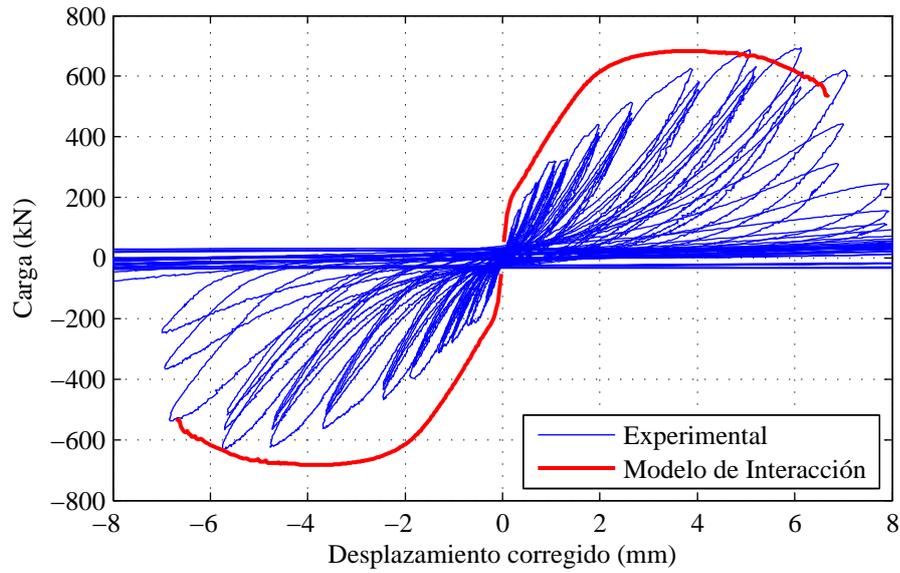


Figura 5.2: Especimen S2, gráfico carga versus desplazamiento corregido

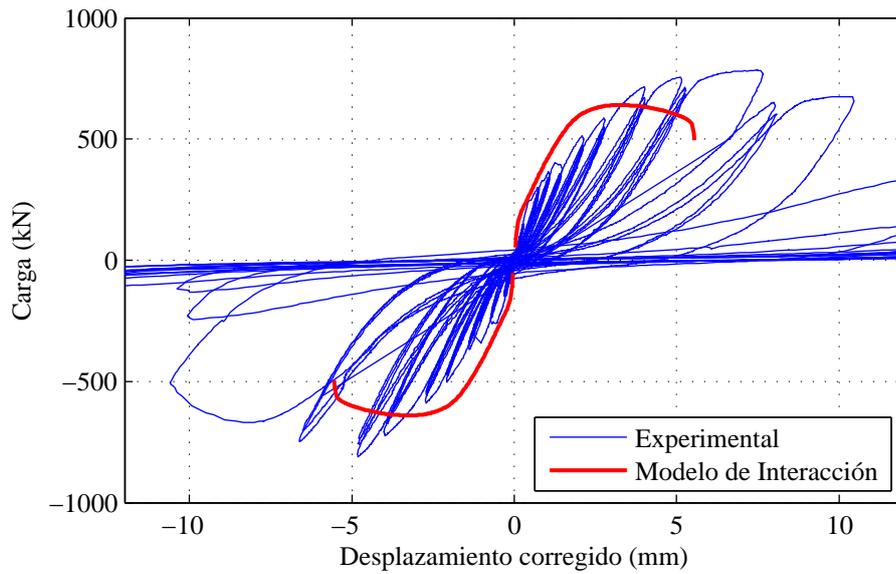


Figura 5.3: Especimen S3, gráfico carga versus desplazamiento corregido

Nótese que en la figura 5.3, falta el ciclo que contiene a la carga máxima negativa (comparar con figura 4.16). Esto se debe a dificultades en éste nivel del ensayo (la máquina se detuvo) por las cuales no se pudieron recuperar datos confiables de los instrumentos necesarios para hacer la corrección al desplazamiento en esos puntos.

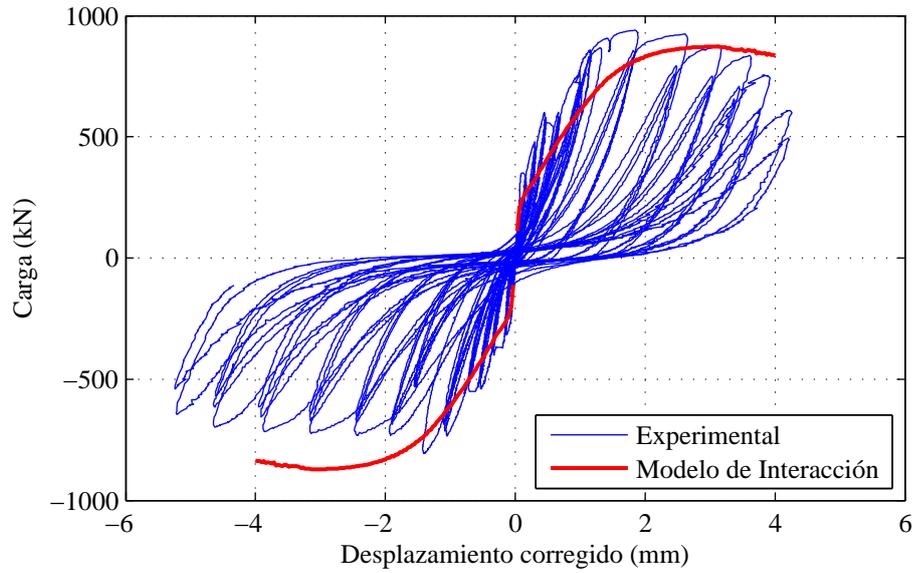


Figura 5.4: Espécimen S4, gráfico carga versus desplazamiento corregido (resorte rotacional)

Las figuras 5.4, 5.5 y 5.7 muestran curvas carga–desplazamiento corregido no completas. Esto se debe a que las curvas se truncaron en un punto en que los datos de los instrumentos empiezan a entregar datos inconsistentes y por lo tanto la corrección del desplazamiento es poco confiable. Las figuras con las curvas completas se adjuntan en el anexo E.

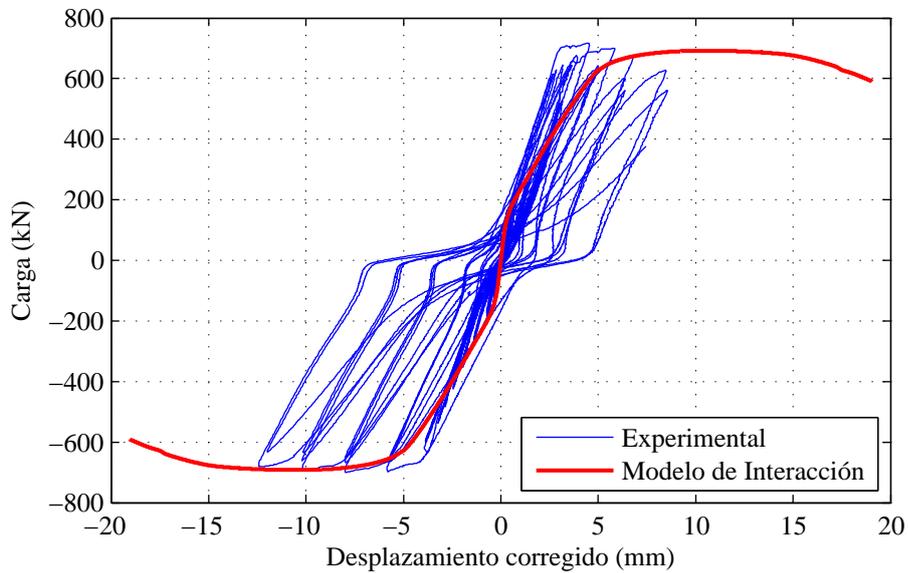


Figura 5.5: Espécimen S5, gráfico carga versus desplazamiento corregido

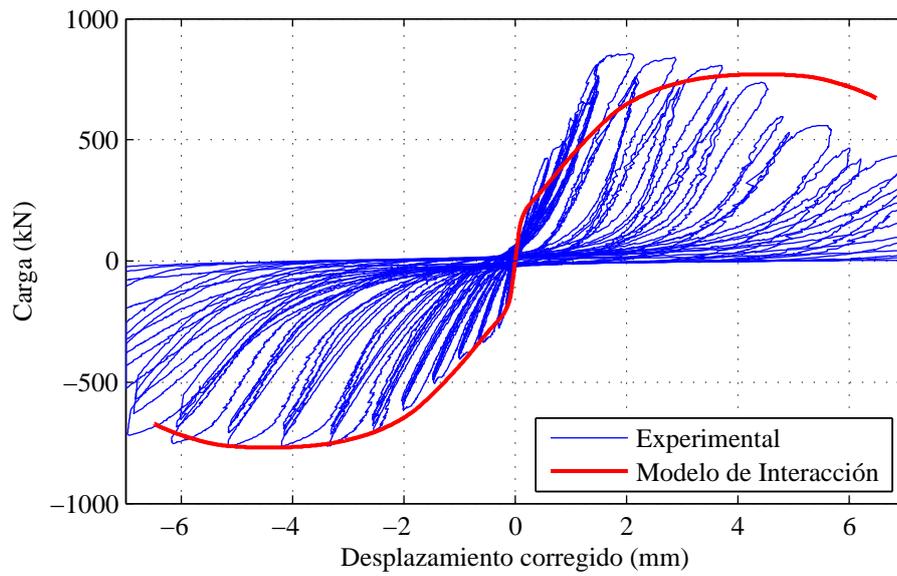


Figura 5.6: Espécimen S6, gráfico carga versus desplazamiento corregido

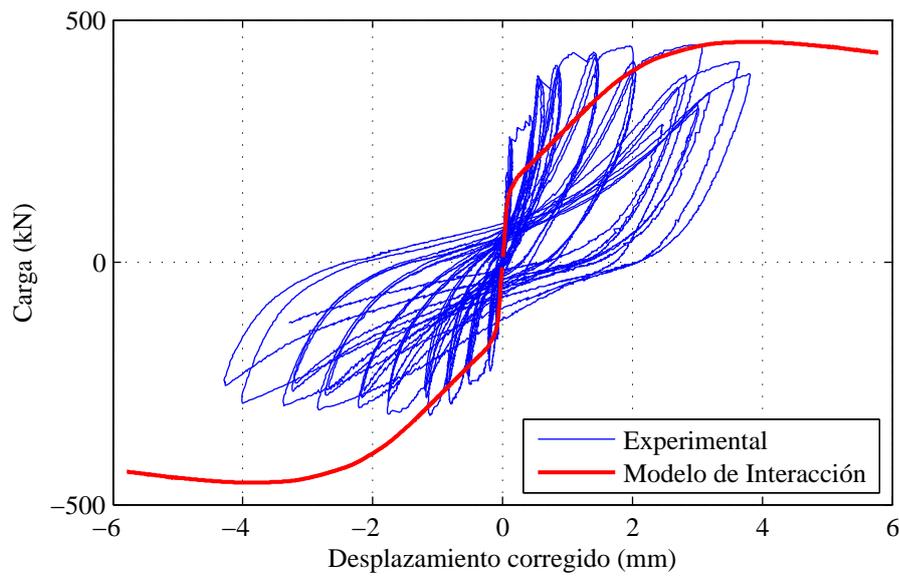


Figura 5.7: Espécimen S7, gráfico carga versus desplazamiento corregido (rótula plástica)

Las siguientes figuras resumen los resultados,

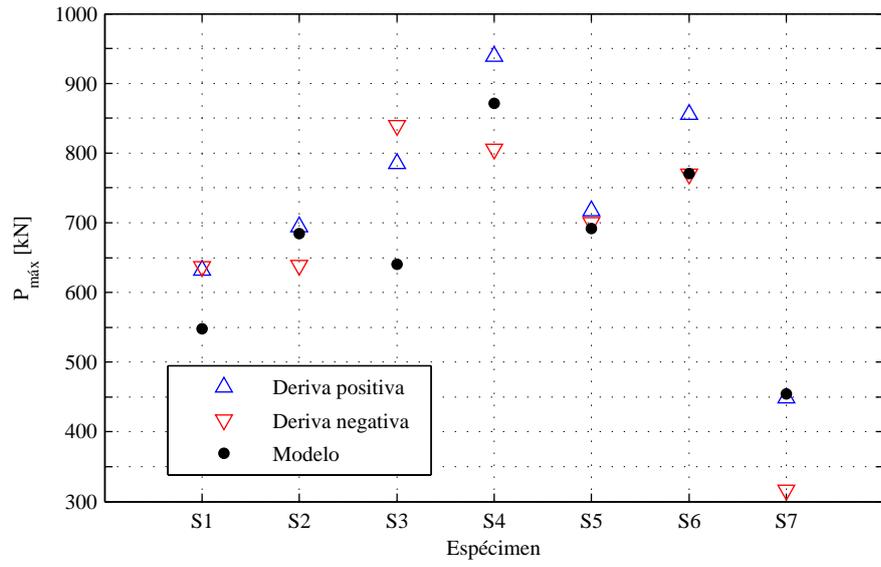


Figura 5.8: Comparación cargas máximas

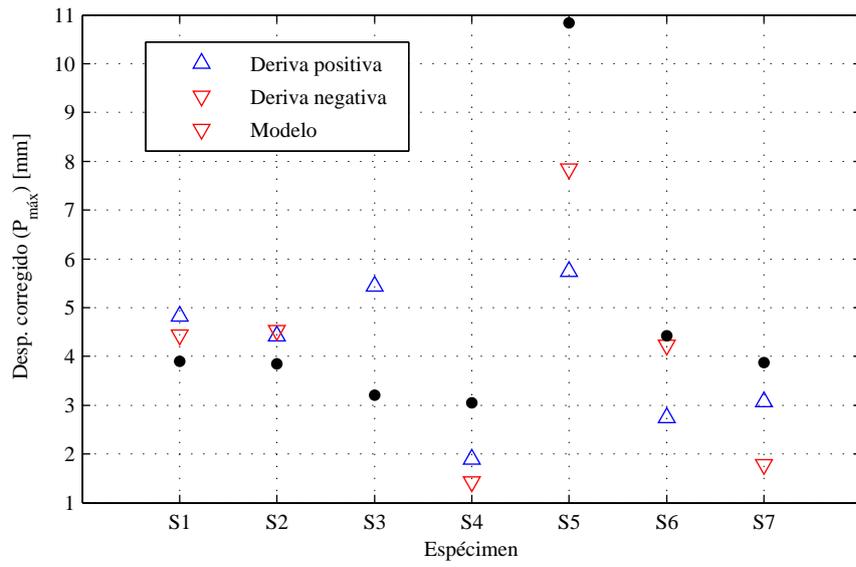


Figura 5.9: Comparación de desplazamientos a la carga máxima

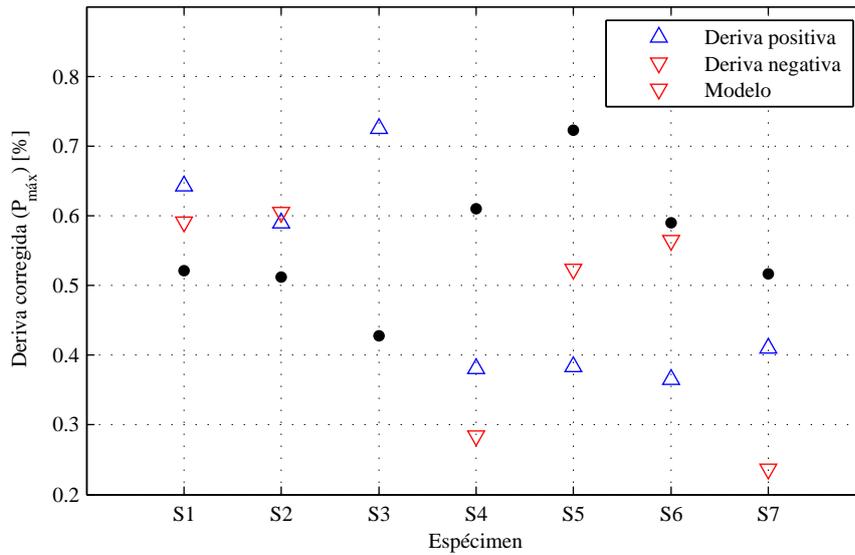


Figura 5.10: Comparación de deriva a la carga máxima

En la figura 5.9 se muestra el desplazamiento (desplazamiento corregido) al nivel de carga máxima del ensayo comparado con el desplazamiento entregado por el modelo en el a la carga máxima. En el caso del espécimen S3, no se muestra el desplazamiento corregido correspondiente a la carga máxima para la deriva negativa, pues ese dato no es posible de obtener como se explicó anteriormente. Lo mismo ocurre con las figuras 5.10, 5.11 y 5.12.

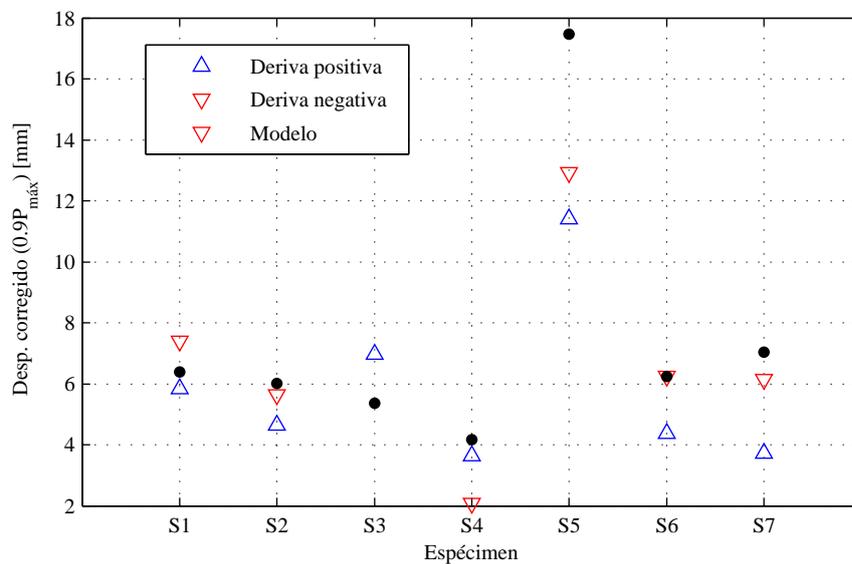


Figura 5.11: Comparación de desplazamientos a 90 % de la carga máxima

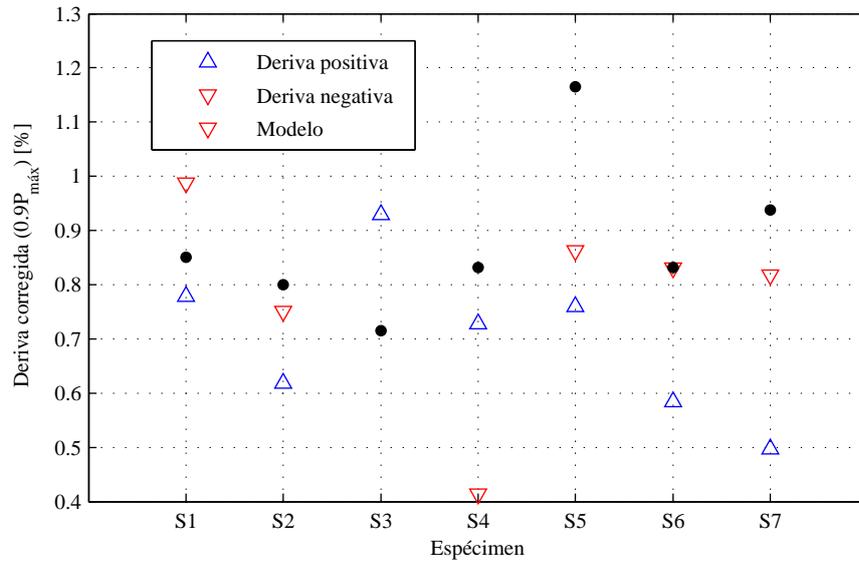


Figura 5.12: Comparación de deriva a 90% de la carga máxima

5.2. Comparación de componentes de desplazamiento

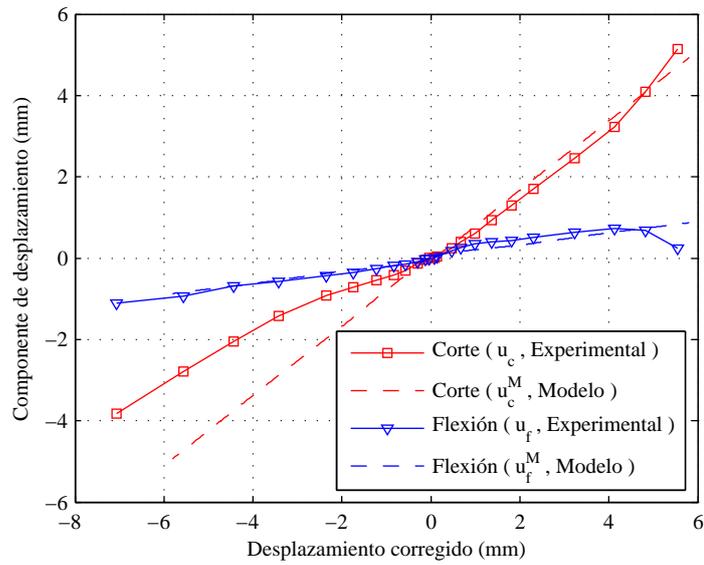


Figura 5.13: Espécimen S1, comparación de componentes de desplazamiento

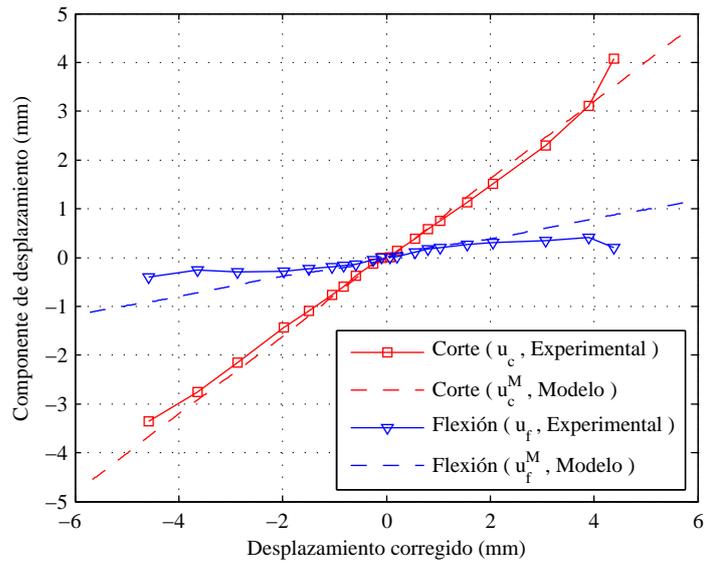


Figura 5.14: Espécimen S2, comparación de componentes de desplazamiento

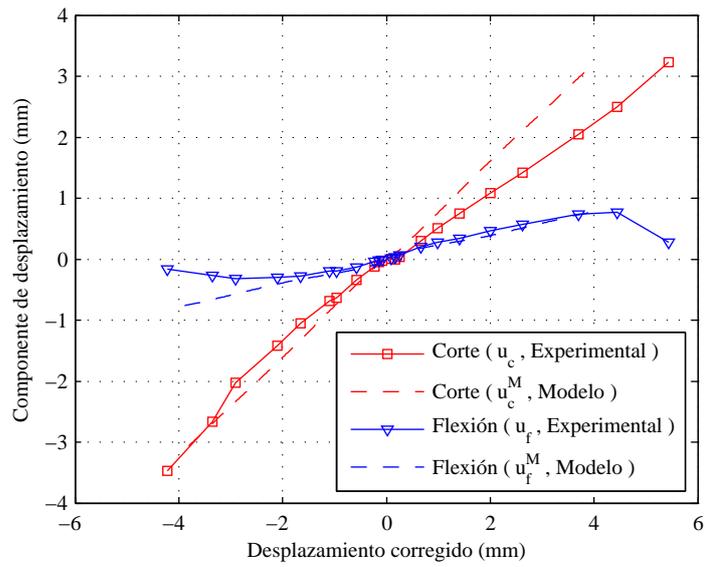


Figura 5.15: Espécimen S3, comparación de componentes de desplazamiento

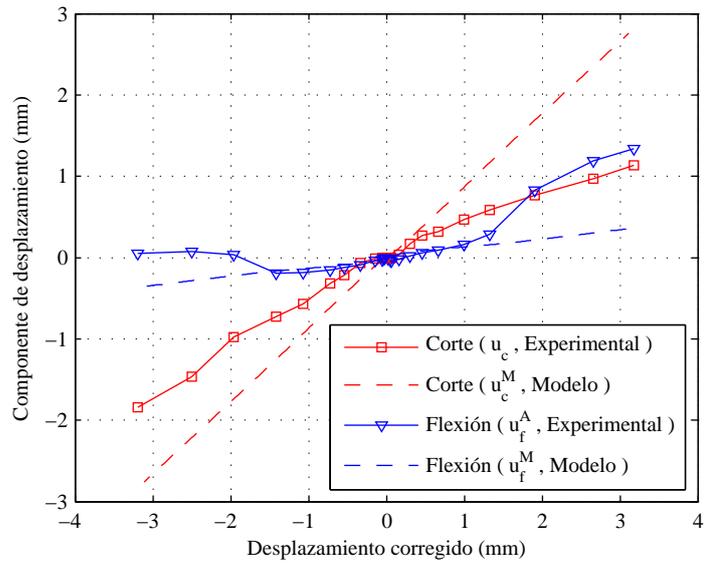


Figura 5.16: Espécimen S4, comparación de componentes de desplazamiento (resorte rotacional)

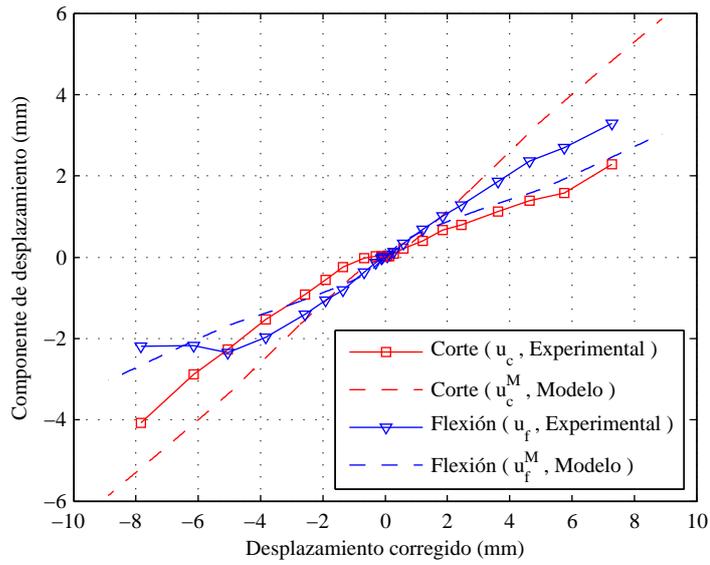


Figura 5.17: Espécimen S5, comparación de componentes de desplazamiento

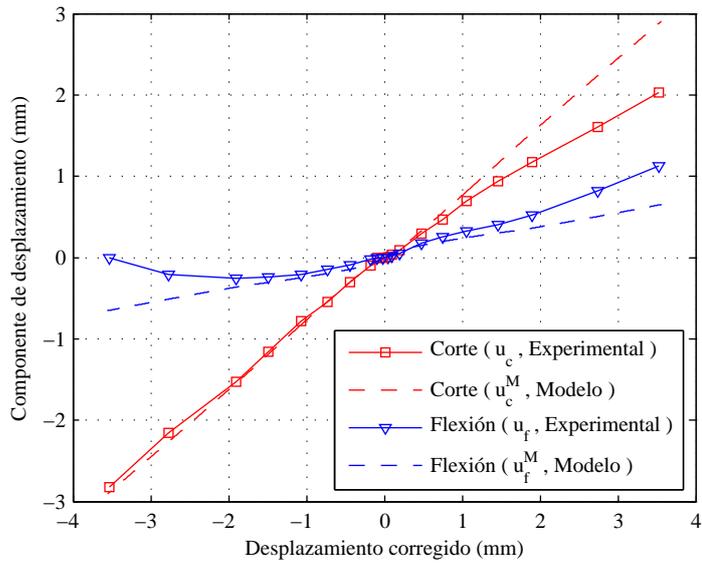


Figura 5.18: Espécimen S6, comparación de componentes de desplazamiento

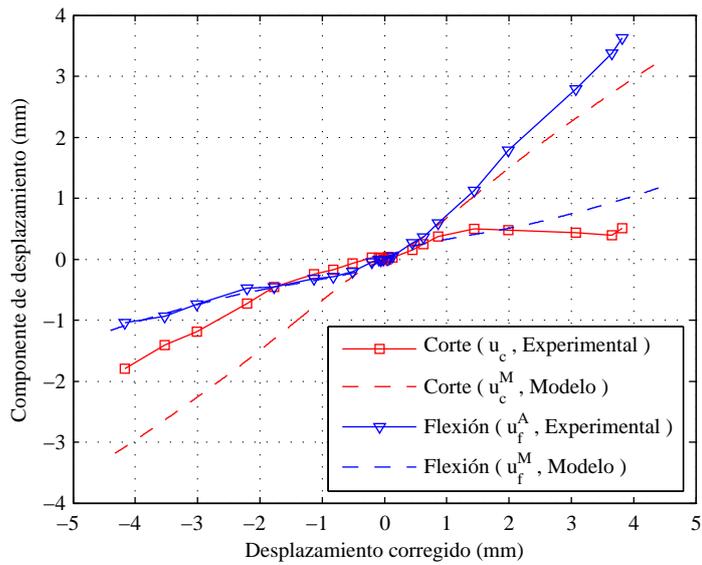
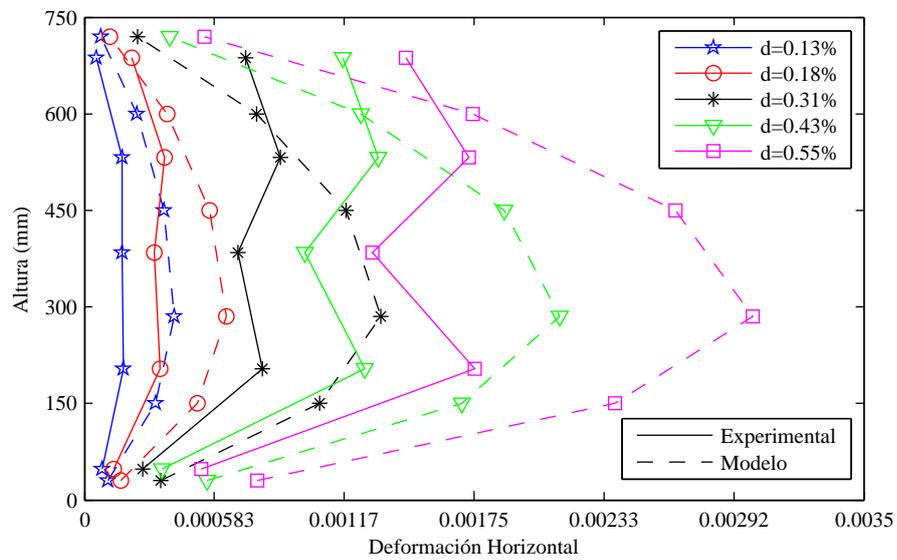


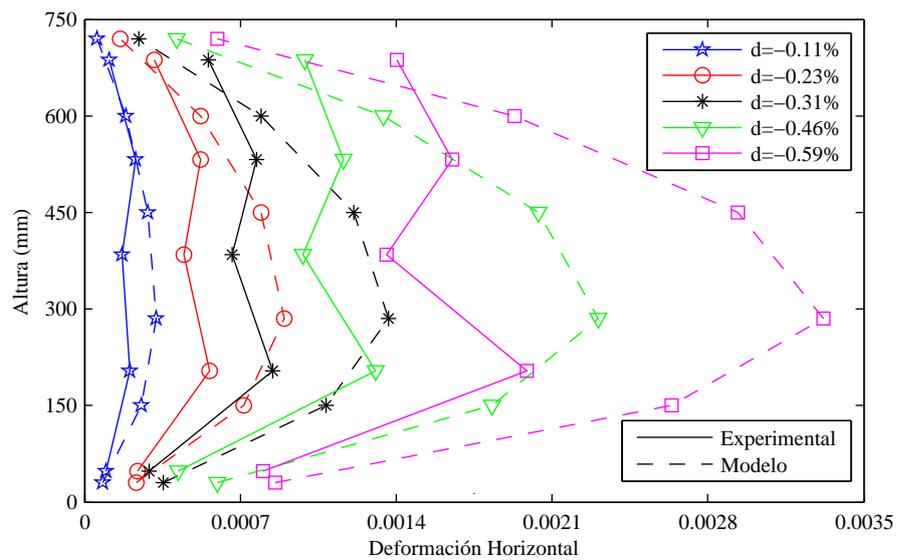
Figura 5.19: Espécimen S7, comparación de componentes de desplazamiento (resorte rotacional)

5.3. Comparación de la expansión lateral

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos contrastados con los resultados entregados por el modelo. Como el ensayo es cíclico se separan los casos en deriva positiva y negativa, tomando el primer ciclo para cada nivel de deriva. En todos los casos, el máximo nivel de deriva (corregida) de las figuras corresponde aproximadamente con el punto de máxima carga del ensayo. La corrección al desplazamiento total se hace como se ha explicado anteriormente, salvo los casos de los especímenes S4 y S7 en que fue modelada una rótula plástica.

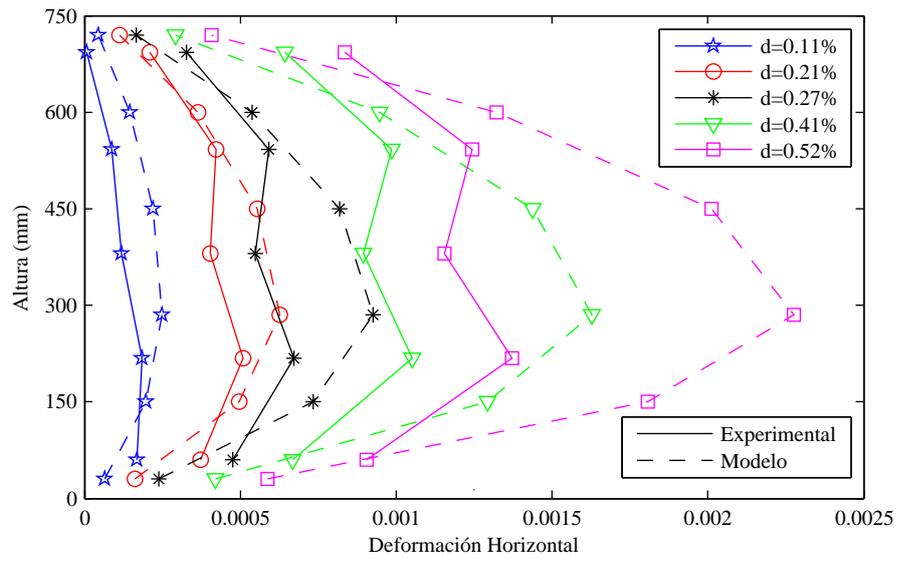


(a) Deriva positiva

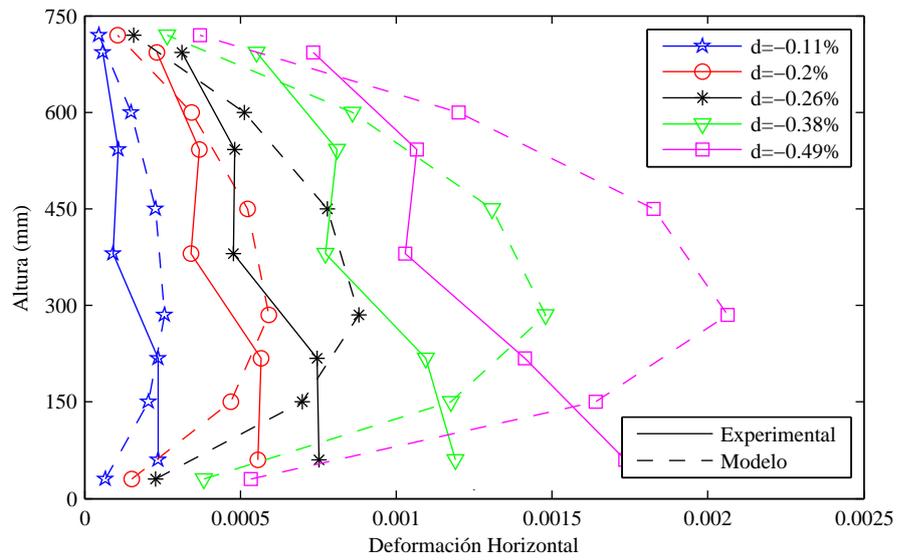


(b) Deriva negativa

Figura 5.20: Espécimen S1, expansión lateral

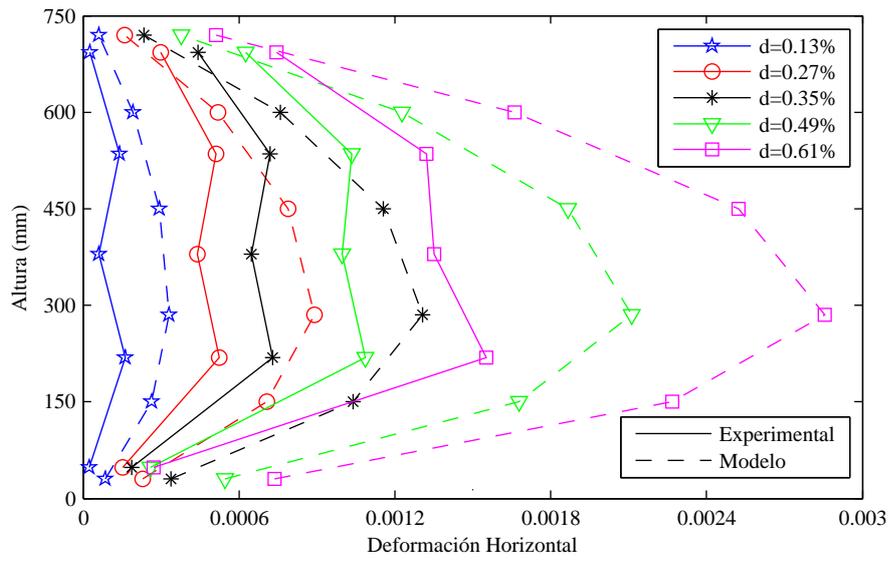


(a) Deriva positiva

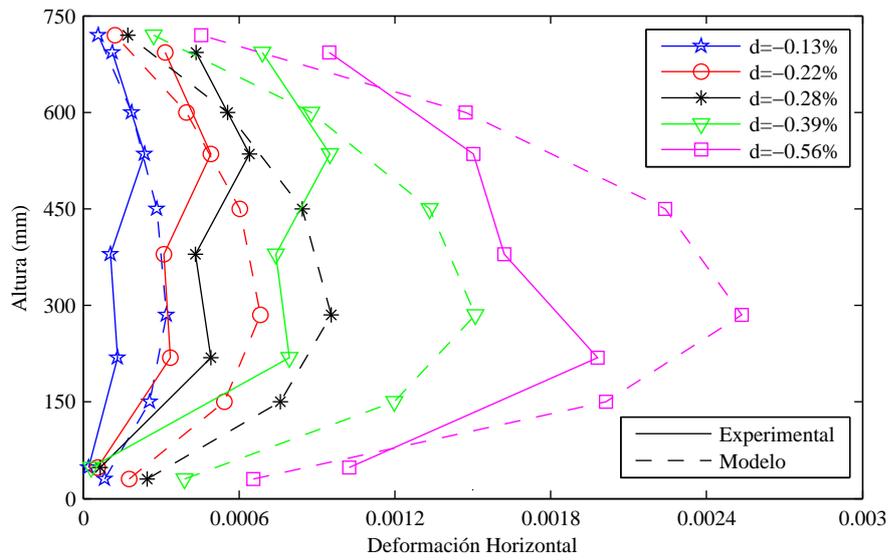


(b) Deriva negativa

Figura 5.21: Espécimen S2, expansión lateral

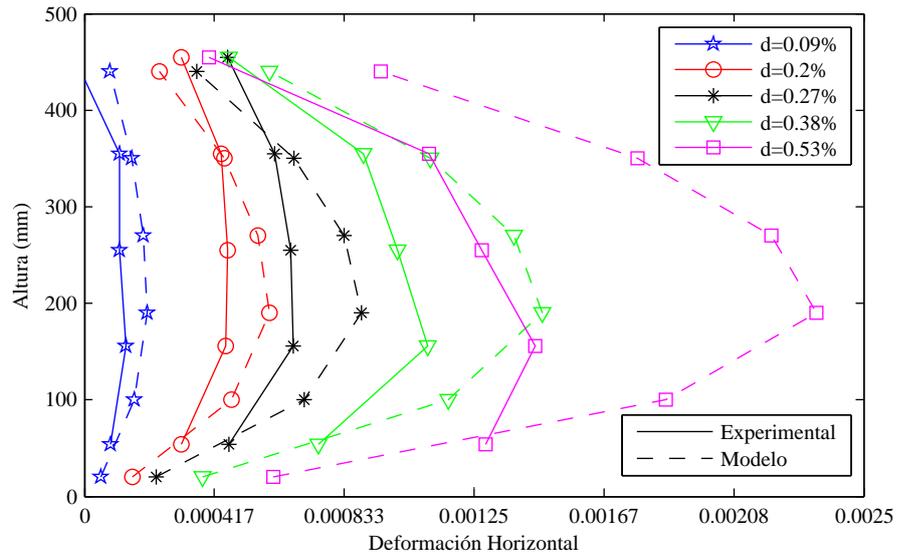


(a) Deriva positiva

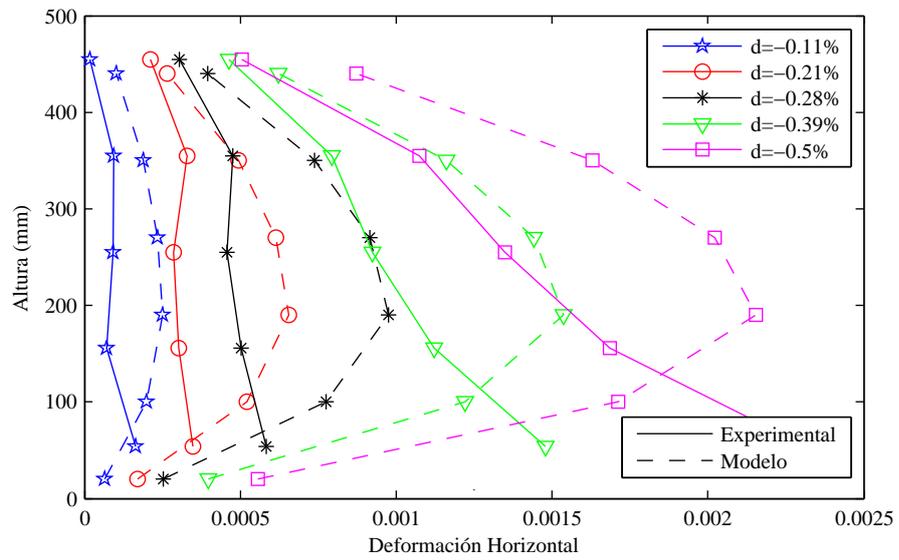


(b) Deriva negativa

Figura 5.22: Espécimen S3, expansión lateral

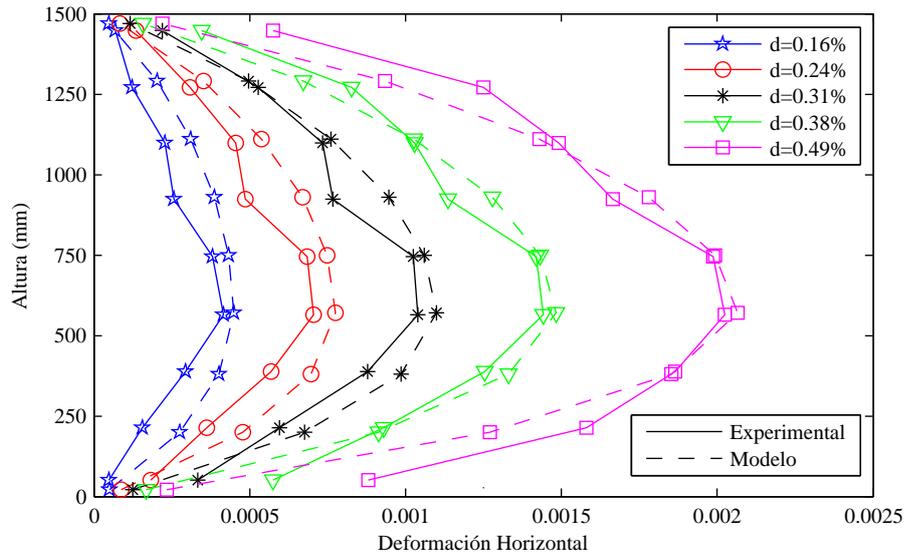


(a) Deriva positiva

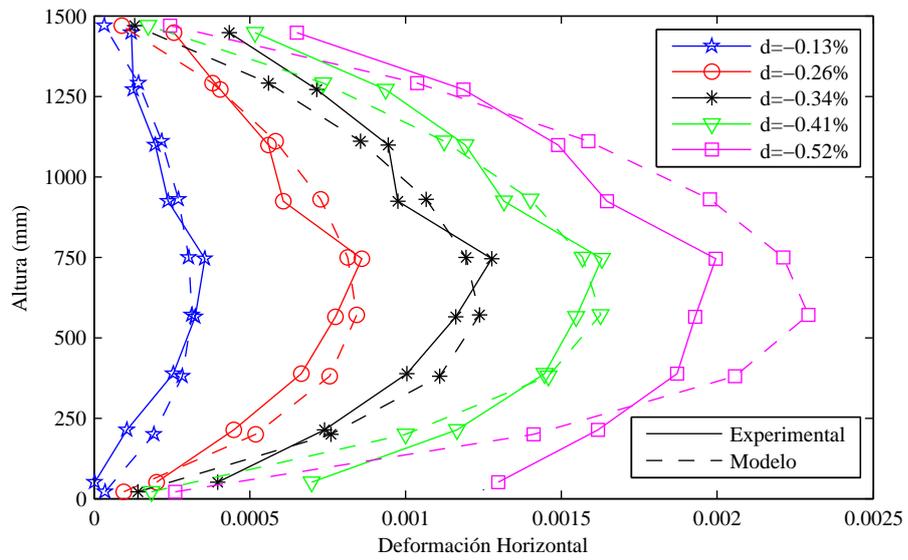


(b) Deriva negativa

Figura 5.23: Espécimen S4, expansión lateral (deriva corregida con resorte rotacional)

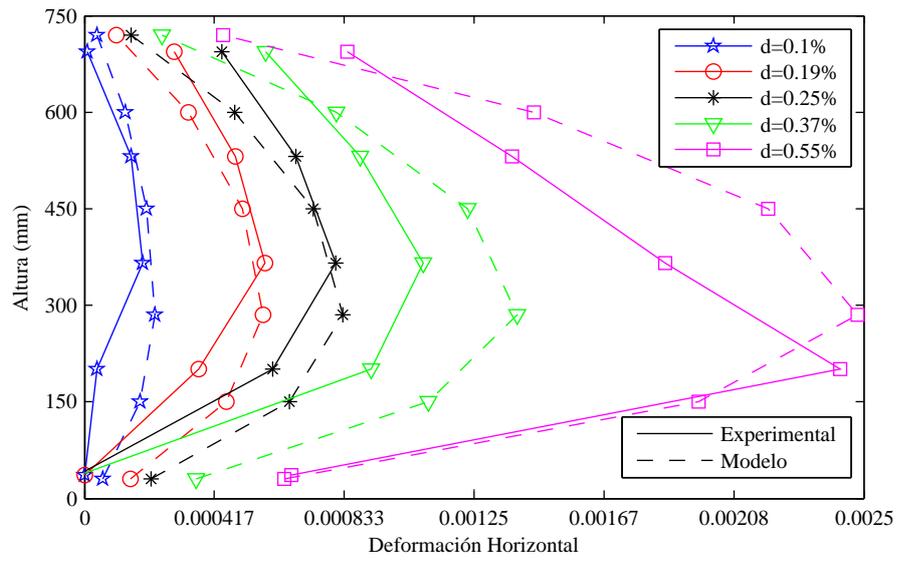


(a) Deriva positiva

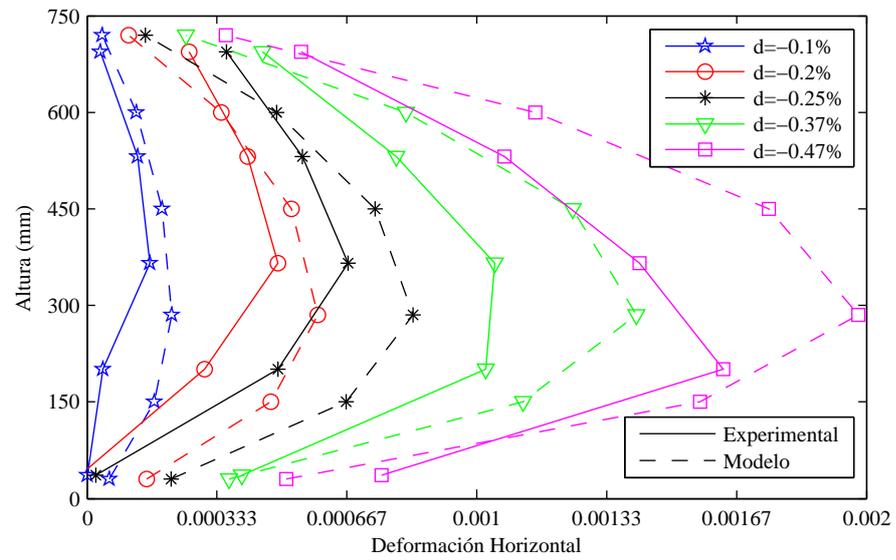


(b) Deriva negativa

Figura 5.24: Espécimen S5, expansión lateral

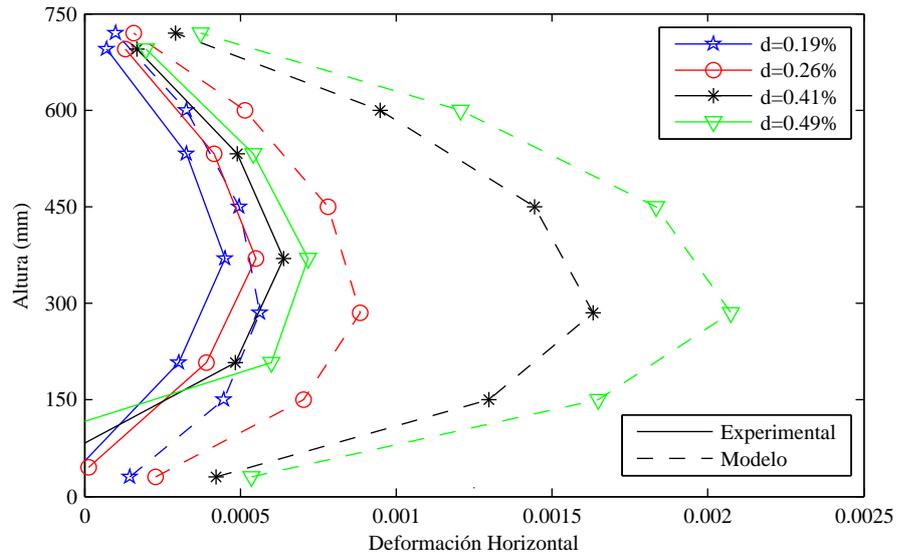


(a) Deriva positiva

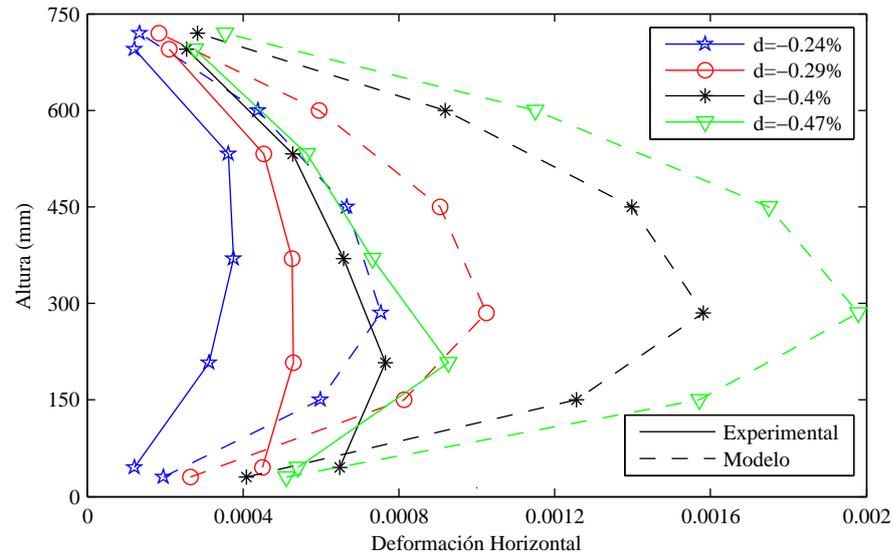


(b) Deriva negativa

Figura 5.25: Espécimen S6, expansión lateral



(a) Deriva positiva



(b) Deriva negativa

Figura 5.26: Espécimen S7, expansión lateral (deriva corregida con resorte rotacional)

En las siguientes figuras, se compara el valor máximo de la expansión lateral, ubicado a una altura $0,38h_w$ de la base, según la ecuación 2.1, con el valor aproximado a la misma altura obtenido mediante interpolación lineal de los datos medidos con el DCDT sobre y bajo $0,38h_w$ en cada caso. Es de notar que al interpolar linealmente, siempre se está obteniendo un valor menor al de los puntos que se consideraron al interpolar. La intención es tener un parámetro común de comparación para todos los ensayos. La deriva ha sido corregida como en el caso anterior.

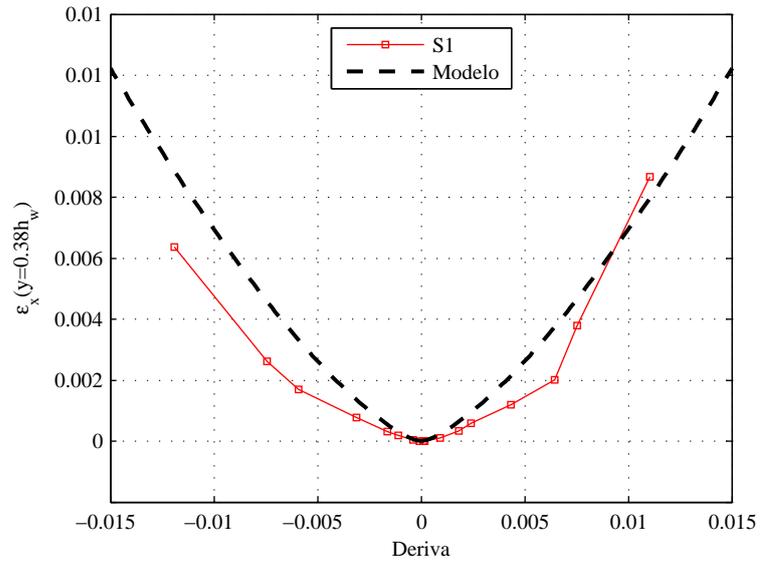


Figura 5.27: Espécimen S1, gráfico $\epsilon_{x,máx}$ versus deriva

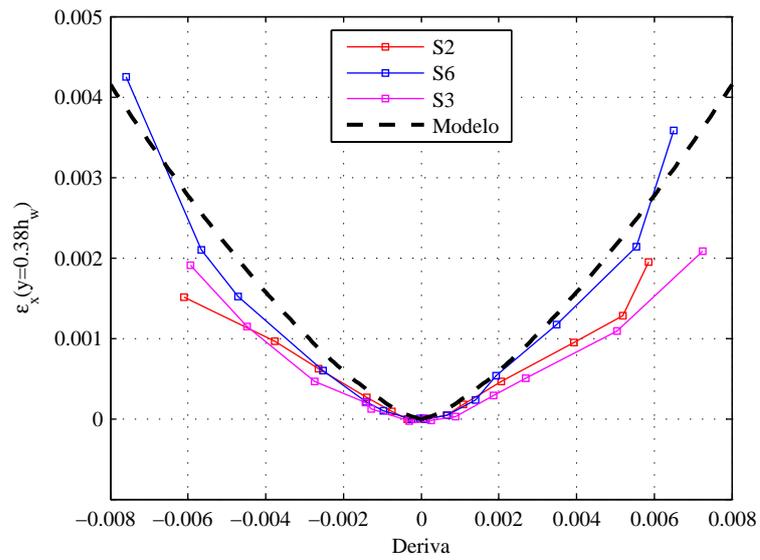


Figura 5.28: Especímenes S2, S3 y S6, gráfico $\epsilon_{x,máx}$ versus deriva

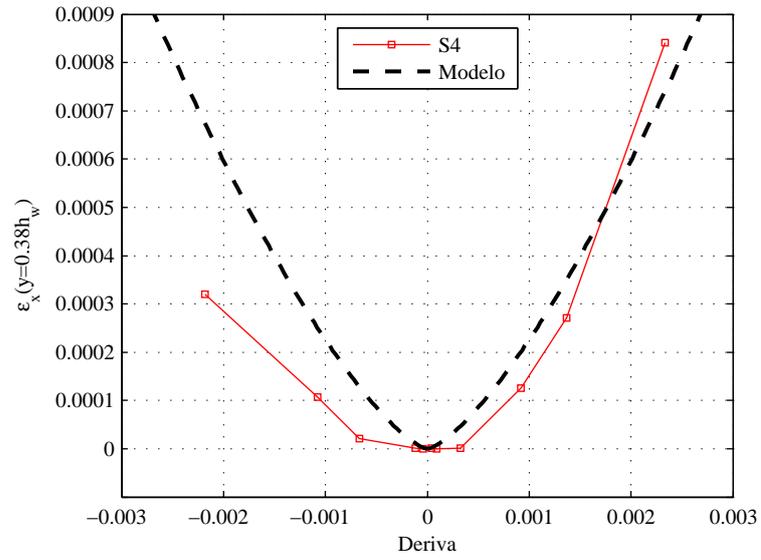


Figura 5.29: Especímenes S4, gráfico $\epsilon_{x,máx}$ versus deriva (resorte rotacional)

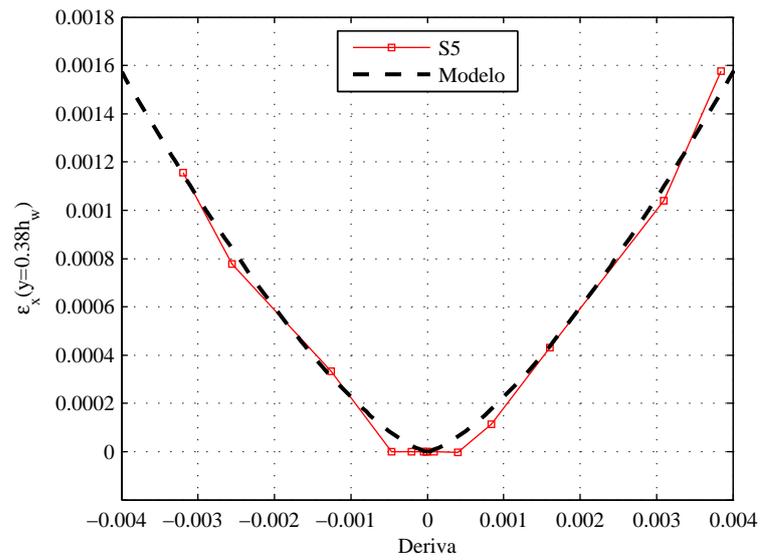


Figura 5.30: Especímenes S5, gráfico $\epsilon_{x,máx}$ versus deriva

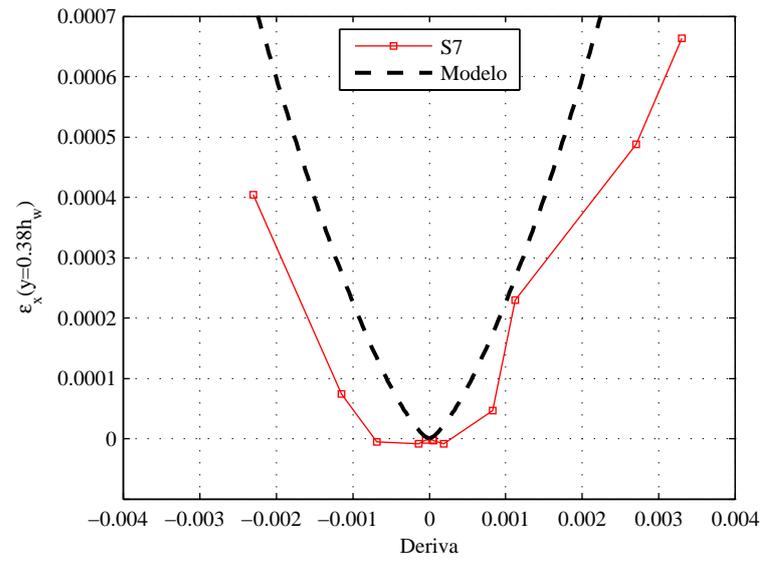


Figura 5.31: Especímenes S7, gráfico $\epsilon_{x,máx}$ versus deriva (resorte rotacional)

6. Conclusiones

Con respecto a los ensayos, en particular los ensayos S1, S2, S3, S6 y S7, se observa que para una misma geometría, distintas configuraciones en la armadura de refuerzo dan como resultado diferentes comportamientos y respuestas ante la carga lateral. En estos 5 especímenes se ven 3 modos de falla distintos, el S1 falla por tracción diagonal, el S7 presenta una falla por deslizamiento y los especímenes S2, S3 y S6 fallan por compresión en la base. El espécimen S4, siendo el más chato de la batería de ensayos, también falla por compresión en la base, y por último, el S5, presenta un comportamiento más flexural, y falla por flexo-compresión.

Los resultados de las componentes de desplazamiento de los ensayos, muestran que en todos los casos, la componente de deslizamiento es comparable a las componentes de flexión del muro, y la rotación en la base. La componente de corte predomina en los especímenes de relación alto/ancho igual a $1/2$, S1, S2, S3 y S6, y son también los muros que muestran una respuesta más frágil, con una capacidad residual del orden de un 20%. El espécimen S7 es la excepción, pues tiene una relación de aspecto igual a $1/2$, y recordando que cuenta con una armadura de borde mínima ($2\phi 8$), se observa que el deslizamiento en la base es del orden del doble comparado con los especímenes similares, y además muestra una tendencia al alza, y por otra parte, no es del todo clara la contribución de la componente de flexión global (que incluye la flexión en el muro y la rotación en la base), pues es la más grande en un sentido de la carga, y en el otro sentido no. En el muro más chato, el S4, con una relación de aspecto igual a $1/3$, la componente de corte es comparable a la del deslizamiento, mientras que no es posible concluir acerca de la flexión, pues en el sentido positivo de la carga predomina, y en el negativo tiene un aporte menor. En el espécimen S5, con una relación alto/ancho igual a 1, predomina el efecto de la flexión, el deslizamiento es la componente más chica, y la rotación y el corte tienden a ser del mismo orden.

El modo de falla más frágil, es la falla por compresión en la base, presente en los especímenes S2, S3 y S6, que muestran una capacidad residual promedio, de aproximadamente un 10% de la capacidad máxima; no así en el espécimen S4, que muestra una mayor capacidad residual para el mismo modo de falla (45% de la capacidad máxima aproximadamente), siendo una posible explicación a éste comportamiento, el aporte mayor del deslizamiento en la base al desplazamiento total, en comparación a los especímenes S2, S3 y S6. El espécimen S5 y el S7 muestran la mayor capacidad residual porcentualmente con respecto a la capacidad máxima, del orden de un 60% y un 55% respectivamente, ambos comportamientos atribuibles al mayor aporte de las componentes de flexión y deslizamiento. Por último, el espécimen S1, muestra una capacidad residual chica, del orden de un 28%, en comparación a los especímenes S4, S5 y S7, pero mayor que la de los especímenes S2, S3 y S6.

El gráfico de expansión lateral, figura 4.31 muestra que ésta aumenta a medida que el nivel de deriva del muro crece. Sólo el espécimen S7 muestra una tendencia a mantener un valor constante para valores de la deriva mayores a 1,0 %, atribuibles al modo de falla por deslizamiento que presenta el muro.

La comparación de las componentes de desplazamiento del modelo con las obtenidas experimentalmente, muestra una buena correlación en los especímenes S1, S2, S3 y S6, observándose que el modelo es capaz de reproducir de manera acertada el comportamiento de los muros en cuanto a sus componentes de flexión y corte. En tanto en los especímenes S4, S5 y S7 esto no es tan claro. Recordando que los especímenes S4 y S7 fueron modelados incluyendo un resorte rotacional en la base, y que por lo tanto la componente de flexión que se está comparando con el modelo, depende de éste resorte, que a su vez, es un modelo simplificado y aproximado, no es posible concluir con certeza acerca la componente de flexión de estos resultados. La componente de corte, en cambio, es perfectamente comparable, y no muestra una buena correlación. El caso del espécimen S5 tiene la particularidad de que las componentes de desplazamiento entregadas por el modelo son al contrario de las entregadas por el ensayo, es decir, el modelo entrega una componente de corte mayor que la de flexión, mientras que el ensayo entrega que la componente de flexión es mayor que la de corte.

La comparación de los perfiles de expansión lateral muestra una buena respuesta de el modelo propuesto por Massone (2010) para niveles de deriva del orden de 0,1 – 0,2 %, en los especímenes S1, S2, S3 y S4, aumentando las diferencias para derivas mayores. El espécimen S5 muestra una correlación excelente con el modelo, al igual que el espécimen S6. El espécimen S7 no muestra una buena respuesta. Al comparar la máxima expansión lateral calibrada, de acuerdo a la ecuación 2.1, también se observa una buena correlación para derivas del orden de un 0,1 – 0,2 %, que va empeorando a medida que aumenta, a excepción del espécimen S5 que muestra una correlación muy buena incluso para niveles de deriva cercanos a la carga máxima.

Con respecto a los resultados de carga–desplazamiento, vemos que en todos los casos, el modelo entrega una respuesta no lineal, con un tramo elástico y un cambio de pendiente asociado a la degradación del material, hasta llegar a la capacidad máxima, que es hasta donde el modelo tiene validez. En general, el modelo muestra la misma tendencia que los ensayos (ver figura 5.8), aumentando o disminuyendo la capacidad máxima, según las distintas configuraciones de armadura. Al comparar la carga máxima obtenida con el modelo, con el promedio de las cargas máximas de los ensayos (promedio entre la carga máxima en deriva positiva y negativa), se obtienen diferencias porcentuales de un 14 % para el espécimen S1, un 3 % para el S2, un 20 % el S3, un 0,2 % el S4, un 2,4 % el S5, un 5,3 % el S6 y un 18 % para el S7.

En resumen, el modelo de interacción flexión–corte muestra una buena predicción de la capacidad máxima de muros de hormigón armado, así como también de las componentes de corte y flexión. La ecuación calibrada para estimar la expansión lateral, muestra buena correlación para derivas del orden de 0,1 – 0,2% en muros con relación de aspecto alto/ancho igual a 1/2 y 1/3, mientras que, para una relación de aspecto igual a 1, muestra una excelente correlación incluso para niveles de deriva altos, cercanos a la falla. Por último, las componentes de desplazamiento de los especímenes S1, S2, S3 y S6 tienen una buena correlación con el modelo, para los especímenes S4 y S7 no es posible concluir, y el espécimen S5 muestra una respuesta contraria a la entregada por el modelo.

Referencias

- Belarbi, A., & Hsu, T.T.C. 1994. Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete. *ACI structural Journal*, **91**(4), 465–474.
- Carreira, D.J., & Chu, K.H. 1985. Stress-strain relationship for plain concrete in compression. *ACI Journal Proceedings*, **82**(6), 797–804.
- Collins, MP, & Porasz, A. 1989. Shear strength for high strength concrete. *Bull. No. 193-Design Aspects of High Strength Concrete, Comite Euro-International du Beton (CEB)*, 75–83.
- Massone, L.M. 2010. Strength prediction of squat structural walls via calibration of a shear-flexure interaction model. *Engineering Structures*, **32**(4), 922–932.
- Massone, L.M., & Wallace, J.W. 2004. Load-deformation responses of slender reinforced concrete walls. *ACI Structural Journal*, **101**(1), 103–113.
- Massone, LM, Orakcal, K., & Wallace, JW. 2006. Shear-flexure interaction for structural walls. *ACI SPECIAL PUBLICATIONS*, **236**, 127–150.
- Massone, L.M., Orakcal, K., & Wallace, J.W. 2009. Modeling of squat structural walls controlled by shear. *ACI Structural Journal*, **106**(5), 646–655.
- Mazzoni, S., McKenna, F., & Fenves, G.L. 2005. OpenSees command language manual. *Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)*.
- Terzioglu, T. 2011. *Experimental evaluation of the lateral load behavior of squat structural walls*. M.Phil. thesis, Department of Civil Engineering, Bogazici University.
- Vecchio, FJ, & Collins, MP. 1993. Compression response of cracked reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering*, **119**(12), 3590–3610.
- Wee, TH, Chin, MS, & Mansur, MA. 1996. Stress-Strain Relationship of High-Strength Concrete in Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **8**(2), 70–76.

Anexo A

Detalle: Armadura de los muros

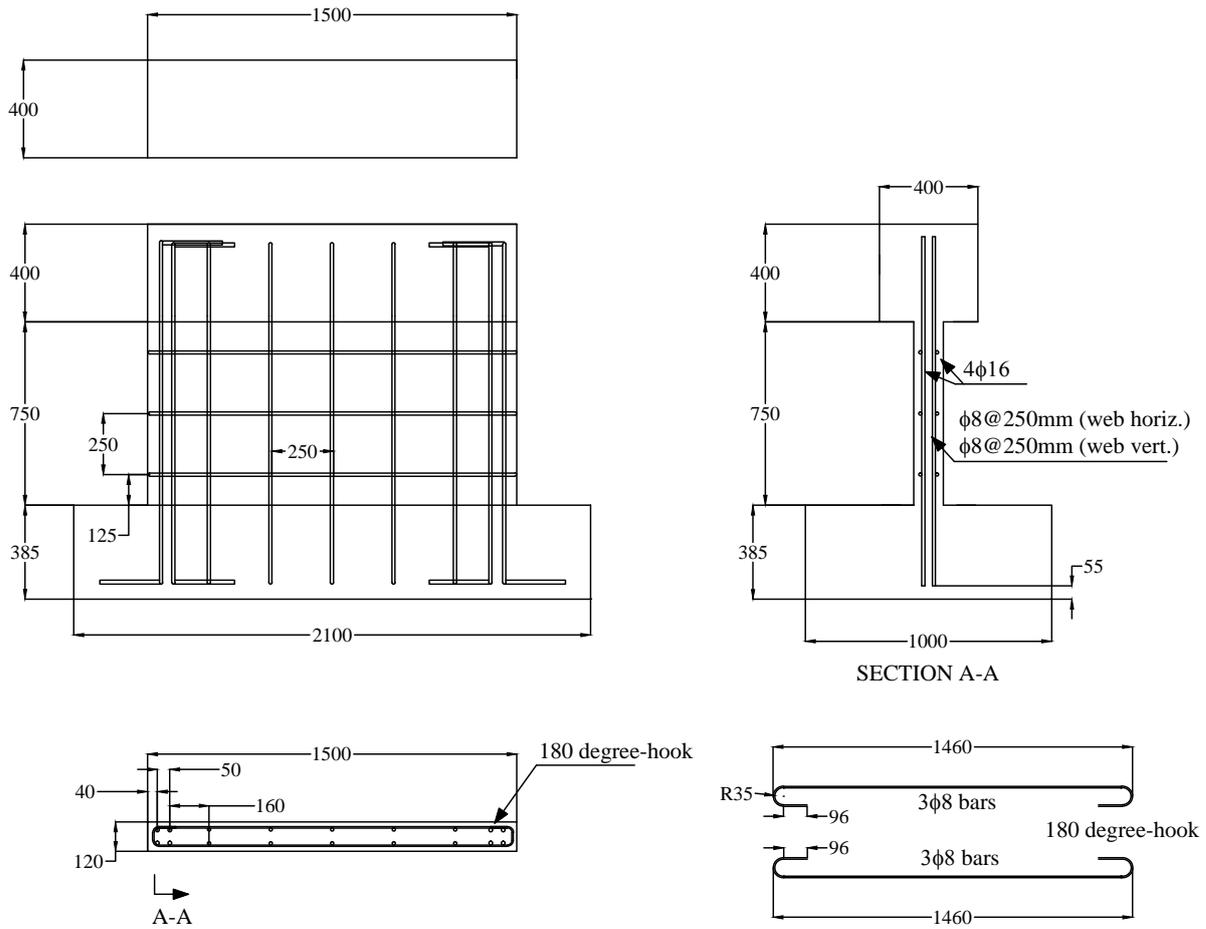


Figura A.1: Armadura espécimen S1

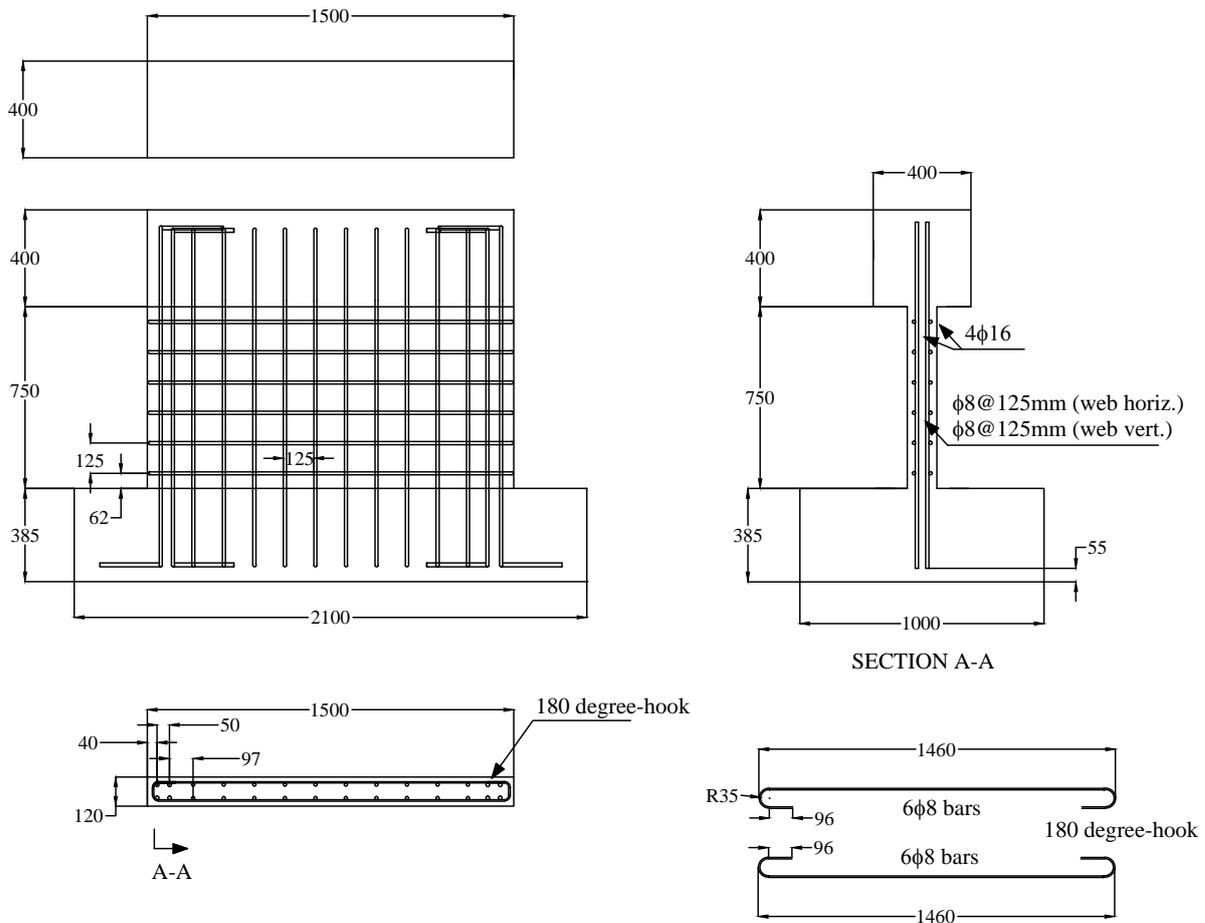


Figura A.2: Armadura espécimen S2

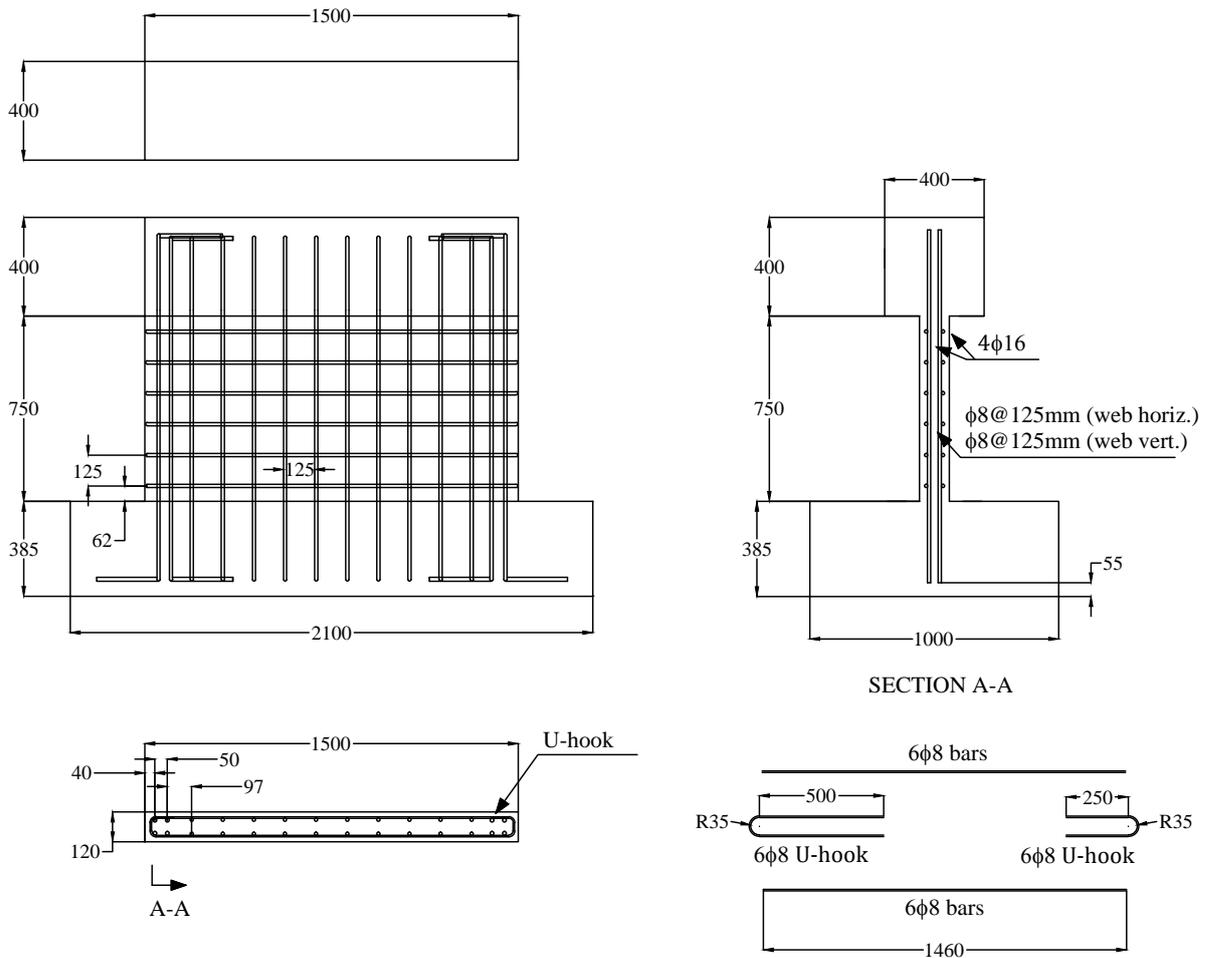


Figura A.3: Armadura espécimen S3

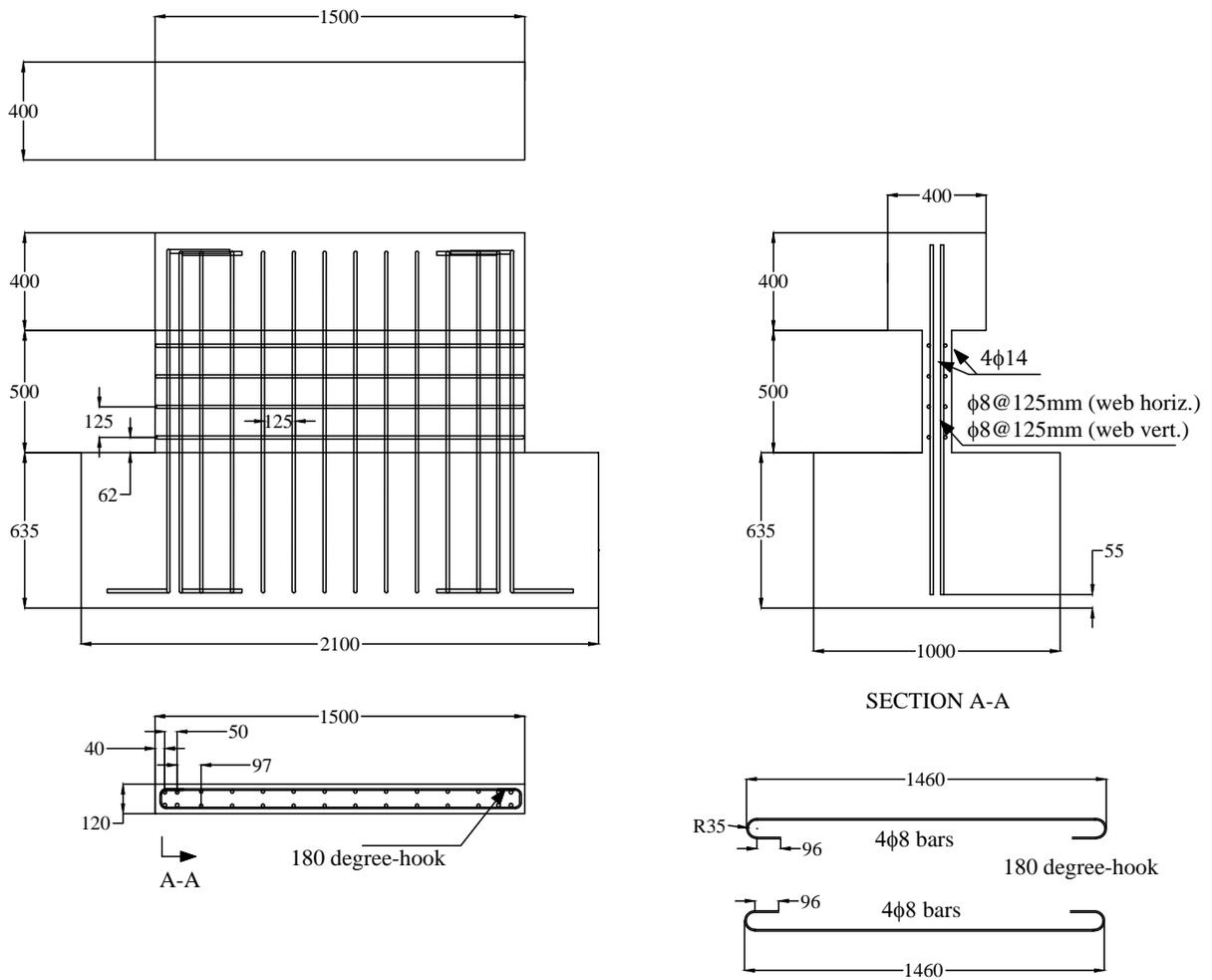


Figura A.4: Armadura espécimen S4

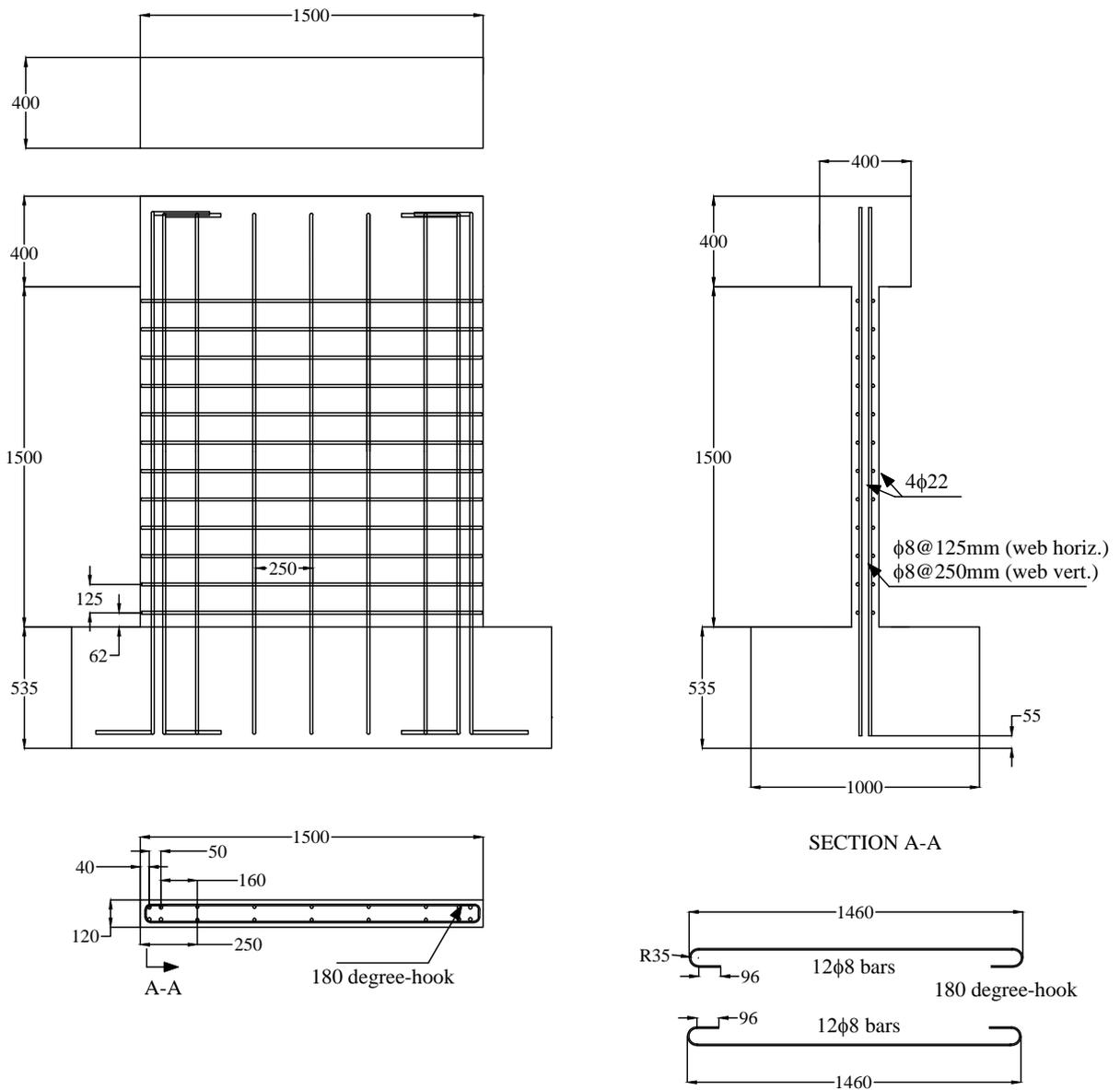


Figura A.5: Armadura espécimen S5

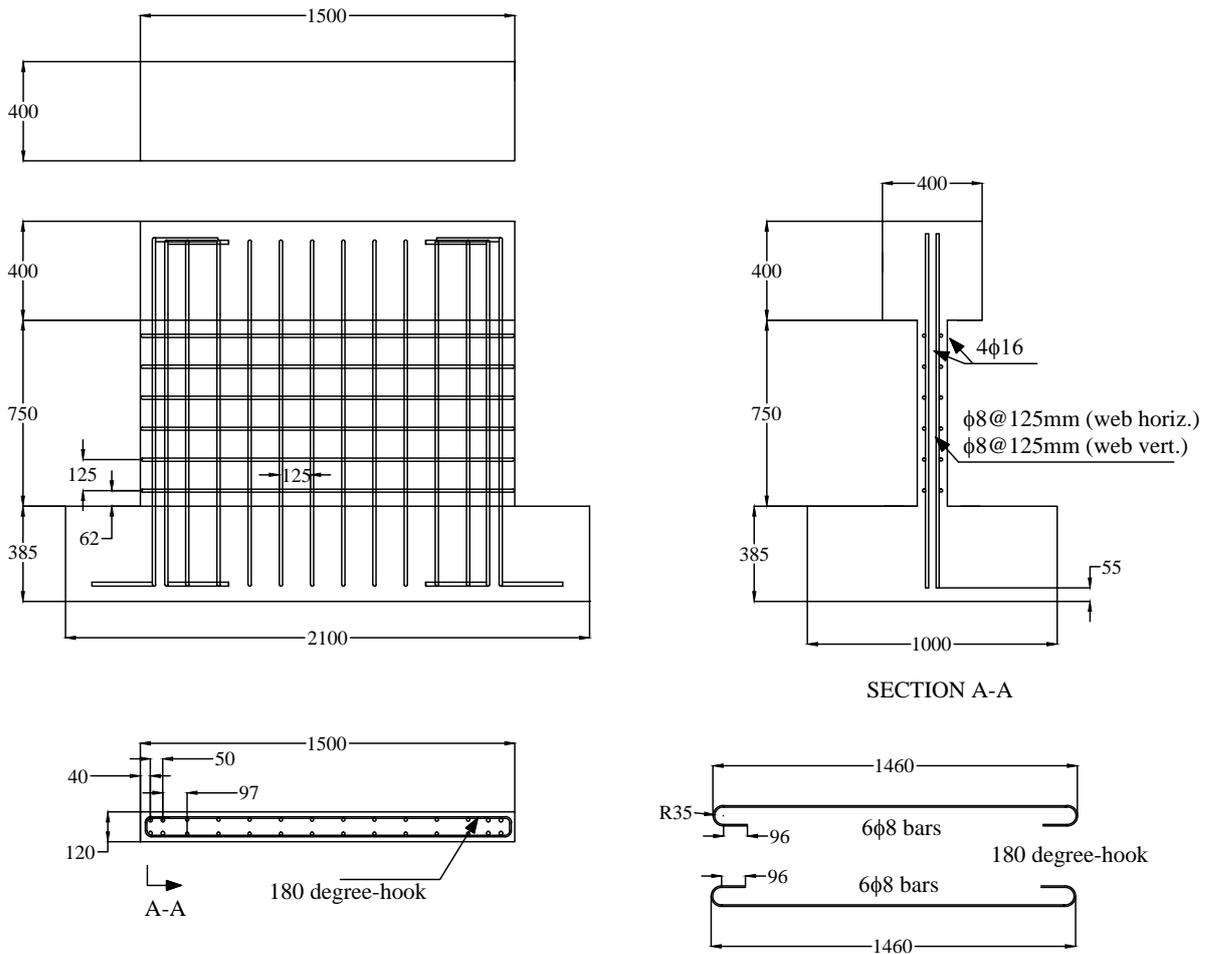


Figura A.6: Armadura espécimen S6

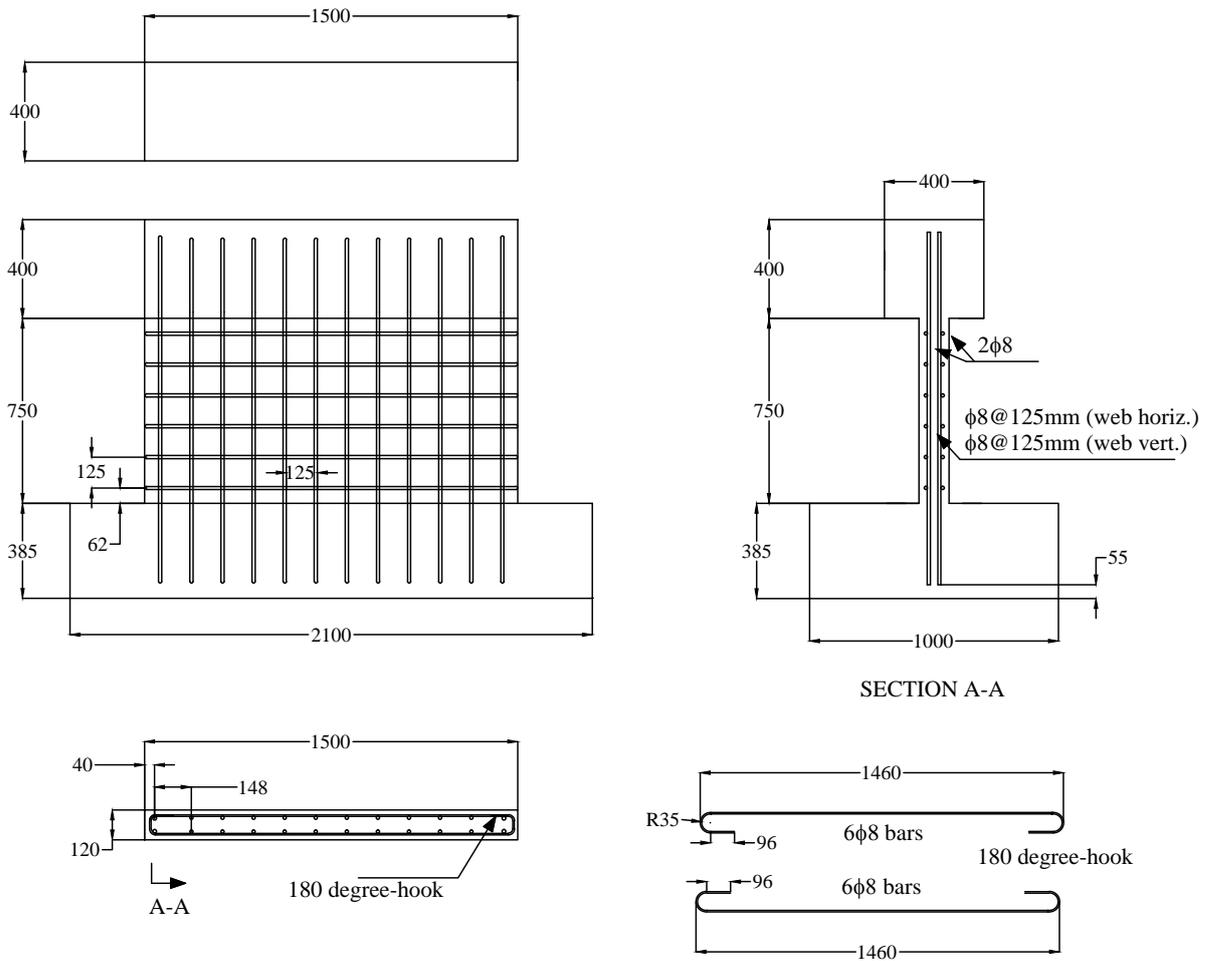


Figura A.7: Armadura espécimen S7

Anexo B

Detalle: Armadura de pedestal

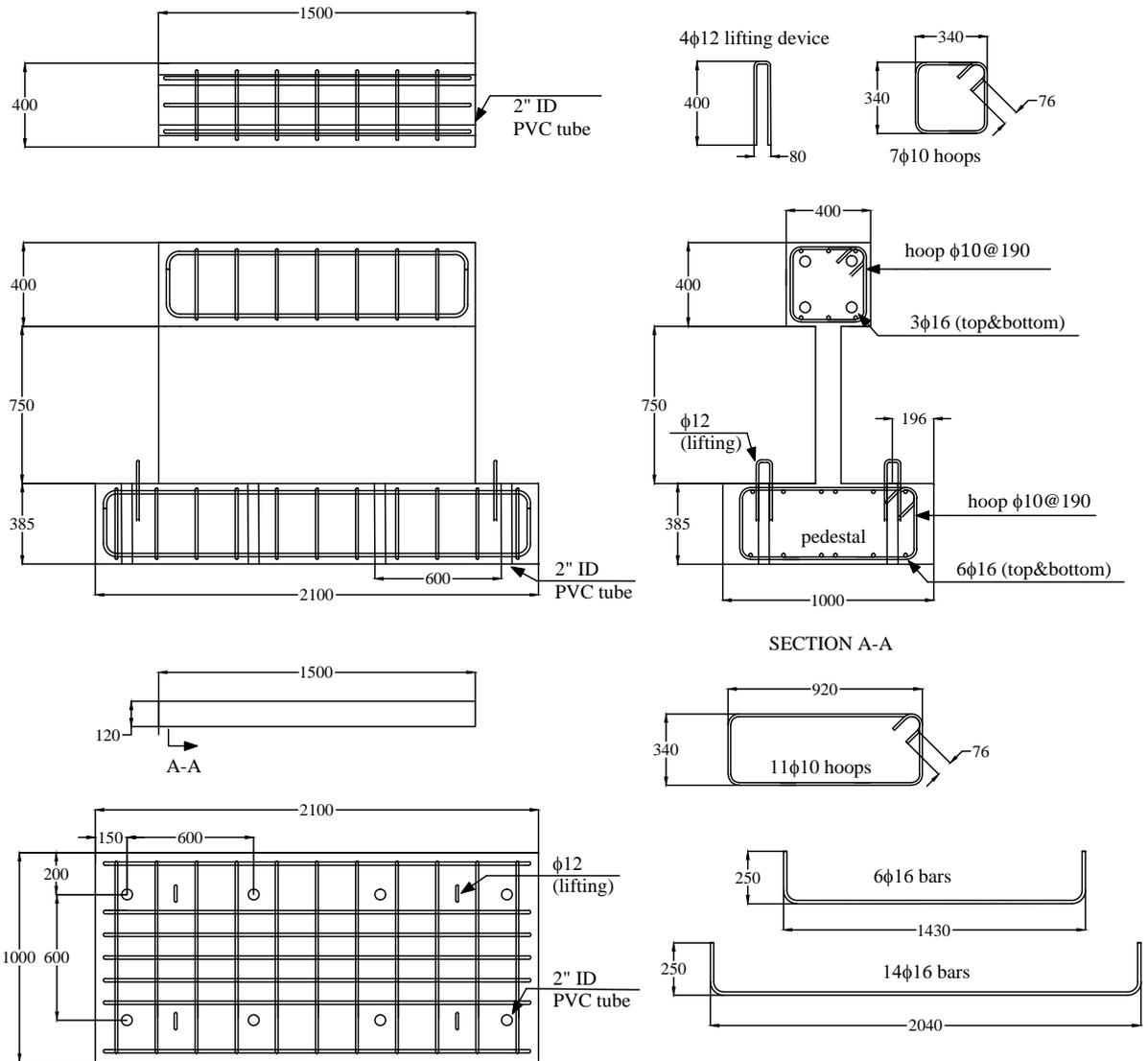


Figura B.1: Pedestal espécimen S1

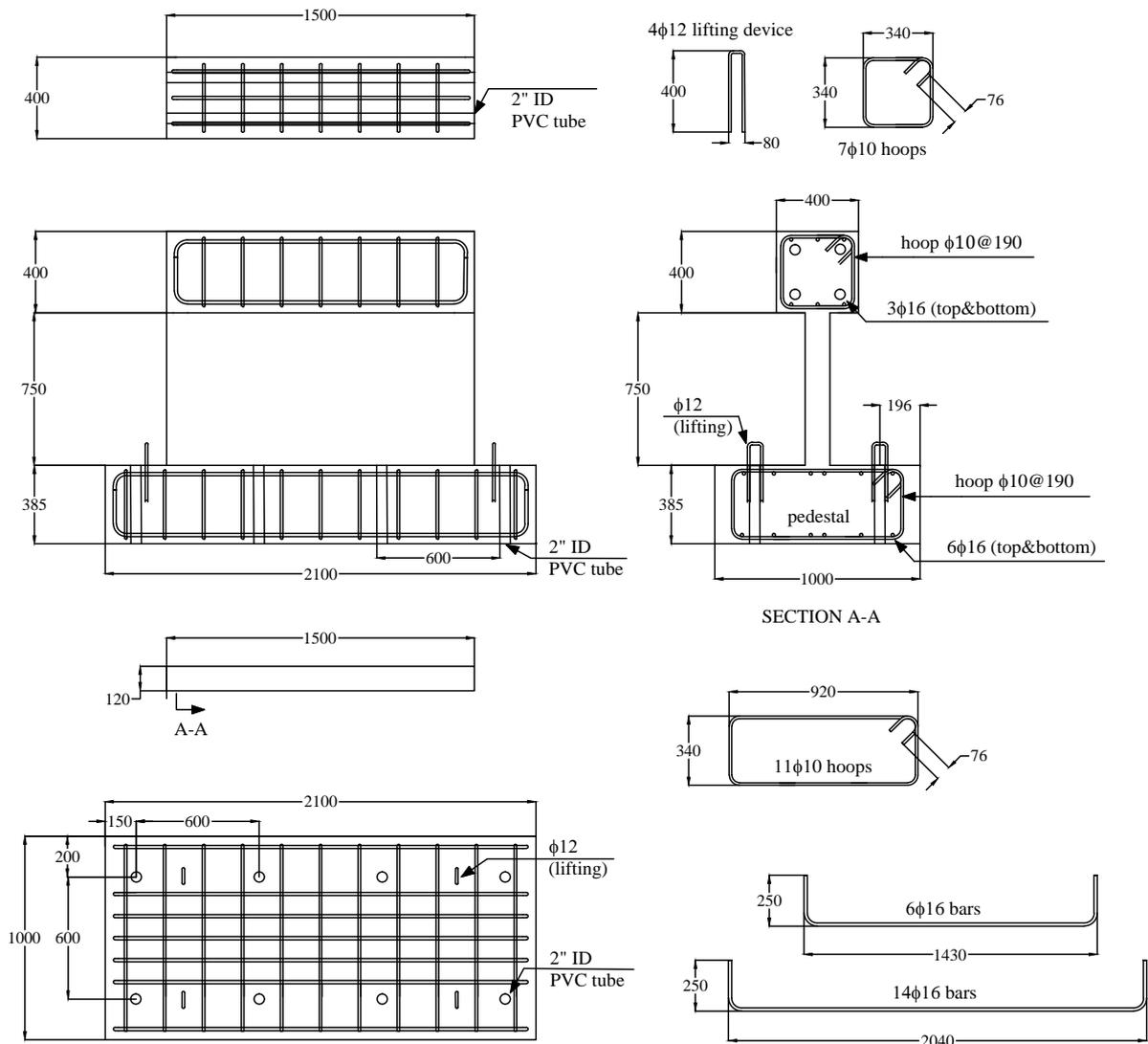


Figura B.2: Pedestal espécimen S2

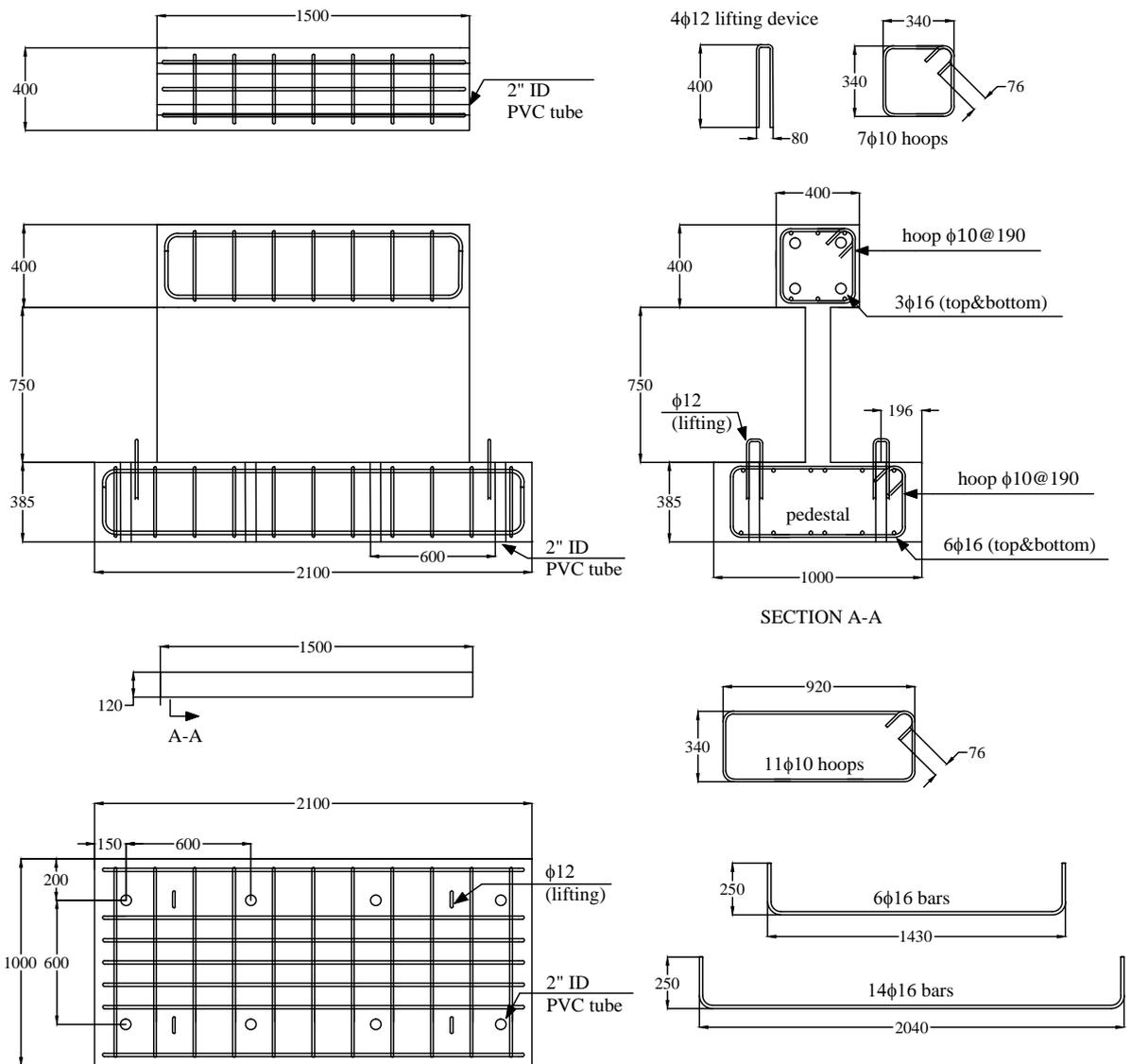


Figura B.3: Pedestal espécimen S3

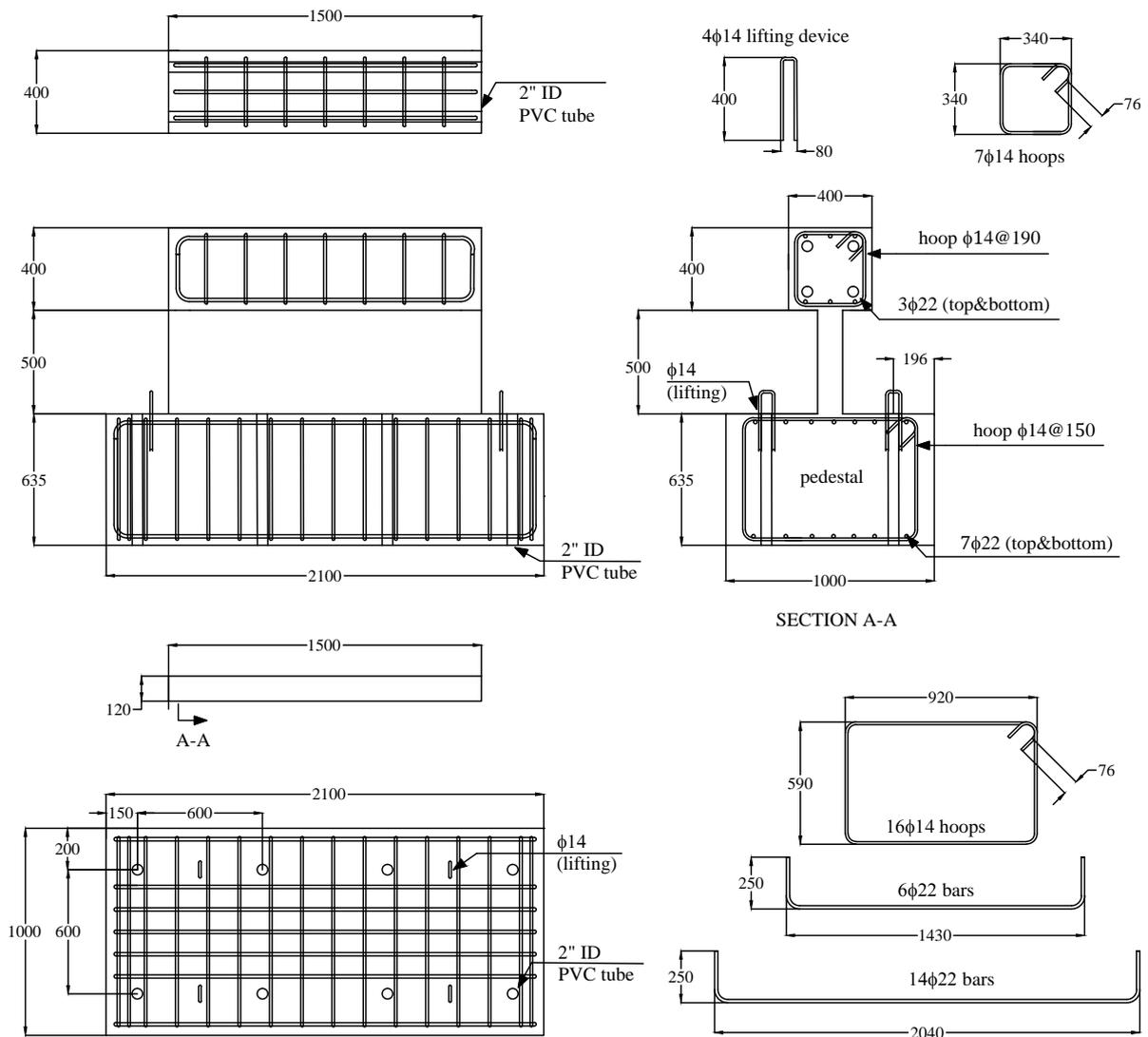


Figura B.4: Pedestal espécimen S4

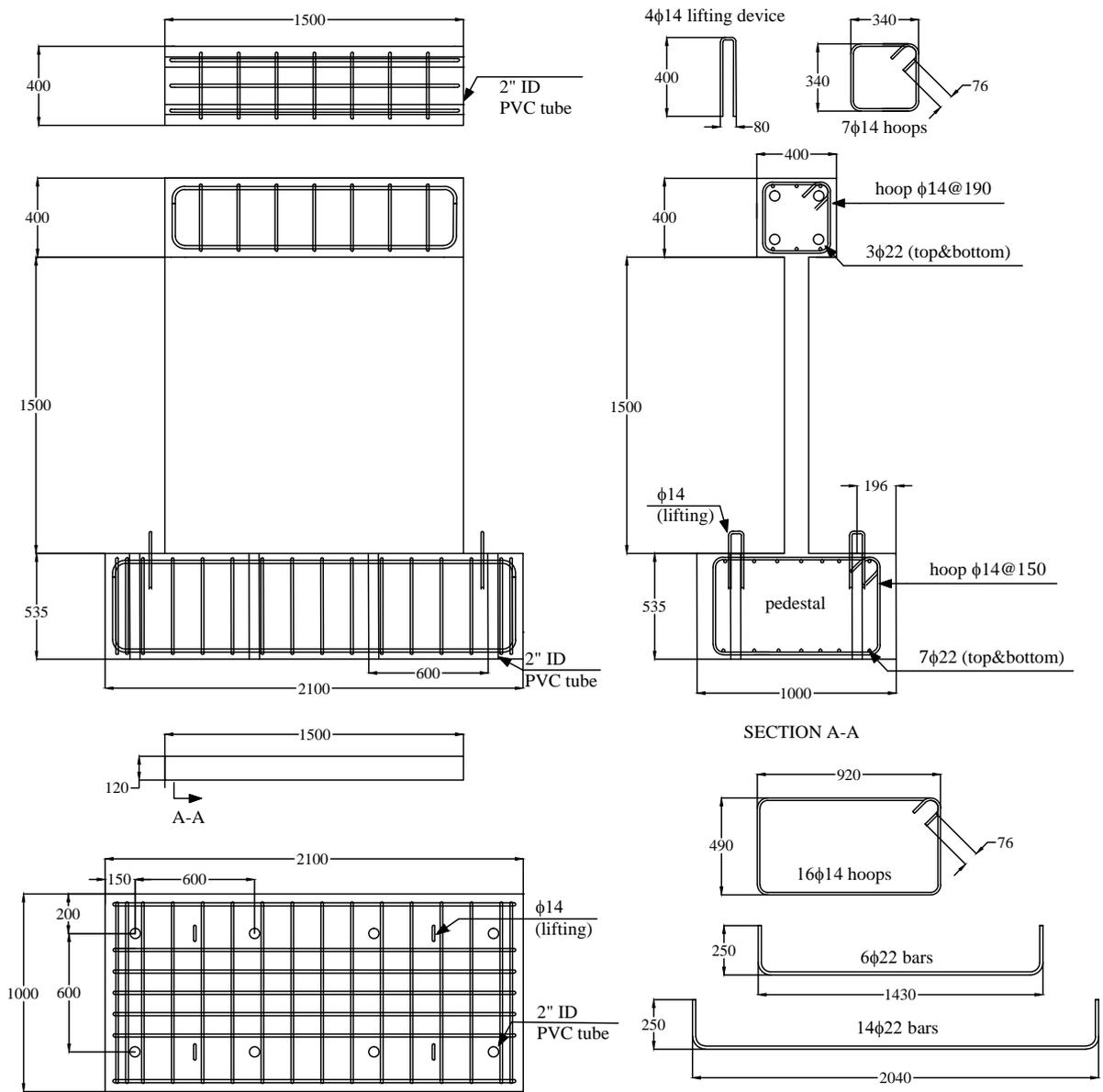


Figura B.5: Pedestal espécimen S5

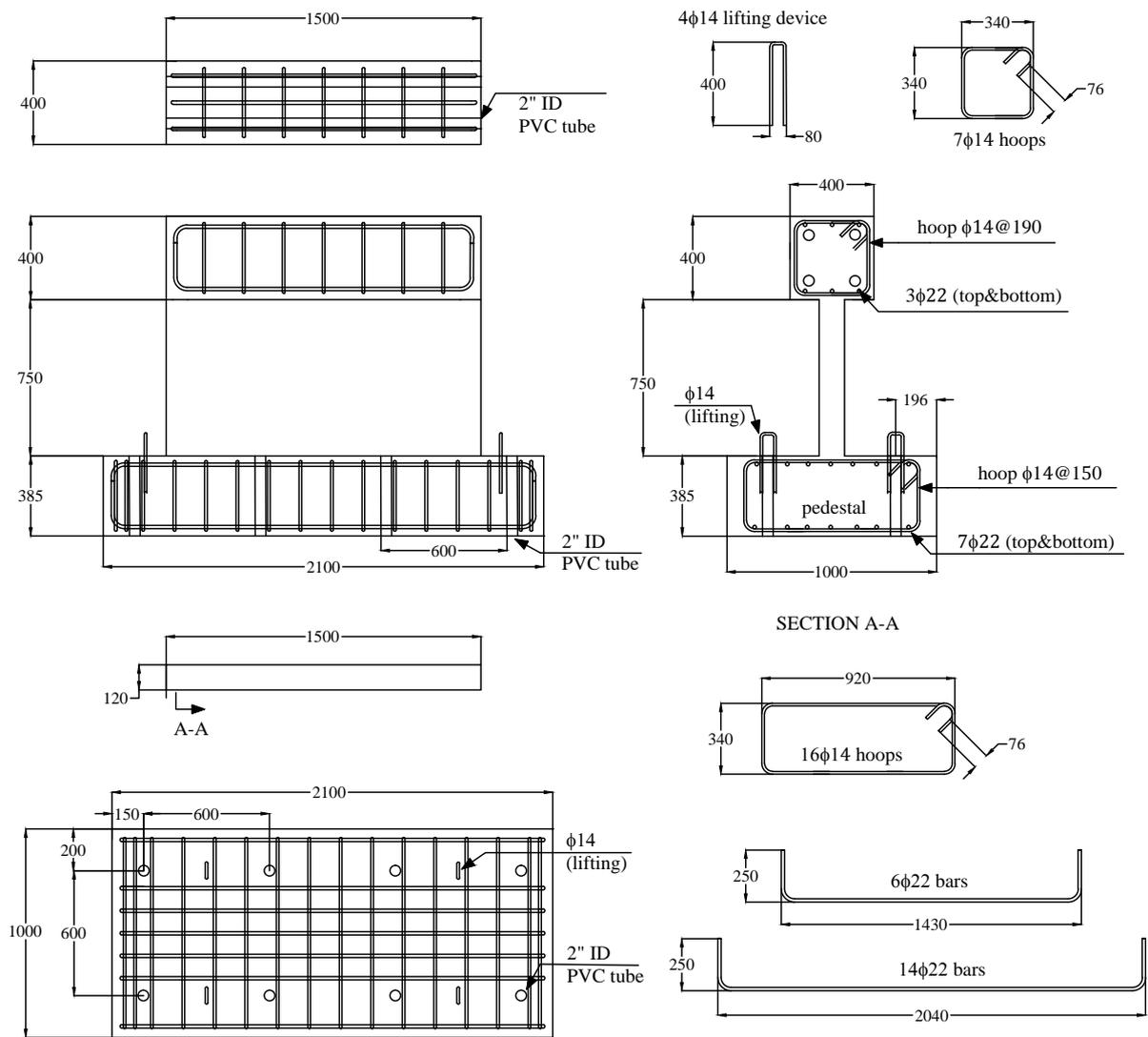


Figura B.6: Pedestal espécimen S6

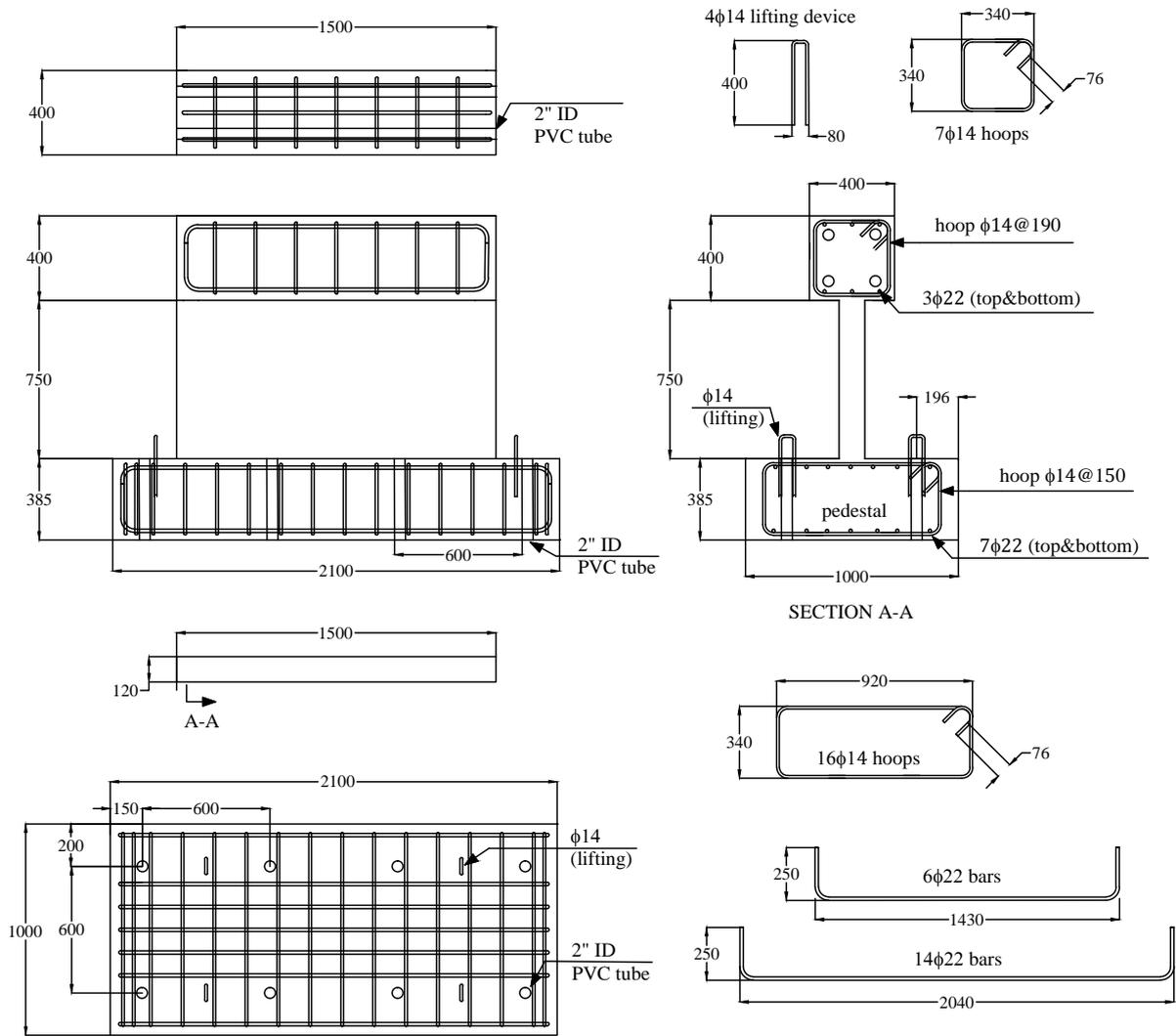


Figura B.7: Pedestal espécimen S7

Anexo C

Detalle: Ciclos de desplazamiento

Tabla C.1: Detalle ciclos de desplazamiento

Nivel	N° ciclos	S1		S2		S3 ^a		S4		S5		S6 ^a		S7 ^a	
		Deriva (%)	Meta (mm)	Deriva (%)	Meta (mm)	Deriva (%)	Meta (mm)	Deriva (%)	Meta (mm)	Deriva (%)	Meta (mm)	Deriva (%)	Meta (mm)	Deriva (%)	Meta (mm)
1	3	0,01	0,075	0,01	0,075	-	50 kN	0,00625	0,03125	0,00625	0,09375	-	50 kN	-	50 kN
2	3	0,02	0,150	0,02	0,075	-	100 kN	0,0125	0,0625	0,0125	0,1875	0,025	0,1875	0,0125	0,09375
3	3	0,05	0,375	0,05	0,375	-	150 kN	0,025	0,125	0,025	0,375	0,05	0,375	0,025	0,1875
4	3	0,10	0,750	0,10	0,75	0,10	0,750	0,05	0,250	0,05	0,750	0,10	0,750	0,05	0,375
5	3	0,15	1,125	0,15	1,125	0,15	1,125	0,10	0,50	0,10	1,50	0,15	1,125	0,10	0,750
6	3	0,20	1,50	0,20	1,50	0,20	1,50	0,15	0,75	0,15	2,25	0,20	1,50	0,15	1,125
7	3	0,30	2,25	0,30	2,25	0,30	2,25	0,20	1,0	0,20	3,0	0,30	2,25	0,20	1,50
8	3	0,40	3,0	0,40	3,0	0,40	3,0	0,30	1,50	0,30	4,5	0,40	3,0	0,30	2,25
9	3	0,60	4,5	0,60	4,5	0,60	4,5	0,40	2,0	0,40	6,0	0,60	4,5	0,40	3,0
10	3	0,80	6,0	0,80	6,0	0,80	6,0	0,60	3,0	0,60	9,0	0,80	6,0	0,60	4,5
11	3	1,00	7,5	1,00	7,5	1,20	9,0	0,80	4,0	0,80	12,0	1,00	7,5	0,80	6,0
12	3	1,20	9,0	1,20	9,0	1,60	12,0	1,00	5,0	1,00	15,0	1,20	9,0	1,00	7,5
13	3	1,40	10,5	1,40	10,5	2,00	15,0	1,20	6,0	1,20	18,0	1,40	10,5	1,20	9,0
14	3	1,60	12,0	1,60	12,0	2,40	18,0	1,40	7,0	1,40	21,0	1,60	12,0	1,40	10,5
15	3	1,80	13,5	1,80	13,5	-	-	1,60	8,0	1,60	24,0	1,80	13,5	1,60	12,0
16	3	2,00	15,0	2,00	15,0	-	-	1,80	9,0	1,80	27,0	2,00	15,0	1,80	13,5
17	3	2,40	18,0	2,40	18,0	-	-	2,00	10,0	2,00	30,0	2,40	18,0	2,00	15,0
18	3	3,20	24,0	4,80	36,0	-	-	2,40	12,0	2,40	36,0	-	-	2,40	18,0
19	3	4,80	36,0	7,20	54,0	-	-	3,20	16,0	3,20	48,0	-	-	3,20	24,0
20	3	7,20	54,0	-	-	-	-	4,00	20,0	3,60	54,0	-	-	-	-
21	3	-	-	-	-	-	-	4,80	72,0	-	-	-	-	-	-

^aPrimeros ciclos controlados por fuerza

Anexo D

Equivalencia Nomenclatura

La tabla D.1 tiene las equivalencias entre las nomenclaturas usadas para los muros analizados en el presente trabajo, y las usadas en la tesis de magíster de Tevfik Terzioglu (Terzioglu, 2011).

Tabla D.1: Equivalencia de nomenclatura

Terzioglu	Opazo
SW-T2-S1-1	S3
SW-T2-S2-3	S2
SW-T2-S3-4	S6
Sw-T3-S1-5	S7
SW-T4-S1-6	S4
SW-T5-S1-7	S5
SW-T6-S1-8	-
SW-T1-S2-9	-
SW-T1-N5-S1-10	-
SW-T1-N10-S1-11	-
SW-T1-S1-2	S1

Anexo E

Gráficos carga desplazamiento corregido

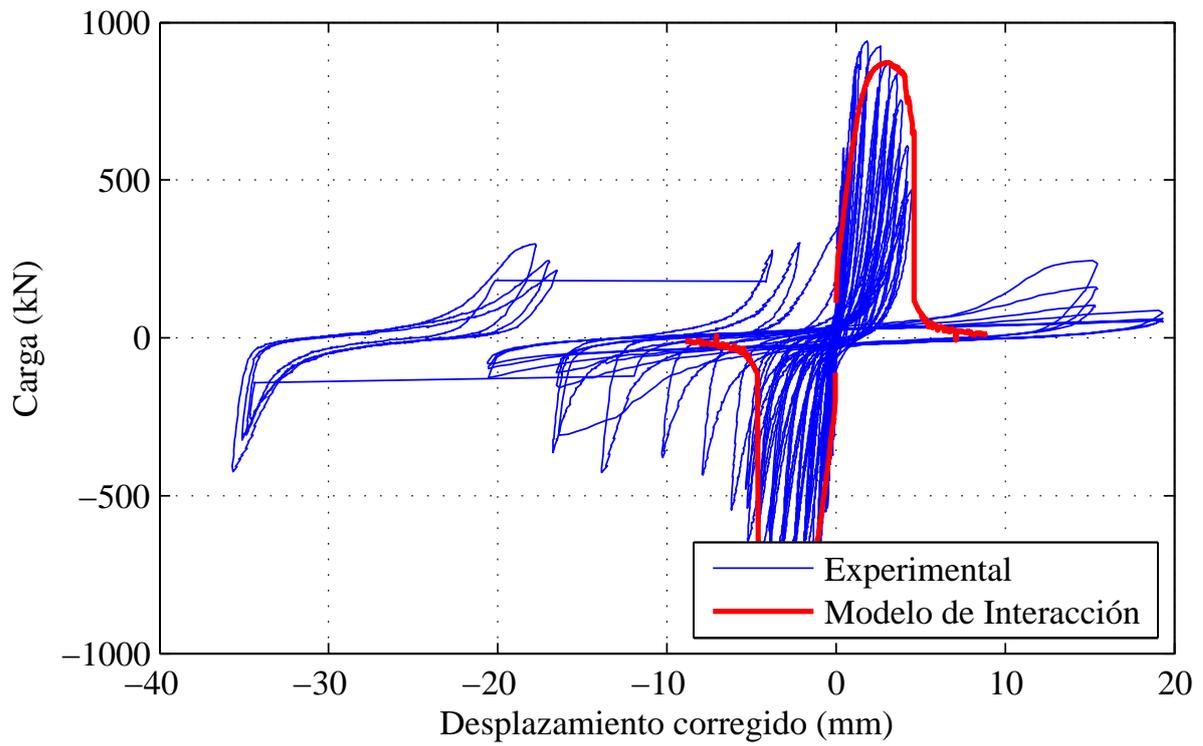


Figura E.1: Espécimen S4, carga vs. desp. corregido

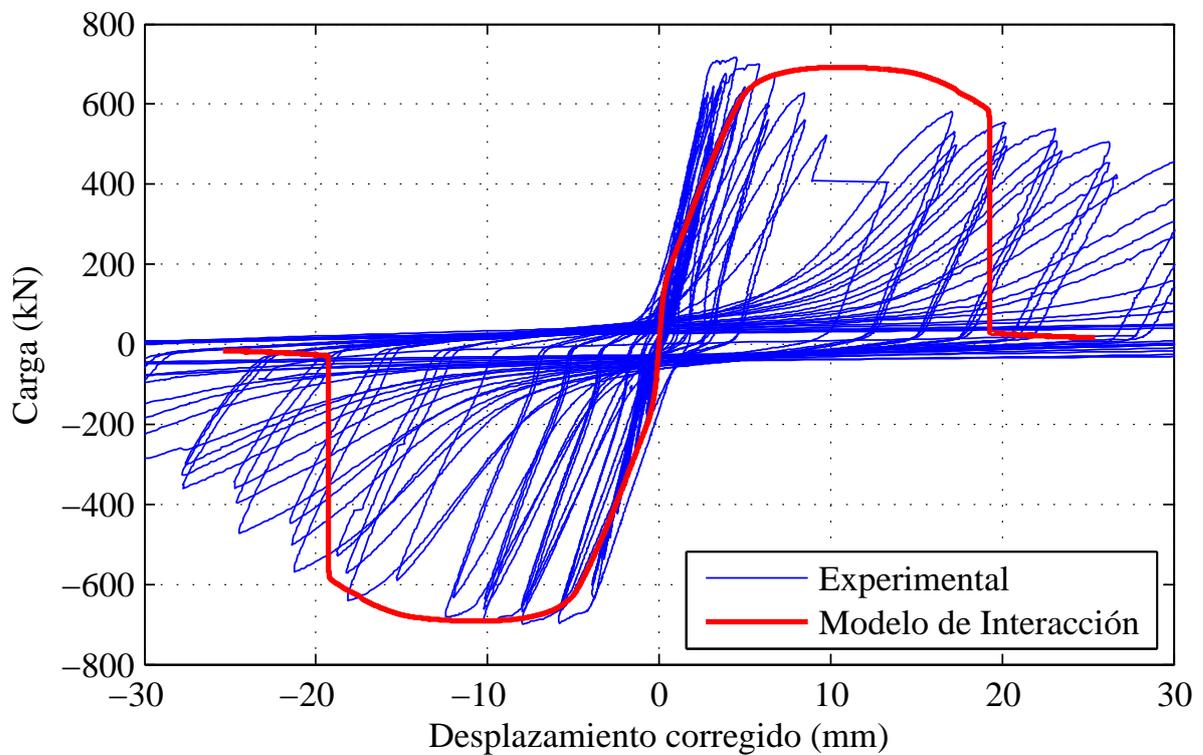


Figura E.2: Espécimen S5, carga vs. desp. corregido

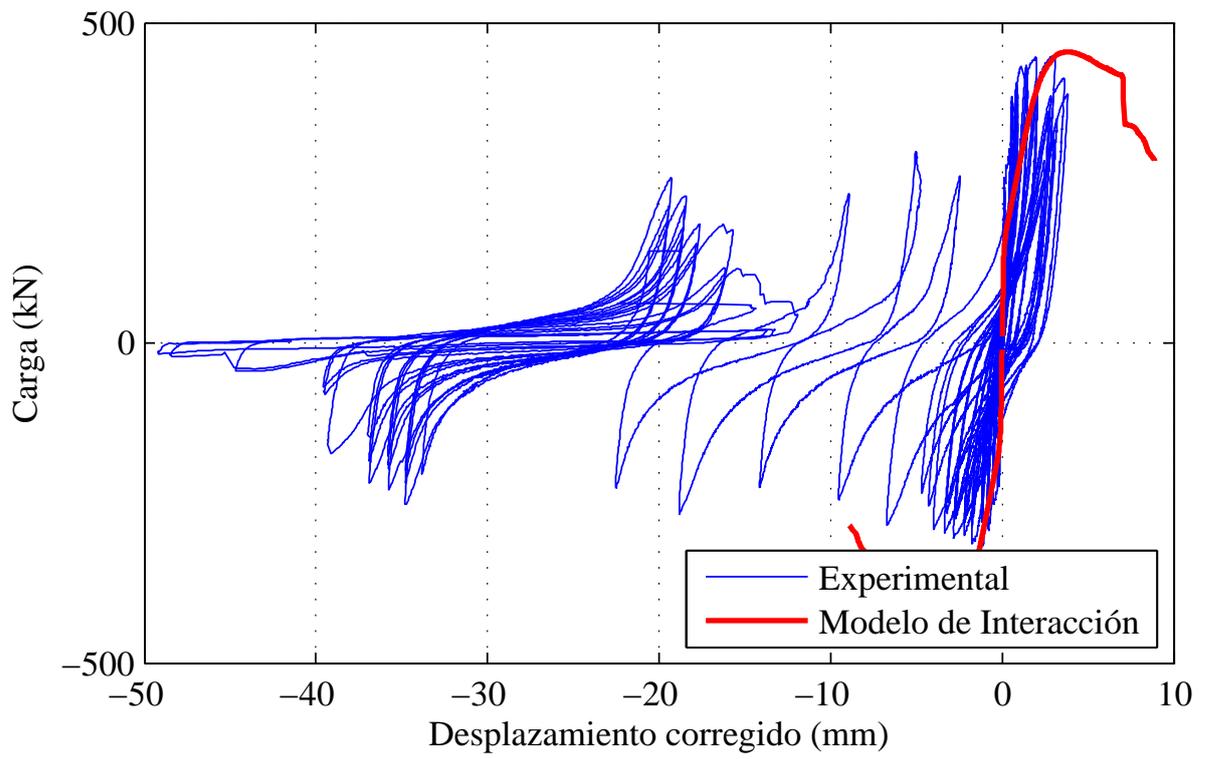


Figura E.3: Espécimen S7, carga vs. desp. corregido