



---

---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“COMPORTAMIENTO A CORTANTE DE MUROS  
CONFINADOS DE CCA: MODELOS DE HISTÉRESIS”**

**TESIS**

**PRESENTADO POR:**

**I.C. EDUARDO JOSÉ RICALDE CANTO**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**OPCIÓN ESTRUCTURAS**

**MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO**

**2019**

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiera sido aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado a través del proyecto de investigación 288718 titulado “Muros de concreto celular de autoclave sujetos a cargas laterales” (FING-2018-0003), así como por la beca otorgada para la realización de estos estudios de Maestría en Ingeniería.

## RESUMEN

El concreto celular de autoclave (CCA) es un material ligero compuesto de cemento Portland, cal, arena sílica, yeso, agua y aluminio en polvo. Se produce en clases con resistencia a compresión entre 20 kg/cm<sup>2</sup> y 60 kg/cm<sup>2</sup>. Existen numerosos estudios experimentales de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. En estos estudios se consideraron piezas de concreto o arcilla. Pocos estudios experimentales se han realizado con muros de mampostería confinada de CCA.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar modelos de histéresis para muros de mampostería confinada de CCA con comportamiento dominado por cortante. Se diseñaron y ensayaron cuatro muros confinados de CCA a escala natural con relaciones de aspecto de 0.71, 1.23, 1.94 y 2.64 y un mismo esfuerzo axial. Los muros tenían una altura de 240 cm y un espesor de 15 cm. Del ensaye se obtuvieron las curvas carga-desplazamiento, así como las cargas y desplazamientos asociados a los agrietamientos por cortante y flexo-cortante, carga máxima y carga última.

Con base en los resultados de este trabajo y los presentados por Pinto (2018), Varela et al. (2018), Fernández (2019) y Naal (2019) se calibraron parámetros para dos modelos de histéresis, basados en el modelo CA7 (CANNY, 1999). Un modelo se desarrolló sin degradación de resistencia, considerando el ensaye hasta el ciclo de carga máxima. Otro modelo se desarrolló con degradación de resistencia, considerando el ensaye hasta el ciclo previo a una pérdida de resistencia del 20 por ciento de la carga máxima. Se presentan los valores de los parámetros de histéresis calculados, así como las tendencias observadas.

Se concluyó que el modelo de histéresis sin degradación de resistencia presenta un mejor ajuste que el modelo con degradación de resistencia. La resistencia a cortante de los muros depende de su relación de aspecto. Conforme esta relación aumenta, la resistencia a cortante disminuye.

## ABSTRACT

Autoclaved Aerated Concrete (AAC) is a lightweight material made of Portland cement, lime, silica sand, gypsum, water and aluminum powder. It is produced in classes with axial compressive strengths between 20 kg/cm<sup>2</sup> and 60 kg/cm<sup>2</sup>. There are several experimental studies of confined masonry walls subjected to reversible cyclic lateral loads. In these studies, concrete or clay units were considered. There are few studies of AAC confined walls.

The objective of this work was to develop hysteresis models for AAC masonry confined walls that represent the shear behavior. Four natural scale walls were designed and tested. The walls had aspect ratios of 0.71, 1.23, 1.94 y 2.64 and the same axial compressive stress. The walls had heights of 240 cm and thicknesses of 15 cm. Load-displacement curves and the values of loads and their respective displacements for shear and flexure-shear cracking, maximum loads and ultimate loads were obtained from testing.

Based on the results of this work and those presented by Pinto (2018), Varela et al. (2018), Fernández (2019) and Naal (2019), hysteresis parameters were calibrated for two hysteresis models, based on the model CA7 (CANNY, 1999). A model was developed without strength degradation, considering the test up to the maximum load cycle. Another model was developed with strength degradation, considering the test up to the cycle prior to a loss of strength of 20 percent of the maximum load. The values of the calculated hysteresis parameters are presented, as well as the trends observed.

It was concluded that the hysteresis model without strength degradation fits correctly and better than the model with strength degradation. The shear strength of the walls depends on the aspect ratio. As this ratio increases, the shear strength decreases.

# CONTENIDO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Generalidades .....	1
1.2 Objetivo general .....	3
1.3 Alcance.....	3
1.4 Contenido .....	3
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES.....	5
2.1 Resistencia de muros .....	5
2.2 Estudios sobre muros de mampostería confinada .....	11
2.3 Estudios sobre muros de CCA .....	12
2.4 Reglamentaciones existentes.....	19
2.5 Conclusiones de la revisión de literatura .....	19
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA.....	21
3.1 Determinación de propiedades de los materiales.....	21
3.2 Diseño de muros .....	25
3.3 Construcción de muros.....	28
3.4 Diseño del sistema de carga e instrumentación .....	30
3.5 Ensaye de muros.....	33
3.6 Desarrollo del modelo de histéresis.....	34
CAPÍTULO 4 RESULTADOS .....	38

4.1	Propiedades mecánicas de los materiales .....	38
4.2	Ensaye de muros.....	42
CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....		60
5.1	Patrón de agrietamiento .....	60
5.2	Degradación de rigidez.....	61
5.3	Calibración de modelos de histéresis.....	62
5.3.1	Modelo de histéresis sin degradación de resistencia.....	64
5.3.2	Modelo de histéresis con degradación de resistencia.....	99
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES.....		134
CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA.....		136

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Muro confinado sujeto a carga axial y lateral. ....	5
Figura 2.2	Falla por flexión de un muro confinado.....	6
Figura 2.3	Grieta diagonal por cortante en un muro confinado.....	7
Figura 2.4	Grieta de flexo-cortante en un muro confinado. ....	9
Figura 2.5	Desplazamiento relativo del muro con respecto a su base. ....	11
Figura 3.1	Ensaye a compresión de un cubo de CCA.....	21
Figura 3.2	Ensaye a tensión de un bloque de CCA.....	22
Figura 3.3	Ensaye a compresión de un cilindro de concreto. ....	22
Figura 3.4	Ensaye a la fluencia de una barra de acero. ....	23

Figura 3.5 Ensaye a tensión por flexión de una viga de concreto. ....	23
Figura 3.6 Ensaye a compresión de un cubo de mortero hidráulico.....	24
Figura 3.7 Ensaye a compresión de un cubo de mortero de pared delgada. ....	24
Figura 3.8 Curvas de resistencia-esfuerzo axial de compresión del muro M-0.71-3.0. .....	26
Figura 3.9 Curvas de resistencia-esfuerzo axial de compresión del muro M-1.23-3.0. .....	26
Figura 3.10 Curvas de resistencia-esfuerzo axial de compresión del muro M-1.94-3.0. .....	27
Figura 3.11 Curvas de resistencia-esfuerzo axial de compresión del muro M-2.64-3.0. .....	27
Figura 3.12 Geometría de los muros. ....	28
Figura 3.13 a) Construcción de base del muro. b) Colocación de primera hilada de bloques de CCA. c) Colocación de hiladas posteriores de bloques de CCA. d) Habilitado de cimbra y colocación de concreto en los castillos. ....	29
Figura 3.14 a) Habilitado de cimbra y acero de refuerzo de la cadena superior. b) Colocación de concreto en la cadena superior. c) Muros de mampostería confinada de CCA al concluir la etapa de construcción. ....	30
Figura 3.15 Esquema general del sistema de carga lateral.....	31
Figura 3.16 Esquema general del sistema de carga axial. ....	31
Figura 3.17 Conexión hidráulica del sistema de carga axial.....	32
Figura 3.18 Esquema general del sistema de instrumentación. ....	32
Figura 3.19 Protocolo de carga. ....	34
Figura 3.20 Modelo de histéresis CA7.....	34
Figura 3.21 Representación de la degradación de resistencia y ablandamiento en el modelo de histéresis.....	36



Figura 3.22 Representación del estrangulamiento en el modelo de histéresis.....	37
Figura 4.1 Historia de carga lateral con los ciclos del muro M-0.71-3.0. ....	42
Figura 4.2 Historia de distorsión con los ciclos del muro M-0.71-3.0.....	43
Figura 4.3 Historia de carga axial con los ciclos del muro M-0.71-3.0.....	43
Figura 4.4 Agrietamiento horizontal y diagonal del muro M-0.71-3.0. ....	44
Figura 4.5 Agrietamiento diagonal por cortante del muro M-0.71-3.0.....	44
Figura 4.6 Grietas por flexión y cortante a la carga máxima del muro M-0.71-3.0. ...	45
Figura 4.7 Patrón de agrietamiento final del muro M-0.71-3.0.....	45
Figura 4.8 Curva carga lateral-desplazamiento del muro M-0.71-3.0.....	46
Figura 4.9 Historia de carga lateral con los ciclos del muro M-1.23-3.0. ....	47
Figura 4.10 Historia de distorsión con los ciclos del muro M-1.23-3.0.....	47
Figura 4.11 Historia de carga axial con los ciclos del muro M-1.23-3.0.....	47
Figura 4.12 Agrietamiento diagonal por cortante del muro M-1.23-3.0.....	48
Figura 4.13 Agrietamiento por flexo-cortante del muro M-1.23-3.0. ....	49
Figura 4.14 Grietas por flexión, flexo-cortante y diagonales por cortante a la carga máxima del muro M-1.23-3.0.....	49
Figura 4.15 Patrón de agrietamiento final del muro M1.23-3.0.....	49
Figura 4.16 Curva carga lateral- desplazamiento del muro M-1.23-3.0.....	50
Figura 4.17 Historia de carga lateral con los ciclos del muro M-1.94-3.0. ....	51
Figura 4.18 Historia de distorsión con los ciclos del muro M-1.94-3.0.....	51
Figura 4.19 Historia de carga axial con los ciclos del muro M-1.94-3.0.....	52
Figura 4.20 Agrietamiento por flexo-cortante del muro M-1.94-3.0. ....	52
Figura 4.21 Agrietamiento por cortante del muro M-1.94-3.0. ....	53
Figura 4.22 Grietas por flexión, flexo-cortante y diagonales por cortante a la carga máxima del muro M-1.94-3.0.....	53

Figura 4.23 Patrón de agrietamiento final del muro M-1.94-3.0.....	53
Figura 4.24 Curva carga lateral- desplazamiento del muro M-1.94-3.0.....	54
Figura 4.25 Historia de carga lateral con los ciclos del muro M-2.64-3.0. ....	55
Figura 4.26 Historia de distorsión con los ciclos del muro M-2.64-3.0.....	55
Figura 4.27 Historia de carga axial con los ciclos del muro M-2.64-3.0.....	56
Figura 4.28 Agrietamiento por flexo-cortante del muro M-2.64-3.0. ....	57
Figura 4.29 Agrietamiento por flexo-cortante y cortante del muro M-2.64-3.0.....	57
Figura 4.30 Grietas flexión, flexo-cortante y diagonales por cortante a la carga máxima del muro M-2.64-3.0. ....	57
Figura 4.31 Patrón de agrietamiento final del muro M-2.64-3.0.....	58
Figura 4.32 Curva carga lateral- desplazamiento del muro M-2.64-3.0.....	59
Figura 5.1 Patrón de agrietamiento final en forma de "X".....	61
Figura 5.3 Degradación de rigidez.....	62
Figura 5.4 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-0.53-3.0-44.....	68
Figura 5.5 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-0.71-3.0-44.....	68
Figura 5.6 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-0.71-3.0-53.....	69
Figura 5.7 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-1.23-3.0-53.....	69
Figura 5.8 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-1.23-4.8-53.....	70
Figura 5.9 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-1.23-7.2-53.....	70
Figura 5.10 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-1.30-3.0-44.....	71
Figura 5.11 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-1.94-3.0-44.....	71
Figura 5.12 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-1.94-3.0-53.....	72
Figura 5.13 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-2.64-3.0-44.....	72
Figura 5.14 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-2.64-3.0-53.....	73
Figura 5.15 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-2.64-4.8-53.....	73

Figura 5.16 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-2.64-7.2-53.....	74
Figura 5.17 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-0.53-3.0-44. ....	76
Figura 5.18 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-0.71-3.0-44. ....	76
Figura 5.19 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-0.71-3.0-53. ....	77
Figura 5.20 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.23-3.0-53. ....	77
Figura 5.21 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.23-4.8-53. ....	78
Figura 5.22 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.23-7.2-53. ....	78
Figura 5.23 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.30-3.0-44. ....	79
Figura 5.24 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.94-3.0-44. ....	79
Figura 5.25 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.94-3.0-53. ....	80
Figura 5.26 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-2.64-3.0-44. ....	80
Figura 5.27 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-2.64-3.0-53. ....	81
Figura 5.28 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-2.64-4.8-53. ....	81
Figura 5.29 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-2.64-7.2-53. ....	82
Figura 5.30 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-0.53-3.0-44.....	85
Figura 5.31 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-0.71-3.0-44.....	85
Figura 5.32 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-0.71-3.0-53.....	86
Figura 5.33 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-1.23-3.0-53.....	86
Figura 5.34 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-1.23-4.8-53.....	87
Figura 5.35 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-1.23-7.2-53.....	87
Figura 5.36 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-1.30-3.0-44.....	88
Figura 5.37 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-1.94-3.0-44.....	88
Figura 5.38 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-1.94-3.0-53.....	89
Figura 5.39 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-2.64-3.0-44.....	89

Figura 5.40 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-2.64-3.0-53.....	90
Figura 5.41 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-2.64-4.8-53.....	90
Figura 5.42 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-2.64-7.2-53.....	91
Figura 5.43 Modelo de histéresis del muro M-0.53-3.0-44. ....	92
Figura 5.44 Modelo de histéresis del muro M-0.71-3.0-44. ....	92
Figura 5.45 Modelo de histéresis del muro M-0.71-3.0-53. ....	93
Figura 5.46 Modelo de histéresis del muro M-1.23-3.0-53. ....	93
Figura 5.47 Modelo de histéresis del muro M-1.23-4.8-53. ....	94
Figura 5.48 Modelo de histéresis del muro M-1.23-7.2-53. ....	94
Figura 5.49 Modelo de histéresis del muro M-1.30-3.0-44. ....	95
Figura 5.50 Modelo de histéresis del muro M-1.94-3.0-44. ....	95
Figura 5.51 Modelo de histéresis del muro M-1.94-3.0-53. ....	96
Figura 5.52 Modelo de histéresis del muro M-2.64-3.0-44. ....	96
Figura 5.53 Modelo de histéresis del muro M-2.64-3.0-53. ....	97
Figura 5.54 Modelo de histéresis del muro M-2.64-4.8-53. ....	97
Figura 5.55 Modelo de histéresis del muro M-2.64-7.2-53. ....	98
Figura 5.56 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-0.53-3.0-44.....	101
Figura 5.57 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-0.71-3.0-44.....	101
Figura 5.58 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-0.71-3.0-53.....	102
Figura 5.59 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-1.23-3.0-53.....	102
Figura 5.60 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-2.64-3.0-53.....	103
Figura 5.61 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-2.64-7.2-53.....	103
Figura 5.62 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-0.53-3.0-44.....	105
Figura 5.63 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-0.71-3.0-44.....	105

Figura 5.64 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-0.71-3.0-53. ....	106
Figura 5.65 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.23-3.0-53. ....	106
Figura 5.66 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.23-4.8-53. ....	107
Figura 5.67 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.23-7.2-53. ....	107
Figura 5.68 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.30-3.0-44. ....	108
Figura 5.69 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.94-3.0-44. ....	108
Figura 5.70 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.94-3.0-53. ....	109
Figura 5.71 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-2.64-3.0-44. ....	109
Figura 5.72 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-2.64-3.0-53. ....	110
Figura 5.73 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-2.64-4.8-53. ....	110
Figura 5.74 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-2.64-7.2-53. ....	111
Figura 5.75 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-0.53-3.0-44. ....	114
Figura 5.76 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-0.71-3.0-44. ....	114
Figura 5.77 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-0.71-3.0-53. ....	115
Figura 5.78 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-1.23-3.0-53. ....	115
Figura 5.79 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-1.23-4.8-53. ....	116
Figura 5.80 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-1.23-7.2-53. ....	116
Figura 5.81 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-1.30-3.0-44. ....	117
Figura 5.82 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-1.94-3.0-44. ....	117
Figura 5.83 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-1.94-3.0-53. ....	118
Figura 5.84 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-2.64-3.0-44. ....	118
Figura 5.85 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-2.64-3.0-53. ....	119
Figura 5.86 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-2.64-4.8-53. ....	119
Figura 5.87 Ajuste del parámetro $\theta$ para el muro M-2.64-7.2-53. ....	120

Figura 5.88 Modelo de histéresis del muro M-0.53-3.0-44. ....	127
Figura 5.89 Modelo de histéresis del muro M-0.71-3.0-44. ....	128
Figura 5.90 Modelo de histéresis del muro M-0.71-3.0-53. ....	128
Figura 5.91 Modelo de histéresis del muro M-1.23-3.0-53. ....	129
Figura 5.92 Modelo de histéresis del muro M-1.23-4.8-53. ....	129
Figura 5.93 Modelo de histéresis del muro M-1.23-7.2-53. ....	130
Figura 5.94 Modelo de histéresis del muro M-1.30-3.0-44. ....	130
Figura 5.95 Modelo de histéresis del muro M-1.94-3.0-44. ....	131
Figura 5.96 Modelo de histéresis del muro M-1.94-3.0-53. ....	131
Figura 5.97 Modelo de histéresis del muro M-2.64-3.0-44. ....	132
Figura 5.98 Modelo de histéresis del muro M-2.64-3.0-53. ....	132
Figura 5.99 Modelo de histéresis del muro M-2.64-4.8-53. ....	133
Figura 5.100 Modelo de histéresis del muro M-2.64-7.2-53. ....	133

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Descripción de la instrumentación utilizada en los muros. ....	33
Tabla 4.1 Contenido de humedad del CCA. ....	38
Tabla 4.2 Resistencia a compresión del CCA. ....	39
Tabla 4.3 Resistencia a tensión de bloques de CCA. ....	39
Tabla 4.4 Resistencia a compresión del concreto. ....	40
Tabla 4.5 Resistencia de fluencia del acero de refuerzo. ....	40
Tabla 4.6 Resistencia a tensión por flexión del concreto. ....	40
Tabla 4.7 Resistencia a compresión del mortero hidráulico. ....	41

Tabla 4.8 Resistencia a compresión del mortero de pared delgada.....	41
Tabla 4.9 Resumen de eventos principales del muro M-0.71-3.0.....	45
Tabla 4.10 Resumen de eventos principales del muro M-1.23-3.0.....	50
Tabla 4.11 Resumen de eventos principales del muro M-1.94-3.0.....	54
Tabla 4.12 Resumen de eventos principales del muro M-2.64-3.0.....	58
Tabla 5.1 Muros considerados para la calibración de modelos de histéresis.....	62
Tabla 5.2 Valores del parámetro $\alpha$ . .....	64
Tabla 5.3 Relación de inercias y valores del parametro $\alpha_g$ . .....	65
Tabla 5.4 Valores del parámetro $\gamma$ . .....	67
Tabla 5.5 Valores del parámetro $\delta$ . .....	75
Tabla 5.6 Valores del parámetro $\theta$ . .....	83
Tabla 5.7 Valores del parámetro $\gamma$ . .....	100
Tabla 5.8 Valores del parámetro $\delta$ . .....	104
Tabla 5.9 Valores del parámetro $\theta$ . .....	112
Tabla 5.10 Valores del parámetro $\lambda_u$ . .....	121
Tabla 5.11 Valores del parámetro $\lambda_3$ .....	124
Tabla 5.12 Valores del parámetro $\varepsilon$ .....	125
Tabla 5.13 Valores del parámetro $\lambda_s$ .....	126

# CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Generalidades

El concreto celular de autoclave (CCA) es un material ligero compuesto de cemento portland, cal, arena sílica, yeso, agua y aluminio en polvo. El CCA se fabrica mezclando los primeros cinco ingredientes en un molde hasta formar una mezcla fluida. Posteriormente, se agrega el aluminio en polvo, el cual funciona como un agente expansivo. La mezcla incrementa su volumen entre dos y tres veces en aproximadamente 4 horas. Después de la expansión, la mezcla es capaz de mantener su forma y soportar su peso propio. Se retira el molde y se corta la mezcla para formar las piezas deseadas. Posteriormente, se introducen las piezas en una autoclave para su proceso de curado por un período de 8 a 12 horas. La presión y temperatura en la autoclave son aproximadamente de  $12 \text{ kg/cm}^2$  y  $180^\circ\text{C}$ , respectivamente. Después del proceso de curado, las piezas de CCA se empaquetan y están listas para ser transportadas a la obra. Entre los principales tipos de piezas se encuentran los bloques sólidos, los paneles verticales y los paneles horizontales. El CCA se produce en clases con resistencia a compresión entre  $20 \text{ kg/cm}^2$  y  $60 \text{ kg/cm}^2$  y densidades entre  $400 \text{ kg/m}^3$  y  $700 \text{ kg/m}^3$  (ASTM C 1693).

El CCA fue producido comercialmente por primera vez en Suecia en el año de 1929. Su uso se ha extendido a más de 40 países en todo el mundo, entre los que se encuentran Alemania, Francia, Inglaterra, Holanda, Portugal, China, Estados Unidos de América y México. El CCA se comenzó a utilizar en los Estados Unidos de América en el año de 1990. Por su parte, en México se utilizó por primera vez en el año de 1994. Su uso se ha extendido a diferentes partes de la república como son Nuevo León, Ciudad de México, Puebla, Guanajuato, San Luis Potosí, Tamaulipas, Estado de México y Yucatán.

Los muros de mampostería se utilizan ampliamente en la construcción de viviendas. Estos muros se pueden clasificar en no reforzados, reforzados interiormente y confinados, entre otros. Los muros de mampostería confinada son aquellos que están



reforzados en su periferia con elementos horizontales de concreto reforzado (dadas o cadenas) y verticales (castillos). En este tipo de muros primero se construye el panel de mampostería y posteriormente los elementos confinantes. En México se utilizan principalmente muros de mampostería confinada debido a su bajo costo y facilidad constructiva. Los muros de mampostería confinada se construyen principalmente con piezas de concreto o de arcilla. En los últimos años se ha empezado a construir muros de mampostería confinada con piezas de CCA.

Existen estudios experimentales sobre el comportamiento a cortante de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales. La mayoría de los estudios se realizaron con muros construidos con piezas de concreto o de arcilla (Meli 1979, San Bartolomé et al. 1992, Castilla et al. 2000, Yoshimura et al. 2000, Urzúa et al. 2001, Flores et al. 2004, Treviño et al. 2004, Tena et al. 2009, San Bartolomé et al. 2010, Pérez-Gavilán 2011, Raygoza 2012, Sosa 2013, Quiroz et al. 2014, Pérez-Gavilán 2015, Ventura 2015, Singhal 2016). Las principales variables estudiadas fueron el tipo de pieza, la relación de aspecto y el esfuerzo axial de compresión. Para el caso de muros construidos con piezas de CCA, la única variable estudiada fue la relación de aspecto (Varela et al. 2018, Pinto 2018). En estos estudios se observó que el comportamiento puede estar dominado por cortante diagonal o por flexo-cortante. El comportamiento a cortante de los muros se caracterizó por grietas diagonales que eventualmente forman un patrón en forma de "X". La falla por cortante estuvo asociada con la propagación de las grietas diagonales a los extremos de los castillos. El comportamiento por flexo-cortante de los muros estuvo asociado con la formación de una grieta horizontal en el castillo y su posterior propagación en forma diagonal en el panel de mampostería. La falla estuvo asociada con la formación de nuevas grietas diagonales por cortante en el panel de mampostería. Estas grietas diagonales se propagaron a los extremos de los castillos.

En México se cuenta con Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (GCM, 2017). En estas normas se establecen los requisitos para el diseño de muros no reforzados, reforzados interiormente y confinados, entre otros. Los requisitos para muros de mampostería

confinada se establecen para muros construidos con piezas de concreto o arcilla. A su vez, en los Estados Unidos de América se cuenta con un reglamento para el diseño de muros de mampostería de CCA (ACI 530-13). En este reglamento sólo se consideran muros de CCA no reforzados y reforzados interiormente.

Con base en lo anterior se observa que existen pocos estudios experimentales sobre el comportamiento a cortante de muros de mampostería confinada de CCA. A su vez no existe una normativa para el diseño de este tipo de muros. Por lo tanto, es importante realizar nuevos estudios experimentales donde se consideren el efecto de otras variables como son la resistencia a compresión del CCA, el esfuerzo axial de compresión y la relación de esbeltez de los muros. La información obtenida servirá para ampliar el conocimiento sobre el comportamiento a cortante y desarrollar especificaciones de diseño para este tipo de muros.

## **1.2 Objetivo general**

Desarrollar modelos de histéresis para muros de mampostería confinada de CCA con comportamiento dominado por cortante.

## **1.3 Alcance**

Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación cuyo objetivo es evaluar el comportamiento a cortante de muros de mampostería confinada de CCA. En esta primera etapa del proyecto, se ensayaron ocho muros sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Se construyeron los muros con bloques de CCA con dimensiones nominales de 15 cm x 20 cm x 61 cm provenientes de un mismo lote. Las variables de estudio de la primera etapa fueron la relación de aspecto y el esfuerzo axial. En esta tesis se ensayaron cuatro muros con diferentes relaciones de aspecto y un mismo esfuerzo axial. Se analizaron los resultados de los ocho muros de esta primera etapa junto con otros resultados experimentales obtenidos en la literatura.

## **1.4 Contenido**

En el Capítulo 1 se incluyen las generalidades, el objetivo y el alcance de la tesis. En el Capítulo 2 se presenta el comportamiento de muros de mampostería con cargas en el plano, la revisión de la literatura de muros de mampostería confinada y muros de CCA con comportamiento dominado por cortante y la reglamentación existente. En el Capítulo 3 se presenta la metodología, la cual incluye: obtención de propiedades de materiales, diseño de muros, construcción de muros, diseño del sistema de carga e instrumentación, ensaye de muros y el desarrollo del modelo de histéresis. En el Capítulo 4 se presentan las propiedades de los materiales y los resultados de los ensayos de los muros de mampostería confinada de CCA. En el Capítulo 5 se presenta el análisis de los resultados de los muros de mampostería confinada de CCA y el desarrollo de los modelos de histéresis. En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones de la tesis.

## CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

### 2.1 Resistencia de muros

La combinación de carga axial ( $P$ ) y carga lateral ( $V$ ) en un muro de mampostería, empotrado en su base y libre en su parte superior (Figura 2.1) puede inducir diversos mecanismos de falla asociados con la resistencia a flexión, cortante, flexo-cortante y deslizamiento. Para un muro con altura ( $H$ ), longitud ( $L$ ) y castillos de concreto reforzado con un ancho y una altura igual al espesor del muro ( $t$ ), las resistencias anteriores se pueden determinar como sigue:

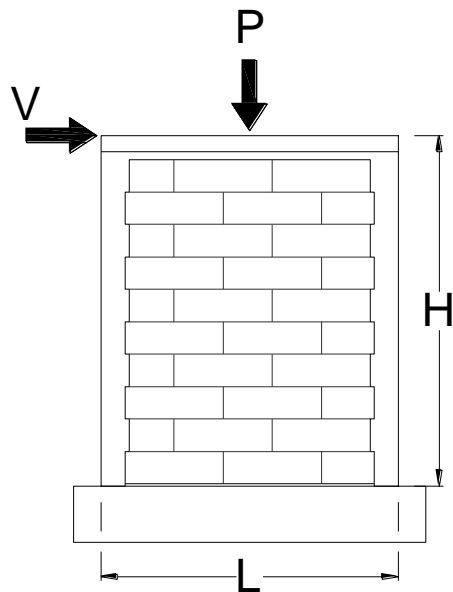


Figura 2.1 Muro confinado sujeto a carga axial y lateral.

**Resistencia a flexión.** Está asociada con el aplastamiento del concreto en la zona de compresión o con la fractura del acero de refuerzo en tensión (Figura 2.2).

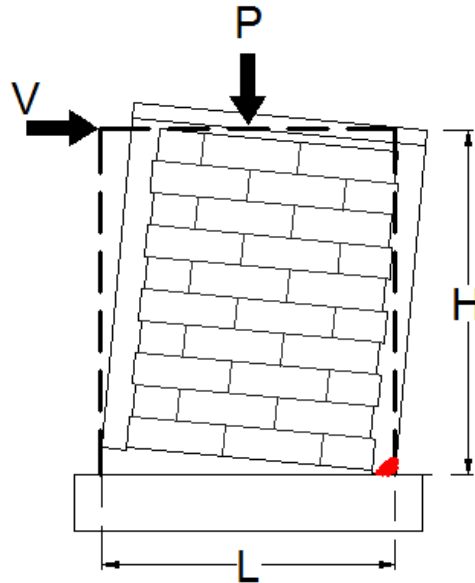


Figura 2.2 Falla por flexión de un muro confinado.

La resistencia a flexión se puede determinar con base en las hipótesis de la teoría de flexión (cinemática, constitutiva y equilibrio). Si se asume una distribución lineal de deformaciones, un bloque rectangular equivalente para los esfuerzos de compresión en el concreto reforzado y una profundidad del eje neutro ( $c$ ) localizado dentro del castillo en compresión, la resistencia a flexión ( $M_f$ ) del muro puede determinarse con la ecuación (2.1).

$$M_f = C \left( \frac{L - \beta_1 c}{2} \right) + T \left( \frac{L}{2} - r \right) \quad (2.1)$$

Dónde:

$$C = 0.85 f'_c \beta_1 c t \quad (2.2)$$

$$T = A_s f_s \quad (2.3)$$

$$P = C - T \quad (2.4)$$

En las ecuaciones anteriores,  $C$  es la fuerza resultante de los esfuerzos de compresión,  $T$  es la fuerza de tensión en el acero de refuerzo del castillo,  $\beta_1$  es el parámetro que relaciona la profundidad del bloque equivalente de esfuerzos de compresión del concreto con el eje neutro,  $r$  es el recubrimiento del acero de refuerzo del castillo,  $f'_c$  es la resistencia a compresión del concreto,  $A_s$  es el área de acero de refuerzo del castillo en tensión y  $f_s$  es el esfuerzo en dicho acero, obtenido a partir del modelo constitutivo propuesto por Rodríguez y Botero (1996). La carga lateral ( $V_f$ ) asociada a la resistencia a flexión se puede determinar con la ecuación (2.5).

$$V_f = M_f / H \quad (2.5)$$

**Resistencia a cortante.** Esta resistencia está asociada con la aparición del primer agrietamiento diagonal en el panel del muro de mampostería (Figura 2.3).

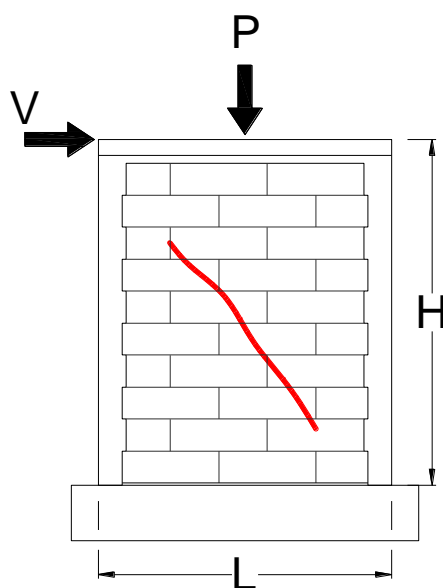


Figura 2.3 Grieta diagonal por cortante en un muro confinado.

Para muros de CCA no reforzados y reforzados interiormente, la resistencia nominal a cortante puede determinarse con la ecuación (2.6) (ACI 530-13). Esta ecuación se basa en la teoría de los esfuerzos principales.

$$V_{C1} = 0.95 L t \sqrt{f_{CCA}} \sqrt{1 + \frac{P}{2.4 \sqrt{f_{CCA}} L t}} \quad (2.6)$$

En la ecuación anterior,  $f_{CCA}$  es la resistencia a compresión del CCA. La resistencia a tensión del CCA ( $f_{tCCA}$ ) es igual a  $2.4 \sqrt{f_{CCA}}$  (Tanner 2003). Por tanto, la ecuación (2.6) puede reescribirse como se presenta en la ecuación (2.7). La resistencia a cortante de las ecuaciones (2.6) y (2.7) se encuentra en libras.

$$V_{C1} = 0.395 f_{tCCA} L t \sqrt{1 + \frac{P}{f_{tCCA} L t}} \quad (2.7)$$

Varela et al. (2018) propusieron la ecuación (2.8) para determinar la resistencia a cortante de muros de mampostería confinada de CCA Clase 4. Esta ecuación se basa en la ecuación (2.7) y considera explícitamente la influencia de la relación de aspecto. La resistencia a cortante de la ecuación (2.8) se encuentra en kilogramos.

$$V_{cCCA1} = \left(0.78 - 0.14 \frac{H}{L}\right) f_{tCCA} L t \sqrt{1 + \frac{P}{f_{tCCA} L t}} \quad (2.8)$$

Por otro lado, para muros de mampostería confinada construidos con piezas de concreto o arcilla, la resistencia nominal a cortante puede determinarse con la ecuación (2.9) (GCM, 2017). Esta ecuación se basa en la teoría de Mohr-Coulomb.

$$V_{C2} = (0.5 v'_m A_t + 0.3 P) f \leq 1.5 v'_m A_t f \quad (2.9)$$

En la ecuación anterior,  $v'_m$  es la resistencia a compresión diagonal de diseño de la mampostería,  $A_t$  es el área de la sección transversal del muro y  $f$  es un factor que se encuentra en función de la relación de aspecto. La resistencia a compresión diagonal promedio del CCA ( $v_m$ ) se puede relacionar con la resistencia a tensión promedio del CCA ( $f_{tCCA}$ ) por medio de la ecuación (2.10). Esta ecuación se validó utilizando datos de ensayos a compresión diagonal de muretes construidos con piezas de CCA Clase 4 (Hernández 2015) y el ensaye de bloques de CCA Clase 4 (Varela et al. 2018).

$$V_m = \frac{\pi}{2} f_{tCCA} \quad (2.10)$$

La resistencia a cortante puede determinarse con la ecuación (2.11), en la que se considera la influencia de la relación de aspecto. La resistencia a cortante de la ecuación (2.11) se encuentra en kilogramos.

$$V_{CCA2} = \left(0.85 - 0.15 \frac{H}{L}\right) (f_{tCCA} L t + 0.3 P) \quad (2.11)$$

**Resistencia a flexo-cortante.** Esta resistencia está asociada con la formación de una grieta horizontal a una altura igual a longitud media del muro y su posterior propagación en forma diagonal (Figura 2.4).

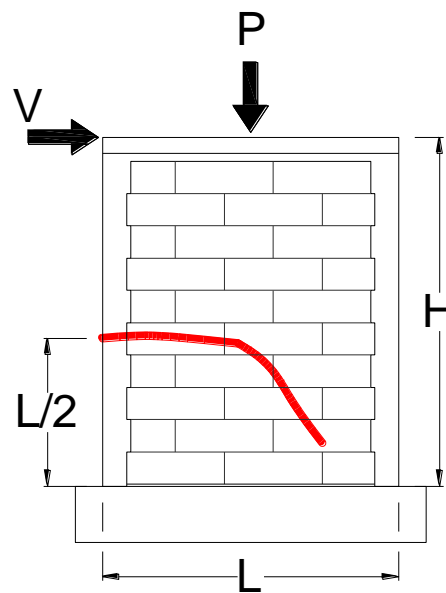


Figura 2.4 Grieta de flexo-cortante en un muro confinado.

La carga lateral asociada a la resistencia a flexo-cortante ( $V_{fc}$ ) puede determinarse con la ecuación (2.12). El primer término de la ecuación se relaciona con la carga requerida para formar la grieta horizontal en el castillo. El segundo con la carga adicional que se requiere para inducir la grieta diagonal en el panel de mampostería ( $C_v$ ). La primera carga se determina con la mecánica de materiales y la segunda con base en pruebas experimentales.



$$V_{fc} = \frac{S_x \left( f_r + \frac{P}{L} \right)}{H - \frac{L}{2}} + C_v \quad (2.12)$$

En la ecuación anterior  $S_x$  es el módulo de sección de la sección transversal del muro y  $f_r$  es la resistencia a tensión por flexión del material.

Para muros de mampostería confinada de CCA Clase 4, la resistencia a flexo-cortante del muro puede determinarse con la ecuación (2.13) (Varela et al. 2018). Esta ecuación es una modificación a la ecuación (2.12) en la que se asume el agrietamiento por flexo-cortante a una altura igual  $L/2$  y se usa  $A_{tr}$  como el área transformada de la sección transversal del panel del muro de CCA a concreto. Esta ecuación no incluye el término  $C_v$  debido a que en los muros estudiados la parte diagonal de la grieta por flexo-cortante se presentó al mismo tiempo que la parte horizontal. La resistencia a flexo-cortante de la ecuación (2.13) se encuentra en kilogramos.

$$V_{fcCCA} = 0.82 \left( \frac{S_x \left( f_r + \frac{P}{A_{tr}} \right)}{H - \frac{L}{2}} \right) \quad (2.13)$$

**Resistencia al deslizamiento.** Esta resistencia está asociada con el desplazamiento relativo del muro con respecto a su base (Figura 2.5).

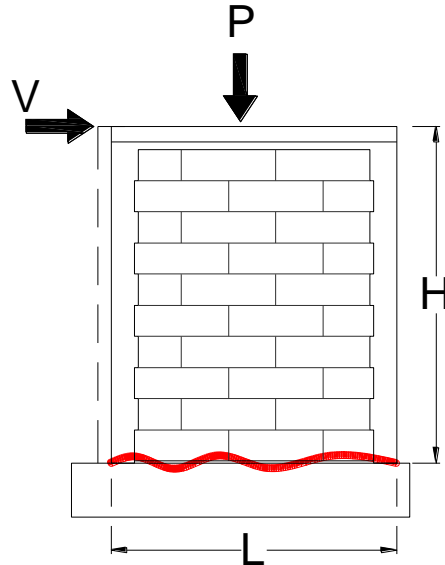


Figura 2.5 Desplazamiento relativo del muro con respecto a su base.

La resistencia al deslizamiento es proporcional al producto de la fuerza normal de compresión ( $P$ ) y el coeficiente de fricción entre el CCA y el concreto de la base ( $\mu$ ) ecuación (2.14). La resistencia a deslizamiento de la ecuación (2.14) se encuentra en kilogramos.

$$V_D = \mu \cdot P \quad (2.14)$$

La resistencia al deslizamiento se puede determinar también con la ecuación (2.15) (González 2013). En esta ecuación se considera la contribución del mortero en la resistencia al deslizamiento. Donde  $A_t$  está dada en centímetros cuadrados. La resistencia a deslizamiento de la ecuación (2.15) se encuentra en kilogramos.

$$V_D = A_t \left( 1.3673 \frac{P}{A_t} + 1.8498 \right) \quad (2.15)$$

## 2.2 Estudios sobre muros de mampostería confinada

El comportamiento a cortante de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales ha sido ampliamente estudiado. La mayoría de los estudios se realizaron con muros construidos con piezas de concreto o de arcilla. En estos estudios se han

considerado diferentes variables como son el tipo de pieza (Meli 1979, San Bartolomé et al. 2010), la combinación de piezas de concreto y arcilla (Tena et al. 2009), el tipo y la cantidad de acero de refuerzo en los castillos (Treviño et al. 2004; Quiroz et al. 2014), la cantidad y separación de acero de refuerzo vertical y horizontal en el panel de mampostería (Yoshimura et al. 2000), el esfuerzo axial de compresión (Castilla et al. 2000, Urzúa et al. 2001; Raygoza 2012; Sosa 2013), la relación de aspecto (H/L) (San Bartolomé 1992; Castilla et al. 2000, Raygoza 2012; Sosa 2013, Pérez-Gavilán 2015), el dentado (Singhal et al. 2016), la interacción entre el momento flexionante y la fuerza cortante (Pérez-Gavilán et al. 2011), las aberturas en los muros (Flores et al. 2004) y la cantidad y distribución de elementos confinantes (Ventura 2015).

### **2.3 Estudios sobre muros de CCA**

Tanner et al. (2005a) ensayaron 17 muros de CCA sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Se estudiaron nueve muros con comportamiento dominado por cortante. Los muros fueron reforzados interiormente con acero de refuerzo vertical en los extremos y uniformemente distribuido a lo largo de la longitud de los muros. Todos los muros se construyeron utilizando un mortero de pared delgada. Las variables de estudio fueron la relación de aspecto, la carga axial y el tipo de pieza. Los muros con comportamiento dominado por cortante fueron construidos a base de bloques sólidos y de paneles horizontales y verticales con refuerzo interior. Se consideraron relaciones de aspecto entre 0.63 y 3.15, y esfuerzos axiales de compresión entre 0.22 MPa y 0.57 MPa (2.23 kg/cm<sup>2</sup> y 5.8 kg/cm<sup>2</sup>). El comportamiento de los muros dominados por cortante se caracterizó por agrietamiento diagonal en ambas direcciones, y en algunos casos por deslizamiento en las juntas. La falla de los muros se asoció al excesivo agrietamiento diagonal y al aplastamiento del CCA. Finalmente, propusieron requisitos para el diseño de muros de CCA, los cuales incluyen las resistencias por cortante, aplastamiento del puntal diagonal, deslizamiento y flexión.

Penna et al. (2008) ensayaron 14 muros de CCA sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Las variables de estudio fueron el tipo de refuerzo utilizado, la relación de aspecto y el esfuerzo axial de compresión. Se consideraron cuatro muros no

reforzados, tres muros reforzados con acero horizontal, dos con acero vertical en sus extremos y cinco muros diafragma. Los muros se construyeron utilizando bloques sólidos y mortero de pared delgada. La relación de aspecto de los muros varió entre 0.61 a 1.83. La carga axial varió entre 0.22 MPa y 0.65 MPa (2.22 kg/cm<sup>2</sup> y 6.67 kg/cm<sup>2</sup>). Los muros con relación de aspecto de 0.61 tuvieron un comportamiento dominado por cortante, mientras que los muros con una relación de aspecto de 1.83 por flexión. Los autores concluyeron que los muros reforzados interiormente presentaron un incremento significativo de su resistencia a flexión comparado con los no reforzados. El uso de acero de refuerzo horizontal demostró una mejora en el control del agrietamiento y un incremento en la ductilidad. El uso de paneles de mampostería de CCA en marcos de concreto reforzado incrementa la resistencia a flexión y la rigidez del marco sin reducir su capacidad de deformación.

Costa et al. (2011) ensayaron cuatro muros de mampostería no reforzada ante cargas laterales cíclicas reversibles. Estos muros se construyeron utilizando bloques sólidos de CCA de 62.5 cm x 25 cm x 30 cm (base x altura x espesor). Las variables de estudio fueron la relación de aspecto y el esfuerzo axial. Se consideraron tres relaciones de aspecto: 0.61 (un muro), 0.91 (un muro) y 1.83 (dos muros). Se aplicaron tres niveles de carga axial: 0.22, 0.44 y 0.67 MPa. Los muros con relación de aspecto de 0.61 y 0.91 tuvieron comportamiento dominado por cortante. Los muros con relación de aspecto de 1.83 tuvieron comportamiento dominado por flexión. Los muros con relación de aspecto de 1.83 alcanzaron el mismo nivel de desplazamiento máximo, aunque se ensayaron a diferentes cargas verticales. Concluyeron que para muros no reforzados de longitud considerable con comportamiento dominado por cortante se recomiendan distorsiones últimas para diseño entre 0.3 y 0.35%. Para muros no reforzados dominados por flexión, se recomienda una distorsión última para diseño de 0.5%.

Tomazevic et al. (2012) ensayaron 10 muros de CCA y 3 edificios, a escala 1:4. Los muros se ensayaron bajo cargas laterales cíclicas reversibles y los edificios en una mesa sísmica vibratoria. Los muros se construyeron con bloques sólidos de CCA a escala 1:4 y mortero de pared delgada. Para los muros la variable de estudio fue el

refuerzo en el muro. Se consideraron cuatro muros no reforzados y seis reforzados interiormente con acero vertical en los extremos. Los muros no reforzados tuvieron un comportamiento dominado por flexión. La falla estuvo asociada a un agrietamiento horizontal en la base del muro y al aplastamiento de las piezas de CCA en la zona de compresión. Los muros reforzados interiormente tuvieron un comportamiento dominado por cortante. La falla se asoció al agrietamiento diagonal de los muros, lo cual produjo la degradación de la rigidez. Los edificios se construyeron a base de muros de bloques sólidos de CCA reforzados interiormente con acero vertical. Las variables de estudio fueron el número de niveles, la orientación de la excitación y el peso del edificio. Se consideraron edificios de 3 y 4 niveles, excitaciones en dirección ortogonal y paralela al eje de simetría, y pesos de 27.45 kN a 44.99 kN (2799 kg a 4588 kg). Todos los edificios presentaron un comportamiento dominado por cortante. La falla estuvo asociada al excesivo daño en los muros del primer piso y su posterior colapso. Los autores concluyeron que el uso del refuerzo interior incrementó la resistencia a cortante de los muros y aseguró la integridad de la estructura hasta el colapso.

Ravichandran et al. (2012) estudiaron el comportamiento de 1 muro diafragma de CCA sujeto a cargas laterales cíclicas reversibles. El muro consistió en un marco de acero y un panel de mampostería de bloques sólidos de CCA. Se utilizó mortero de pared delgada en la construcción del panel de mampostería. Primero se estudió el comportamiento del marco de acero sin el panel. Posteriormente, fue construido un panel de mampostería no reforzada de CCA en el interior del marco. El comportamiento del muro estuvo dominado por cortante. La falla se asoció al excesivo agrietamiento diagonal. Los autores concluyeron que las recomendaciones de diseño para muros diafragma de CCA de la Masonry Standards Joint Committee (MSJC) dan una buena aproximación de la rigidez lateral. Con base en los resultados experimentales obtenidos, propusieron un modelo analítico que representa el comportamiento histerético de los muros diafragma de CCA con un marco de acero.

Mandirola et al. (2012) ensayaron 3 muros de CCA sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Las variables de estudio fueron el tipo de refuerzo en el muro y el esfuerzo

axial de compresión. Se consideraron dos muros con acero de refuerzo horizontal en las juntas y uno no reforzado. Los muros se construyeron utilizando bloques sólidos de CCA y mortero de pared delgada. Se consideró una relación de aspecto de 0.8 y esfuerzos axiales de compresión entre 0.40 MPa y 0.60 MPa ( $4.08 \text{ kg/cm}^2$  y  $6.12 \text{ kg/cm}^2$ ). El comportamiento de los muros fue dominado por cortante, se presentaron grietas diagonales en ambas direcciones. La falla se asoció al excesivo agrietamiento diagonal y al aplastamiento del CCA. Los autores concluyeron que el uso de refuerzo horizontal disminuye la extensión de las grietas, incrementa la capacidad de deformación del muro y la resistencia a cortante.

Yu et al. (2013) ensayaron 6 muros de CCA sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Se consideraron cinco muros con castillos en los extremos y un muro no reforzado. La variable de estudio fue el tipo de refuerzo en los muros. Los muros se construyeron con bloques sólidos de CCA y mortero de pared delgada. Se consideró una relación de aspecto de 0.52 y un esfuerzo axial de compresión de  $7.13 \text{ kg/cm}^2$ . Se empleó un castillo intermedio, y de una a dos cadenas intermedias. El comportamiento de los muros fue dominado por cortante, se presentaron grietas diagonales en ambos sentidos. Los autores concluyeron que sin los castillos en los extremos el muro llega a su capacidad de carga inmediatamente después del agrietamiento. El uso de cadenas intermedias previene la ocurrencia y propagación de las grietas por lo que su carga de agrietamiento incrementa con el número cadenas. La ductilidad se mejora si se incrementa la altura de las cadenas intermedias y la cantidad de columnas. Los elementos confinantes mejoran el comportamiento por cortante de los muros de CCA.

Bose et al. (2014) evaluaron el comportamiento de un muro diafragma a escala 1:2.5 sujeto a cargas laterales cíclicas reversibles. El marco del muro fue de concreto reforzado. El panel de mampostería se construyó con bloques sólidos de CCA y utilizando mortero pared delgada. Se consideró un esfuerzo axial de  $0.066 \text{ kg/cm}^2$ . Primero se ensayó el marco de concreto sin el panel de CCA. Posteriormente se ensayó el marco de concreto con el panel. El comportamiento del muro fue dominado por cortante. El panel presentó agrietamiento diagonal en ambos sentidos. La falla

final fue caracterizada por la formación de articulaciones plásticas en las columnas de concreto reforzado y el aplastamiento del panel en la zona de compresión. Los autores concluyeron que a niveles de distorsión bajos el panel toma la mayor parte del esfuerzo cortante. Al incrementarse la distorsión hay una mejor distribución de cargas entre el panel y el marco, lo cual lleva a un mecanismo de fluencia temprano que genera una mejor disipación de energía.

Cao et al. (2016) estudiaron el comportamiento de un muro diafragma de dos niveles a escala 1:2 sujeto a cargas laterales cíclicas reversibles. El marco del muro fue de acero con una altura de 150 cm por nivel y un claro de 200 cm. Las columnas fueron perfiles IR 150 mm x 150 mm x 8 mm x 10 mm (peralte x ancho de patín x espesor de alma x espesor de patín) y las vigas perfiles IR 200 mm x 100 mm x 5.5 mm x 8mm (peralte x patín x espesor de alma x espesor de patín) conectados rígidamente. Dentro del marco se colocaron 6 paneles sólidos de CCA por nivel de 30 cm x 130 cm x 6 cm (base x altura x espesor) unidos con conectores tipo U a los elementos metálicos. Las juntas entre los paneles fueron rellenas con mortero. Primero se estudió el comportamiento del marco de acero sin el panel. Posteriormente se realizó la prueba con el panel en el interior. El panel presentó agrietamiento en el punto de conexión con el marco. La falla final fue caracterizada por el pandeo local del patín en la base de la columna. Los autores concluyeron que los paneles de CCA incrementan la rigidez inicial, carga máxima, distorsión y capacidad de disipar la energía. Después de un severo agrietamiento en el panel de CCA la contribución de la rigidez puede ser ignorada.

Rosti et al. (2016) ensayaron seis muros de mampostería no reforzados ante cargas laterales cíclicas reversibles. Los muros se construyeron utilizando bloques sólidos de CCA de 50 cm x 25 cm x 30 cm (base x altura x espesor) y densidad de 360 kg/m<sup>3</sup>. Las variables de estudio fueron la relación de aspecto y el esfuerzo axial. Se consideraron dos relaciones de aspecto: 0.8 (dos muros) y 2.0 (cuatro muros). Los esfuerzos axiales aplicados fueron de 2.7, 4.0 y 5.3 kg/cm<sup>2</sup>. Se concluyó que el mecanismo de falla para los muros con relación de aspecto de 0.8 fue por cortante y para los muros con relación de aspecto de 2.0 por flexión. También se concluyó que

la capacidad de deformación de los muros de CCA decrece conforme se incrementa el esfuerzo axial de compresión. Este comportamiento está relacionado a la baja capacidad de deformación de este tipo de mampostería e implica un límite a las cargas axiales aplicadas.

Wang et al. (2017) estudiaron el comportamiento de cuatro muros diafragma sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Los marcos fueron de acero con un largo de 330 cm y una altura 235 cm. Las columnas fueron perfiles tubulares rectangulares de 200 mm x 200 mm x 10 mm (base x peralte x espesor) rellenos de concreto con resistencia a compresión de  $400\text{kg/cm}^2$ . Las vigas fueron perfiles IR de 300 mm x 150 mm x 6.5 mm x 9 mm (peralte x base de patín x espesor del alma x espesor del patín). En los dos primeros marcos se colocaron 5 paneles sólidos de CCA clase 4 de 60 cm x 250 cm x 15 cm (base x altura x espesor) conectados externamente. En el tercer marco se emplearon paneles sólidos de CCA Clase 4 de 60 cm x 220 cm x 15 cm (base x altura x espesor) conectados internamente. En el cuarto marco se construyó un panel de mampostería de bloques de CCA Clase 4 de 60 cm x 24 cm x 15 cm (base x altura x espesor) conectados internamente. Primero se estudió el comportamiento de un marco de acero y posteriormente se ensayaron los muros diafragma. El comportamiento de los muros estuvo dominado por cortante. Los autores concluyeron que conectar el panel de manera externa no mejora la resistencia y rigidez del marco. Reportaron valores de ductilidad para muros diafragma con columnas rellenas que van de 2.88 a 3.00.

Chim (2017) ensayó dos muros de mampostería confinada de CCA sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Los muros fueron construidos con bloques sólidos de CCA Clase 4 y mortero de pared delgada. La variable de estudio fue la relación de aspecto. Se consideraron relaciones de aspecto de 1.94 (Mc3) y 2.64 (Mc4). La altura de los muros fue de 240 cm y el espesor de 15 cm. El esfuerzo axial de compresión aplicado fue de  $3.30\text{ kg/cm}^2$ . Durante el ensayo, los muros se comportaron como un elemento monolítico. El primer agrietamiento fue por flexo-cortante, inducido por un agrietamiento por flexión en los castillos. Las fallas estuvieron asociadas al excesivo agrietamiento diagonal por cortante y su propagación a los castillos. Se observó un



patrón de agrietamiento final en forma de "X" en el panel de mampostería. Concluyó que la degradación de la resistencia posterior a la carga máxima es menor al 20%. Además, la rigidez, la carga de agrietamiento por cortante y la carga máxima incrementan conforme la relación de aspecto disminuye. El desplazamiento de agrietamiento por cortante aumenta conforme la relación de aspecto incrementa. La energía disipada de los muros incrementa conforme la relación de aspecto disminuye. Presenta la calibración del modelo de histéresis propuesto el cual ajusta adecuadamente el comportamiento a cortante de los muros ensayados.

Varela et al. (2018) ensayaron siete muros de mampostería confinada de CCA sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Los muros fueron construidos con bloques sólidos de CCA Clase 4 y mortero de pared delgada. Las variables de estudio fueron la relación de aspecto y el esfuerzo axial de compresión. Para la primera variable se consideraron cuatro muros con relaciones de aspecto de 0.71, 1.30, 1.94 y 2.64 con un esfuerzo axial constante de 3.30 kg/cm<sup>2</sup>. La altura de los muros fue de 240 cm y el espesor de 15 cm. Los muros tuvieron comportamiento dominado por cortante. Las fallas estuvieron asociadas al excesivo agrietamiento diagonal por cortante y su propagación a los castillos. Se observó un patrón de agrietamiento final en forma de "X". Para la segunda variable se consideraron tres muros de 122 cm x 280 cm x 15 cm (largo x alto x espesor) con esfuerzos de 2.4, 4.8 y 7.2 kg/cm<sup>2</sup>. Los muros tuvieron un comportamiento dominado por flexión. Posterior a la fluencia del acero de refuerzo de los castillos se observaron agrietamientos por flexo-cortante. La parte horizontal de la grieta se formó en la junta constructiva de los castillos. La parte diagonal se formó a partir de la junta vertical entre el concreto y el panel de CCA. Las fallas estuvieron asociadas a una degradación de resistencia a flexión mayor al 20 por ciento. Los autores concluyeron que la resistencia a cortante aumenta conforme la relación de aspecto disminuye. Se propusieron modificaciones a las ecuaciones de diseño por cortante y flexo-cortante. Observaron que al incrementar el esfuerzo axial de compresión la resistencia a flexión aumenta y la ductilidad de desplazamiento disminuye. La resistencia a flexión de los muros puede ser calculada adecuadamente por medio de la teoría de flexión.

Pinto (2018) ensayó dos muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Las dimensiones de los muros fueron de 456 cm x 240 cm x 15 cm (largo x alto x espesor). La variable de estudio fue el tipo de pieza. Un muro fue construido con bloques huecos de concreto y el otro con bloques sólidos de CCA Clase 4. El esfuerzo axial de compresión aplicado fue de 3.00 kg/cm<sup>2</sup>. Los muros tuvieron comportamiento dominado por cortante. Las fallas estuvieron asociadas al excesivo agrietamiento diagonal por cortante y su propagación a los castillos. Concluyó que la resistencia a cortante de los muros es función de la relación de aspecto, la relación de esbeltez y la relación entre el esfuerzo axial de compresión y la resistencia a compresión de la mampostería. Propuso una ecuación para calcular la resistencia a cortante de muros confinados de cualquier tipo de pieza.

## **2.4 Reglamentaciones existentes**

En México se cuenta con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (GCM, 2017). En estas normas se establecen los requisitos mínimos para el diseño de muros no reforzados, muros reforzados interiormente y muros confinados, entre otros. Los requisitos de diseño para muros confinados establecidos en las NTCM son para muros construidos con piezas de concreto o arcilla. Por otro lado, en los Estados Unidos de América se cuenta con el Código de Requerimientos Constructivos y Especificaciones para Estructuras de Mampostería (Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures) (ACI 530-13). En este código se establecen los requisitos mínimos para el diseño de muros de CCA. Sin embargo, el alcance de este reglamento es solo para muros no reforzados, reforzados interiormente y diafragma.

## **2.5 Conclusiones de la revisión de literatura**

Con base en la revisión de literatura presentada anteriormente se concluye que existe una gran cantidad de estudios sobre el comportamiento a cortante de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. En estos

estudios los muros fueron construidos con piezas de concreto o arcilla. Las principales variables estudiadas fueron la relación de aspecto, el tipo de pieza, el esfuerzo axial de compresión y la cantidad y disposición del acero de refuerzo.

Existen pocos estudios sobre el comportamiento a cortante de muros de CCA sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Estos estudios se enfocaron principalmente en muros no reforzados, reforzados interiormente y muros diafragma. Las variables estudiadas fueron la relación de aspecto, el esfuerzo axial de compresión, el tipo de pieza y la cantidad y disposición del acero de refuerzo.

En los últimos años se han realizado estudios de muros de mampostería confinada de CCA sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Estos estudios se realizaron con muros construidos con bloques sólidos de CCA Clase 4. De igual manera, no existe una normativa para el diseño de este tipo de muros. Por lo tanto, es necesario realizar más estudios considerando el efecto de otras variables como son la Clase del CCA, el esfuerzo axial de compresión y la relación de esbeltez de los muros.

## CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

Las actividades realizadas en la metodología fueron: (1) determinación de las propiedades de los materiales, (2) diseño de muros, (3) construcción de muros, (4) diseño del sistema de carga e instrumentación, (5) ensaye de muros y (6) desarrollo de modelo de histéresis. Los detalles de las actividades se presentan en las siguientes secciones.

### 3.1 Determinación de propiedades de los materiales

El contenido de humedad y la resistencia a compresión del CCA se determinaron con base en la norma ASTM C1693-11. Cada propiedad se determinó con nueve cubos de 10 cm por lado. El ensaye a compresión de los cubos se realizó en una máquina universal con capacidad de 60 ton (Figura 3.1). Las cargas aplicadas por la máquina universal se validaron con un sistema de adquisición de datos independiente a través de una celda de carga con capacidad de 22.67 ton.



Figura 3.1 Ensaye a compresión de un cubo de CCA.

La resistencia a tensión del CCA se determinó con base en la norma ASTM C1006-01. Se utilizaron seis bloques con dimensiones nominales de 15 cm x 20 cm x 61 cm (espesor x altura x longitud). El ensaye de los bloques se realizó en una máquina universal con capacidad de 60 ton (Figura 3.2). Las cargas aplicadas por la máquina

universal se validaron con un sistema de adquisición de datos independiente a través de una celda de carga con capacidad de 4.53 ton.



Figura 3.2 Ensayo a tensión de un bloque de CCA.

La resistencia a compresión del concreto se determinó con base en la norma ASTM C39/C39M-18. Se elaboraron cuatro cilindros de 15 cm x 30 cm (diámetro x altura) para cada muro. Se utilizó el concreto empleado en la construcción de los castillos. Los ensayos se realizaron en una máquina universal con capacidad de 60 ton (Figura 3.3).



Figura 3.3 Ensayo a compresión de un cilindro de concreto.

La resistencia a la fluencia del acero de refuerzo longitudinal de los castillos y la cadena superior de los muros se determinó con base en la norma ASTM A370-02. Se utilizaron

dos barras de 50 cm de longitud. El ensaye se realizó en una máquina universal con capacidad de 60 ton (Figura 3.4).



Figura 3.4 Ensayo a la fluencia de una barra de acero.

La resistencia a tensión por flexión del concreto se determinó con base a la norma ASTM C78-02. Se utilizaron tres vigas con dimensiones de 15 cm x 15 cm x 75 cm (espesor x altura x longitud). El ensaye se realizó en una máquina universal con capacidad de 60 ton (Figura 3.5).



Figura 3.5 Ensayo a tensión por flexión de una viga de concreto.

La resistencia a compresión del mortero hidráulico se determinó con base en la norma ASTM C109/C109M-07. Se utilizaron tres cubos de 5 cm por lado. Se utilizó mortero

en proporciones por volumen 1:3 (cemento Portland: arena). El ensaye se realizó en una máquina universal con capacidad de 60 ton (Figura 3.6).



Figura 3.6 Ensayo a compresión de un cubo de mortero hidráulico.

La resistencia a compresión del mortero de pared delgada se determinó con base en la norma ASTM C109/C109M-07. Se utilizaron tres cubos de 5 cm por lado. El ensaye se realizó en una máquina universal con capacidad de 60 ton (Figura 3.7).



Figura 3.7 Ensayo a compresión de un cubo de mortero de pared delgada.

### 3.2 Diseño de muros

Se ensayaron cuatro muros de mampostería confinada de CCA a escala natural. Se consideraron relaciones de aspecto diferentes para cada muro. El diseño de los muros se basó en un proceso iterativo en el cual se determinaron las resistencias por flexión (ecuación (2.5)), cortante (ecuación (2.8)), flexo-cortante (ecuación (2.13)) y deslizamiento (ecuación (2.15)). Los muros se denominaron M-0.71-3.0, M-1.23-3.0, M-1.94-3.0 y M-2.64-3.0 (Muro-relación de aspecto-esfuerzo axial).

Para el diseño de los muros se utilizaron los siguientes parámetros:

- Altura de muros al punto de aplicación de carga lateral (H) de 240 cm.
- Longitud de muros (L) de 336 cm (M-0.71-3.0), 195 cm (M-1.23-3.0), 124 cm (M-1.94-3.0) y 91 cm (M-2.64-3.0).
- Espesor de muros (t) de 15 cm.
- Resistencia a compresión promedio del CCA ( $f_{CCA}$ ) de 53.88 kg/cm<sup>2</sup>.
- Resistencia a tensión promedio del CCA ( $f_{tCCA}$ ) de 4.65 kg/cm<sup>2</sup>.
- Resistencia a compresión de diseño del concreto ( $f'_c$ ) de 175 kg/cm<sup>2</sup>.
- Resistencia a la fluencia promedio del acero de refuerzo longitudinal ( $f_y$ ) de 4338.25 kg/cm<sup>2</sup>.
- Resistencia a la fluencia nominal del acero de refuerzo transversal ( $f_y$ ) de 2530 kg/cm<sup>2</sup>.
- Esfuerzo axial de compresión de 3.0 kg/cm<sup>2</sup>. Este esfuerzo se obtuvo con base en un análisis de cargas gravitacionales en edificios habitacionales construidos con muros y losas de CCA de 2 niveles.

En la Figura 3.8, Figura 3.9, Figura 3.10 y Figura 3.11 se presentan las curvas de resistencia-esfuerzo axial de compresión obtenidas para los muros. El esfuerzo axial se representa con una línea horizontal. En la Figura 3.8 y Figura 3.9 se observa que los muros M-0.71-3.0 y M-1.23-3.0 tendrán fallas por cortante. De igual manera, en la Figura 3.10 y Figura 3.11 se observa que los muros M-1.94-3.0 y M-2.64-3.0 tendrán fallas por flexo-cortante. Se observa que el tipo de falla esperada depende de la



relación de aspecto del muro y del esfuerzo axial de compresión. En la Figura 3.12 se presentan las características geométricas finales de los muros.

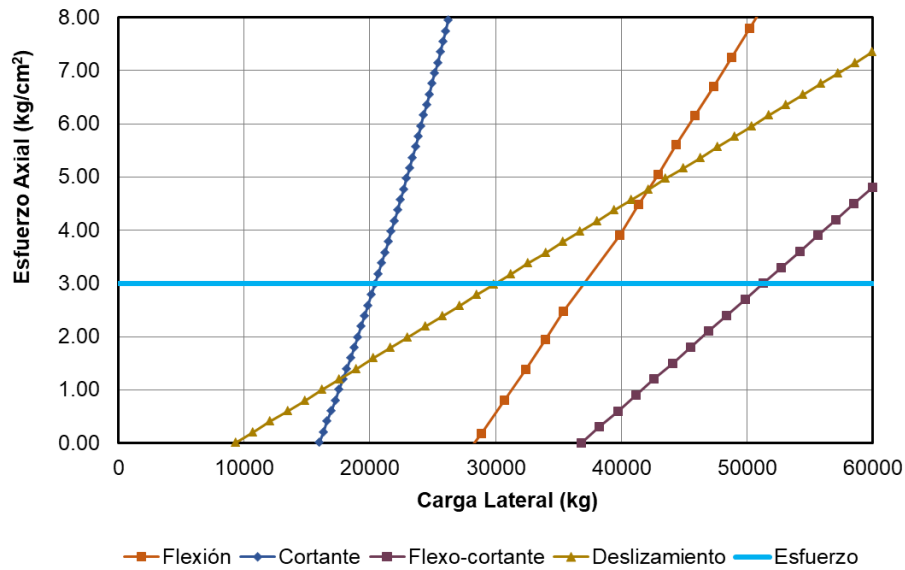


Figura 3.8 Curvas de resistencia-esfuerzo axial de compresión del muro M-0.71-3.0.

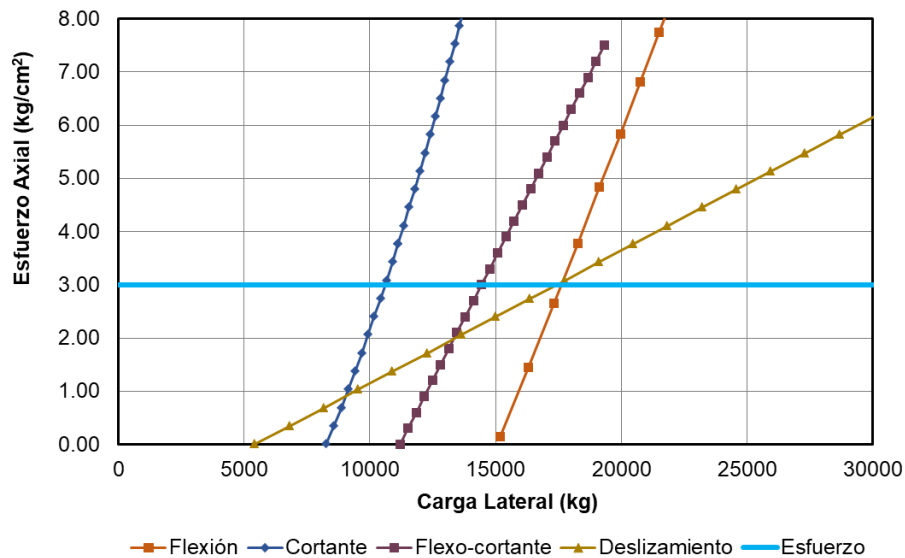


Figura 3.9 Curvas de resistencia-esfuerzo axial de compresión del muro M-1.23-3.0.

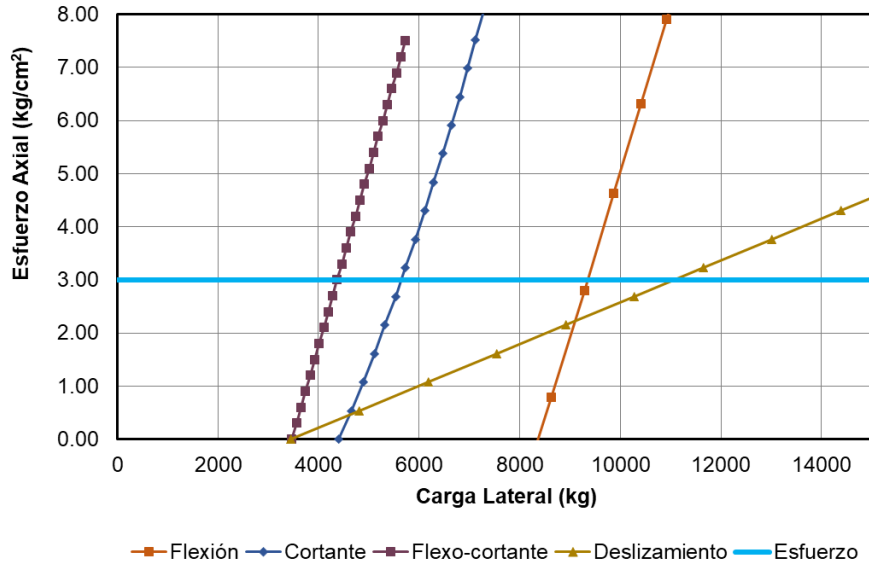


Figura 3.10 Curvas de resistencia-esfuerzo axial de compresión del muro M-1.94-3.0.

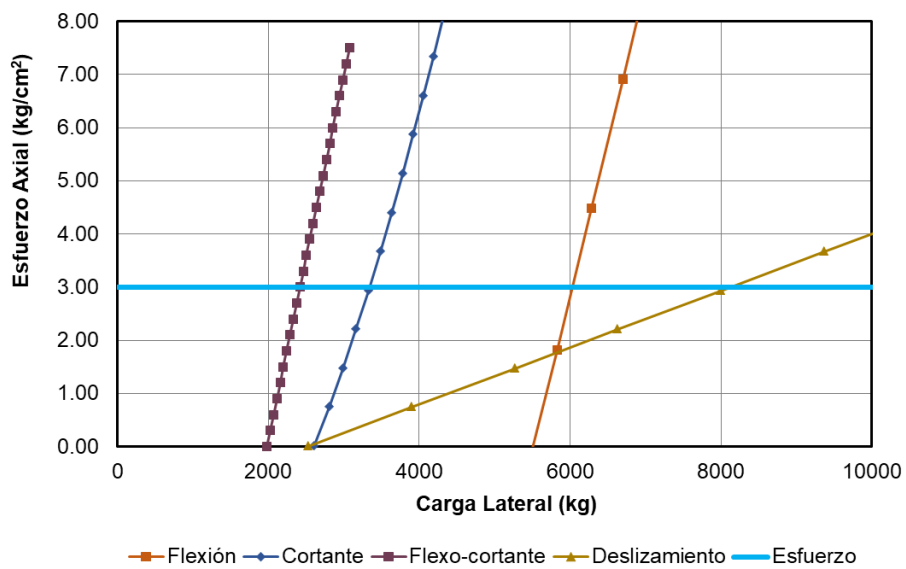


Figura 3.11 Curvas de resistencia-esfuerzo axial de compresión del muro M-2.64-3.0.

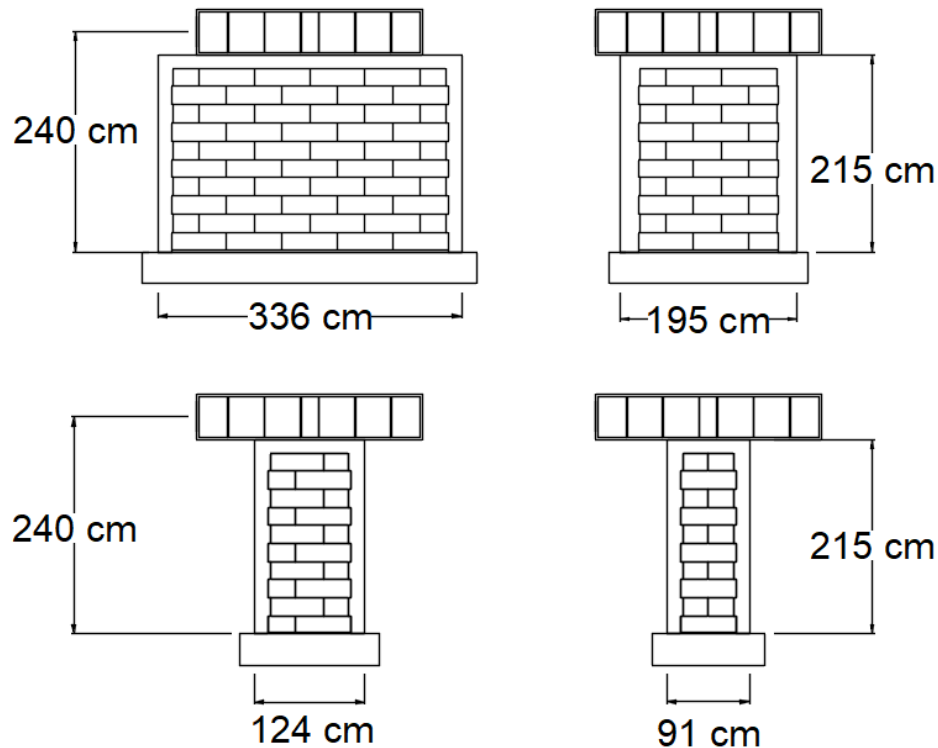


Figura 3.12 Geometría de los muros.

### 3.3 Construcción de muros

Los muros fueron construidos a plomo y nivel por un trabajador experimentado. El procedimiento constructivo empleado se describe a continuación.

1. Se construyó la base del muro de concreto reforzado y se habilitó el acero de refuerzo longitudinal para los castillos (Figura 3.13.a).
2. Se colocó la primera hilada de bloques de CCA a plomo y nivel (Figura 3.13.b). Para la junta horizontal se utilizó mortero hidráulico en proporciones por volumen 1:3 (cemento Portland: arena). Para las juntas verticales se utilizó mortero de pared delgada tipo 1 marca Hebel. La primera hilada se dejó reposar por 24 horas.
3. Se colocaron las subsecuentes hiladas de bloques de CCA empleando mortero de pared delgada tipo 1 marca Hebel en las juntas horizontales y verticales (Figura 3.13.c). La colocación de los bloques se realizó traslapándolos a su

longitud media. Se consideró un dentado de 2.5 cm en los extremos de cada hilada.

4. Se habilitó la cimbra y colocó el concreto de los castillos hasta la altura total del panel (Figura 3.13.d). Se dejó el anclaje del acero de refuerzo longitudinal de la cadena.
5. Se habilitó el acero de refuerzo y la cimbra de la cadena superior (Figura 3.14.a).
6. Se colocó el concreto de la cadena superior. (Figura 3.14.b).



a)



b)



c)



d)

Figura 3.13 a) Construcción de base del muro. b) Colocación de primera hilada de bloques de CCA. c) Colocación de hiladas posteriores de bloques de CCA. d) Habilitado de cimbra y colocación de concreto en los castillos.



a)



b)



c)

Figura 3.14 a) Habilitado de cimbra y acero de refuerzo de la cadena superior. b) Colocación de concreto en la cadena superior. c) Muros de mampostería confinada de CCA al concluir la etapa de construcción.

### 3.4 Diseño del sistema de carga e instrumentación

El sistema de carga se dividió en dos partes: sistema de carga lateral y sistema de carga axial. El sistema de carga lateral consistió en un marco de carga lateral, un actuador hidráulico y una viga de repartición de carga (Figura 3.15). El marco de carga se ancló a la losa de reacción del laboratorio. El actuador tuvo una capacidad en tensión de 28 ton y en compresión de 38 ton.

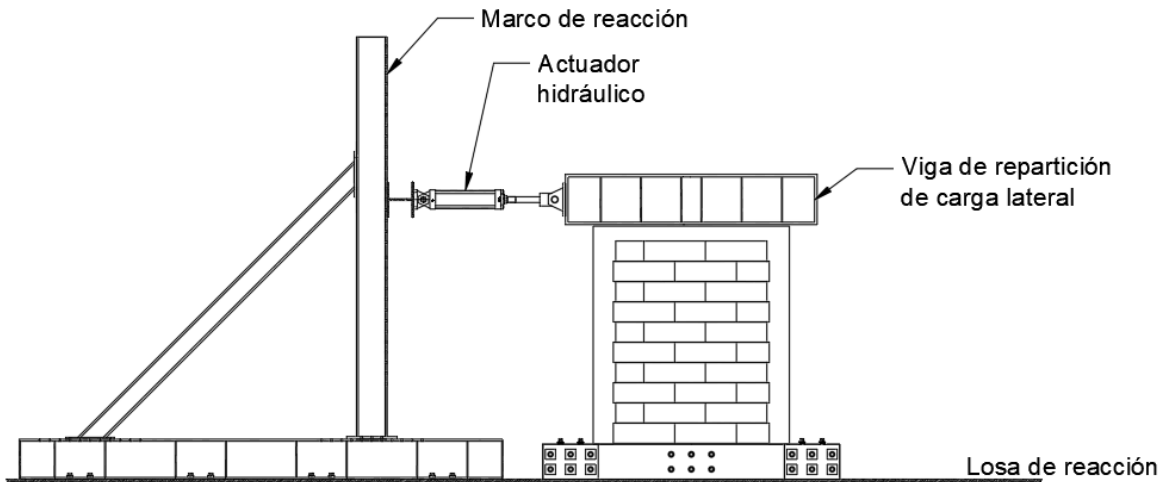


Figura 3.15 Esquema general del sistema de carga lateral.

El sistema de carga axial consistió en una viga balancín, una viga de reparto de carga axial, tensores de acero y un actuador hidráulico (Figura 3.16). La capacidad del actuador fue de 30 ton. La carga axial se mantuvo constante durante el ensayo mediante un controlador de presión hidráulica. El controlador se conectó a una bomba hidráulica (Figura 3.17).

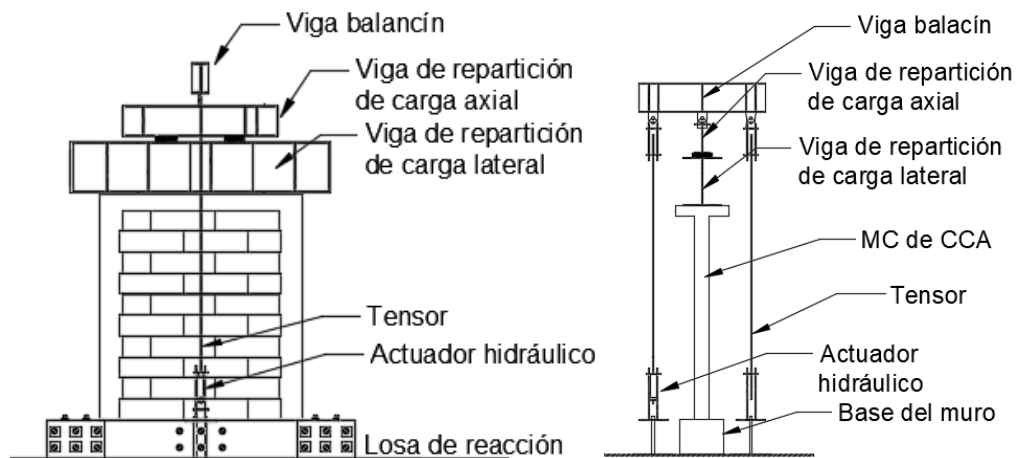


Figura 3.16 Esquema general del sistema de carga axial.

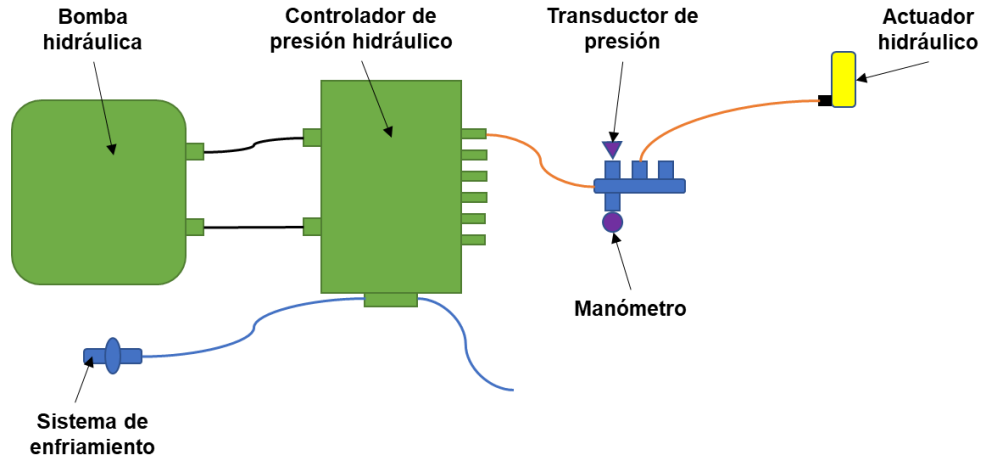


Figura 3.17 Conexión hidráulica del sistema de carga axial.

La instrumentación de los muros consistió en potenciómetros lineales (PL), potenciómetros de polea (PP), transductores de presión (TP), celdas de carga tipo dona (CC) y una celda de pasador (CP). Las mediciones se registraron mediante un sistema de adquisición de datos. En la Figura 3.18 se presenta la distribución de la instrumentación de los muros. En la Tabla 3.1 se presenta la descripción de la instrumentación utilizada en los muros.

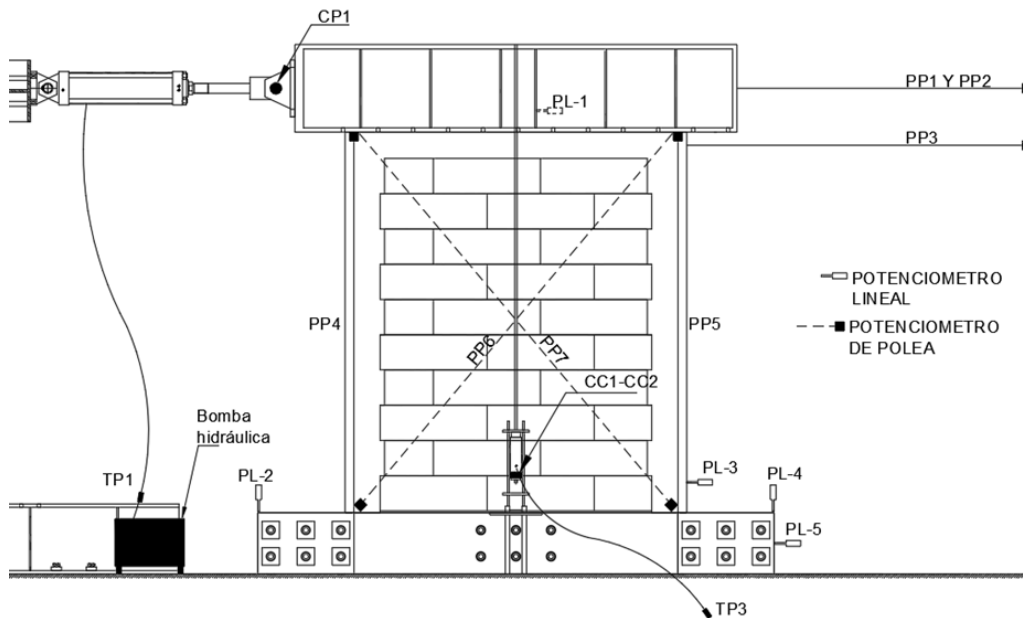


Figura 3.18 Esquema general del sistema de instrumentación.

Tabla 3.1 Descripción de la instrumentación utilizada en los muros.

<b>Instrumento</b>	<b>Medición</b>	<b>Capacidad</b>
PL1	Desplazamiento horizontal relativo entre viga de repartición de carga lateral y cadena.	2.5 cm
PL2	Desplazamiento vertical relativo entre la cimentación y la losa de reacción.	2.5 cm
PL3	Desplazamiento horizontal relativo entre el castillo y la cimentación.	2.5 cm
PL4	Desplazamiento vertical relativo entre la cimentación y la losa de reacción.	2.5 cm
PL5	Desplazamiento horizontal relativo entre la cimentación y la losa de reacción.	2.5 cm
PP1	Desplazamiento horizontal de la viga de carga lateral.	12 cm
PP2	Desplazamiento horizontal de la viga de carga lateral.	38 cm
PP3	Desplazamiento horizontal de la cadena.	38 cm
PP4	Desplazamiento vertical del castillo izquierdo.	5 cm
PP5	Desplazamiento vertical del castillo derecho.	5 cm
PP6	Alargamiento y acortamiento de la diagonal.	5 cm
PP7	Alargamiento y acortamiento de la diagonal.	5 cm
CC1	Carga de tensión aplicada al tensor delantero.	22.67 ton
CC2	Carga de tensión aplicada al tensor trasero.	22.67 ton
CP	Carga lateral aplicada por el actuador hidráulico.	40.86 ton
TP1	Presión del actuador hidráulico lateral.	0.70 ton/cm <sup>2</sup>
TP2	Presión del actuador hidráulico lateral.	0.70 ton/cm <sup>2</sup>
TP3	Presión del actuador hidráulico axial.	0.70 ton/cm <sup>2</sup>

### 3.5 Ensaye de muros

Para el ensaye de los muros se utilizó el protocolo de carga establecido en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (GCM, 2017). La primera etapa consistió en dos pares de ciclos controlados por carga, correspondientes al 25 y 50 por ciento de la carga de agrietamiento. La segunda etapa consistió en ciclos controlados por distorsión (Figura 3.19).



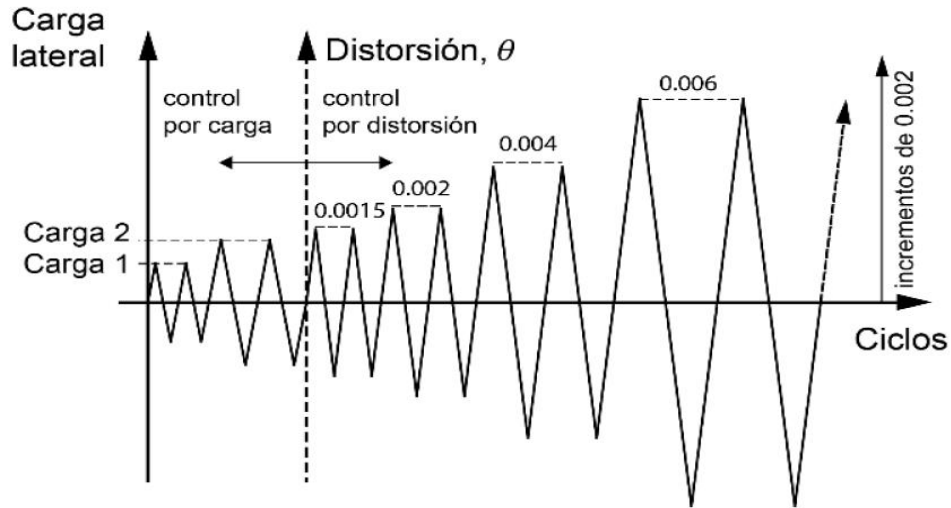


Figura 3.19 Protocolo de carga.

### 3.6 Desarrollo del modelo de histéresis

El comportamiento no lineal de los muros se representó utilizando un modelo de histéresis CA7 (CANNY, 1999) (Figura 3.20). Este modelo está diseñado para representar la degradación de rigidez, la degradación de resistencia y el estrangulamiento de la curva con base en una serie de parámetros.

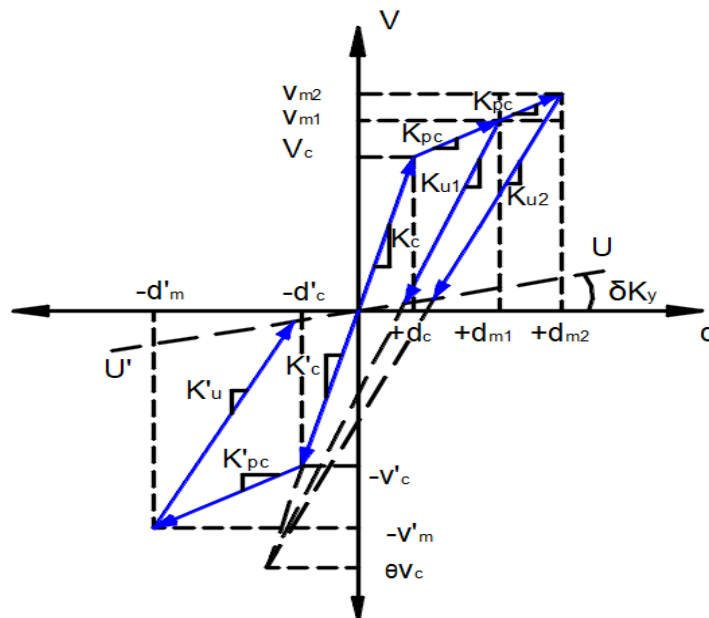


Figura 3.20 Modelo de histéresis CA7.

La rigidez al agrietamiento ( $K_c$ ) se calculó con la ecuación (3.1). En esta ecuación  $\alpha$  es el parámetro de histéresis que relaciona la rigidez analítica con la rigidez al agrietamiento,  $E_{CCA}$  es el módulo de elasticidad del CCA,  $I$  es la inercia de la sección transversal del muro transformada a CCA,  $G_{CCA}$  es el módulo de cortante del CCA,  $A$  es el área de la sección transversal del muro.

$$K_c = \alpha \left( \frac{H^3}{3 \cdot E_{CCA} \cdot I} + \frac{H}{G_{CCA} \cdot A} \right)^{-1} \quad (3.1)$$

La rigidez posterior al agrietamiento ( $K_{pc}$ ) se calculó con la ecuación (3.2). Donde  $\gamma$  es el parámetro de histéresis que relaciona la rigidez al agrietamiento con la rigidez posterior al agrietamiento.

$$K_{pc} = \gamma \cdot K_c \quad (3.2)$$

La recta U-U' (Figura 3.20) se ajustó para delimitar la descarga elástica. La pendiente de la recta U-U' ( $K_{uu}$ ) se calculó con la ecuación (3.3). Donde  $\delta$  es el parámetro de histéresis que define la pendiente de la recta U-U'.

$$K_{uu} = \delta \cdot K_c \quad (3.3)$$

La rigidez de descarga elástica ( $K_u$ ) se calculó con la ecuación (3.4). Donde  $\theta$  es el parámetro de histéresis que define la rigidez de descarga elástica,  $V_c$  es la carga de agrietamiento por cortante o flexo-cortante,  $V_m$  y  $d_m$  son la carga y desplazamiento máximos de cada ciclo.

$$K_u = \frac{\theta \cdot V_c + V_m}{\theta \cdot \frac{V_c}{K_c} + d_m} \quad (3.4)$$

La degradación de la resistencia en los ciclos posteriores al ciclo de carga máxima se puede representar dirigiendo la curva de recarga hacia un punto de carga reducida ( $\bar{V}_m$ ) con el mismo desplazamiento correspondiente a la carga máxima del ciclo anterior ( $V_m$ ) (Figura 3.21).

La carga reducida ( $\bar{V}_m$ ) se calculó con la ecuación (3.5). Donde  $\lambda_u$  es el parámetro de histéresis que controla la degradación de resistencia y  $\mu$  es la relación entre desplazamiento correspondiente a la carga máxima del ciclo y el desplazamiento de agrietamiento ( $d_m/d_c$ ) (Figura 3.20).

$$\bar{V}_m = V_m \left( 1 - \lambda_u \left( 1 - \frac{1}{\mu} \right) \right) \quad (3.5)$$

El efecto de ablandamiento de la curva en los ciclos posteriores al ciclo de carga máxima se puede representar considerando una rigidez reducida posterior al agrietamiento (Figura 3.21).

La rigidez reducida posterior al agrietamiento ( $\bar{K}_{pc}$ ) se calculó con la ecuación (3.6). Donde  $\lambda_3$  es el parámetro de histéresis que controla el efecto de ablandamiento.

$$\bar{K}_{pc} = K_{pc} \left( 1 - \lambda_3 \left( 1 - \frac{1}{\mu} \right) \right) \quad (3.6)$$

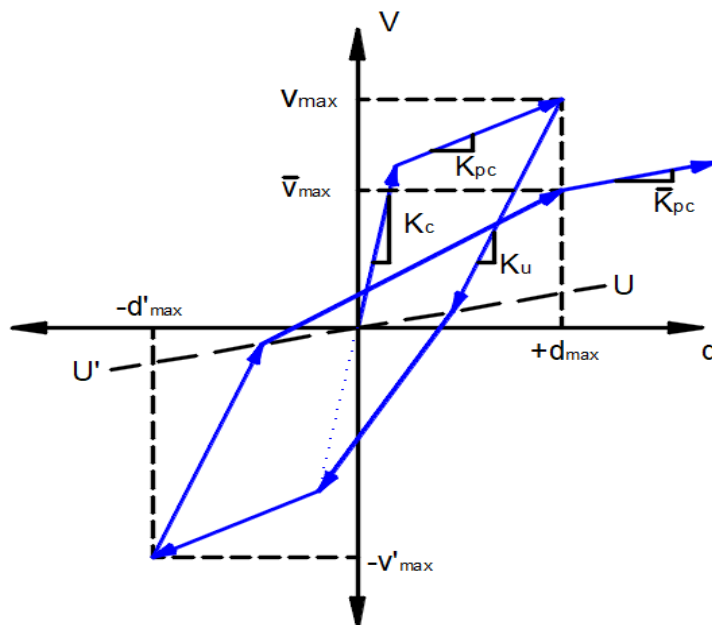


Figura 3.21 Representación de la degradación de resistencia y ablandamiento en el modelo de histéresis.

El estrangulamiento de los ciclos de histéresis se simuló dirigiendo la recarga iniciada en la recta U-U' hacia un punto definido por la intersección de una fuerza  $V_e$  y el desplazamiento  $d_m$  del ciclo, hasta alcanzar un desplazamiento  $d_e$  (Figura 3.22).

Los valores de  $d_e$  y  $V_e$  se calcularon con las ecuaciones (3.7) y (3.8), respectivamente. Donde  $\varepsilon$  y  $\lambda_s$  son los parámetros de histéresis que definen el efecto de estrangulamiento en la curva de histéresis y  $d_u$  es el desplazamiento residual de la descarga elástica.

$$d_e = \varepsilon \cdot d_u \quad (3.7)$$

$$V_e = \lambda_s (\bar{V}_m - K_{uu} \cdot d_m) + K_{uu} \cdot d_m \quad (3.8)$$

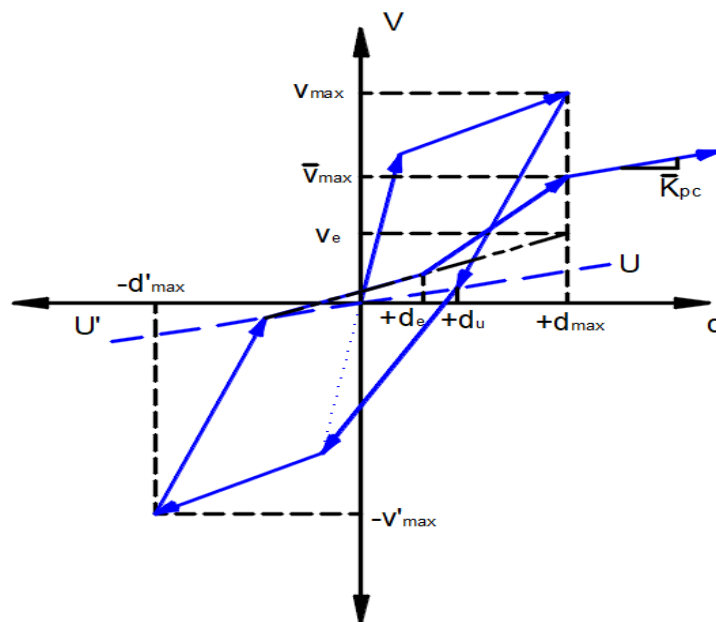


Figura 3.22 Representación del estrangulamiento en el modelo de histéresis.

Los parámetros de histéresis ( $\alpha, \gamma, \theta, \delta, \lambda_u, \lambda_3, \varepsilon, \lambda_s$ ) se calibraron con base en estudios experimentales como se presenta posteriormente.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS

### 4.1 Propiedades mecánicas de los materiales

En la Tabla 4.1 se presenta el contenido de humedad de los cubos de CCA utilizados para el ensaye a compresión. La humedad promedio fue de 8.34 % con un coeficiente de variación (CV) de 0.11. El promedio de la humedad se encontró entre el 5 y 15% especificado en la ASTM C1693-11.

Tabla 4.1 Contenido de humedad del CCA.

<b>Cubo</b>	<b>Humedad (%)</b>
<b>C1</b>	8.18
<b>C2</b>	7.69
<b>C3</b>	7.18
<b>C4</b>	9.88
<b>C5</b>	9.32
<b>C6</b>	7.77
<b>C7</b>	8.47
<b>C8</b>	8.33
<b>C9</b>	9.48
<b>Promedio</b>	8.34
<b>CV</b>	0.11

En la Tabla 4.2 se presenta la resistencia a compresión del CCA ( $f_{CCA}$ ). La resistencia promedio fue de 53.88 kg/cm<sup>2</sup> con un coeficiente de variación de 0.04.

Tabla 4.2 Resistencia a compresión del CCA.

<b>Cubo</b>	<b>f<sub>CCA</sub> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>C1</b>	57.99
<b>C2</b>	54.03
<b>C3</b>	54.66
<b>C4</b>	53.01
<b>C5</b>	52.97
<b>C6</b>	52.71
<b>C7</b>	53.56
<b>C8</b>	50.93
<b>C9</b>	55.02
<b>Promedio</b>	53.88
<b>CV</b>	0.04

En la Tabla 4.3 se presenta la resistencia a tensión del CCA ( $f_{iCCA}$ ). La resistencia a tensión promedio fue de 4.65 kg/cm<sup>2</sup> con un coeficiente de variación de 0.07.

Tabla 4.3 Resistencia a tensión de bloques de CCA.

<b>Bloque</b>	<b>f<sub>iCCA</sub> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>T2B1</b>	4.96
<b>T2B2</b>	4.40
<b>T3B1</b>	4.26
<b>T3B2</b>	4.79
<b>T1B1</b>	5.03
<b>T4B1</b>	4.47
<b>Promedio</b>	4.65
<b>CV</b>	0.07

En la Tabla 4.4 se presenta la resistencia a compresión ( $f'_c$ ) promedio del concreto utilizado en los castillos de cada muro. Las resistencias promedio fueron de 159.91

kg/cm<sup>2</sup>, 158.34 kg/cm<sup>2</sup>, 165.17 kg/cm<sup>2</sup> y 161.48 kg/cm<sup>2</sup> con coeficientes de variación de 0.01, 0.02, 0.02 y 0.03 respectivamente.

Tabla 4.4 Resistencia a compresión del concreto.

	<b>f'<sub>c</sub> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>			
	M-0.71-3.0	M-1.23-3.0	M-1.94-3.0	M-2.64-3.0
<b>Promedio</b>	159.91	158.34	165.17	161.48
<b>CV</b>	0.01	0.02	0.02	0.03

En la Tabla 4.5 se presenta la resistencia de fluencia del acero (f<sub>y</sub>) de refuerzo longitudinal. La resistencia promedio fue de 4338.25 kg/cm<sup>2</sup> con un coeficiente de variación de 0.01.

Tabla 4.5 Resistencia de fluencia del acero de refuerzo.

<b>Muestra</b>	<b>f<sub>y</sub> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>R1</b>	4292.69
<b>R2</b>	4383.81
<b>Promedio</b>	4338.25
<b>CV</b>	0.01

En la Tabla 4.6 se presenta la resistencia a tensión por flexión (f<sub>r</sub>) del concreto. La resistencia promedio fue de 27.52 kg/cm<sup>2</sup> con un coeficiente de variación de 0.04.

Tabla 4.6 Resistencia a tensión por flexión del concreto.

<b>Viga</b>	<b>f<sub>r</sub> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>1</b>	29.05
<b>2</b>	27.57
<b>3</b>	25.90
<b>4</b>	26.64
<b>5</b>	27.7
<b>6</b>	28.25
<b>Promedio</b>	27.52
<b>CV</b>	0.04

En la Tabla 4.7 se presenta la resistencia a compresión del mortero hidráulico ( $f_j$ ). La resistencia promedio fue de 227.98 kg/cm<sup>2</sup> con un coeficiente de variación de 0.003.

Tabla 4.7 Resistencia a compresión del mortero hidráulico.

<b>Cubo</b>	<b><math>f_j</math> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>M1</b>	227.46
<b>M2</b>	227.74
<b>M3</b>	228.74
<b>Promedio</b>	227.98
<b>CV</b>	0.003

En la Tabla 4.8 se presenta la resistencia a compresión del mortero de pared delgada ( $f_{jpd}$ ). La resistencia promedio fue de 181.62 kg/cm<sup>2</sup> con un coeficiente de variación de 0.02.

Tabla 4.8 Resistencia a compresión del mortero de pared delgada.

<b>Cubo</b>	<b><math>f_{jpd}</math> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>M1</b>	176.49
<b>M2</b>	183.64
<b>M3</b>	184.72
<b>Promedio</b>	181.62
<b>CV</b>	0.02



## 4.2 Ensaye de muros

En el ensayo del muro M-0.71-3.0 se aplicaron 23 ciclos de carga lateral. Los primeros cuatro estuvieron controlados por carga y los subsecuentes por distorsión. En la Figura 4.1, Figura 4.2 y Figura 4.3 se presentan la historia de la carga lateral, la distorsión y la carga axial con los ciclos, respectivamente. El primer ciclo se denomina 1A, el segundo 1B, el tercero 2A, el cuarto 2B y así sucesivamente. Cada ciclo consistió en una parte positiva y una negativa. Para la parte positiva los agrietamientos se marcaron de color negro y para la negativa de color rojo. La carga axial inicial aplicada al muro fue de 15.97 ton. Esta carga incluye la aplicada con el actuador hidráulico y el peso propio del sistema de carga. En la Figura 4.3 se observa una variación de la carga axial de aproximadamente el 31.3% en los ciclos 9B y 11A.

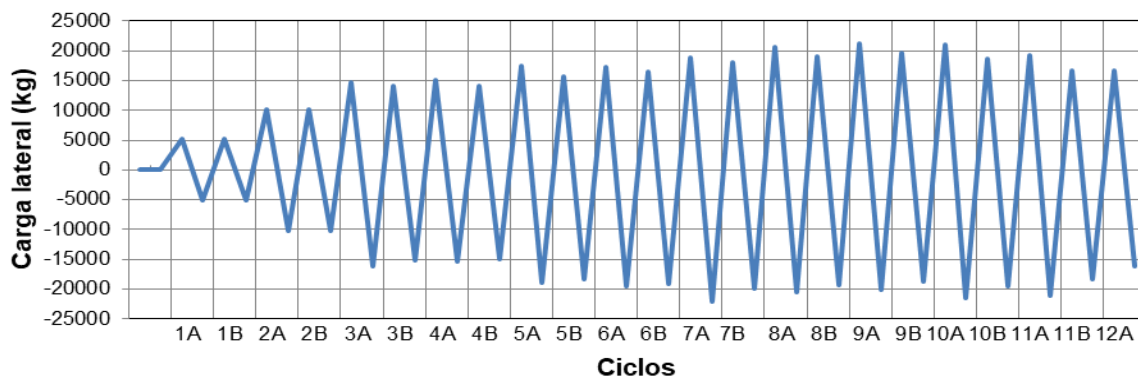


Figura 4.1 Historia de carga lateral con los ciclos del muro M-0.71-3.0.

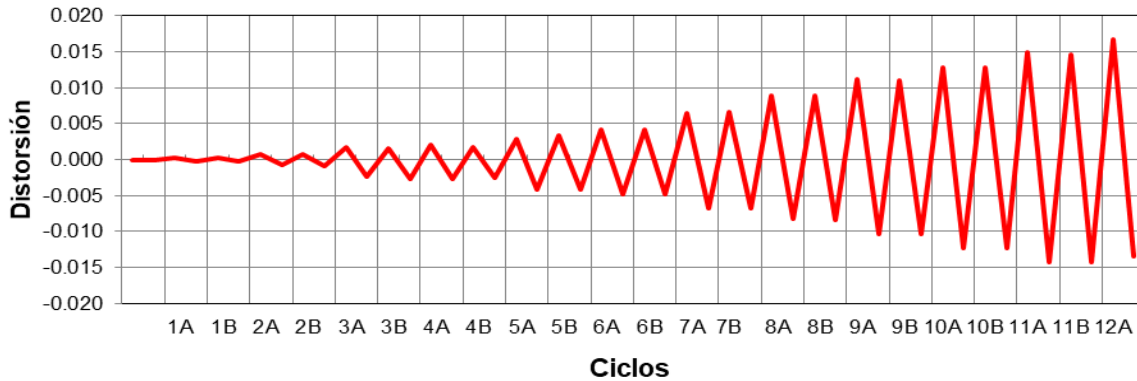


Figura 4.2 Historia de distorsión con los ciclos del muro M-0.71-3.0.

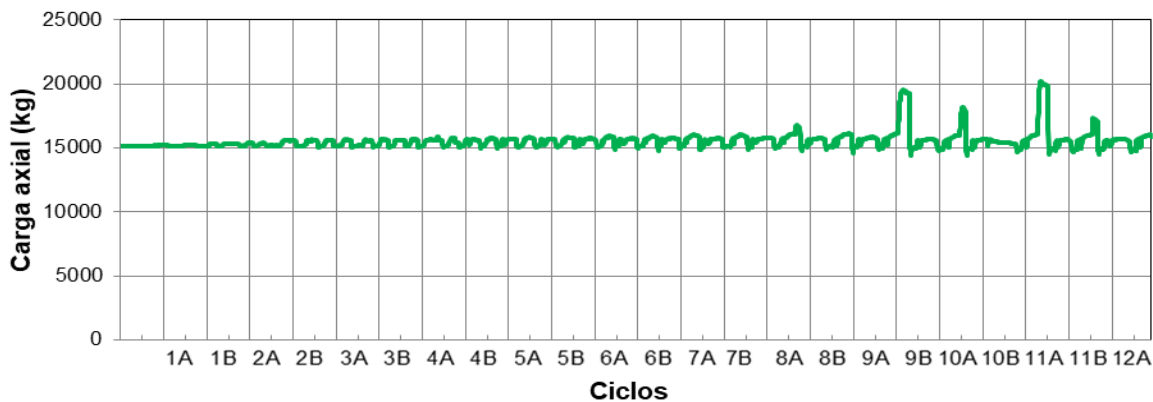


Figura 4.3 Historia de carga axial con los ciclos del muro M-0.71-3.0.

El comportamiento del muro se caracterizó en los primeros ciclos por la formación de grietas horizontales en los castillos, la formación de una grieta horizontal entre la base del muro y la primera hilada de bloques de CCA y una grieta diagonal en el panel. Esta grieta diagonal se presentó y extendió en ciclos consecutivos y está asociada a un desplazamiento relativo de la base del muro (Figura 4.4). En el ciclo 5A positivo se observaron otras grietas por flexión junto con grietas diagonales por cortante. (Figura 4.5). Posteriormente, se observaron nuevas grietas por flexión y cortante hasta alcanzar la carga máxima en el ciclo 7A negativo (Figura 4.6). Durante estos ciclos se presentaron desplazamientos relativos significativos entre la viga de repartición de carga lateral y la cadena de nivelación del muro. Al aumentar la distorsión se observó la degradación de resistencia del muro. Sin embargo, debido al agrietamiento se formó

un puntal de compresión que ocasionó el aumento de resistencia en el sentido negativo. El ensaye se detuvo debido a una falla fuera del plano del panel. El patrón de agrietamiento final se presenta en la Figura 4.7. En la Tabla 4.9 se presenta un resumen de los eventos principales observados durante el ensaye del muro. En esta tabla se incluyen para cada evento el ciclo, la carga lateral, el desplazamiento y la distorsión. En la Figura 4.8 se presenta la curva carga lateral-desplazamiento del muro. Esta curva fue ajustada debido a los desplazamientos relativos presentados durante el ensaye los cuales fueron medidos por los potenciómetros lineales.

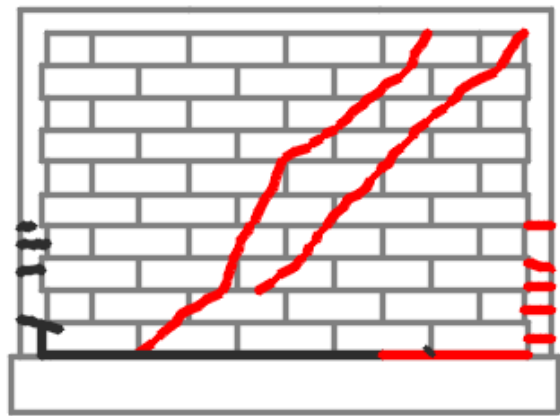


Figura 4.4 Agrietamiento horizontal y diagonal del muro M-0.71-3.0.



Figura 4.5 Agrietamiento diagonal por cortante del muro M-0.71-3.0.

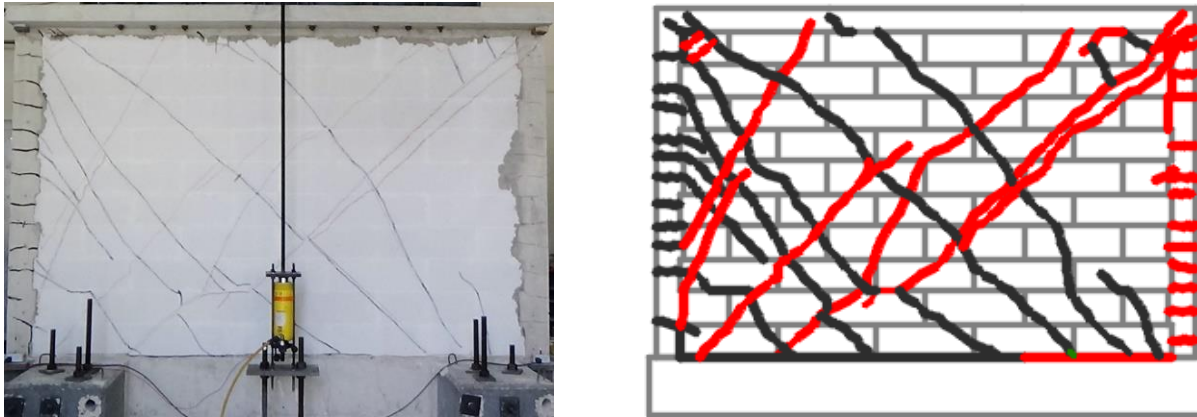


Figura 4.6 Grietas por flexión y cortante a la carga máxima del muro M-0.71-3.0.

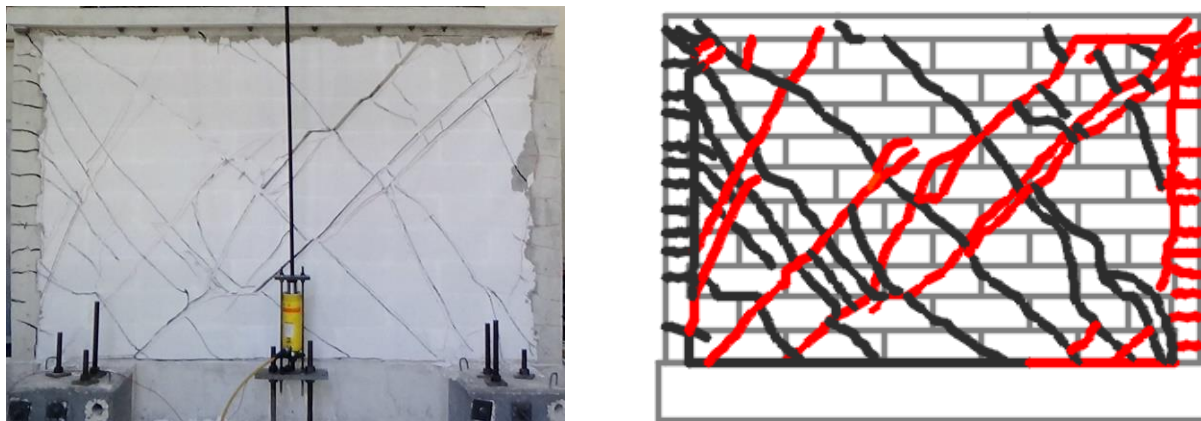


Figura 4.7 Patrón de agrietamiento final del muro M-0.71-3.0.

Tabla 4.9 Resumen de eventos principales del muro M-0.71-3.0.

Evento	Sentido	Ciclo	Carga (kg)	Desplazamiento (mm)	Distorsión
<b>Agrietamiento por cortante</b>	Positivo	5A	17513	7.06	0.003
<b>Carga máxima</b>	Negativo	7A	22059	16.19	0.007
	Positivo	9A	21222	26.71	0.011
<b>Carga última experimental</b>	Negativo	11A	21143	34.30	0.014
	Positivo	12A	16591	40.24	0.017

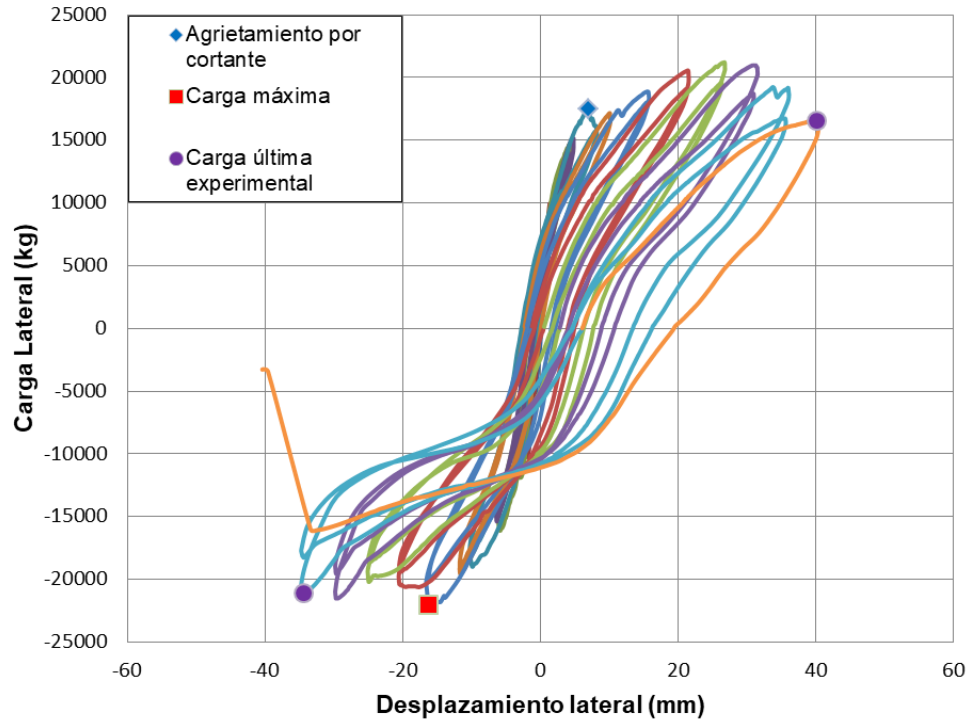


Figura 4.8 Curva carga lateral-desplazamiento del muro M-0.71-3.0.

En el ensayo del muro M-1.23-3.0 se aplicaron 20 ciclos de carga lateral. Los primeros cuatro estuvieron controlados por carga y los subsecuentes por distorsión. En la Figura 4.9, Figura 4.10 y Figura 4.11 se presentan la historia de la carga lateral, la distorsión y la carga axial con los ciclos, respectivamente. La carga axial inicial aplicada al muro fue de 9.65 ton. Esta carga incluye la aplicada con el actuador hidráulico y el peso propio del sistema de carga. En la Figura 4.11 se observa que la máxima variación de la carga axial fue aproximadamente de 7.0 por ciento.

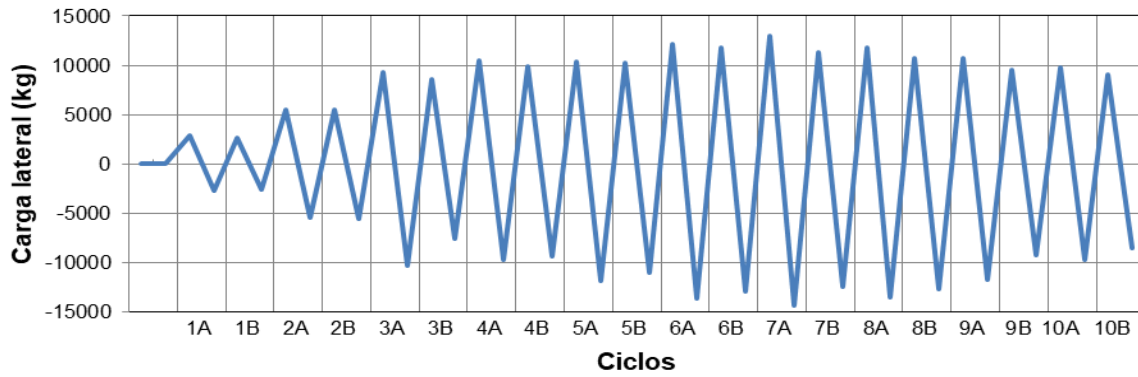


Figura 4.9 Historia de carga lateral con los ciclos del muro M-1.23-3.0.

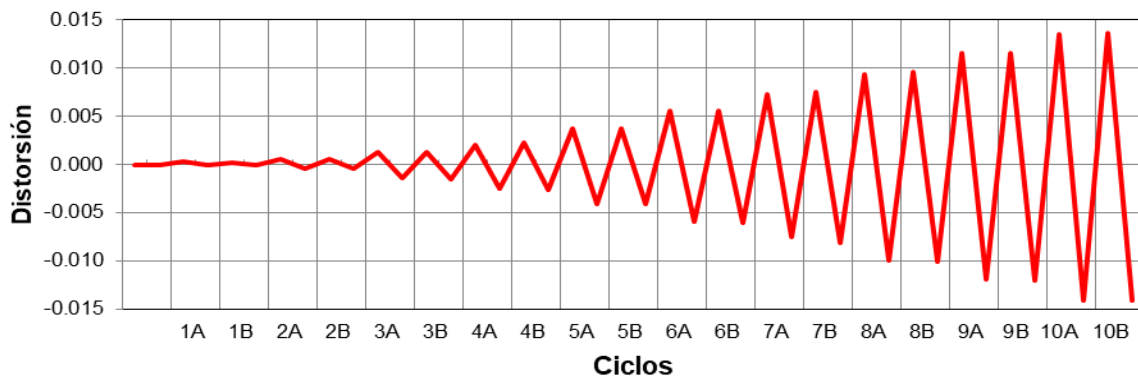


Figura 4.10 Historia de distorsión con los ciclos del muro M-1.23-3.0.

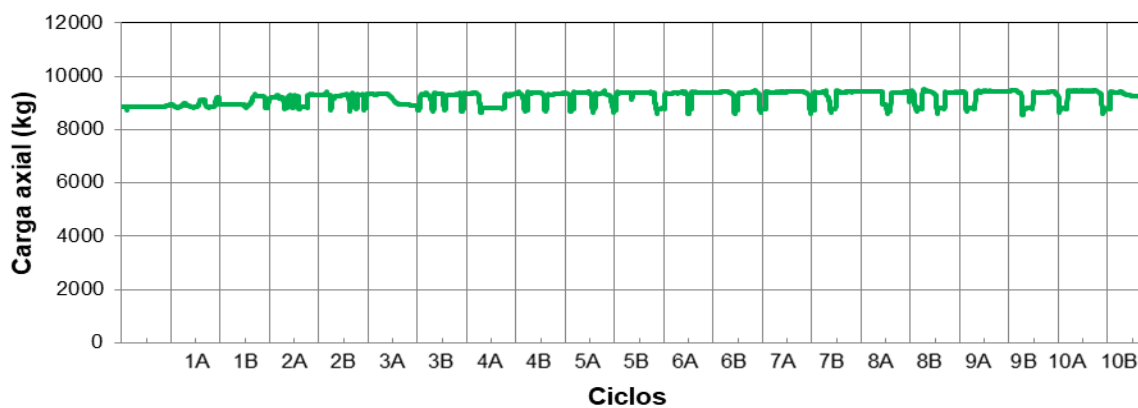


Figura 4.11 Historia de carga axial con los ciclos del muro M-1.23-3.0.

El comportamiento del muro se caracterizó en los primeros ciclos por la formación de grietas horizontales en los castillos y una grieta diagonal en el panel. En el ciclo 3A negativo se observó la formación de una grieta diagonal por cortante (Figura 4.12). En el ciclo 5A positivo se observaron otras grietas por flexión junto con una grieta por flexo-cortante (Figura 4.13). Posteriormente, se observaron nuevas grietas por flexión, flexo-cortante y grietas diagonales por cortante hasta alcanzar la carga máxima en el ciclo 7A negativo (Figura 4.14). Al aumentar la distorsión se observó la degradación de la resistencia del muro. El ensaye se detuvo debido a que se alcanzó una degradación mayor al 20 por ciento. El patrón de agrietamiento final se presenta en la Figura 4.15. En la Tabla 4.10 se presenta un resumen de los principales eventos observados durante el ensaye del muro. En la Figura 4.16 se presenta la curva carga lateral-desplazamiento del muro.

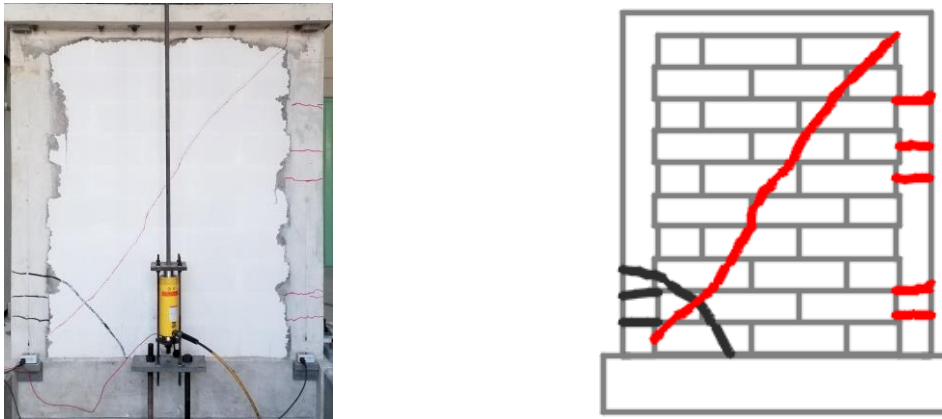


Figura 4.12 Agrietamiento diagonal por cortante del muro M-1.23-3.0.

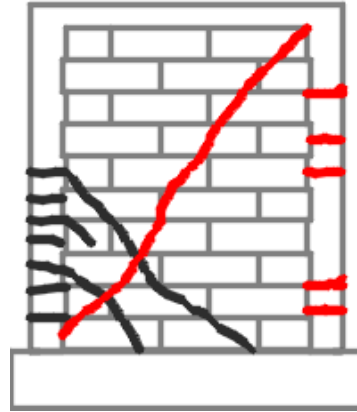


Figura 4.13 Agrietamiento por flexo-cortante del muro M-1.23-3.0.

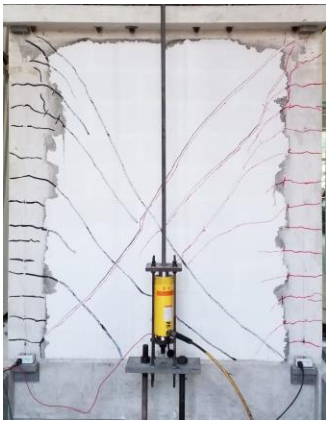


Figura 4.14 Grietas por flexión, flexo-cortante y diagonales por cortante a la carga máxima del muro M-1.23-3.0.

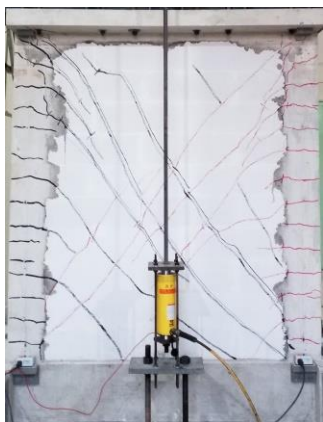


Figura 4.15 Patrón de agrietamiento final del muro M1.23-3.0.



Tabla 4.10 Resumen de eventos principales del muro M-1.23-3.0.

Evento	Sentido	Ciclo	Carga (kg)	Desplazamiento (mm)	Distorsión
Agrietamiento por cortante	Negativo	3A	10339	3.40	0.001
	Positivo	5A	10281	5.96	0.002
Agrietamiento por flexo-cortante	Positivo	4A	10461	5.00	0.002
Carga máxima	Positivo	7A	13010	17.53	0.007
	Negativo	7A	14328	18.16	0.008
Carga última experimental	Positivo	10A	9822	32.56	0.014
	Negativo	10A	9661	33.76	0.014

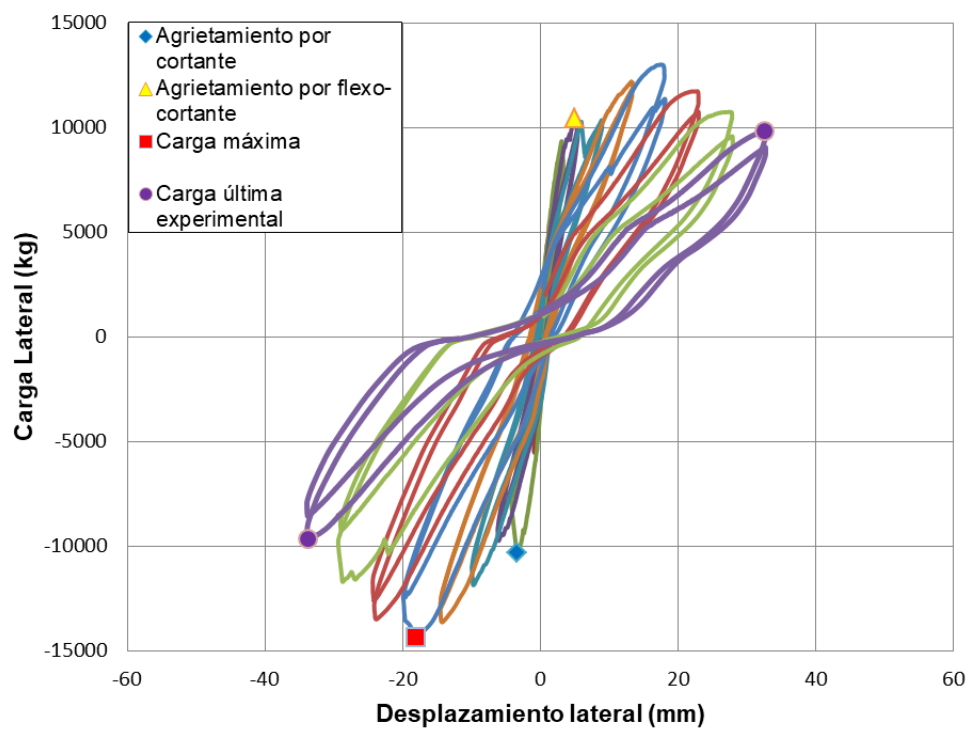


Figura 4.16 Curva carga lateral- desplazamiento del muro M-1.23-3.0.

En el ensaye del muro M-1.94-3.0 se aplicaron 29 ciclos de carga lateral. Los primero cuatro estuvieron controlados por carga y los subsecuentes por distorsión. En la Figura 4.17, Figura 4.18 y Figura 4.19 se presentan la historia de la carga lateral, la distorsión y la carga axial con los ciclos, respectivamente. La carga axial inicial aplicada al muro fue de 6.43 ton. Esta carga incluye la aplicada por el actuador hidráulico y el peso propio del sistema de carga. En la Figura 4.19 se observa que la máxima variación de la carga axial fue de aproximadamente 8.7 por ciento.

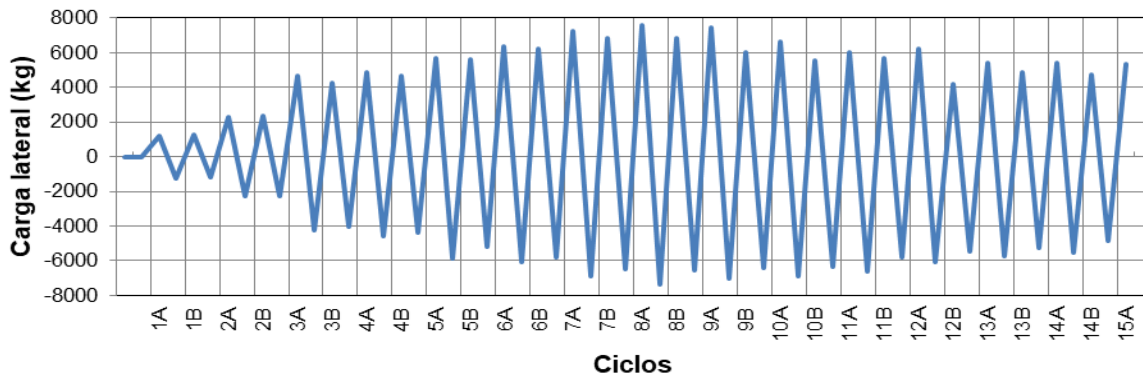


Figura 4.17 Historia de carga lateral con los ciclos del muro M-1.94-3.0.

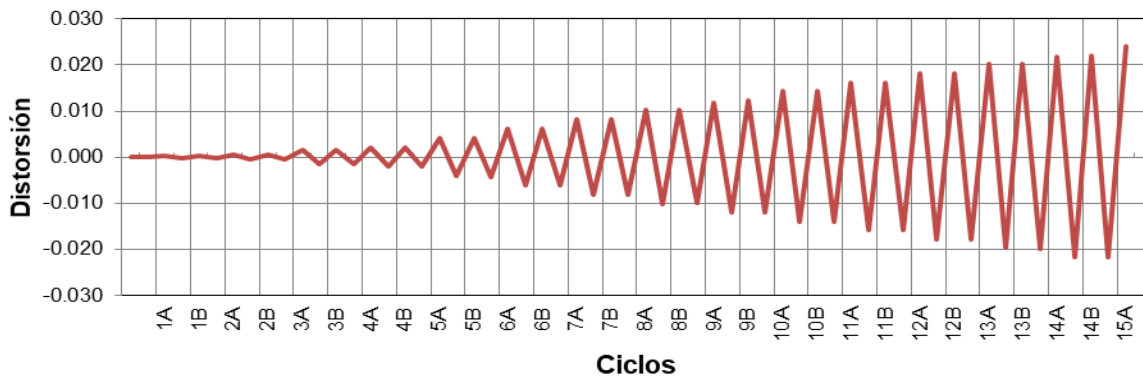


Figura 4.18 Historia de distorsión con los ciclos del muro M-1.94-3.0.

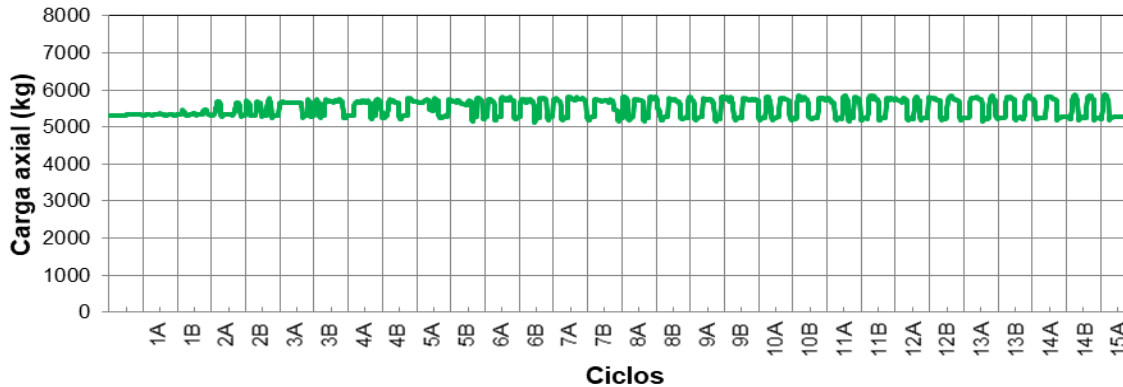


Figura 4.19 Historia de carga axial con los ciclos del muro M-1.94-3.0.

El comportamiento del muro se caracterizó en los primeros ciclos por la formación de grietas horizontales en los castillos. En el ciclo 3A positivo se observó una grieta por flexo-cortante (Figura 4.20). En los siguientes ciclos se presentaron nuevas grietas por flexión y flexo-cortante. En el ciclo 5A positivo se observó una grieta diagonal por cortante (Figura 4.21). Posteriormente, se observaron nuevas grietas por flexión, flexo-cortante y cortante hasta alcanzar la carga máxima en el ciclo 8A positivo (Figura 4.22). Al aumentar la distorsión se observó la degradación de resistencia del muro. El ensaye se detuvo debido a que se alcanzó una degradación mayor al 20 por ciento. El patrón de agrietamiento final se presenta en la Figura 4.23. En la Tabla 4.11 se presenta un resumen de los principales eventos observados durante el ensaye del muro. En la Figura 4.24 se presenta la curva carga lateral-desplazamiento del muro.

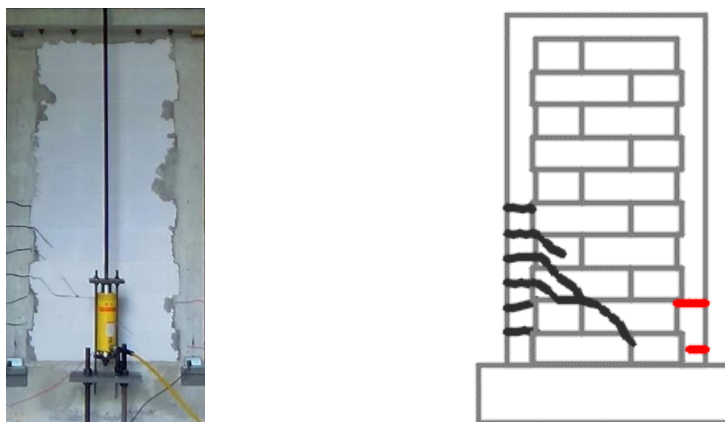


Figura 4.20 Agrietamiento por flexo-cortante del muro M-1.94-3.0.

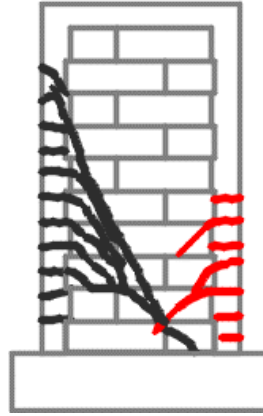
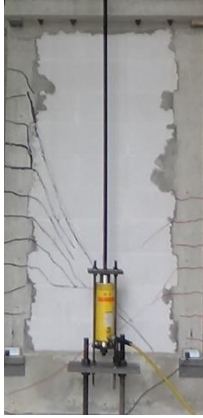


Figura 4.21 Agrietamiento por cortante del muro M-1.94-3.0.



Figura 4.22 Grietas por flexión, flexo-cortante y diagonales por cortante a la carga máxima del muro M-1.94-3.0.

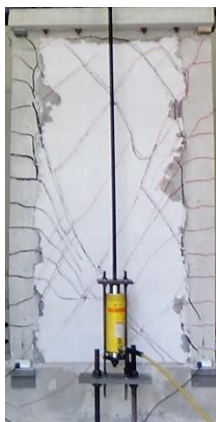


Figura 4.23 Patrón de agrietamiento final del muro M-1.94-3.0.

Tabla 4.11 Resumen de eventos principales del muro M-1.94-3.0.

Evento	Sentido	Ciclo	Carga (kg)	Desplazamiento (mm)	Distorsión
Agrietamiento por flexo-cortante	Positivo	3A	4633	3.59	0.001
	Negativo	4A	4328	4.04	0.002
Agrietamiento por cortante	Positivo	5A	5511	7.72	0.003
	Negativo	5A	5635	7.68	0.003
Carga máxima	Positivo	8A	7600	24.36	0.010
	Negativo	8A	7367	24.26	0.010
Carga última experimental	Negativo	14A	5332	52.44	0.022
	Positivo	15A	5313	57.86	0.024

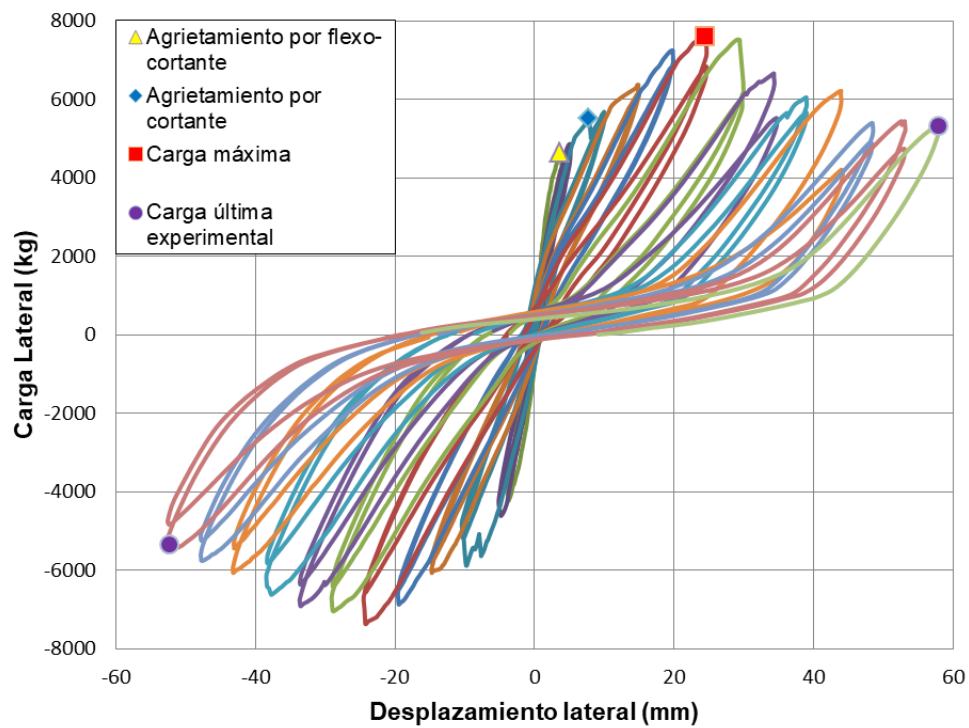


Figura 4.24 Curva carga lateral- desplazamiento del muro M-1.94-3.0.

En el ensaye del muro M-2.64-3.0 se aplicaron 22 ciclos de carga lateral. Los primeros cuatro estuvieron controlados por carga y los subsecuentes por distorsión. En la Figura 4.25, Figura 4.26 y Figura 4.27 se presentan la historia de la carga lateral, la distorsión y la carga axial con los ciclos, respectivamente. La carga axial inicial aplicada al muro fue de 4.88 ton. Esta carga incluye la aplicada con el actuador hidráulico y el peso propio del sistema de carga. En la Figura 4.27 se observa que la máxima variación de la carga axial fue aproximadamente de 10.8 por ciento.

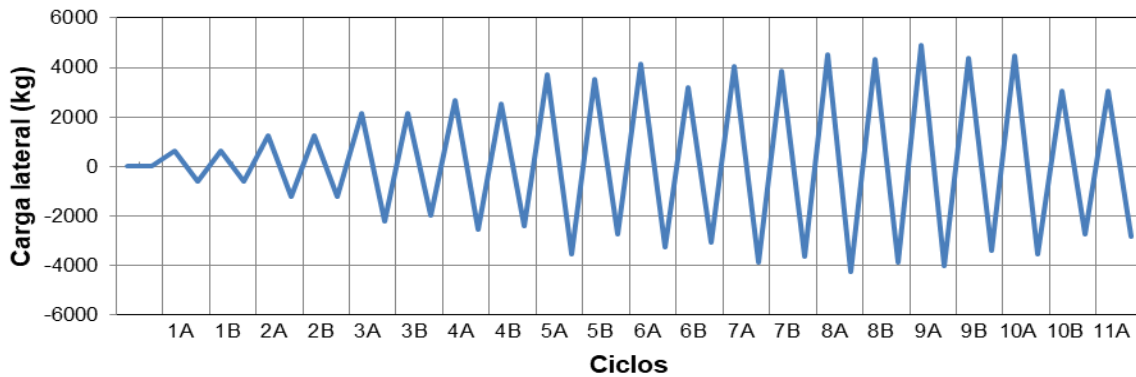


Figura 4.25 Historia de carga lateral con los ciclos del muro M-2.64-3.0.

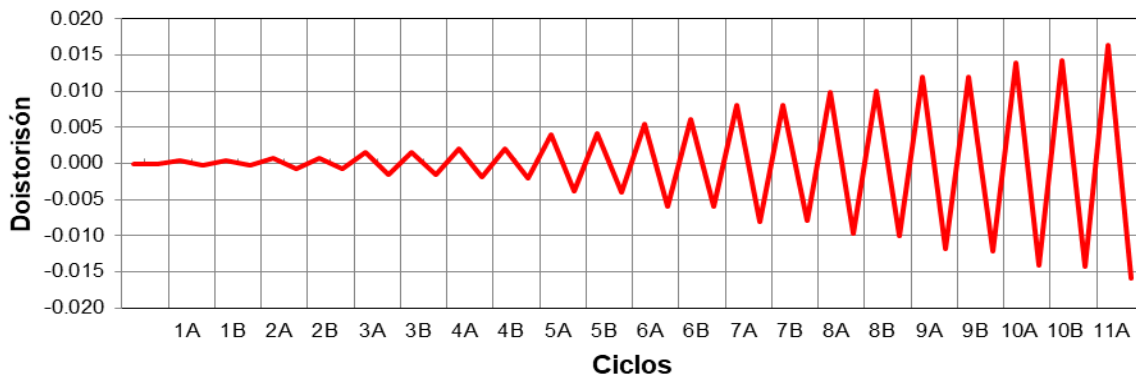


Figura 4.26 Historia de distorsión con los ciclos del muro M-2.64-3.0.

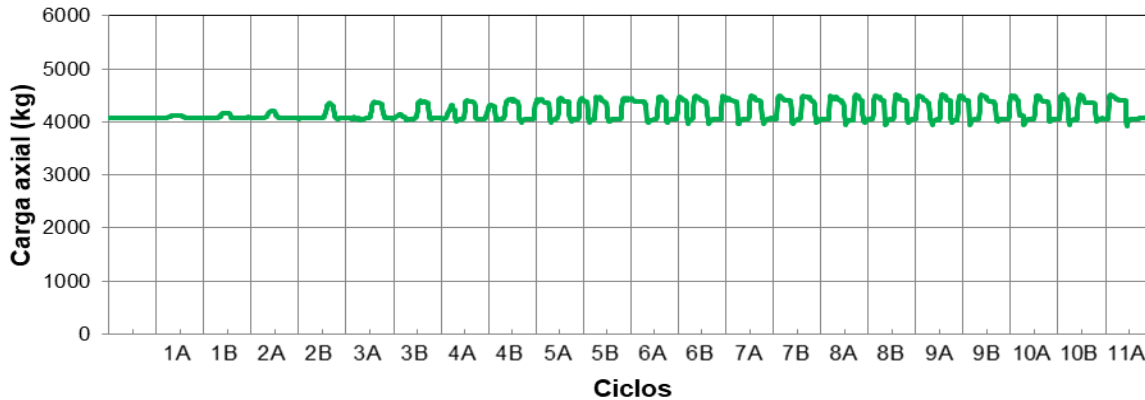


Figura 4.27 Historia de carga axial con los ciclos del muro M-2.64-3.0.

El comportamiento del muro se caracterizó en los primeros ciclos por la formación de grietas horizontales en los castillos. En el ciclo 5A positivo se observó la formación de una grieta por flexo-cortante (Figura 4.28). En el ciclo 5A negativo se observaron la formación de grietas por flexión, grietas por flexo-cortante y grietas diagonales por cortante (Figura 4.29). Posteriormente, se observaron nuevas grietas por flexión, flexo-cortante y cortante hasta alcanzar la carga máxima en el ciclo 9A positivo (Figura 4.30). Al aumentar la distorsión se observó la degradación de la resistencia del muro. El ensaye se detuvo debido a que se alcanzó una degradación mayor al 20 por ciento. El patrón de agrietamiento final se presenta en la Figura 4.31. En la Tabla 4.12 se presenta un resumen de los principales eventos observados durante el ensaye del muro. En la Figura 4.32 se presenta la curva carga lateral-desplazamiento del muro.



Figura 4.28 Agrietamiento por flexo-cortante del muro M-2.64-3.0.



Figura 4.29 Agrietamiento por flexo-cortante y cortante del muro M-2.64-3.0.

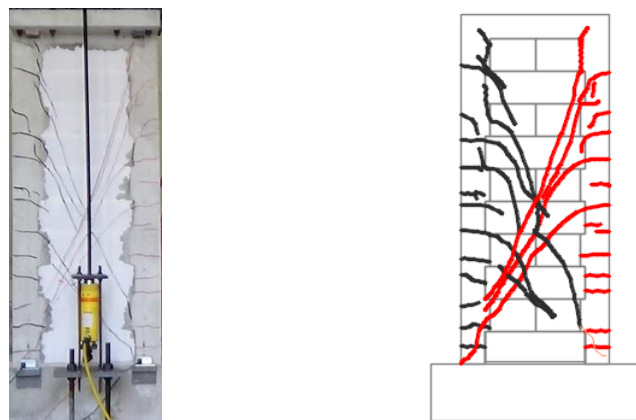


Figura 4.30 Grietas flexión, flexo-cortante y diagonales por cortante a la carga máxima del muro M-2.64-3.0.



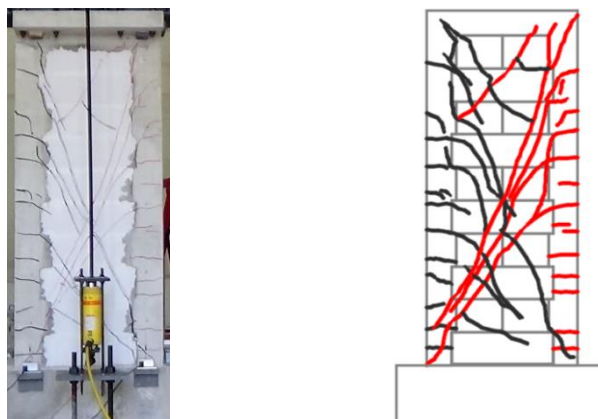


Figura 4.31 Patrón de agrietamiento final del muro M-2.64-3.0.

Tabla 4.12 Resumen de eventos principales del muro M-2.64-3.0.

Evento	Sentido	Ciclo	Carga (kg)	Desplazamiento (mm)	Distorsión
<b>Agrietamiento por flexo-cortante</b>	Positivo	5A	3623	8.60	0.004
	Negativo	5A	3548	8.19	0.003
<b>Agrietamiento por cortante</b>	Negativo	5A	3532	9.25	0.004
	Positivo	6A	4153	12.95	0.005
<b>Carga máxima</b>	Negativo	8A	4238	23.38	0.010
	Positivo	9A	4902	28.97	0.012
<b>Carga última experimental</b>	Positivo	11A	3035	39.37	0.016
	Negativo	11A	2832	30.03	0.013

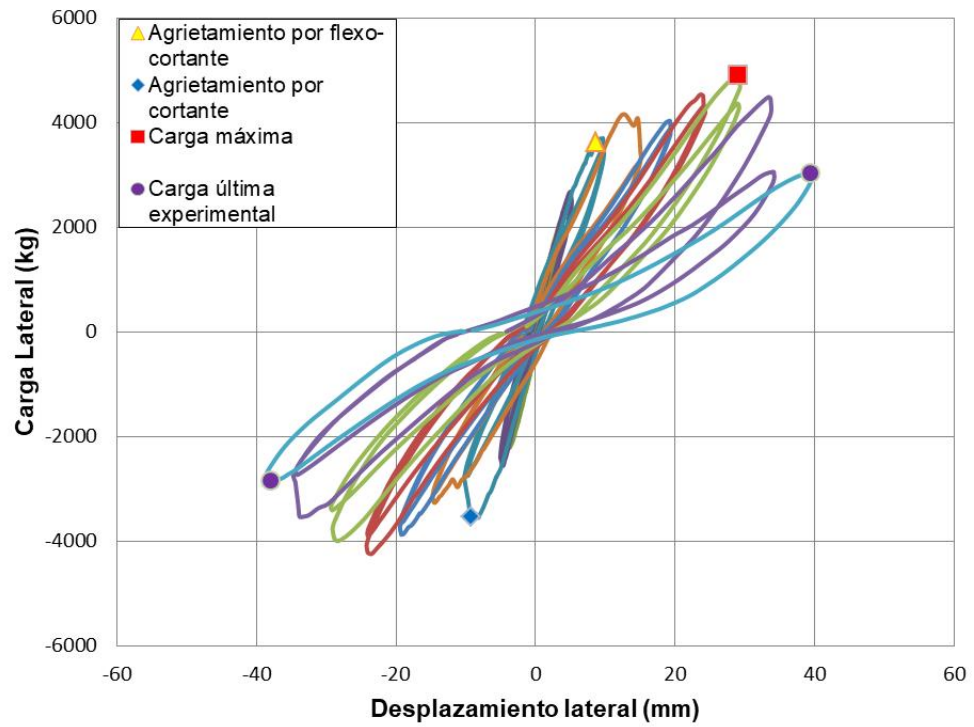


Figura 4.32 Curva carga lateral- desplazamiento del muro M-2.64-3.0.

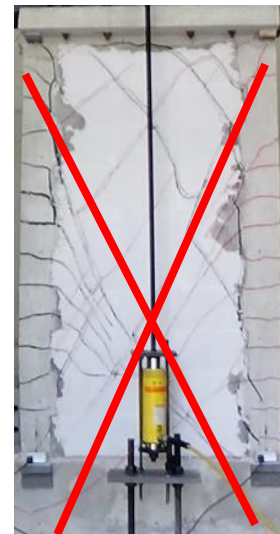
## CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### 5.1 Patrón de agrietamiento

Los muros M-0.71-3.0 y M-1.23-3.0 presentaron agrietamientos diagonales por cortante, los cuales definieron su comportamiento. Al aumentar la distorsión los muros continuaron presentando grietas diagonales por cortante en ambos sentidos. Estas grietas se propagaron hacia los castillos formando el patrón de agrietamiento final en forma de "X" (Figura 5.1.a y Figura 5.1.b). Los muros M-1.94-3.0 y M-2.64-3.0 presentaron agrietamientos por flexo-cortante en ambos sentidos. Al aumentar la distorsión se presentaron grietas diagonales por cortante, las cuales se propagaron a los castillos formando el patrón de agrietamiento final en forma de "X" (Figura 5.1.c y Figura 5.1.d).



a) M0.71-3.0



c) M1.94-3.0



Figura 5.1 Patrón de agrietamiento final en forma de "X".

## 5.2 Degradación de rigidez

De acuerdo con Naal (2019), en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta la degradación de la rigidez de los muros ensayados. En el eje vertical se presenta la rigidez secante instantánea ( $K_i$ ) normalizada con respecto a la rigidez secante al primer agrietamiento ( $K_o$ ). En el eje horizontal se presenta el desplazamiento asociado a la rigidez instantánea ( $\Delta_i$ ) normalizado con respecto al desplazamiento de agrietamiento ( $\Delta_{agr}$ ). Con un cuadrado se representa el punto asociado a la carga máxima de cada muro.

La degradación de rigidez es un parámetro importante en la evaluación del daño en las estructuras. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa que la degradación de la rigidez a la carga máxima de los muros varía entre un 73 y 91 por ciento. Posterior al ciclo de carga máxima inician los ciclos con degradación de resistencia, por lo que en este rango los muros tendrán una menor resistencia y rigidez remanente. Debido a lo anterior, se proponen dos modelos de histéresis, el primero hasta la carga máxima y el segundo hasta una pérdida de resistencia del 20 por ciento.

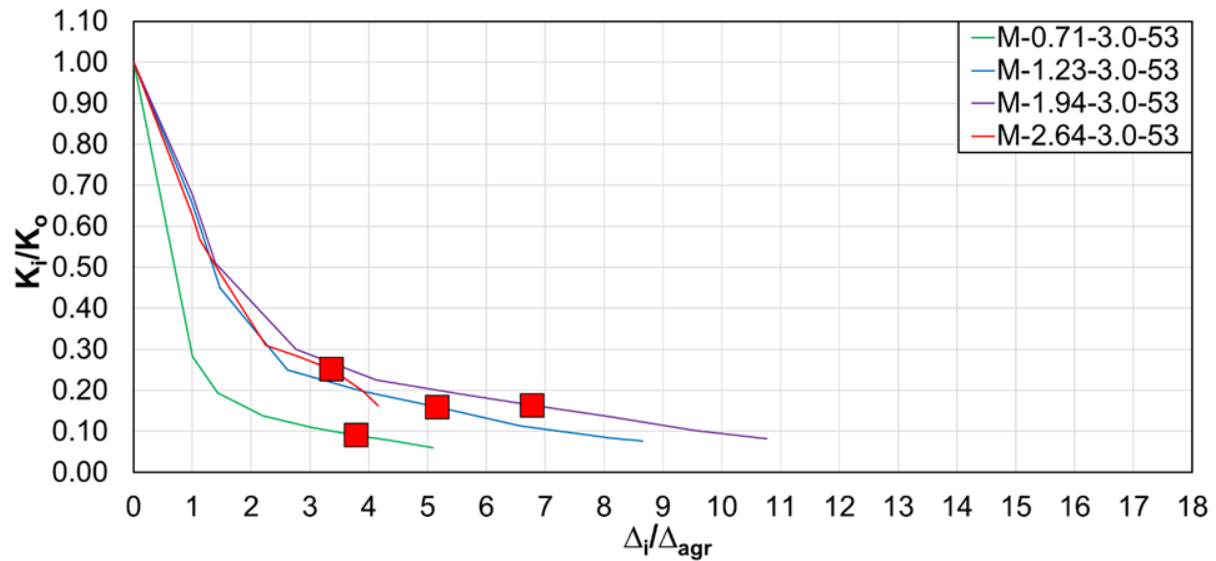


Figura 5.2 Degradación de rigidez.

### 5.3 Calibración de modelos de histéresis

Se calibraron parámetros para dos modelos de histéresis. En el primer modelo se consideró el ensaye hasta el ciclo donde se presentó la carga máxima. Este modelo no considera la degradación de resistencia, el efecto de ablandamiento y el estrangulamiento de la curva. Se calibraron 4 parámetros ( $\alpha, \gamma, \delta, \theta$ ). En el segundo modelo se consideró el ensaye hasta el ciclo previo al cual se observó una degradación de resistencia con respecto a la carga máxima de aproximadamente el 20 por ciento. Para este modelo se calibraron todos los parámetros de histéresis ( $\alpha, \gamma, \delta, \theta, \lambda_u, \lambda_3, \varepsilon, \lambda_s$ ).

Para la calibración de los modelos histéresis se consideraron los muros ensayados en este trabajo junto con los otros cuatro muros con diferentes esfuerzos axiales pertenecientes a este proyecto. Además, se consideraron otros cinco muros de mampostería confinada de CCA obtenidos de la literatura. En la Tabla 5.1 se presentan las características geométricas de los trece muros (altura (H), longitud (L) y relación de aspecto (H/L), el esfuerzo axial ( $\sigma$ ) aplicado, la resistencia a compresión de los bloques de CCA utilizados ( $f_{cCCA}$ ) y la referencia.

Tabla 5.1 Muros considerados para la calibración de modelos de histéresis.

Muro	H (cm)	L (cm)	H/L	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f_{cCCA}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Referencia
<b>M-0.53-3.0-44</b>	240	456	0.53	3.02	44.13	Pinto (2018)
<b>M-0.71-3.0-44</b>	240	336	0.71	3.32	44.13	Varela et al. (2018)
<b>M-0.71-3.0-53</b>	240	336	0.71	3.17	53.88	Ricalde (2019)
<b>M-1.23-3.0-53</b>	240	195	1.23	3.30	53.88	Ricalde (2019)
<b>M-1.23-4.8-53</b>	240	195	1.23	5.06	53.88	Fernández (2019)
<b>M-1.23-7.2-53</b>	240	195	1.23	7.60	53.88	Fernández (2019)
<b>M-1.30-3.0-44</b>	240	185	1.30	3.37	44.13	Varela et al. (2018)
<b>M-1.94-3.0-44</b>	240	124	1.94	3.35	44.13	Varela et al. (2018)
<b>M-1.94-3.0-53</b>	240	124	1.94	3.46	53.88	Ricalde (2019)
<b>M-2.64-3.0-44</b>	240	91	2.64	3.74	44.13	Varela et al. (2018)
<b>M-2.64-3.0-53</b>	240	91	2.64	3.57	53.88	Ricalde (2019)
<b>M-2.64-4.8-53</b>	240	91	2.64	5.44	53.88	Naal (2019)
<b>M-2.64-7.2-53</b>	240	91	2.64	7.81	53.88	Naal (2019)

En general las curvas carga lateral-desplazamiento experimentales no fueron simétricas debido a que el daño generado en un sentido afectó el comportamiento del otro. Por tanto, los parámetros del modelo de histéresis, a excepción de  $\alpha$ , fueron calibrados en ambos sentidos de aplicación de carga. Para los muros ensayados en este trabajo, así como los ensayados por Fernández (2019) y Naal (2019), se emplearon valores de  $E_{CCA}$  igual a 20,993 kg/cm<sup>2</sup> y  $G_{CCA}$  igual a 8,747 kg/cm<sup>2</sup>. Este valor de  $E_{CCA}$  se obtuvo del trabajo experimental realizado por Pérez (2019). Para los muros ensayados por Pinto (2018) y Varela et al. (2018) se emplearon valores de  $E_{CCA}$  igual a 21,890 kg/cm<sup>2</sup> y  $G_{CCA}$  igual a 9,087 kg/cm<sup>2</sup>. Este valor de  $E_{CCA}$  es el reportado en dichos trabajos. El valor de  $G_{CCA}$  en todos los casos se calculó considerando una relación de Poisson de 0.2, con base en recomendaciones del RILEM (1993).

### 5.3.1 Modelo de histéresis sin degradación de resistencia

En la Tabla 5.2 se presentan los valores del parámetro  $\alpha$ . Para el cálculo de la rigidez al agrietamiento se tomó el primer agrietamiento por cortante o flexo-cortante presentado independientemente del sentido en que ocurrió. Luego, la recta fue extendida hacia el otro sentido hasta alcanzar los mismos valores de carga y desplazamiento, pero con signo contrario.

Tabla 5.2 Valores del parámetro  $\alpha$ .

Muro	$K_{tr}$ (kg/cm)	$K_c$ (kg/cm)	$\alpha$
<b>M-0.53-3.0-44</b>	212414	144193	0.68
<b>M-0.71-3.0-44</b>	141678	56486	0.40
<b>M-0.71-3.0-53</b>	135798	24807	0.18
<b>M-1.23-3.0-53</b>	64415	30409	0.47
<b>M-1.23-4.8-53</b>	64158	42021	0.65
<b>M-1.23-7.2-53</b>	65217	41600	0.64
<b>M-1.30-3.0-44</b>	58758	21410	0.36
<b>M-1.94-3.0-44</b>	29443	11136	0.38
<b>M-1.94-3.0-53</b>	27716	12869	0.46
<b>M-2.64-3.0-44</b>	15683	5313	0.34
<b>M-2.64-3.0-53</b>	15104	4207	0.28
<b>M-2.64-4.8-53</b>	15223	4227	0.28
<b>M-2.64-7.2-53</b>	15057	4930	0.33
		<b>Promedio</b>	0.42
		<b>CV</b>	0.37

Se observa que cuando la relación de aspecto aumenta el parámetro  $\alpha$  tiende a disminuir. Esto se debe a que, al usar la inercia transformada para el cálculo de la rigidez inicial, la aportación de los castillos resulta ser mayor en muros con menor longitud. En la Tabla 5.3 se presentan la inercia transformada, la inercia gruesa y la relación entre estas para cada muro, además se presenta la rigidez inicial calculada

con la inercia gruesa ( $K_g$ ) y los valores de alfa ( $\alpha_g$ ) calculados con esta rigidez. Se observa que, al calcularse con la inercia gruesa, los valores del parámetro alfa no presentan ninguna tendencia. Sin embargo, la dispersión entre muros con diferentes relaciones de aspecto es muy grande. Con base en las discusiones anteriores se recomienda usar los valores calculados del parámetro  $\alpha$  para cada muro.

Tabla 5.3 Relación de inercias y valores del parametro  $\alpha_g$ .

Muro	$I_{tr}$ ( $cm^4$ )	$I_g$ ( $cm^4$ )	$I_{tr}/I_g$	$K_g$ ( $kg/cm$ )	$\alpha_g$
<b>M-0.53-3.0-44</b>	249597437	118523520	2.11	155855	0.93
<b>M-0.71-3.0-44</b>	116222768	47416320	2.45	93072	0.61
<b>M-0.71-3.0-53</b>	114330947	47416320	2.41	89589	0.28
<b>M-1.23-3.0-53</b>	30219994	9268594	3.26	28621	1.06
<b>M-1.23-4.8-53</b>	29936304	9268594	3.23	28621	1.47
<b>M-1.23-7.2-53</b>	31127138	9268594	3.36	28621	1.45
<b>M-1.30-3.0-44</b>	28166324	7914531	3.56	26235	0.82
<b>M-1.94-3.0-44</b>	10690185	2383280	4.49	9461	1.18
<b>M-1.94-3.0-53</b>	10291190	2383280	4.32	9107	1.41
<b>M-2.64-3.0-44</b>	4757080	941964	5.05	4040	1.32
<b>M-2.64-3.0-53</b>	4760922	941964	5.05	3889	1.08
<b>M-2.64-4.8-53</b>	4814933	941964	5.11	3889	1.09
<b>M-2.64-7.2-53</b>	4739664	941964	5.03	3889	1.27
				<b>Promedio</b>	1.07
				<b>CV</b>	0.33

Debido a los desplazamientos relativos posteriores al agrietamiento ocurridos en el muro M-0.71-3.0-53, los valores de los parámetros de histéresis  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\theta$  para este muro fueron calculados pero considerados no válidos. Estos valores aparecen tachados en las tablas de cada parámetro y no contribuyen al promedio.



En la Tabla 5.4 se presentan los valores del parámetro  $\gamma$ . El valor de este parámetro se ajustó en los sentidos positivo y negativo ( $\gamma$  y  $\gamma'$ , respectivamente) con la rigidez posterior al agrietamiento experimental. Definida como la pendiente de la recta que pasa por los puntos dados por el primer agrietamiento y la carga máxima (Figura 5.3 a Figura 5.15). En este modelo se consideró el ensaye hasta el ciclo donde se presentó la primera carga máxima, independientemente del sentido. En algunos muros no se alcanzaron las cargas máximas de cada sentido en el mismo ciclo, al truncar la curva de histéresis en el ciclo de la primera carga máxima no se permitió al otro sentido alcanzar su carga máxima. Por tanto, para estos muros se tomó como carga máxima el valor correspondiente al último ciclo considerado. Debido a que el daño en un sentido afecta el comportamiento en el otro y que el agrietamiento de los trece muros no ocurrió exclusivamente en el mismo sentido, se calculó el promedio del parámetro  $\gamma$  con el fin de considerar la afectación en ambos sentidos.

Se observa que al aumentar la relación de aspecto el valor del parámetro  $\bar{\gamma}$  aumenta, el incremento de estos valores es más notorio en los muros elaborados con piezas con  $f_{CCA}$  de 44.13 kg/cm<sup>2</sup>. De igual forma se observa que al aumentar el esfuerzo axial sobre los muros con una misma relación de aspecto el valor del parámetro  $\bar{\gamma}$  aumenta, siendo más notorio el incremento en el muro con relación de aspecto de 2.64. La dispersión presentada en los valores del parámetro fue grande, por lo que se recomienda utilizar los valores promedio independientes para cada muro.

Tabla 5.4 Valores del parámetro  $\gamma$ .

Muro	$K_c$ (kg/cm)	$K_{pc}$ (kg/cm)	$\gamma$	$K'_{pc}$ (kg/cm)	$\gamma'$	$\bar{\gamma}$
M-0.53-3.0-44	144193	4122	0.03	7003	0.05	0.04
M-0.71-3.0-44	56486	6494	0.11	8130	0.14	0.13
M-0.71-3.0-53	24807	1626	<del>0.07</del>	4973	<del>0.20</del>	<del>0.13</del>
M-1.23-3.0-53	30409	1889	0.06	2701	0.09	0.08
M-1.23-4.8-53	42021	4363	0.10	4389	0.10	0.10
M-1.23-7.2-53	41600	5589	0.13	4567	0.11	0.12
M-1.30-3.0-44	21410	3730	0.17	2779	0.13	0.15
M-1.94-3.0-44	11136	2331	0.21	1815	0.16	0.19
M-1.94-3.0-53	12869	1429	0.11	1323	0.10	0.11
M-2.64-3.0-44	5313	677	0.13	1059	0.20	0.16
M-2.64-3.0-53	4207	604	0.14	416	0.10	0.12
M-2.64-4.8-53	4227	512	0.12	966	0.23	0.17
M-2.64-7.2-53	4930	1002	0.20	1714	0.35	0.28
		<b>Promedio</b>	0.13	<b>Promedio</b>	0.15	0.14
		<b>CV</b>	0.41	<b>CV</b>	0.54	0.44

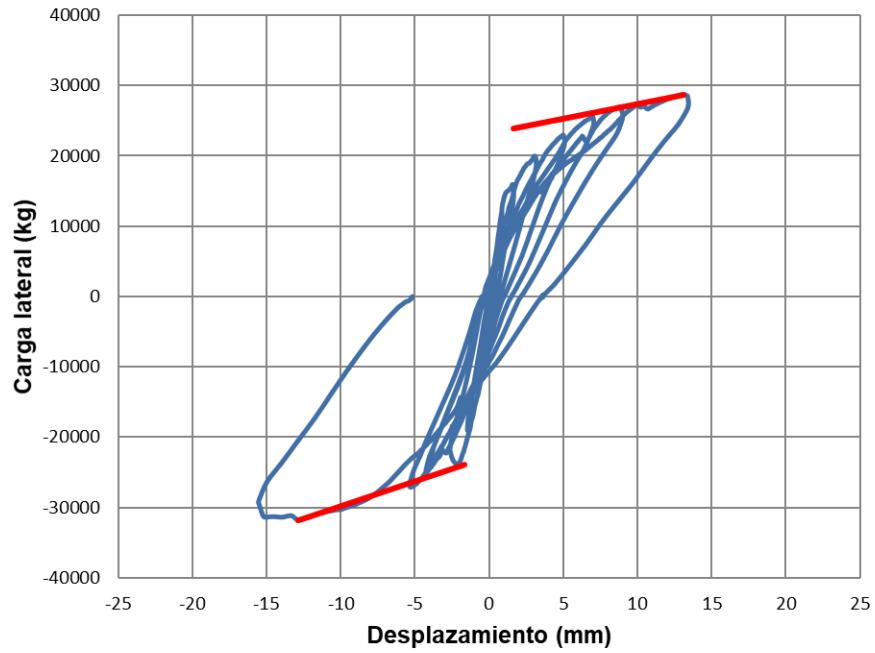


Figura 5.3 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-0.53-3.0-44.

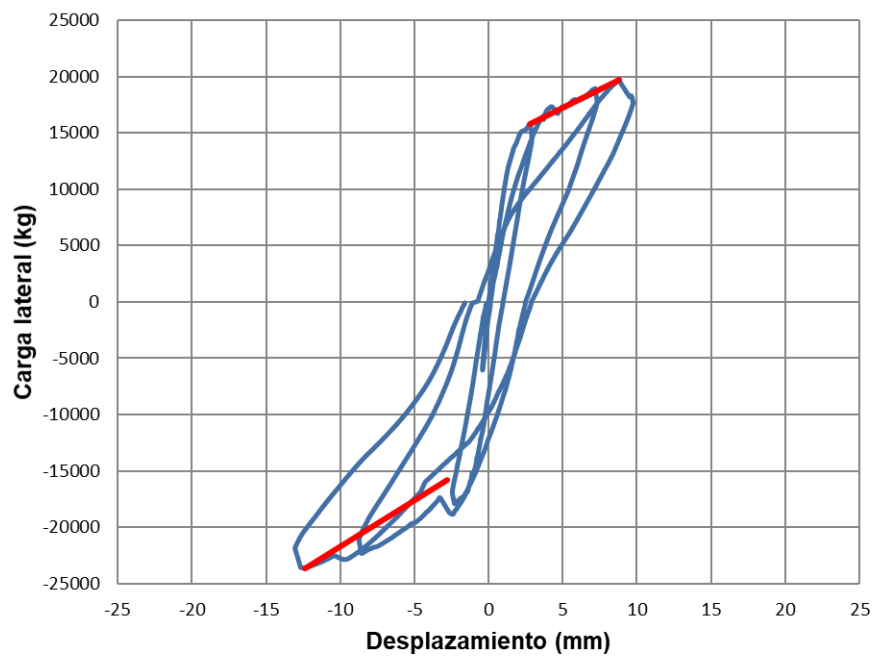


Figura 5.4 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-0.71-3.0-44.

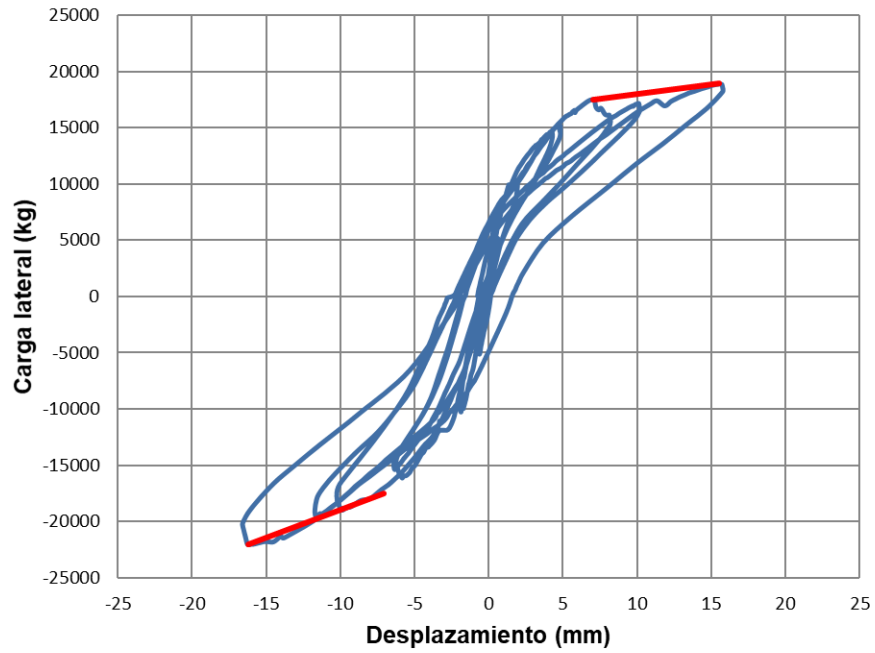


Figura 5.5 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-0.71-3.0-53.

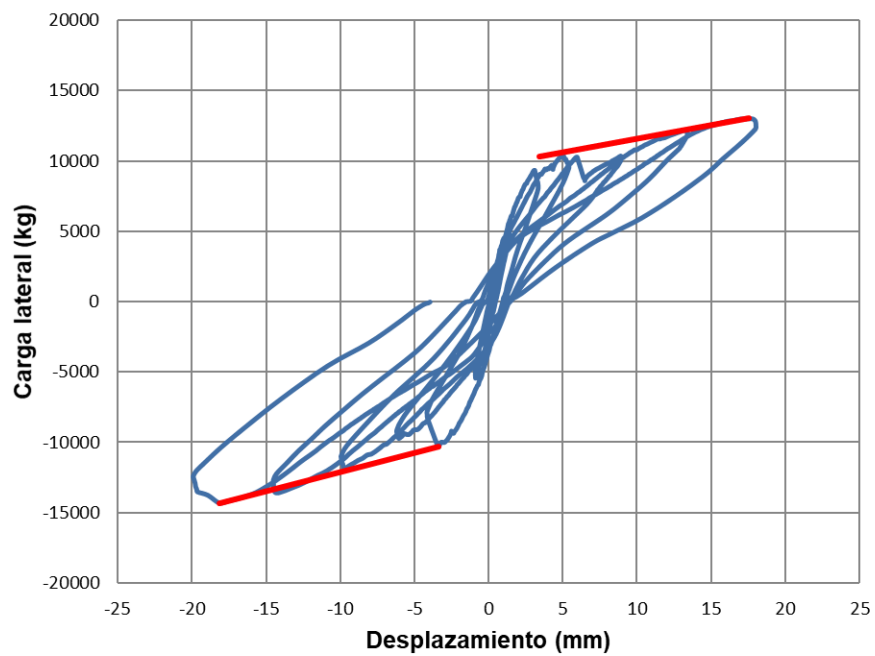


Figura 5.6 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-1.23-3.0-53.

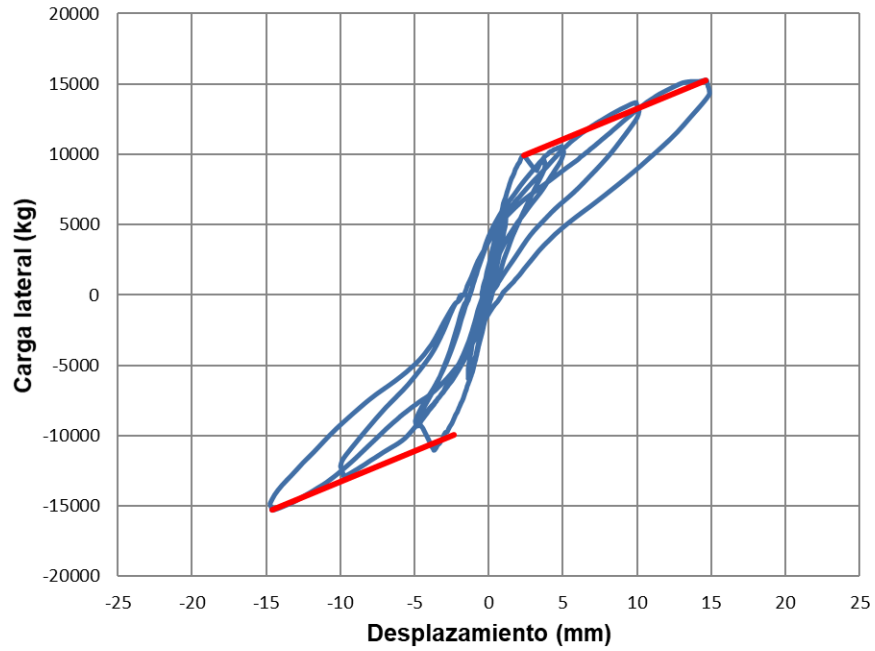


Figura 5.7 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-1.23-4.8-53.

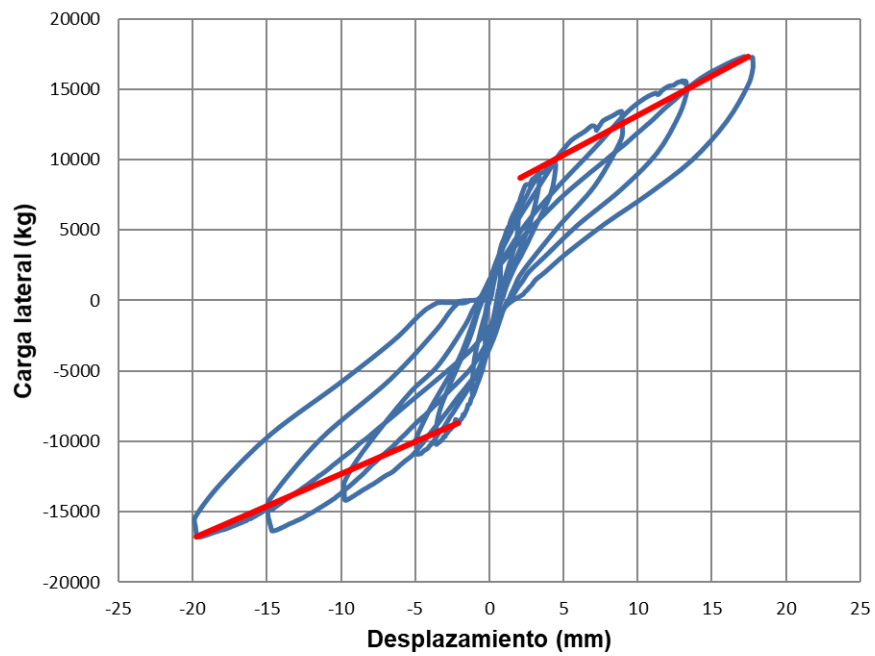


Figura 5.8 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-1.23-7.2-53.

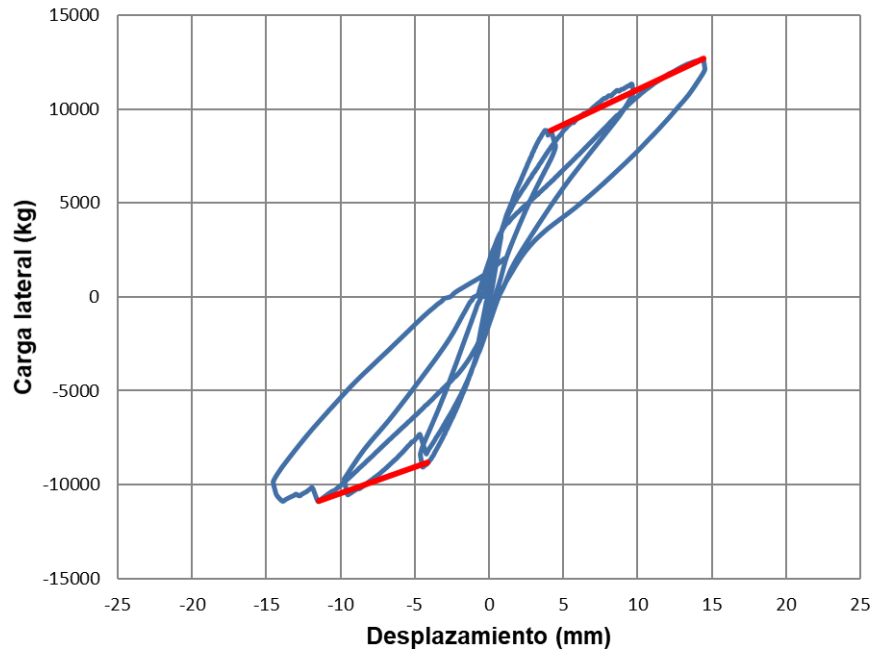


Figura 5.9 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-1.30-3.0-44.

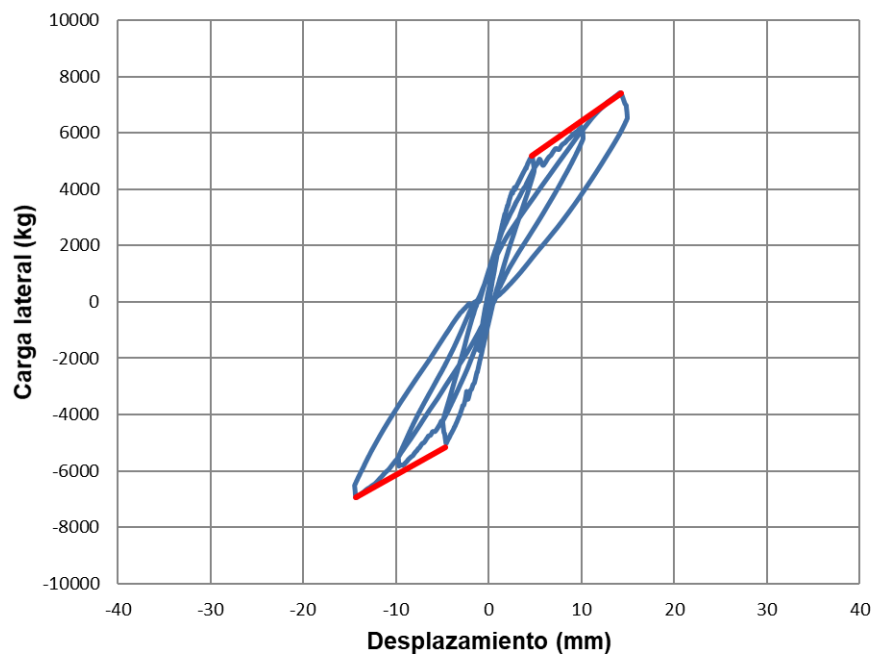


Figura 5.10 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-1.94-3.0-44.

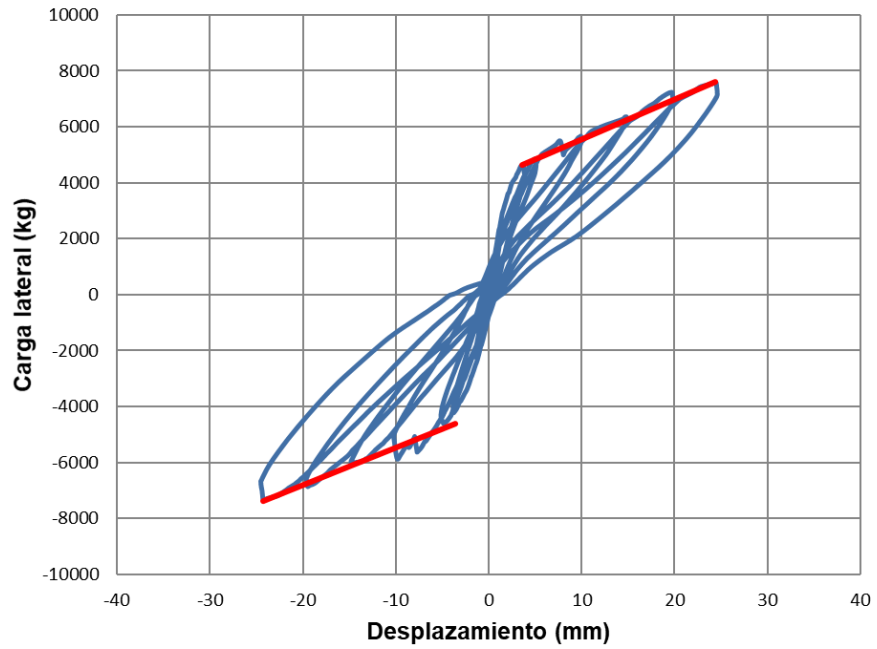


Figura 5.11 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-1.94-3.0-53.

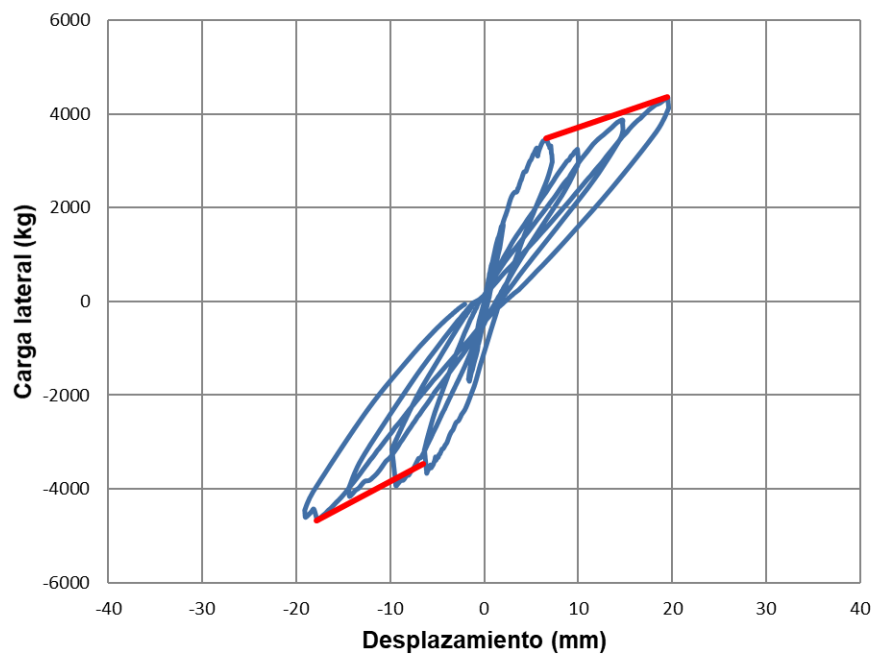


Figura 5.12 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-2.64-3.0-44.

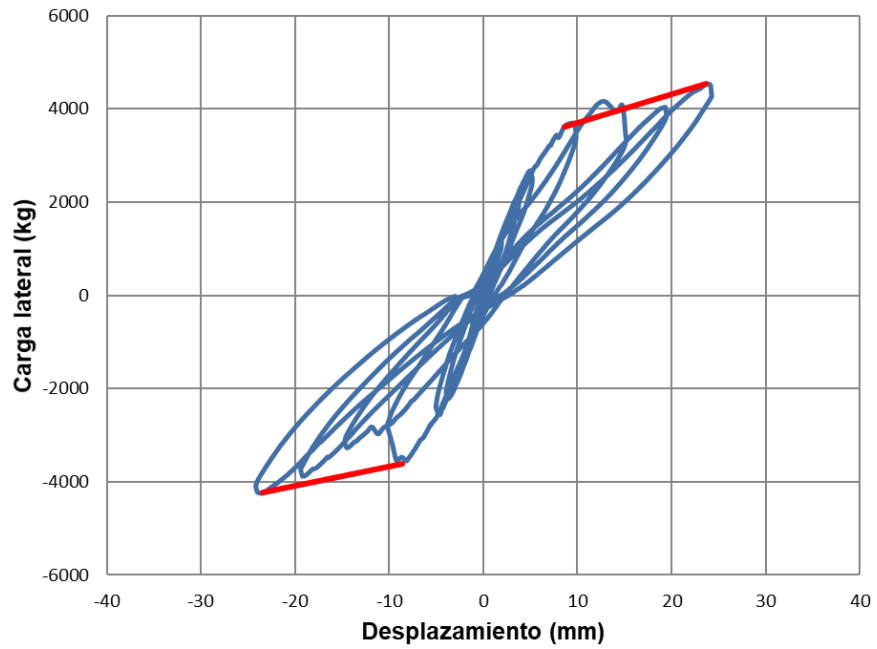


Figura 5.13 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-2.64-3.0-53.

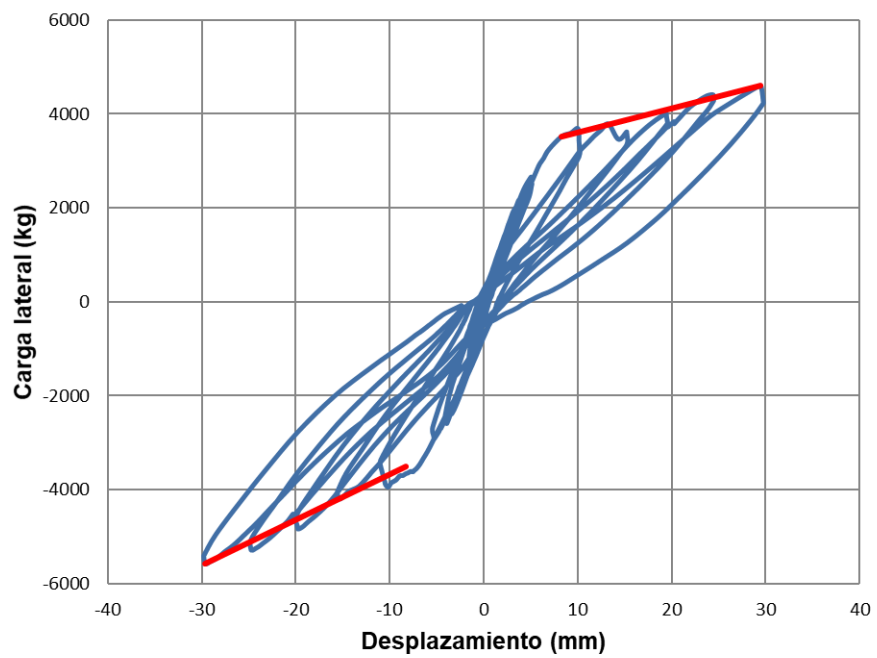


Figura 5.14 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-2.64-4.8-53.



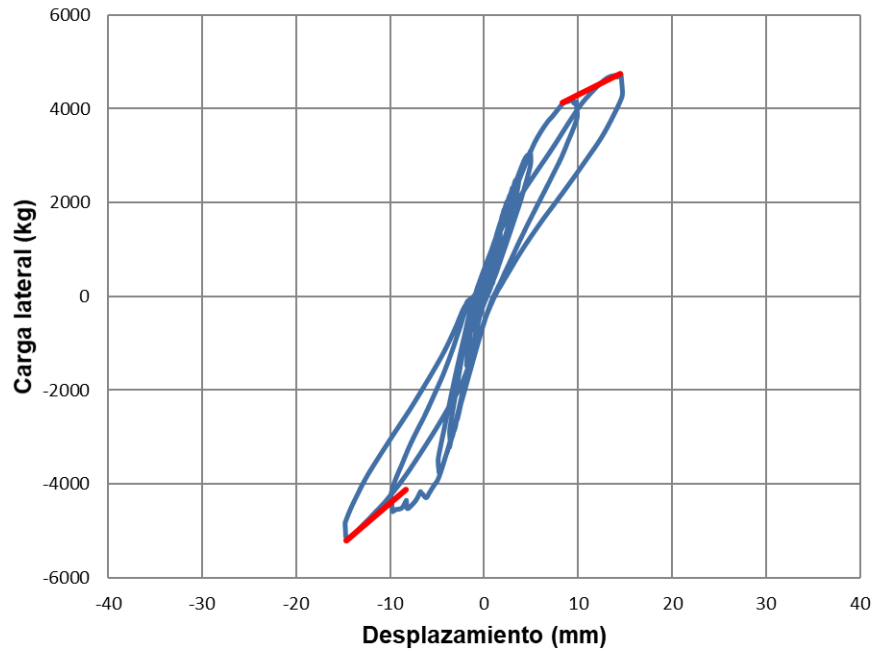


Figura 5.15 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-2.64-7.2-53.

En la Tabla 5.5 se presentan los valores del parámetro  $\delta$ . La recta U-U' se ajustó gráficamente en los sentidos positivo y negativo ( $\delta$  y  $\delta'$ , respectivamente) (Figura 5.16 a Figura 5.28). De igual manera que para el parámetro  $\gamma$ , se calcularon los promedios para considerar el daño en ambos sentidos. Se observa que al aumentar la relación de aspecto el parámetro  $\bar{\delta}$  tiende a aumentar. Se observa también que al aumentar el esfuerzo axial en los muros con relación de aspecto de 2.64, los valores del parámetro  $\bar{\delta}$  aumentan. La dispersión presentada en los valores del parámetro es demasiado grande, por lo que se recomienda utilizar los valores promedio independientes para cada muro.

Tabla 5.5 Valores del parámetro  $\delta$ .

Muro	$K_c$ (kg/cm)	$K_{u-u}$ (kg/cm)	$\delta$	$K'_{u-u}$ (kg/cm)	$\delta'$	$\bar{\delta}$
<b>M-0.53-3.0-44</b>	144193	880	0.01	2350	0.02	0.01
<b>M-0.71-3.0-44</b>	56486	9004	0.16	8162	0.14	0.15
<b>M-0.71-3.0-53</b>	24807	3503	0.14	2875	0.12	0.13
<b>M-1.23-3.0-53</b>	30409	3719	0.12	2788	0.09	0.11
<b>M-1.23-4.8-53</b>	42021	5656	0.13	3345	0.08	0.11
<b>M-1.23-7.2-53</b>	41600	3977	0.10	3565	0.09	0.09
<b>M-1.30-3.0-44</b>	21410	4749	0.22	2210	0.10	0.16
<b>M-1.94-3.0-44</b>	11136	3599	0.32	1287	0.12	0.22
<b>M-1.94-3.0-53</b>	12869	2291	0.18	1567	0.12	0.15
<b>M-2.64-3.0-44</b>	5313	742	0.14	956	0.18	0.16
<b>M-2.64-3.0-53</b>	4207	1051	0.25	879	0.21	0.23
<b>M-2.64-4.8-53</b>	4227	965	0.23	1247	0.30	0.26
<b>M-2.64-7.2-53</b>	4930	1836	0.37	1716	0.35	0.36
		<b>Promedio</b>	0.19	<b>Promedio</b>	0.15	0.17
		<b>CV</b>	0.53	<b>CV</b>	0.63	0.54

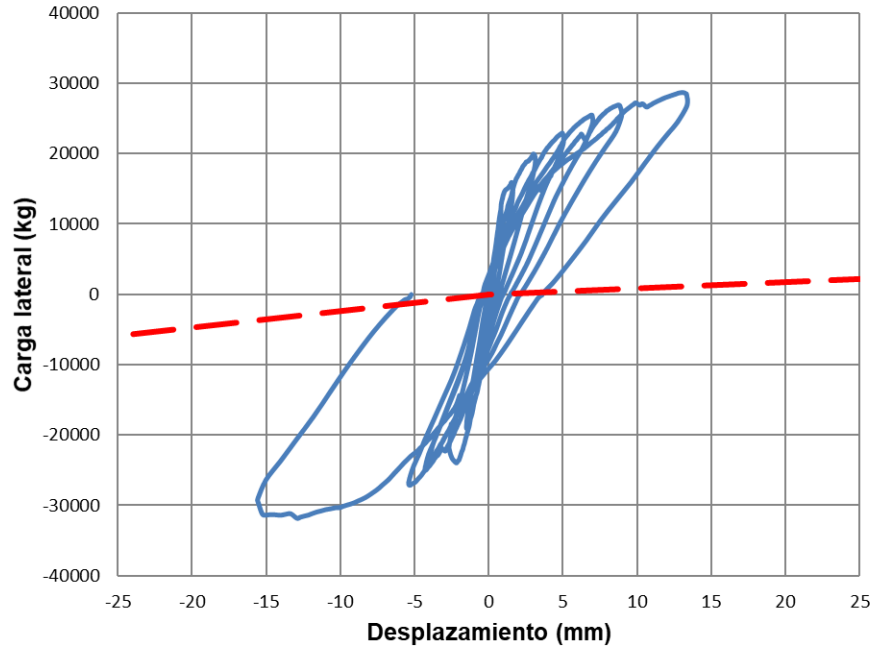


Figura 5.16 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-0.53-3.0-44.

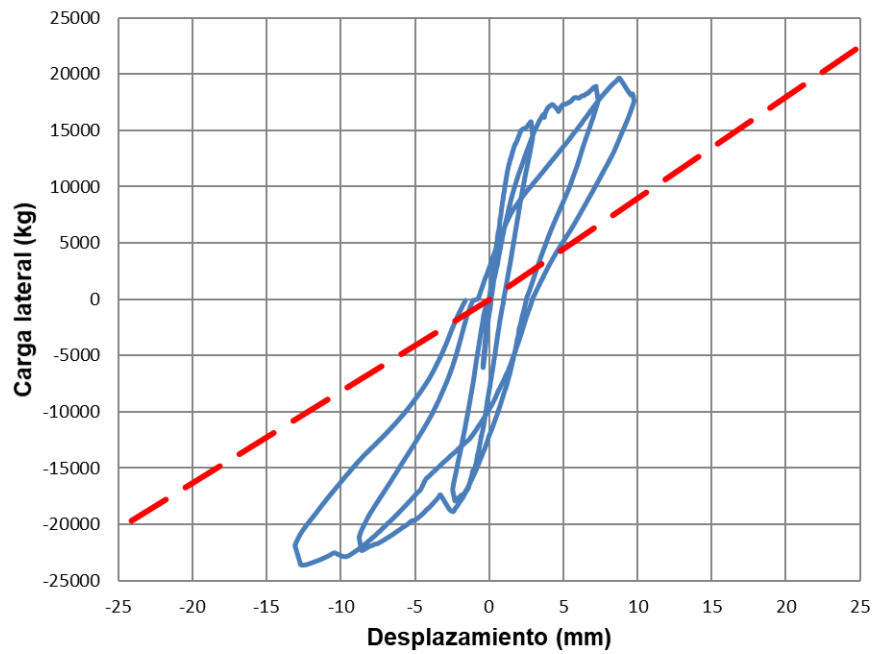


Figura 5.17 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-0.71-3.0-44.

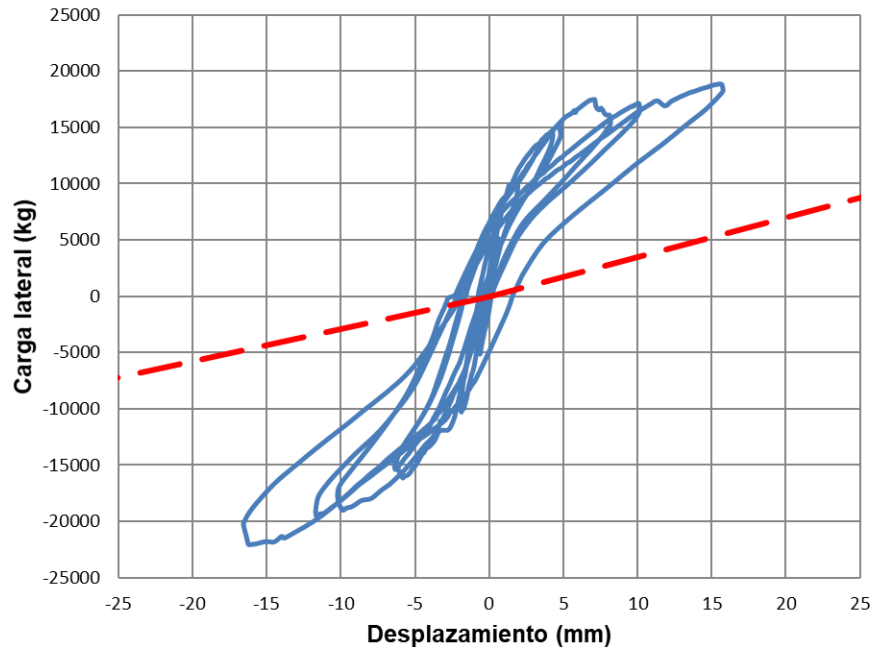


Figura 5.18 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-0.71-3.0-53.

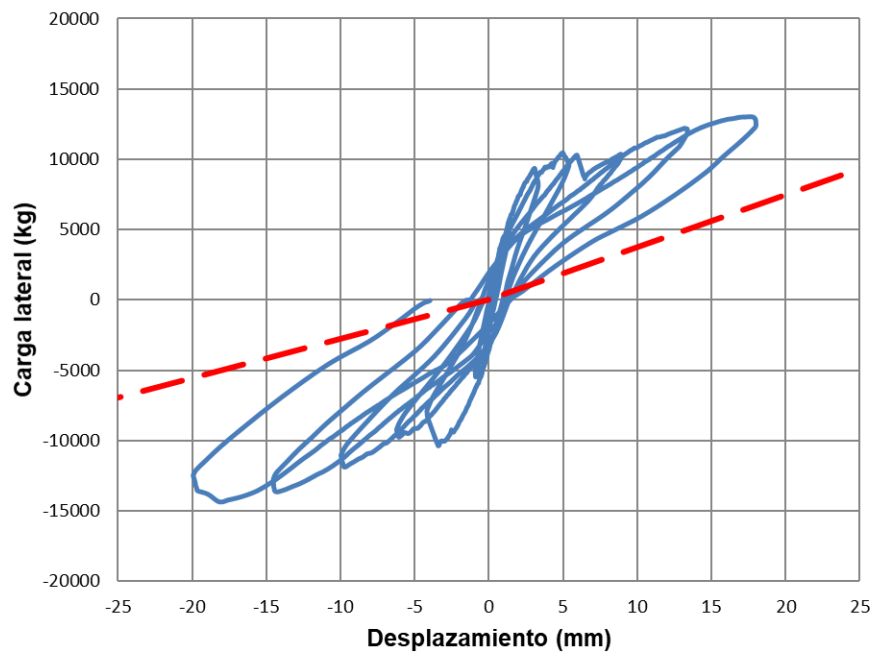


Figura 5.19 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.23-3.0-53.

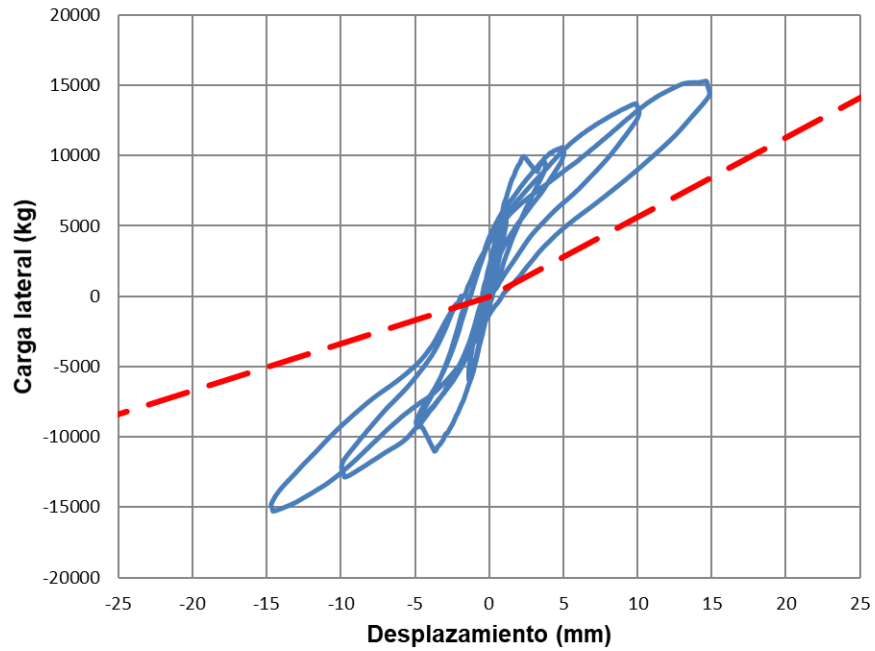


Figura 5.20 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.23-4.8-53.

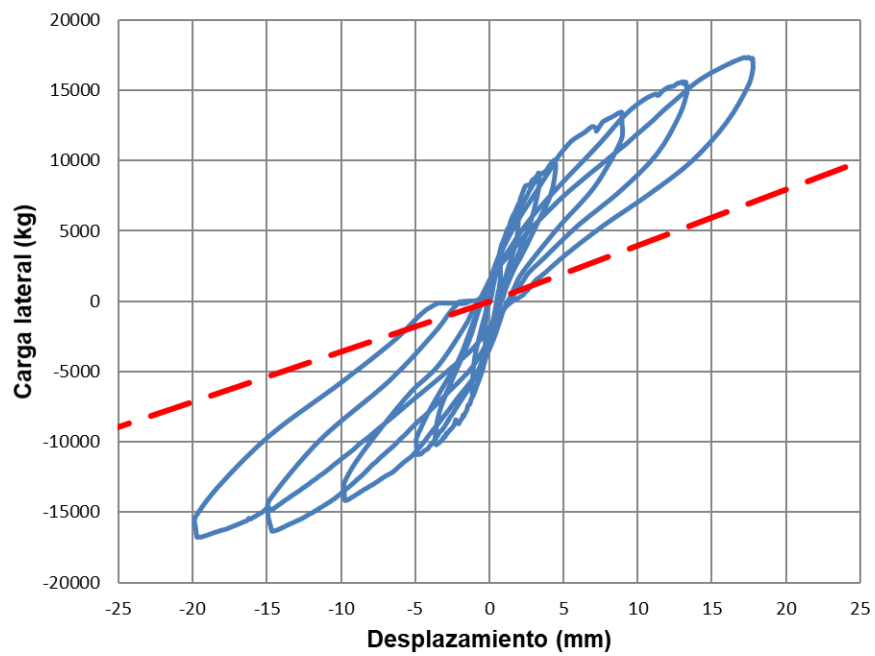


Figura 5.21 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.23-7.2-53.

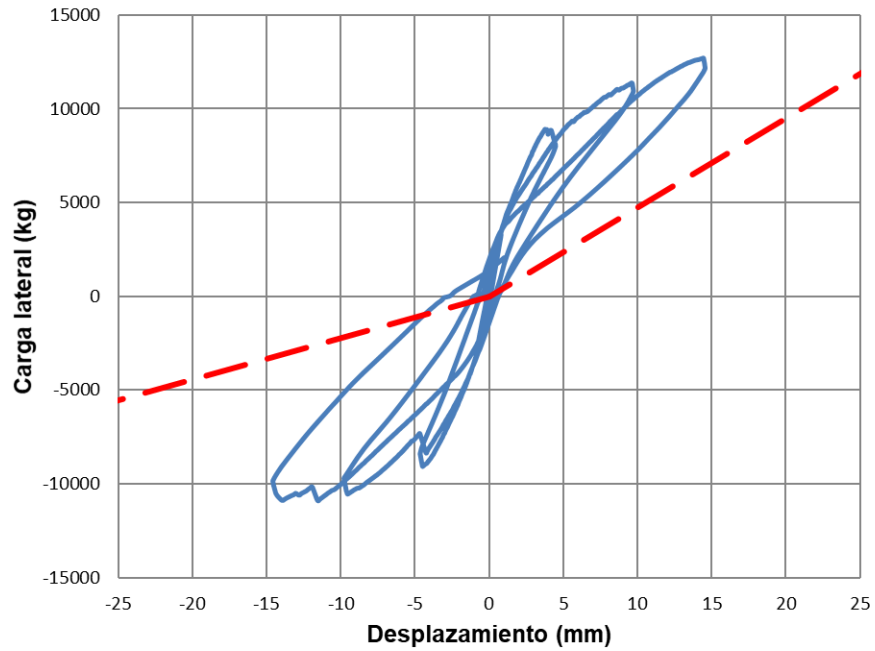


Figura 5.22 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.30-3.0-44.

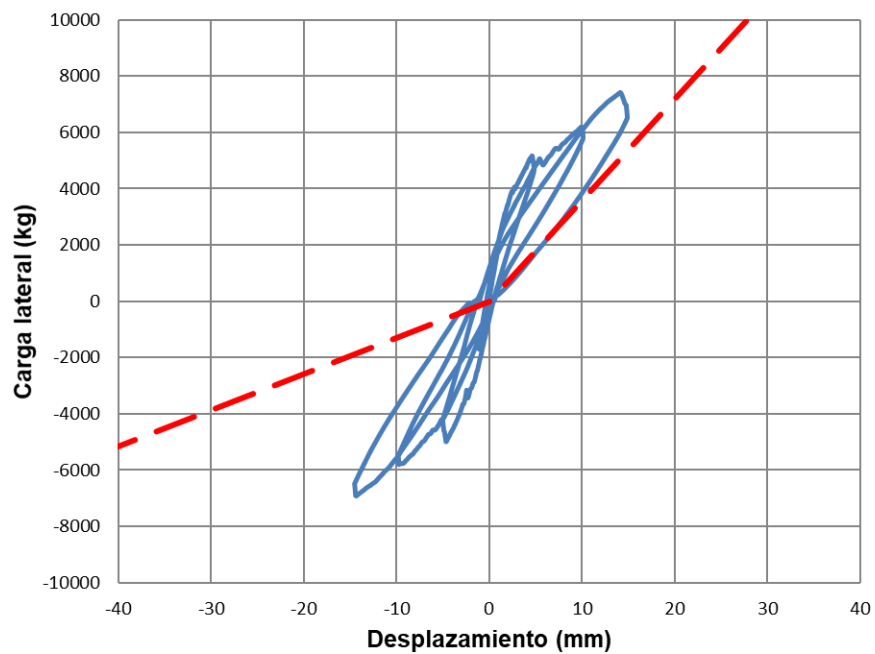


Figura 5.23 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.94-3.0-44.

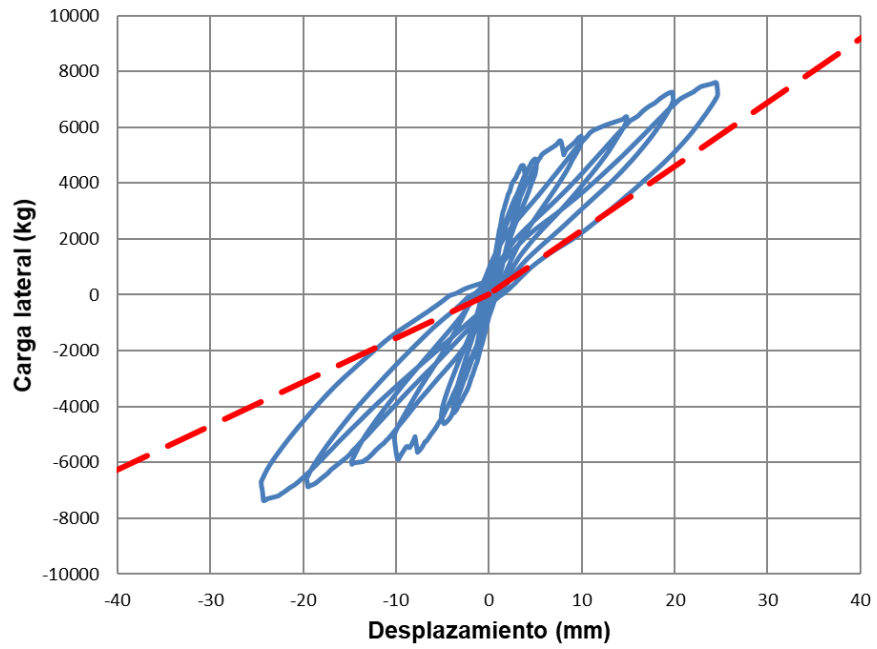


Figura 5.24 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.94-3.0-53.

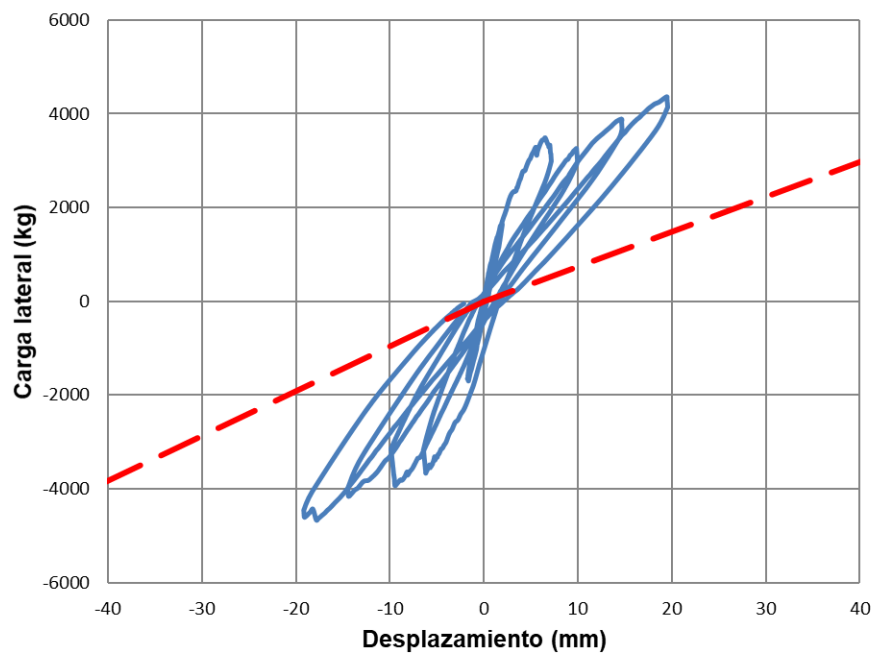


Figura 5.25 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-2.64-3.0-44.

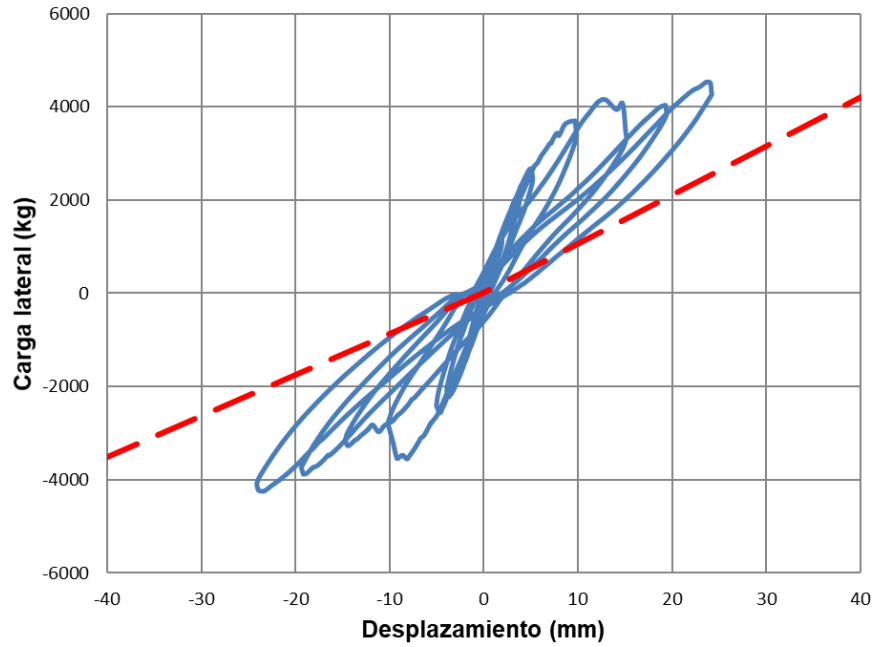


Figura 5.26 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-2.64-3.0-53.

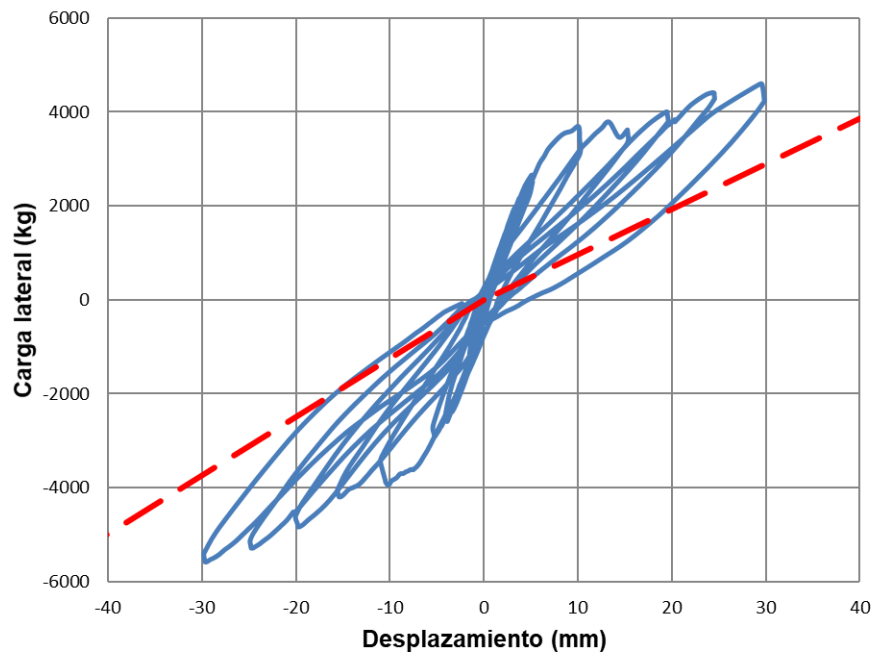


Figura 5.27 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-2.64-4.8-53.



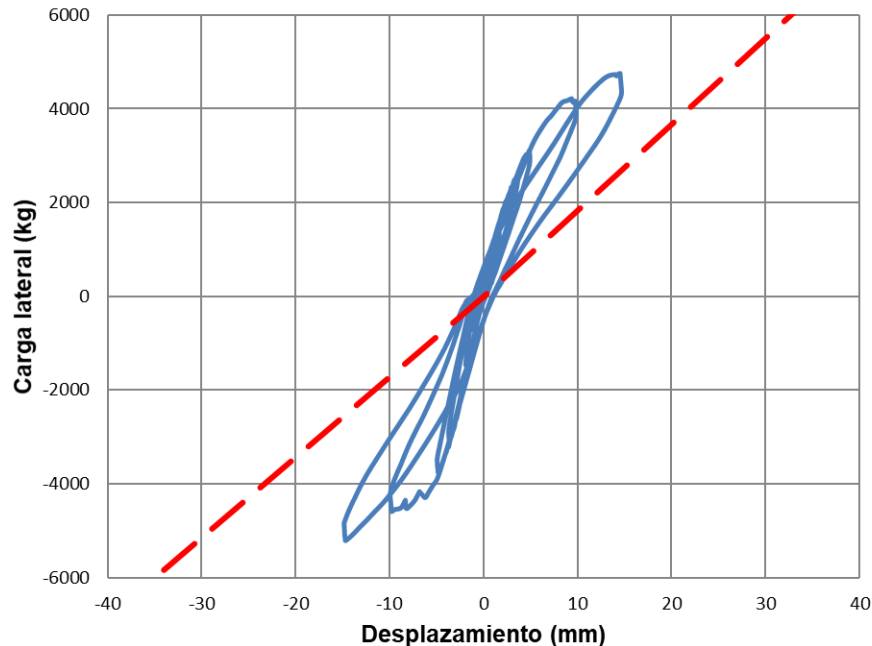


Figura 5.28 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-2.64-7.2-53.

En la Tabla 5.6 se presentan los valores del parámetro  $\theta$ . Se calcularon valores de carga máxima ( $V_{mi}$ ), desplazamiento máximo ( $d_{mi}$ ) y valores de  $\theta$  para cada ciclo y para cada sentido de aplicación de carga ( $\theta_i$ ). El modelo de histéresis CA7 considera que todas las pendientes de descarga elástica posteriores al agrietamiento deben converger en un mismo punto y que los valores del parámetro  $\theta$  deberían disminuir conforme avanzan los ciclos de carga.

De los datos experimentales obtenidos se observa que las pendientes no convergen y los valores de  $\theta_i$  varían conforme los ciclos sin una tendencia marcada. Por tanto, el valor de este parámetro se ajustó en los sentidos positivo y negativo ( $\theta$  y  $\theta'$ , respectivamente) con el promedio de los valores obtenidos para cada ciclo. Algunos valores de los primeros ciclos se descartaron debido a que el desplazamiento plástico era muy pequeño o inexistente, lo cual generaba errores o valores del parámetro  $\theta$  muy elevados. De igual manera, se observa que los valores del parámetro  $\theta$  resultan menores que uno, valor mínimo propuesto para el modelo CA7. En la Figura 5.29 a Figura 5.41 se presenta el ajuste del parámetro  $\theta$ .



<b>M-1.94-3.0-53</b>	12869	4633	4350	5.00	0.81	5282	0.98	0.26	6136	1.48	0.13	6475	1.92	0.13	7101	2.46	0.06	0.28		
		-4633	-4120	-5.12	0.65	-4653	-0.97	0.39	-5220	-1.37	0.19	-6037	-1.88	0.24	-6076	-2.36	0.26		0.35	
<b>M-2.64-3.0-44</b>	5313	3475	2990	0.72	<del>4.62</del>	2830	0.99	0.34	3460	1.47	0.25	4000	1.95	0.26				0.28		
		-3475	-3096	-0.66	<del>2.90</del>	-3000	-0.98	0.28	-3880	-1.44	0.38	-4370	-1.92	0.35					0.34	
<b>M-2.64-3.0-53</b>	4207	3622	3211	0.97	1.02	3113	1.48	0.46	3645	1.90	0.36	4253	2.42	0.30				0.54		
		-3622	-2467	-0.97	1.43	-2976	-1.45	0.57	-3254	-1.81	0.30	-3974	-2.40	0.41					0.68	
<b>M-2.64-4.8-53</b>	4227	3513	3078	1.02	1.03	3318	1.52	0.35	3785	1.96	0.24	4089	2.39	0.31	4214	2.98	0.25	0.44		
		-3513	-3386	-1.10	1.43	-3636	-1.46	0.56	-4367	-1.95	0.39	-4913	-2.44	0.41	-4953	-2.85	0.29		0.62	
<b>M-2.64-7.2-53</b>	4930	4131	3797	0.98	0.87	4235	1.46	0.18										0.53		
		-4131	-4028	-0.97	<del>3.60</del>	-4564	-1.43	0.32												0.32
																		<b>Promedio</b>	0.41	0.40
																		<b>CV</b>	0.52	0.38

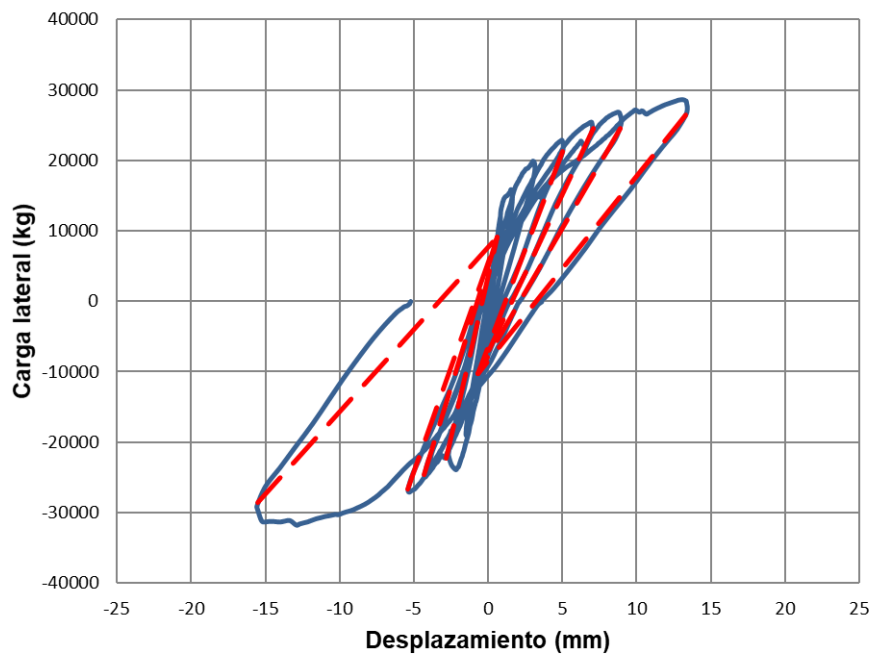


Figura 5.29 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-0.53-3.0-44.

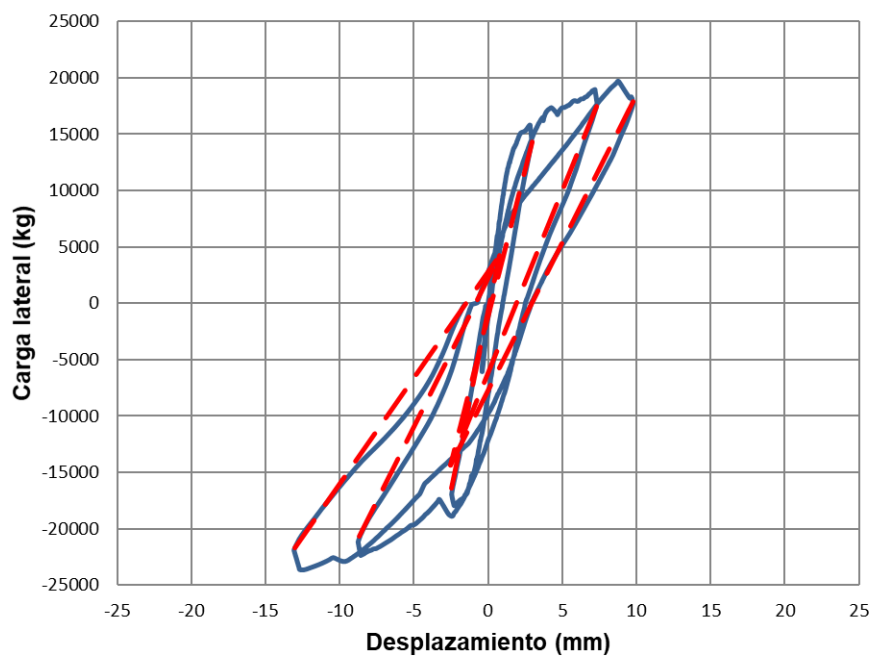


Figura 5.30 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-0.71-3.0-44.

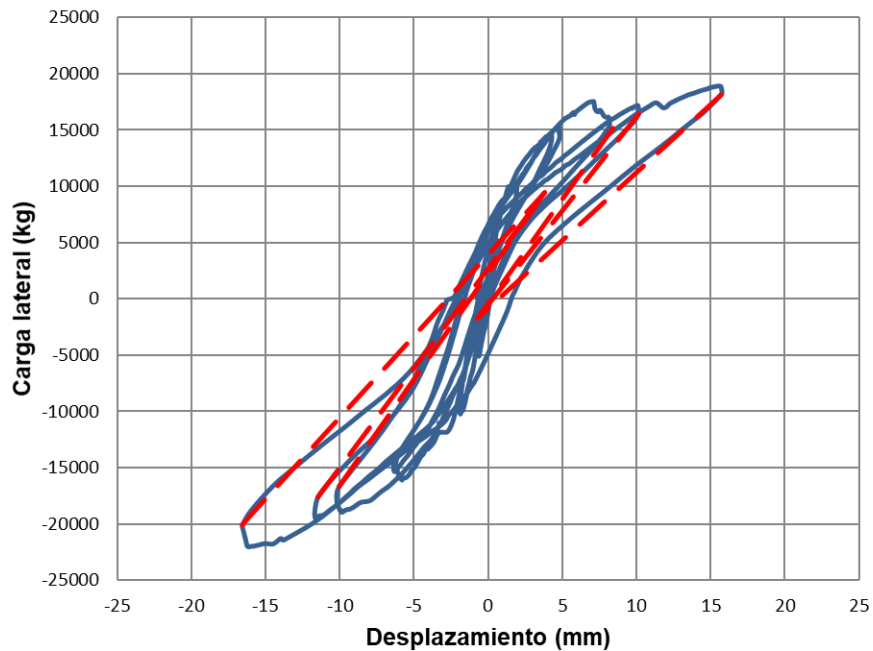


Figura 5.31 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-0.71-3.0-53.

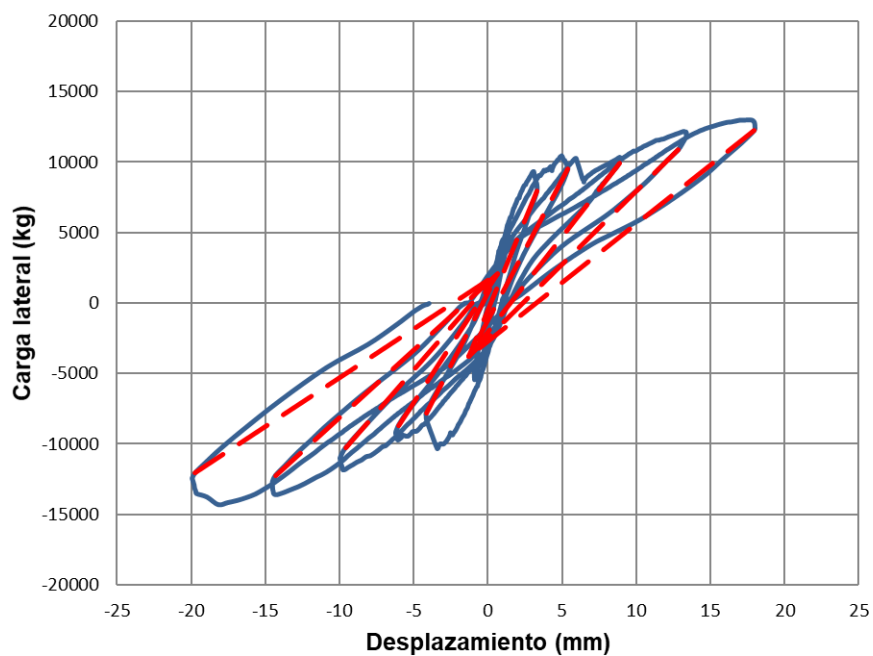


Figura 5.32 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-1.23-3.0-53.

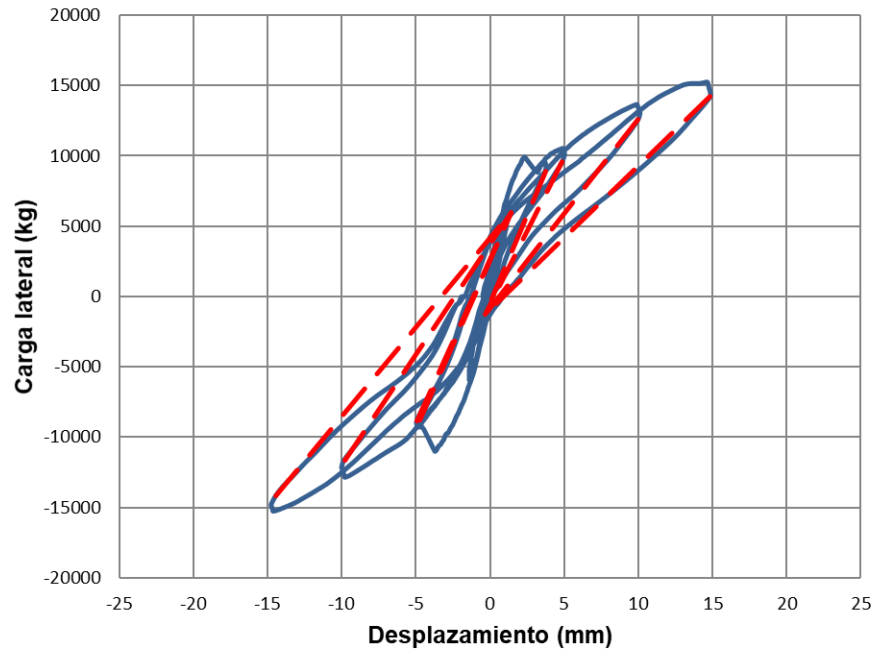


Figura 5.33 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-1.23-4.8-53.

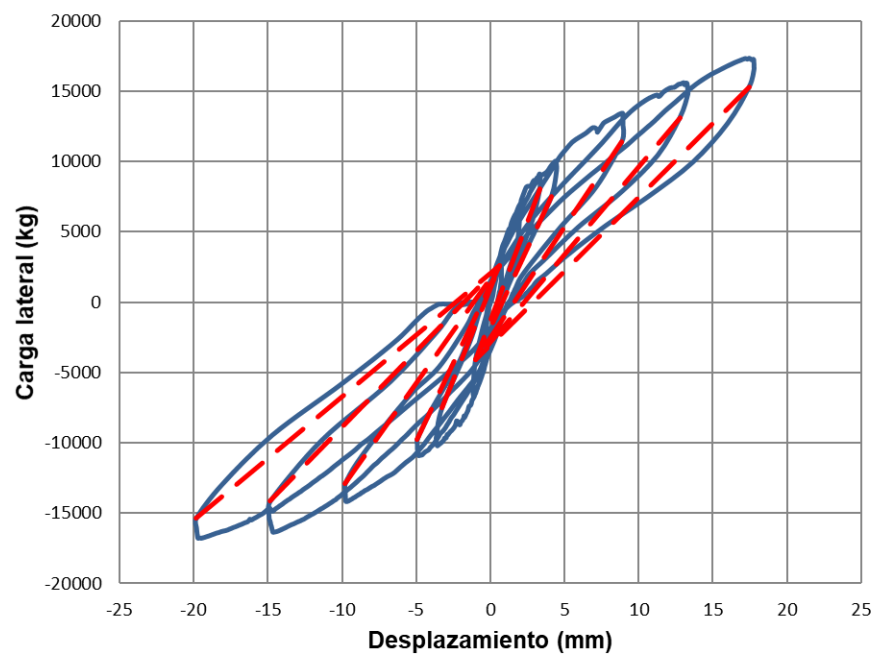


Figura 5.34 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-1.23-7.2-53.

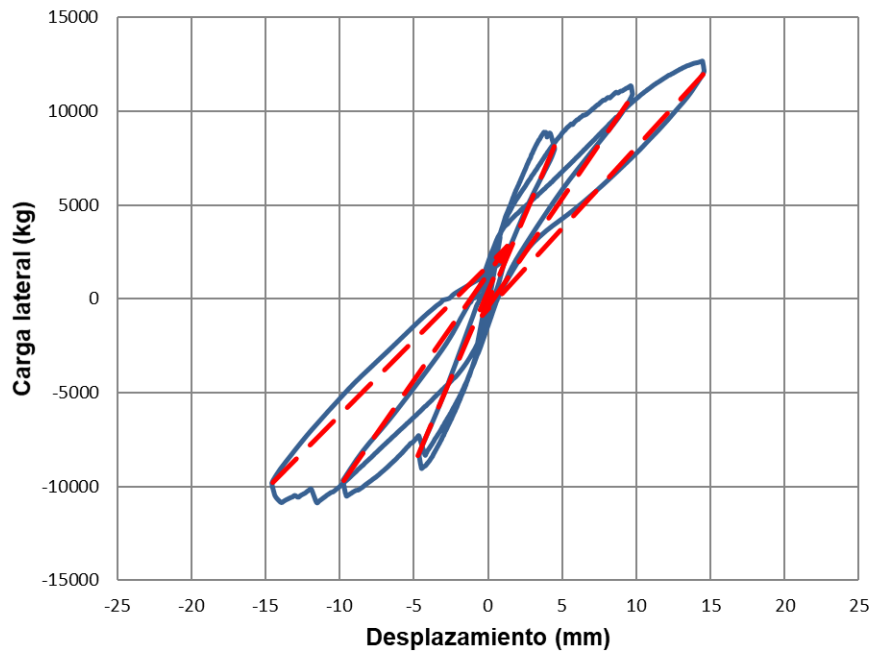


Figura 5.35 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-1.30-3.0-44.

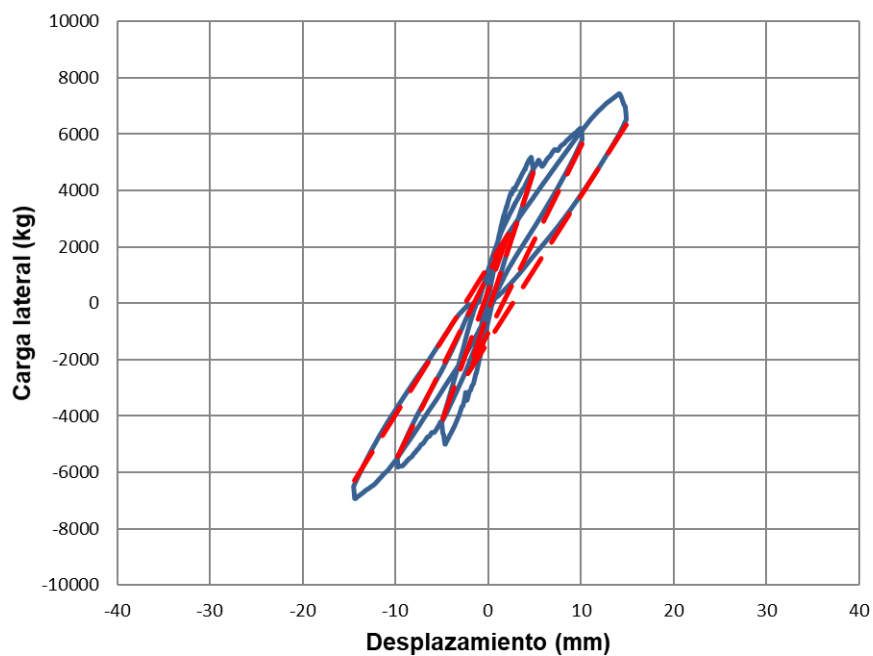


Figura 5.36 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-1.94-3.0-44.

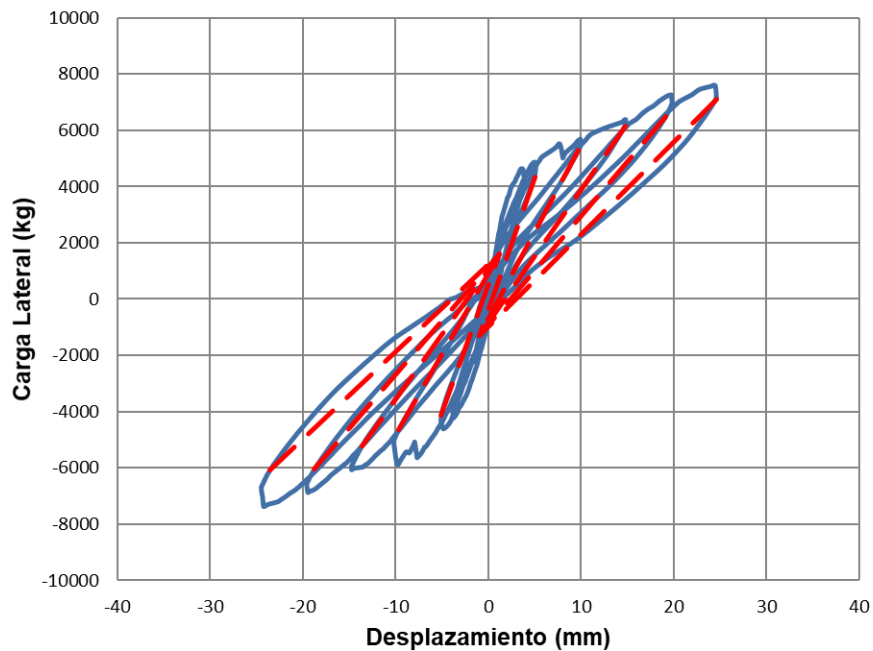


Figura 5.37 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-1.94-3.0-53.

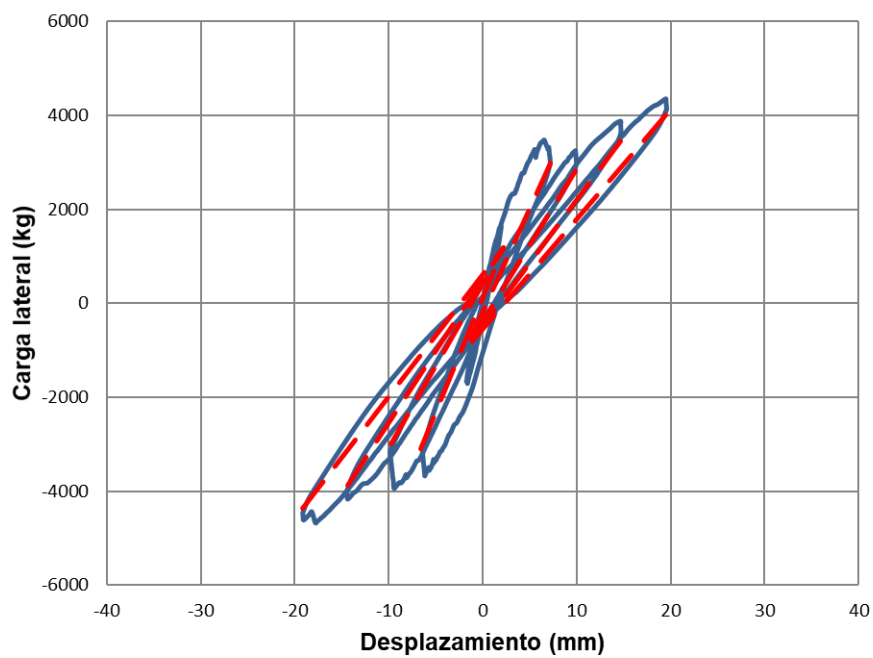


Figura 5.38 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-2.64-3.0-44.



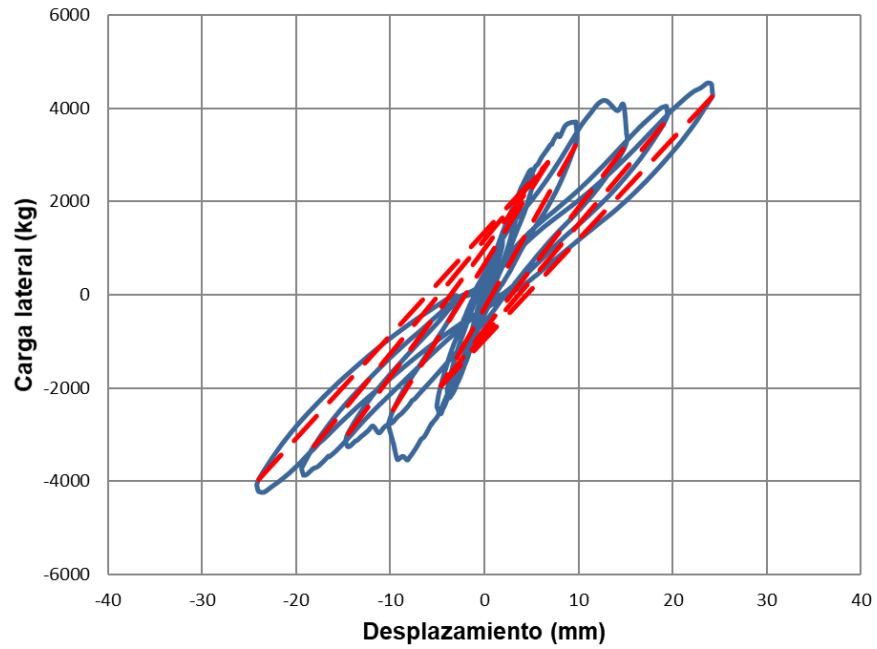


Figura 5.39 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-2.64-3.0-53.

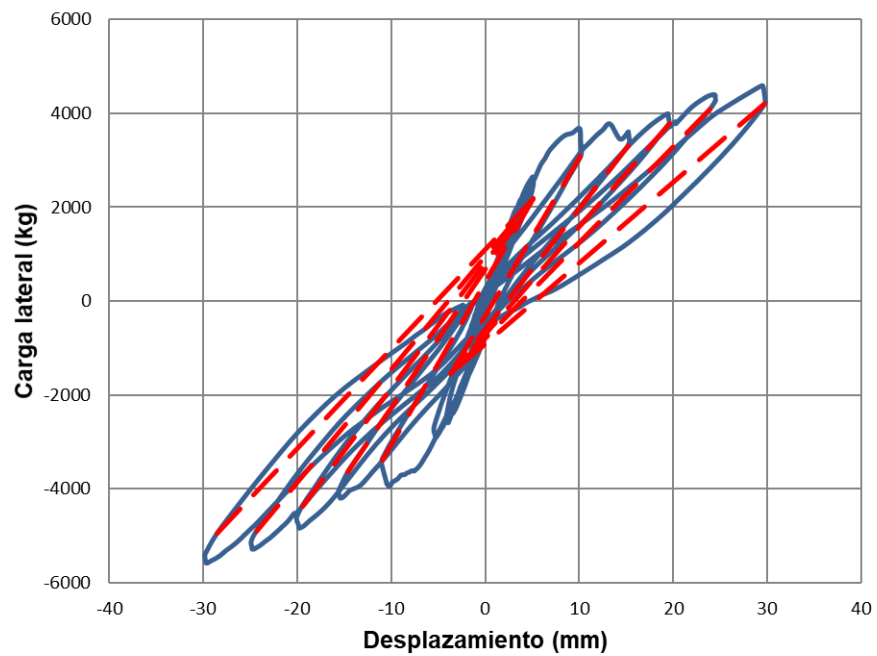


Figura 5.40 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-2.64-4.8-53.

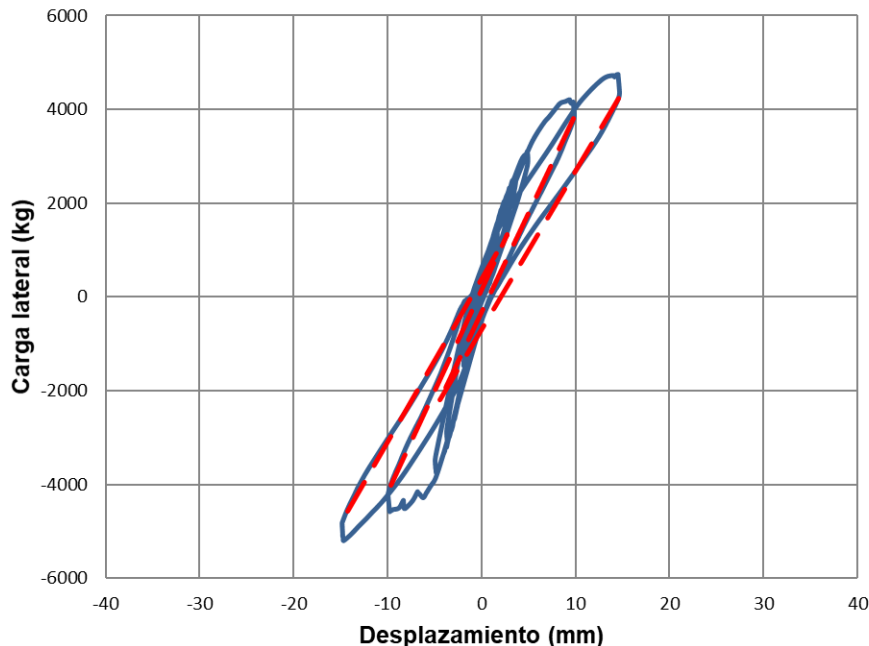


Figura 5.41 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-2.64-7.2-53.

En la Figura 5.42 a Figura 5.54 se presenta la comparación entre la curva carga lateral-desplazamiento experimental y el modelo de histéresis propuesto. Se emplearon los parámetros calculados para cada muro y para cada sentido de aplicación de carga.

De los modelos de histéresis podemos observar que al aumentar la relación de aspecto la resistencia al primer agrietamiento disminuye, lo cual se había observado durante el diseño de los muros. Se observa que en los muros M-0.53-3.0-44 y M-0.71-3.0-44 existe una diferencia entre las resistencias de los sentidos positivo y negativo, mientras que para el resto de los muros las resistencias son relativamente iguales. De igual manera, al aumentar el desplazamiento lateral del ciclo, la pendiente de descarga elástica pierde precisión. Es decir, si el desplazamiento lateral máximo del modelo aumenta, los valores del parámetro  $\theta$  no ajustan adecuadamente a la curva experimental. En general, los modelos de histéresis propuestos se ajustan bien a las curvas experimentales, por lo que el cálculo de los parámetros de histéresis se considera válido.

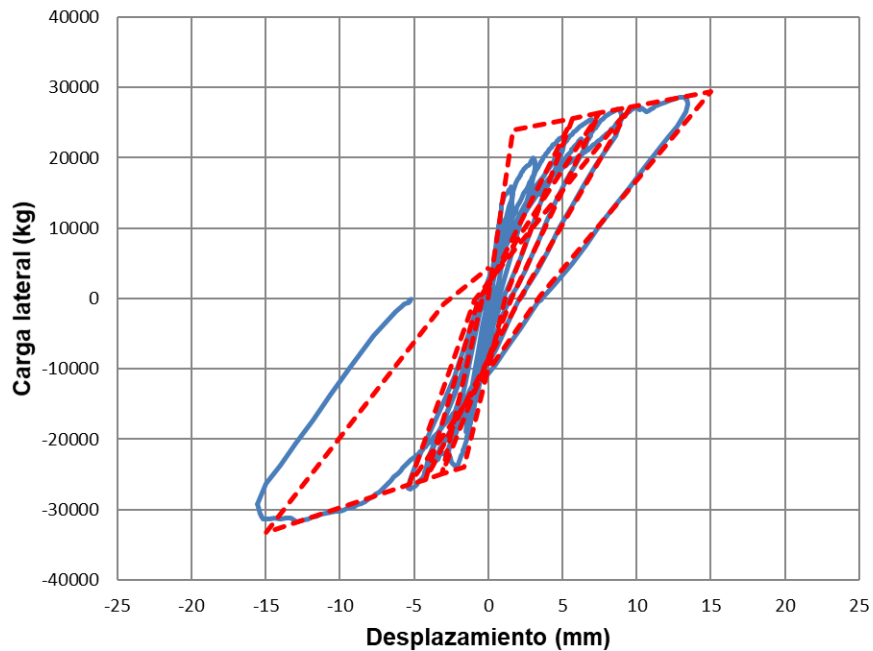


Figura 5.42 Modelo de histéresis del muro M-0.53-3.0-44.

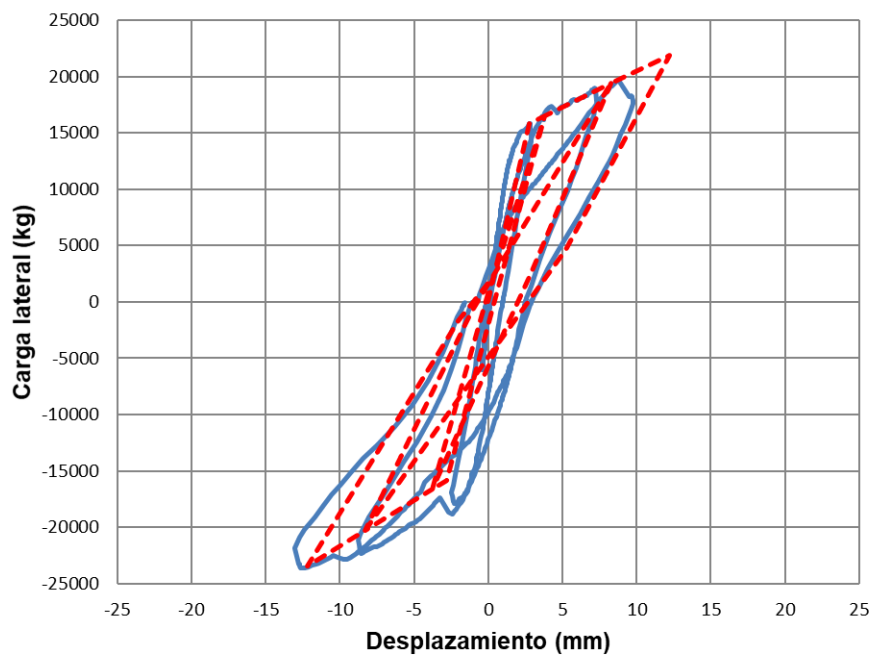


Figura 5.43 Modelo de histéresis del muro M-0.71-3.0-44.

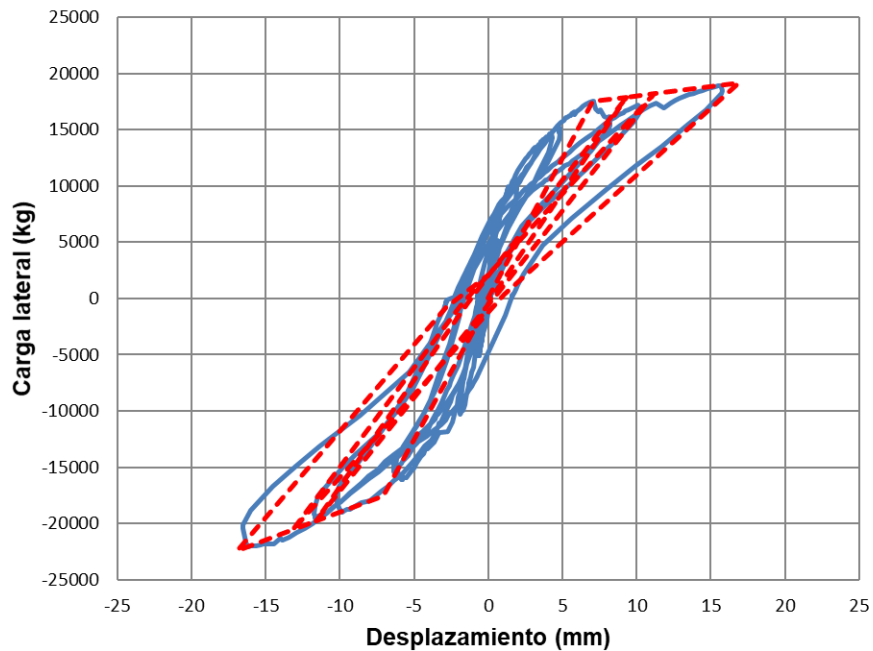


Figura 5.44 Modelo de histéresis del muro M-0.71-3.0-53.

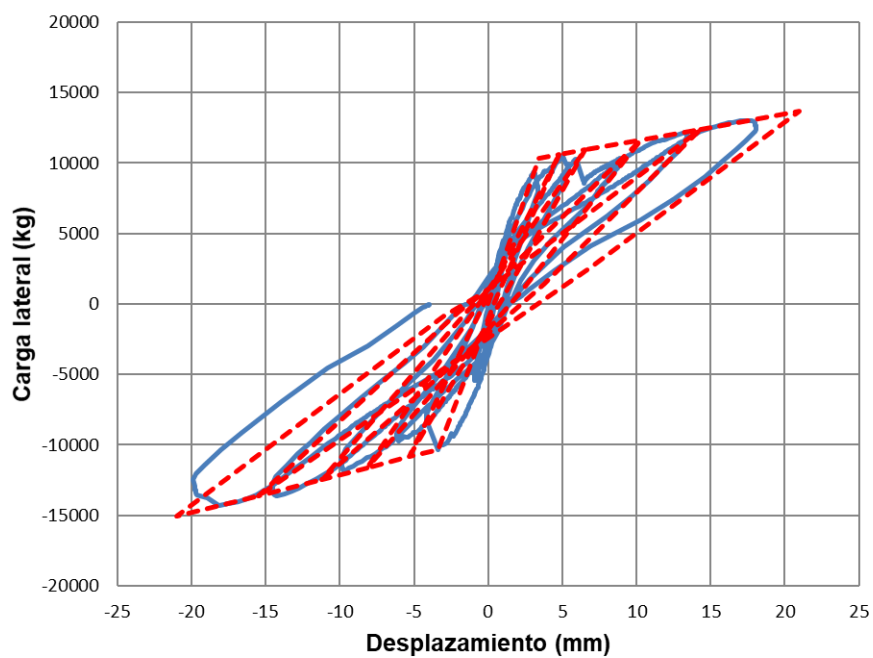


Figura 5.45 Modelo de histéresis del muro M-1.23-3.0-53.

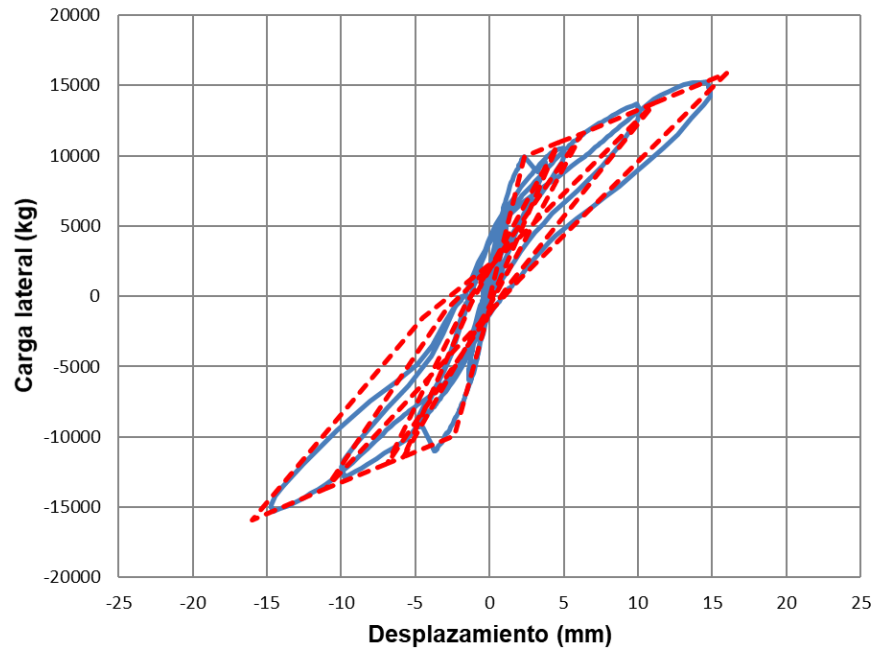


Figura 5.46 Modelo de histéresis del muro M-1.23-4.8-53.

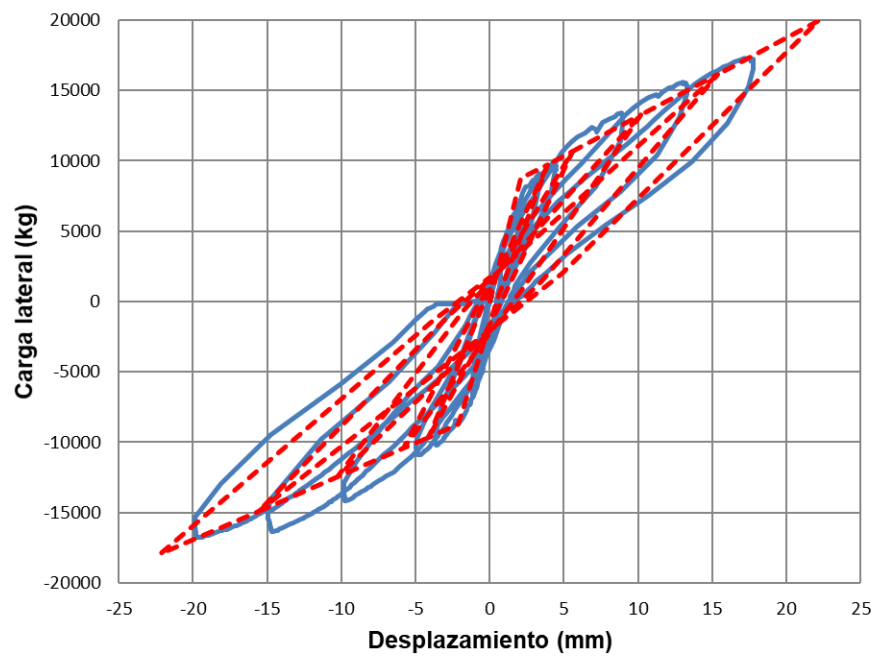


Figura 5.47 Modelo de histéresis del muro M-1.23-7.2-53.

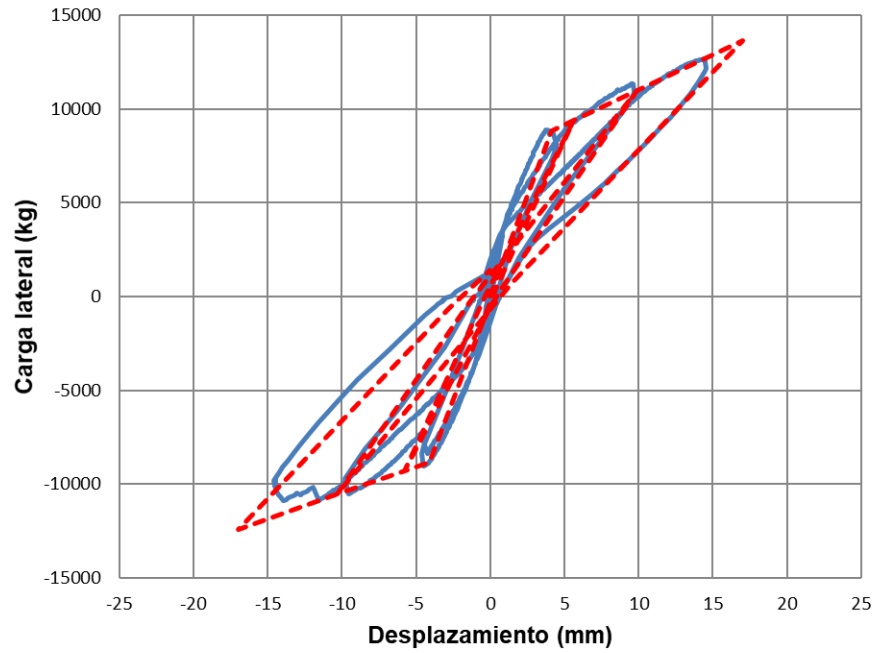


Figura 5.48 Modelo de histéresis del muro M-1.30-3.0-44.

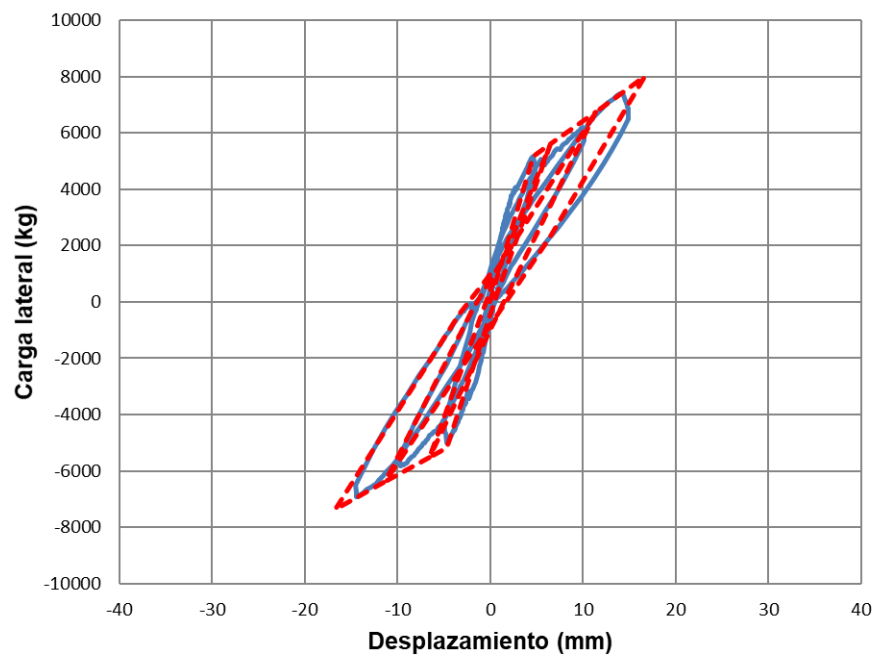


Figura 5.49 Modelo de histéresis del muro M-1.94-3.0-44.

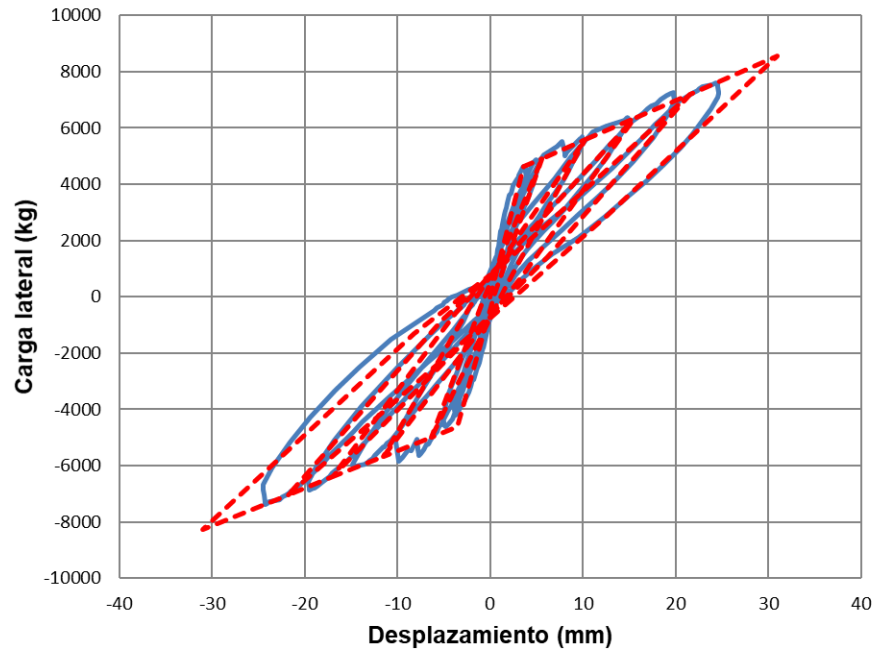


Figura 5.50 Modelo de histéresis del muro M-1.94-3.0-53.

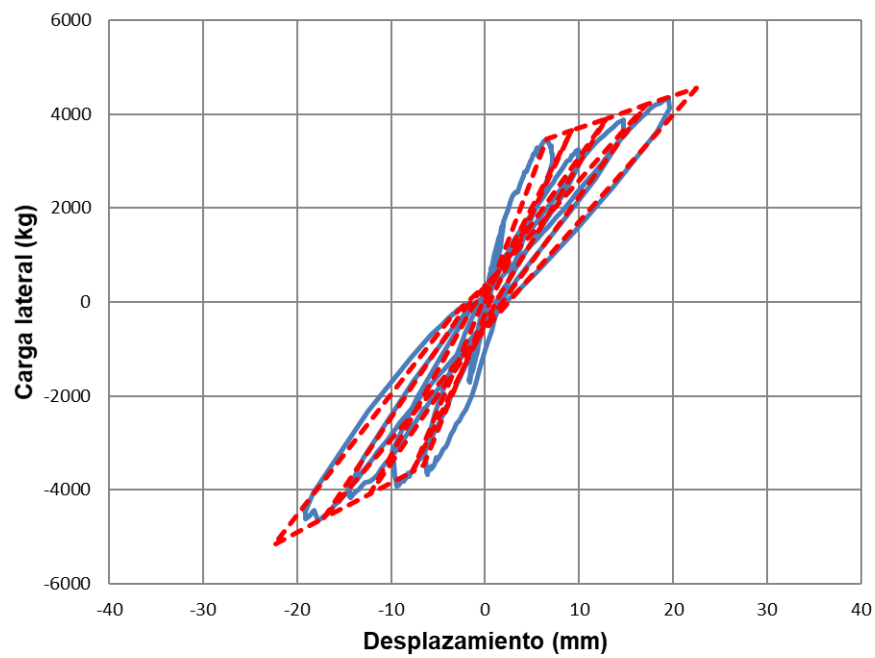


Figura 5.51 Modelo de histéresis del muro M-2.64-3.0-44.

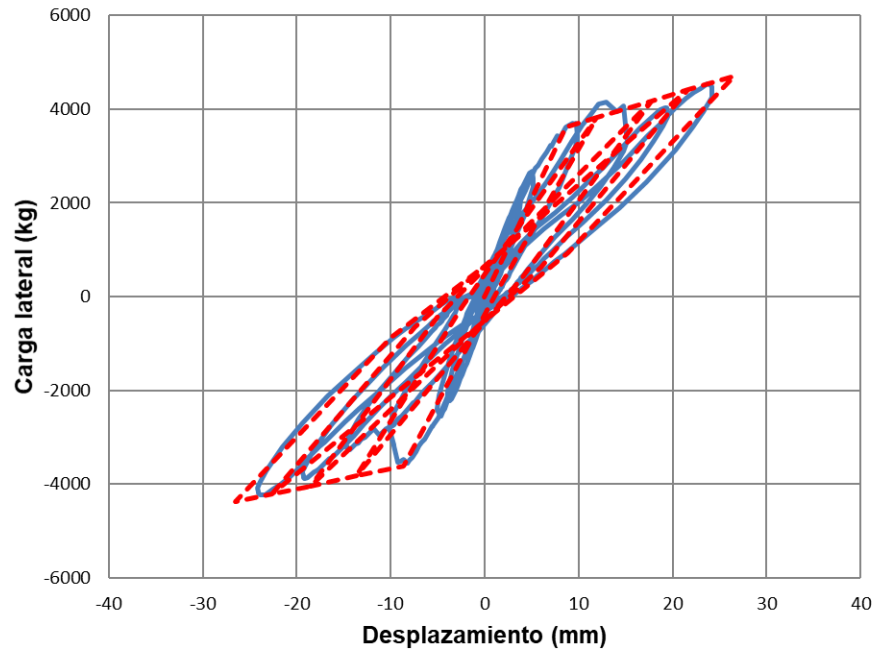


Figura 5.52 Modelo de histéresis del muro M-2.64-3.0-53.

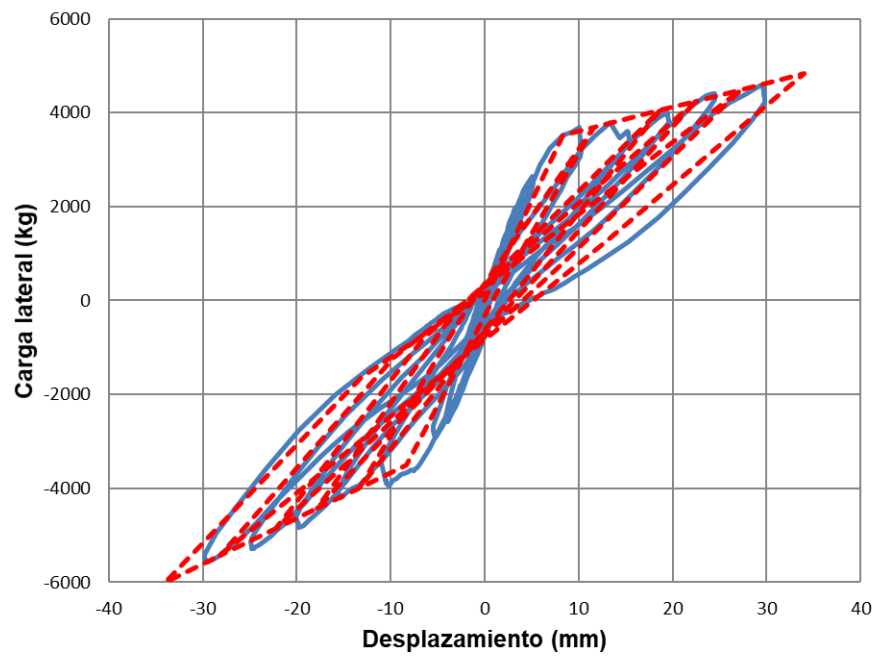


Figura 5.53 Modelo de histéresis del muro M-2.64-4.8-53.



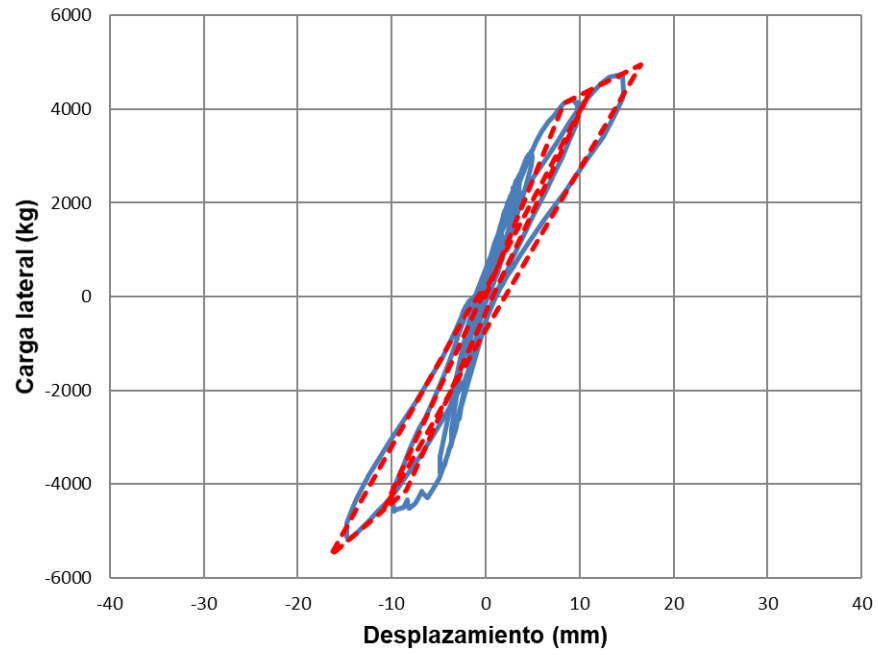


Figura 5.54 Modelo de histéresis del muro M-2.64-7.2-53.

### 5.3.2 Modelo de histéresis con degradación de resistencia

Para este modelo los valores del parámetro  $\alpha$  serán los mismos que los calibrados para el modelo de histéresis sin degradación. Igual que para el modelo de histéresis sin degradación, los valores de los parámetros de histéresis calculados para el muro M-0.71-3.0-53 serán considerados no válidos. Estos valores aparecen tachados en las tablas de cada parámetro y no contribuyen al promedio.

En la Tabla 5.7 se presentan los valores del parámetro  $\gamma$ . La rigidez posterior al agrietamiento experimental se calculó en los sentidos positivo y negativo ( $K_{pc}$  y  $K'_{pc}$ , respectivamente) como la pendiente de la recta que pasa por los puntos dados por el primer agrietamiento y la carga máxima. Para este modelo, en la mayoría de los muros, el parámetro  $\gamma$  resultó igual que para el modelo de histéresis sin degradación de resistencia, por tanto, solo se presentan los ajustes de la rigidez posterior al agrietamiento de los muros en que varió (Figura 5.55 a Figura 5.60). Debido a que el daño en un sentido afecta el comportamiento en el otro y que el agrietamiento de los trece muros no ocurrió exclusivamente en el mismo sentido, se calculó el promedio del parámetro  $\gamma$  con el fin de considerar la afectación en ambos sentidos. De los valores promedio se observa que al aumentar la relación de aspecto el valor del parámetro  $\bar{\gamma}$  aumenta. De igual forma se observa que al aumentar el esfuerzo axial sobre los muros con una misma relación de aspecto el valor del parámetro  $\bar{\gamma}$  aumenta, siendo más notorio el incremento en el muro con relación de aspecto de 2.64. La dispersión presentada en los valores del parámetro es demasiado grande, por lo que se recomienda utilizar los valores promedio independientes para cada muro.

Tabla 5.7 Valores del parámetro  $\gamma$ .

Muro	$K_c$ (kg/cm)	$K_{pc}$ (kg/cm)	$\gamma$	$K'_{pc}$ (kg/cm)	$\gamma'$	$\bar{\gamma}$
M-0.53-3.0-44	144193	3326	0.02	7003	0.05	0.04
M-0.71-3.0-44	56486	4480	0.08	8130	0.14	0.11
M-0.71-3.0-53	24807	1886	<del>0.08</del>	4973	<del>0.20</del>	<del>0.14</del>
M-1.23-3.0-53	30409	1889	0.06	2701	0.09	0.08
M-1.23-4.8-53	42021	4363	0.10	3993	0.10	0.10
M-1.23-7.2-53	41600	5589	0.13	4567	0.11	0.12
M-1.30-3.0-44	21410	3730	0.17	2779	0.13	0.15
M-1.94-3.0-44	11136	2331	0.21	1815	0.16	0.19
M-1.94-3.0-53	12869	1429	0.11	1323	0.10	0.11
M-2.64-3.0-44	5313	677	0.13	1059	0.20	0.16
M-2.64-3.0-53	4207	628	0.15	416	0.10	0.12
M-2.64-4.8-53	4227	512	0.12	966	0.23	0.17
M-2.64-7.2-53	4930	858	0.17	1714	0.35	0.26
		<b>Promedio</b>	0.12		0.15	0.13
		<b>CV</b>	0.42		0.55	0.43

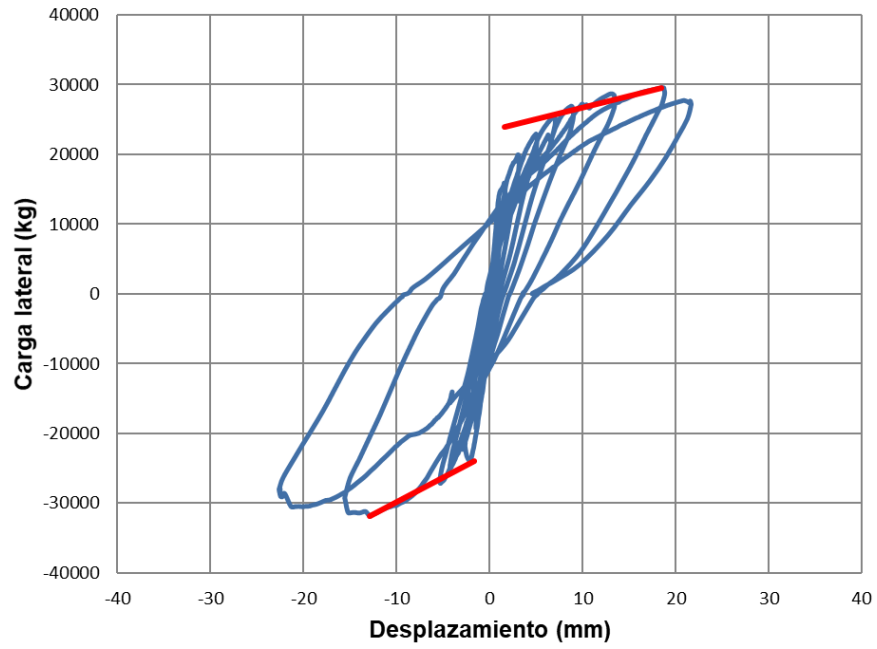


Figura 5.55 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-0.53-3.0-44.

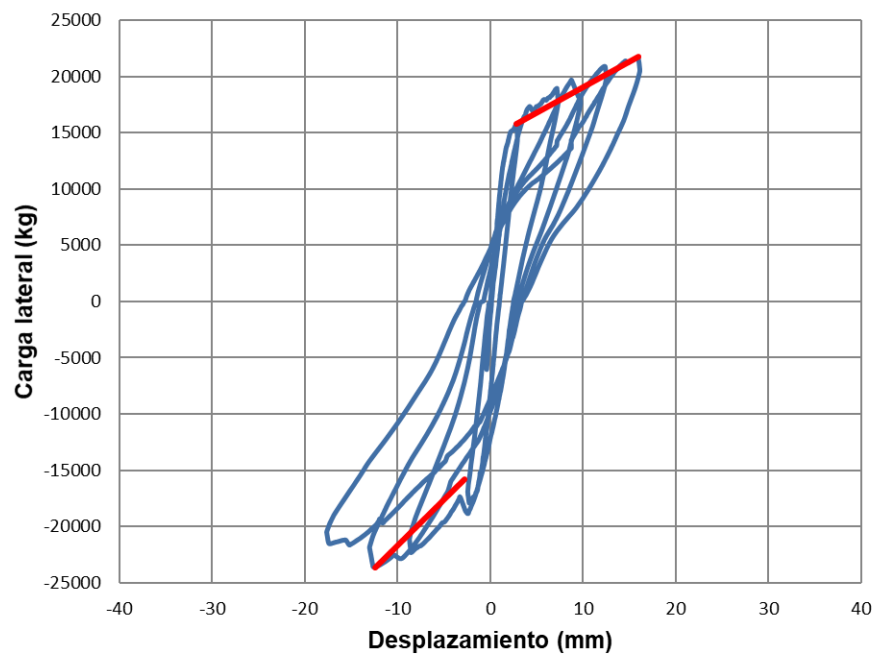


Figura 5.56 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-0.71-3.0-44.

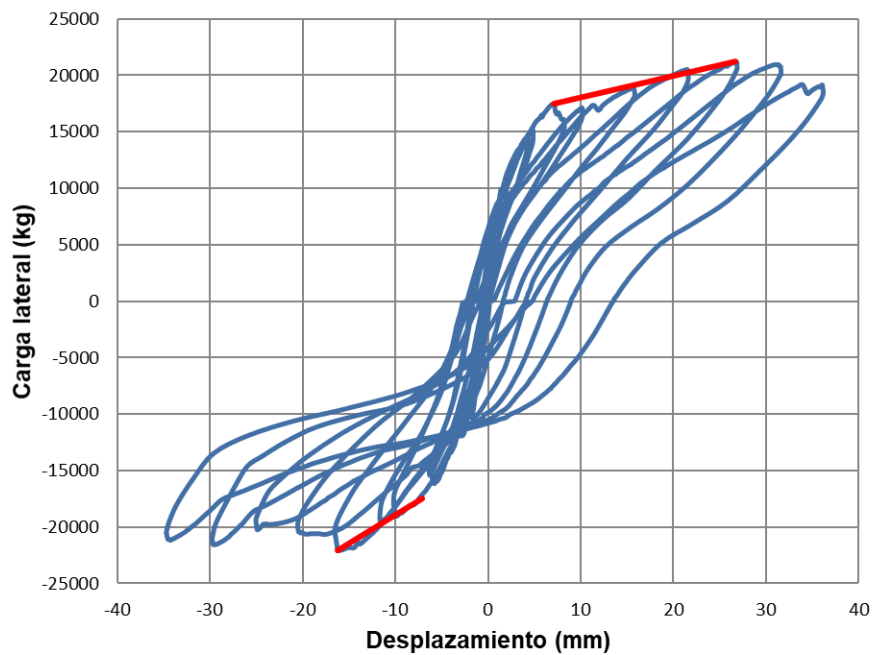


Figura 5.57 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-0.71-3.0-53.

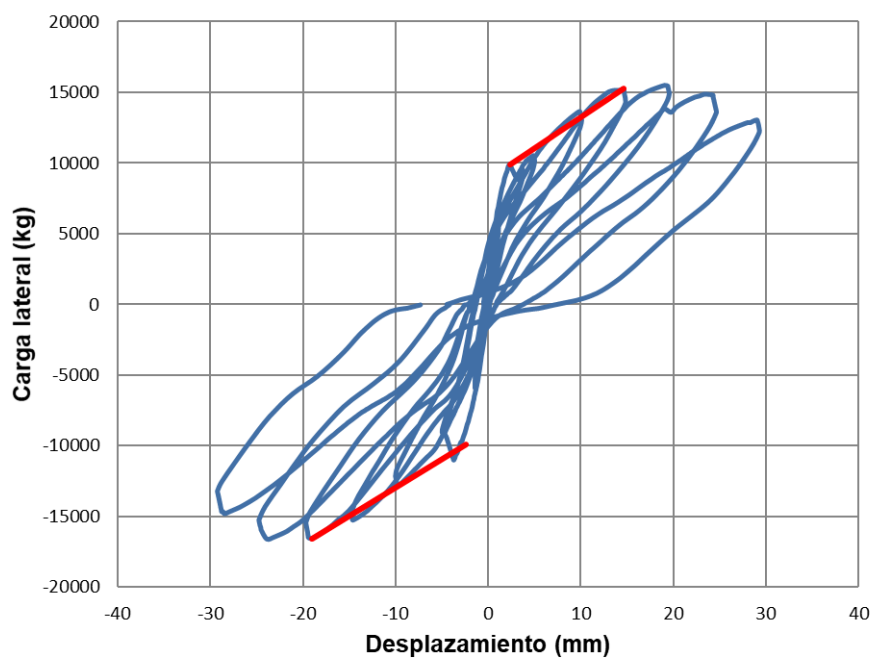


Figura 5.58 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-1.23-3.0-53.

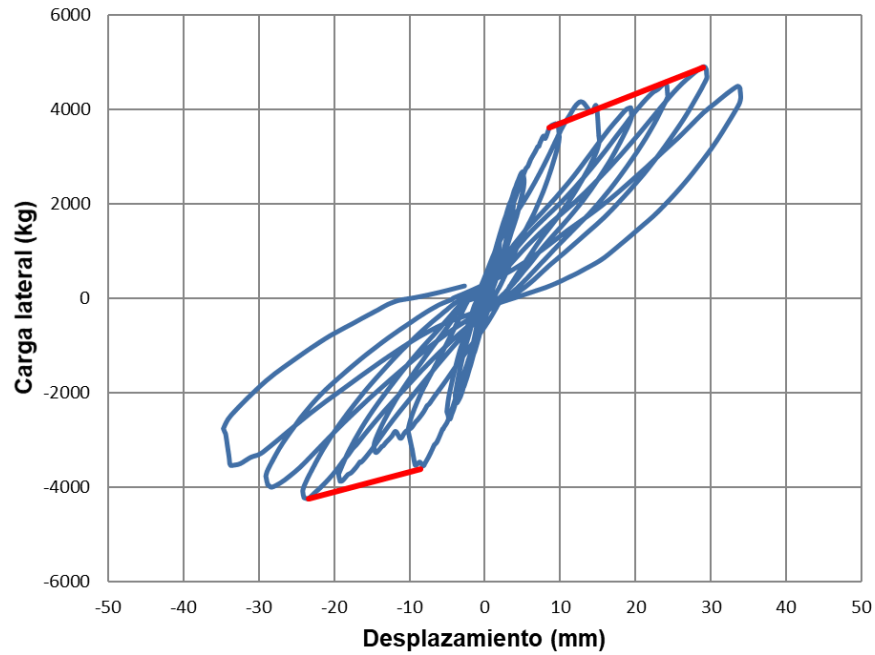


Figura 5.59 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-2.64-3.0-53.

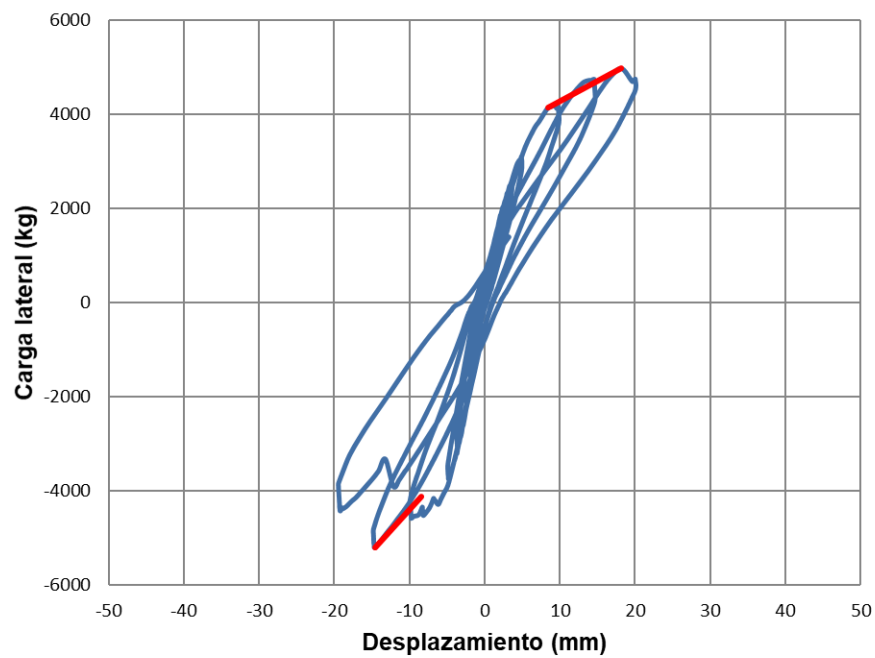


Figura 5.60 Rigidez posterior al agrietamiento del muro M-2.64-7.2-53.

En la Tabla 5.8 se presentan los valores del parámetro  $\delta$ . La recta U-U' se ajustó gráficamente en los sentidos positivo y negativo ( $\delta$  y  $\delta'$ , respectivamente) (Figura 5.61 a Figura 5.73). De igual manera que para el parámetro  $\gamma$ , se calcularon los promedios para considerar el daño en ambos sentidos. De los promedios se observa que al aumentar el esfuerzo axial en los muros los valores del parámetro  $\bar{\delta}$  aumentan. La dispersión presentada en los valores del parámetro es demasiado grande, por lo que se recomienda utilizar los valores promedio independientes para cada muro.

Tabla 5.8 Valores del parámetro  $\delta$ .

Muro	$K_c$ (kg/cm)	$K_{u-u}$ (kg/cm)	$\delta$	$K'_{u-u}$ (kg/cm)	$\delta'$	$\bar{\delta}$
M-0.53-3.0-44	144193	807	0.01	2048	0.01	0.01
M-0.71-3.0-44	56486	7219	0.13	7016	0.12	0.13
M-0.71-3.0-53	24807	1734	0.07	2994	0.12	0.10
M-1.23-3.0-53	30409	1271	0.04	672	0.02	0.03
M-1.23-4.8-53	42021	1114	0.03	1084	0.03	0.03
M-1.23-7.2-53	41600	1893	0.05	1481	0.04	0.04
M-1.30-3.0-44	21410	3233	0.15	1783	0.08	0.12
M-1.94-3.0-44	11136	808	0.07	519	0.05	0.06
M-1.94-3.0-53	12869	610	0.05	418	0.03	0.04
M-2.64-3.0-44	5313	349	0.07	421	0.08	0.07
M-2.64-3.0-53	4207	677	0.16	569	0.14	0.15
M-2.64-4.8-53	4227	614	0.15	720	0.17	0.16
M-2.64-7.2-53	4930	1537	0.31	1346	0.27	0.29
		<b>Promedio</b>	0.10	<b>Promedio</b>	0.09	0.09
		<b>CV</b>	0.85	<b>CV</b>	0.89	0.86

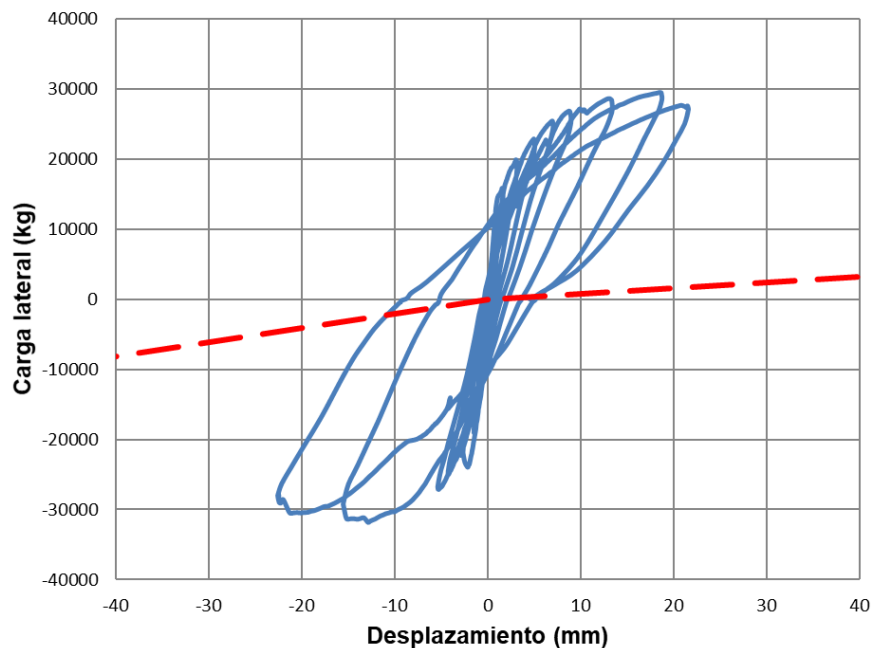


Figura 5.61 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-0.53-3.0-44.

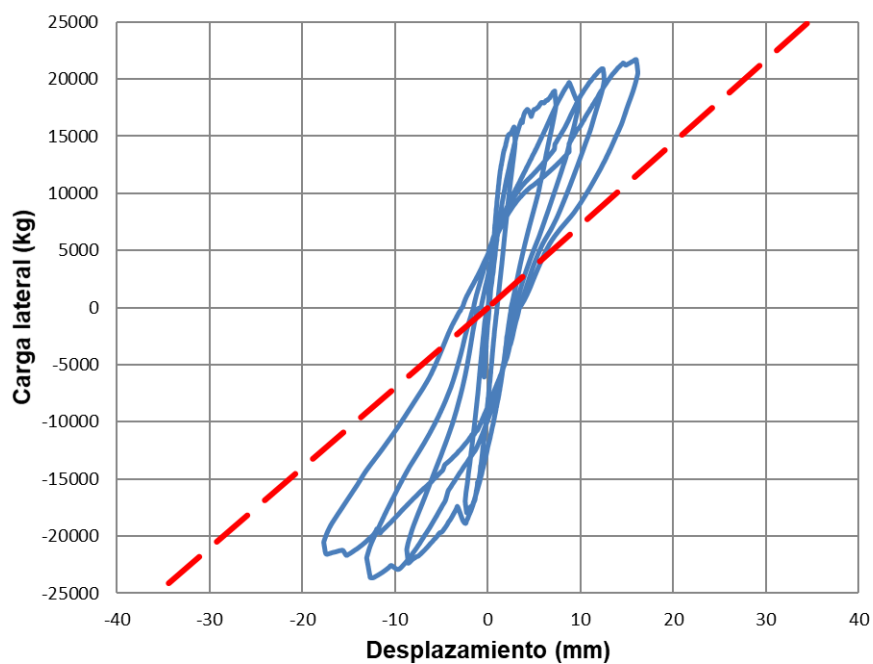


Figura 5.62 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-0.71-3.0-44.



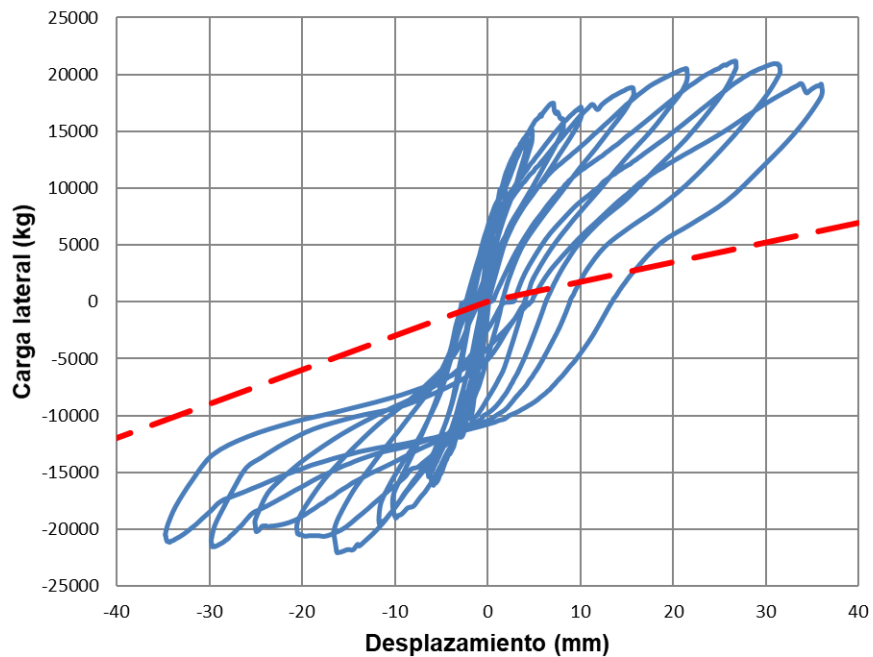


Figura 5.63 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-0.71-3.0-53.

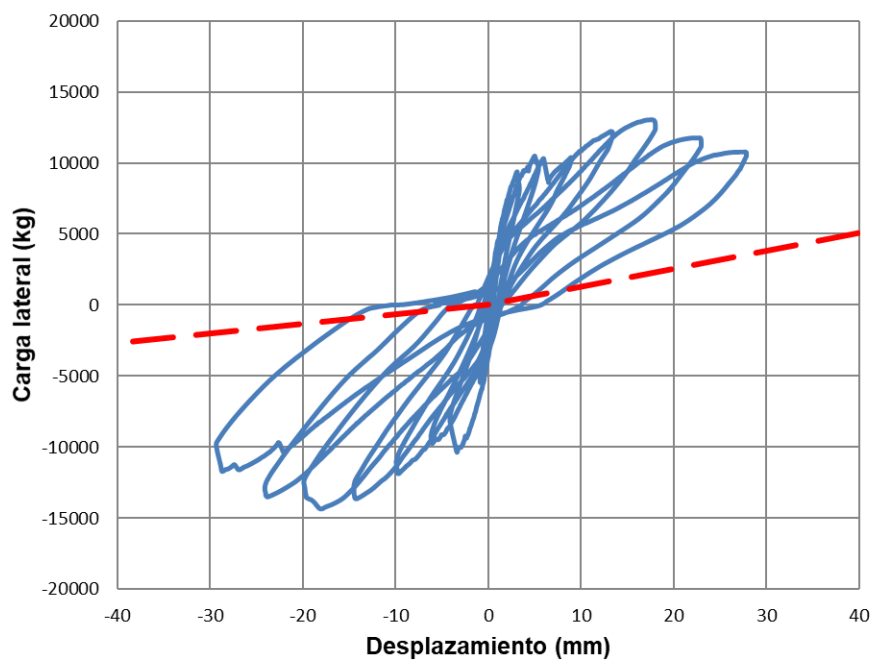


Figura 5.64 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.23-3.0-53.

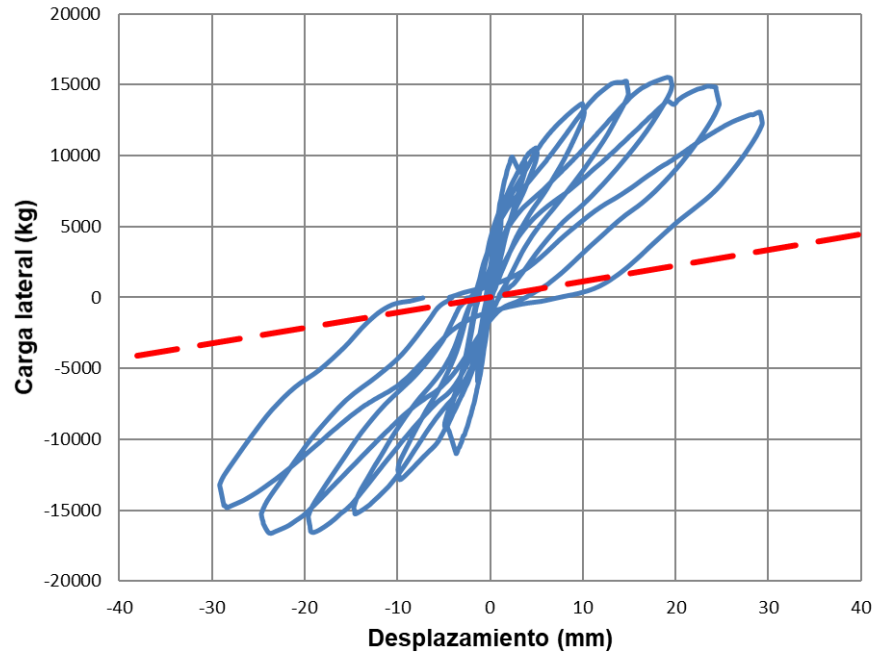


Figura 5.65 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.23-4.8-53.

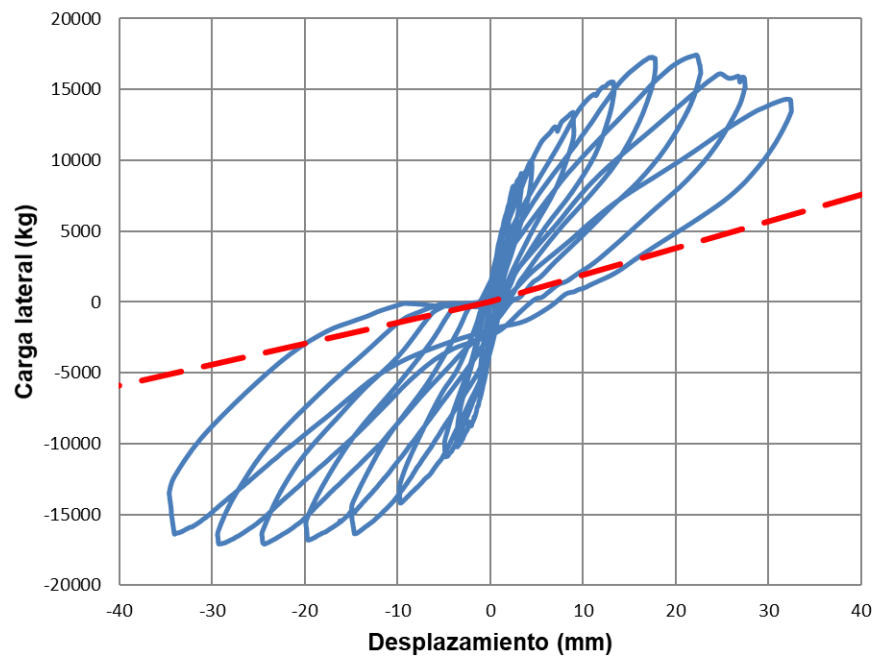


Figura 5.66 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.23-7.2-53.

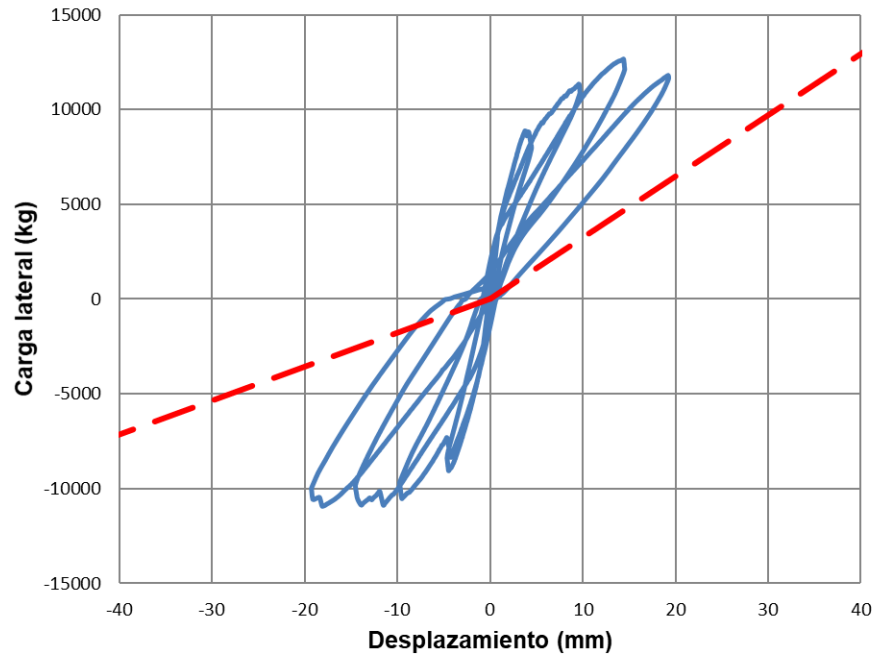


Figura 5.67 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.30-3.0-44.

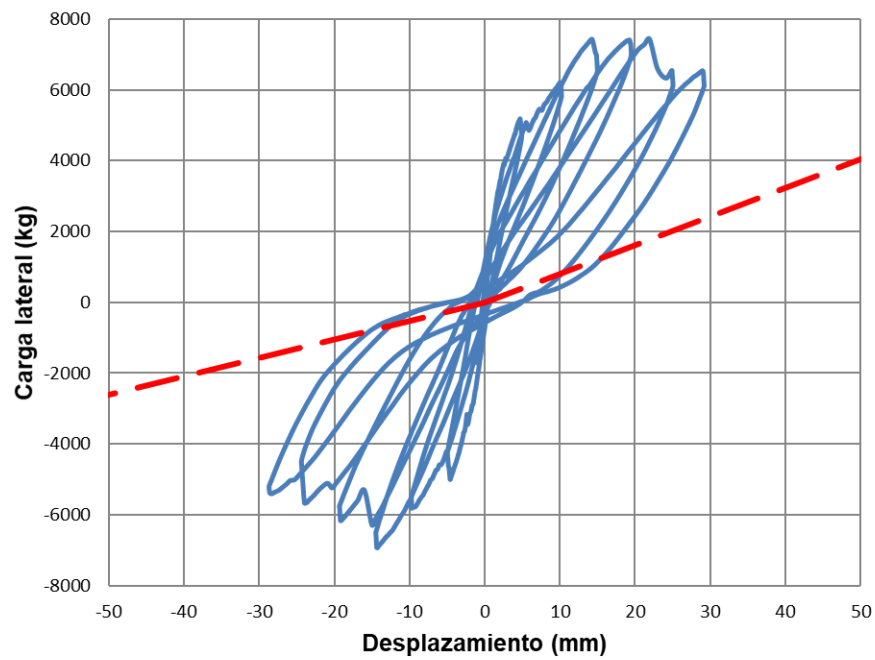


Figura 5.68 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.94-3.0-44.

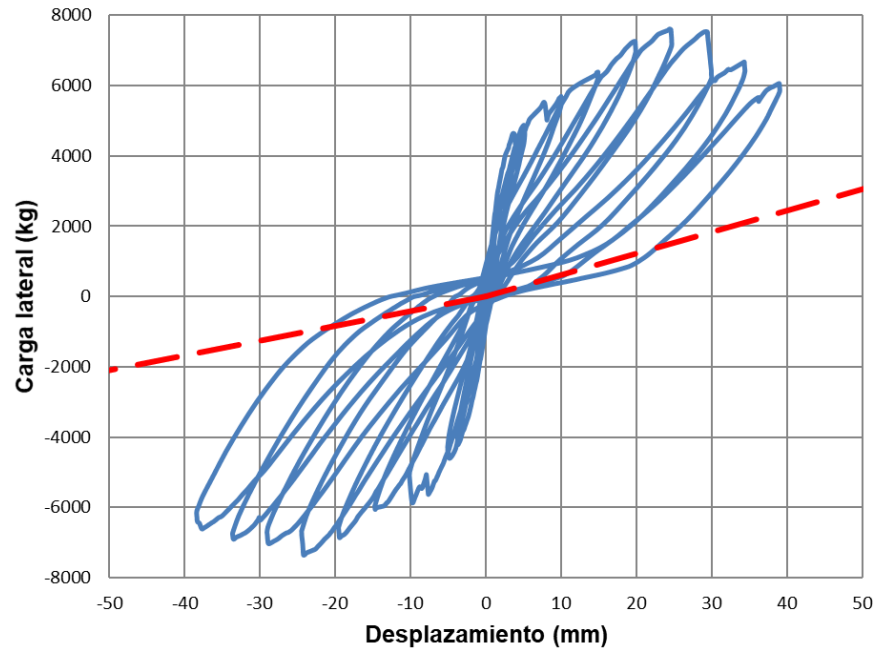


Figura 5.69 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-1.94-3.0-53.

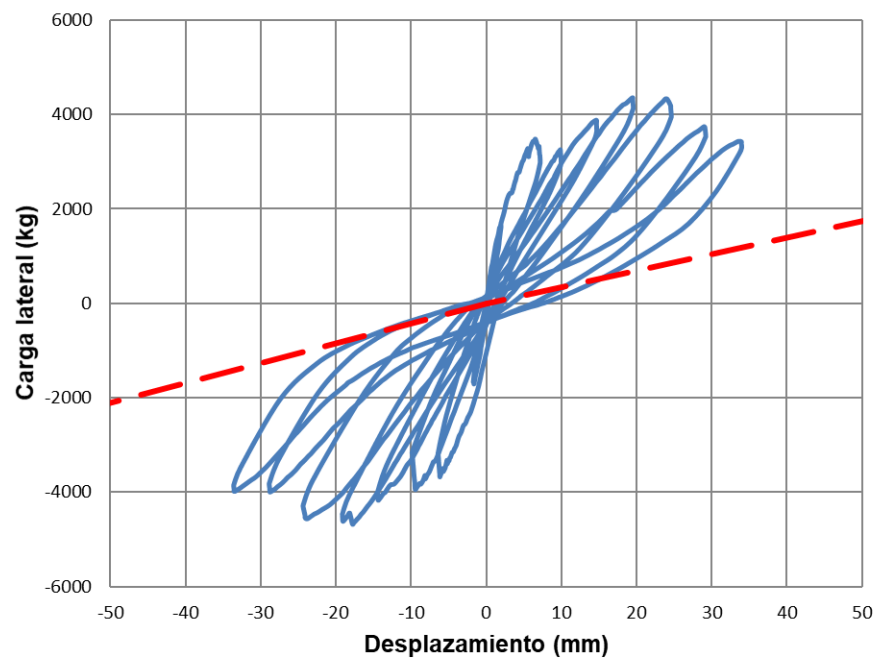


Figura 5.70 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-2.64-3.0-44.

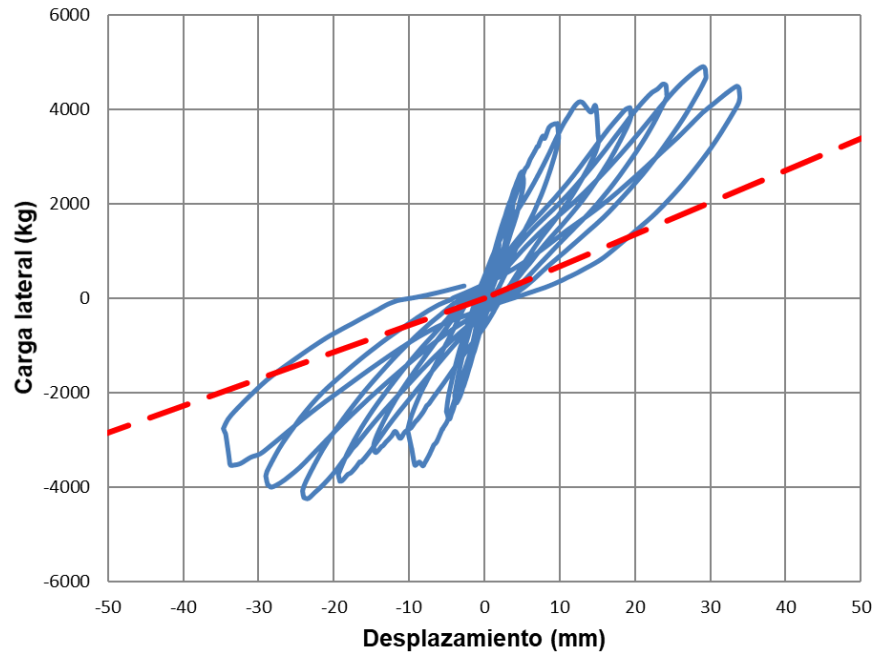


Figura 5.71 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-2.64-3.0-53.

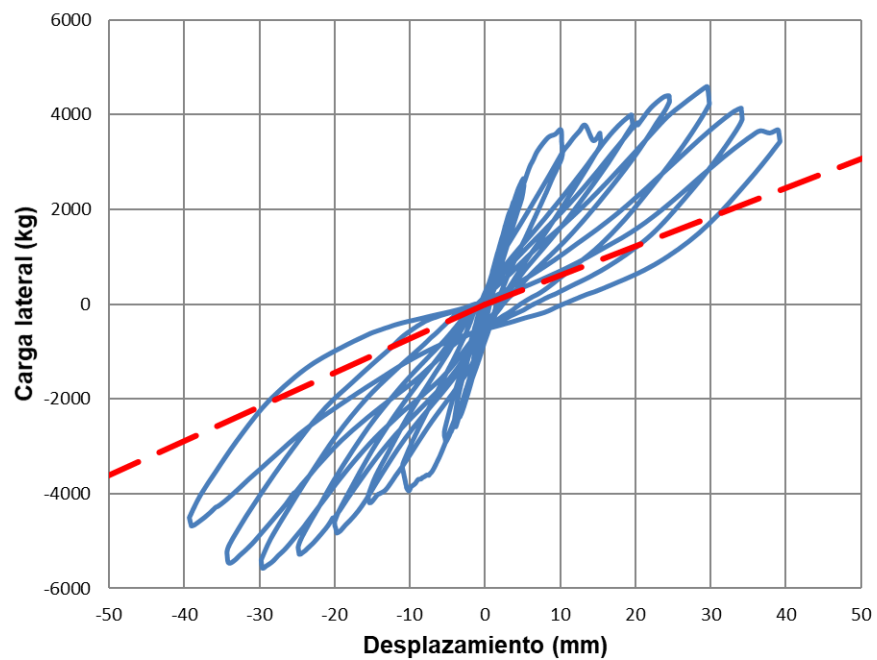


Figura 5.72 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-2.64-4.8-53.

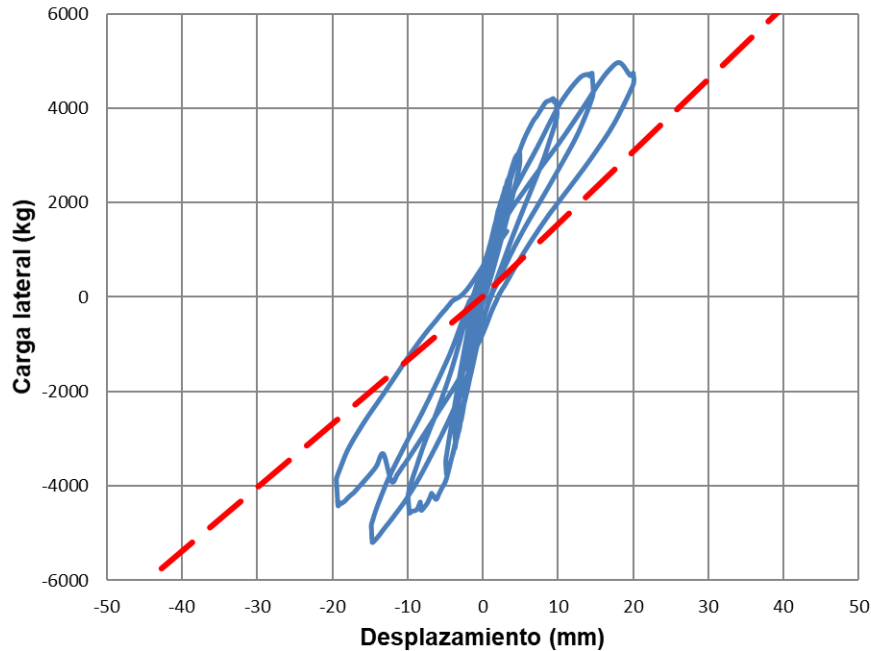


Figura 5.73 Ajuste de la recta U-U' para el muro M-2.64-7.2-53.

En la Tabla 5.9 se presentan los valores del parámetro  $\theta$ . Se calcularon valores de  $\theta$  para cada ciclo y para cada sentido de aplicación de carga ( $\theta_i$ ). De los datos experimentales obtenidos se observa que las pendientes de nuevo no convergen a un mismo punto y que los valores de  $\theta_i$  varían conforme los ciclos sin una tendencia marcada. Por tanto, el valor de este parámetro se ajustó en los sentidos positivo y negativo ( $\theta$  y  $\theta'$ , respectivamente) con el promedio de los valores obtenidos para cada ciclo. Algunos valores de los primeros ciclos se desecharon debido a que el desplazamiento plástico era muy pequeño o inexistente, lo cual generaba errores o valores del parámetro  $\theta$  muy elevados. De igual manera, se observa que la mayoría de los valores del parámetro  $\theta$  resultan menores de uno, valor mínimo propuesto para el modelo CA7. En la Figura 5.74 a Figura 5.86 se presenta el ajuste del parámetro  $\theta$ .

Tabla 5.9 Valores del parámetro  $\theta$ .

Muro	Kc (kg/cm)	Vc (kg)	V <sub>m1</sub> (kg)	d <sub>m1</sub> (cm)	$\theta_1$	V <sub>m2</sub> (kg)	d <sub>m2</sub> (cm)	$\theta_2$	V <sub>m3</sub> (kg)	d <sub>m3</sub> (cm)	$\theta_3$	V <sub>m4</sub> (kg)	d <sub>m4</sub> (cm)	$\theta_4$
M-0.53-3.0-44	144193	23936	21200	5.00	0.34	24500	7.10	0.41	24600	8.90	0.44	26450	13.30	0.51
		-23936	-22300	-2.80	0.53	-24600	-4.30	0.12	-26700	-5.40	0.19	-28600	-15.50	0.68
M-0.71-3.0-44	56486	15816	14300	2.95	4.60	17500	7.30	1.32	17900	9.80	0.87	19450	12.50	0.69
		-15816	-16370	-2.50	0.00	-20680	-8.70	0.37	-21710	-13.00	0.23	-20200	-17.70	0.19
M-0.71-3.0-53	24807	17514	15166	8.43	0.06	16439	10.16	0.05	18181	15.75	0.24	19335	21.44	0.39
		-17514	-16682	-10.04	2.75	-17591	-11.46	0.78	-20067	-16.56	0.29	-19073	-20.36	0.07
M-1.23-3.0-53	30409	10339	7972	3.33	6.00	9501	5.41	1.26	9937	8.86	0.40	10887	12.87	0.19
		-10339	-7827	-4.15	0.38	-8744	-6.04	0.13	-10261	-9.57	0.17	-12277	-14.32	0.25
M-1.23-4.8-53	42021	9917	8891	3.73	0.39	9551	4.87	0.02	12556	9.97	0.10	14246	14.86	0.22
		-9917	-8799	-4.70	1.28	-8867	-4.92	0.89	-11631	-9.81	0.50	-14193	-14.43	0.34
M-1.23-7.2-53	41600	8736	8072	3.32	1.47	7547	4.12	0.56	11398	8.86	0.38	13104	12.77	0.27
		-8736	-7475	-3.26	0.56	-9738	-4.93	0.35	-12895	-9.79	0.24	-14115	-14.84	0.33
M-1.30-3.0-44	21410	8836	8120	4.50	1.47	10420	9.40	0.18	11980	14.50	0.08	11500	19.20	0.07
		-8836	-8370	-4.70	3.11	-9680	-9.70	0.31	-9810	-14.50	0.39	-10000	-19.30	0.43
M-1.94-3.0-44	11136	5177	4620	4.90	3.09	5660	10.10	0.23	6350	14.90	0.12	6900	19.40	0.12
		-5177	-4100	-4.90	6.00	-5450	-9.78	0.66	-6290	-14.40	0.52	-5700	-19.30	0.50
M-1.94-3.0-53	12869	4633	4350	5.00	1.20	5282	9.76	0.41	6136	14.75	0.25	6475	19.16	0.34
		-4633	-4120	-5.12	0.83	-4653	-9.69	0.50	-5220	-13.65	0.30	-6037	-18.76	0.41
M-2.64-3.0-44	5313	3475	2990	7.16	3.80	2830	9.87	0.42	3460	14.67	0.33	4000	19.50	0.35
		-3475	-3096	-6.59	2.80	-3000	-9.78	0.37	-3880	-14.40	0.52	-4370	-19.15	0.52
M-2.64-3.0-53	4207	3622	3211	9.65	3.16	3113	14.81	0.68	3645	18.99	0.55	4253	24.21	0.48
		-3622	-2467	-9.65	3.10	-2976	-14.48	0.79	-3254	-18.12	0.42	-3974	-23.97	0.60
M-2.64-4.8-53	4227	3513	3078	10.15	1.40	3318	15.21	0.48	3785	19.58	0.35	4089	23.91	0.48
		-3513	-3386	-10.98	2.67	-3636	-14.60	0.91	-4367	-19.47	0.66	-4913	-24.36	0.77
M-2.64-7.2-53	4930	4131	3797	9.82	1.12	4235	14.56	0.23	4475	19.92	0.12			
		-4131	-4028	-9.68	5.00	-4564	-14.29	0.43	-3240	-17.94	0.14			

Tabla 5.8 Valores del parámetro  $\theta$ .

Muro	V <sub>m5</sub> (kg)	d <sub>m5</sub> (cm)	$\theta_5$	V <sub>m6</sub> (kg)	d <sub>m6</sub> (cm)	$\theta_6$	V <sub>m7</sub> (kg)	d <sub>m7</sub> (cm)	$\theta_7$	V <sub>m8</sub> (kg)	d <sub>m8</sub> (cm)	$\theta_8$	$\theta$	$\theta'$
M-0.53-3.0-44	28000	18.7	0.5	26650	21.5	0.33							0.42	
	-26650	-22.4	0.77											0.46
M-0.71-3.0-44	20300	16.1	0.24										0.78	
														0.26
M-0.71-3.0-53	20557	26.8	0.47	20137	31.53	0.58	17994	35.93	0.66				0.35	
	-19199	-25.06	0	-21061	-29.79	0	-19507	-34.45	0					0.56
M-1.23-3.0-53	12264	17.98	0.17	10896	22.76	0.25	9000	26.56	0.22				0.42	
	-12060	-19.72	0.41	-11855	-23.47	0.51	-9396	-29.07	0.64					0.36
M-1.23-4.8-53	13380	18.47	0.22	13595	24.68	0.45	11363	28.68	0.67				0.30	
	-14669	-19.16	0.31	-14327	-24.06	0.44	-12573	-28.75	0.66					0.63
M-1.23-7.2-53	15289	17.45	0.24	13908	21.54	0.31	13734	26.72	0.34	11329	30.80	0.38	0.49	
	-15341	-19.84	0.43	-13706	-22.92	0.55	-14552	-28.34	0.48	-12321	-34.11	0.44		0.42
M-1.30-3.0-44													0.45	
														1.06
M-1.94-3.0-44	6050	25.1	0.4	6100	29.2	0.37							0.72	
	-4350	-24.3	0.42	-5150	-28.7	0.69								0.56
M-1.94-3.0-53	7101	24.59	0.23	5119	27.32	0.36	5182	31.78	0.43	4530	35.77	0.71	0.49	
	-6076	-23.58	0.59	-6182	-28.29	0.88	-5624	-31.51	0.97	-5684	-37.66	1.01		0.69
M-2.64-3.0-44	3890	24.7	0.37	3500	29.2	0.4	3240	33.9	0.37				0.37	
	-4230	-24.3	0.64	-3780	-28.9	0.45	-3790	-33.6	0.4					0.48
M-2.64-3.0-53	4642	29.37	0.47	4085	33.62	0.5							0.97	
	-3769	-29.05	0.47	-2758	-34.68	0.26								0.94
M-2.64-4.8-53	4214	29.79	0.47	3736	33.66	0.39	3273	38.44	0.24				0.54	
	-4953	-28.53	0.67	-5122	-34.16	0.71	-4043	-37.93	0.48					0.98
M-2.64-7.2-53													0.49	
														0.29
												<b>Promedio</b>	0.54	0.59
												<b>CV</b>	0.36	0.46



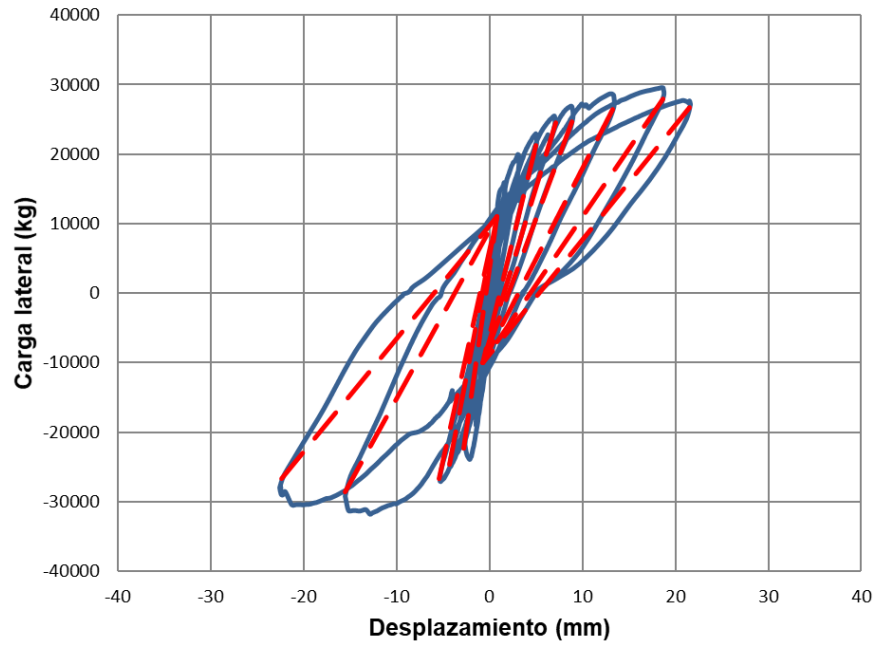


Figura 5.74 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-0.53-3.0-44.

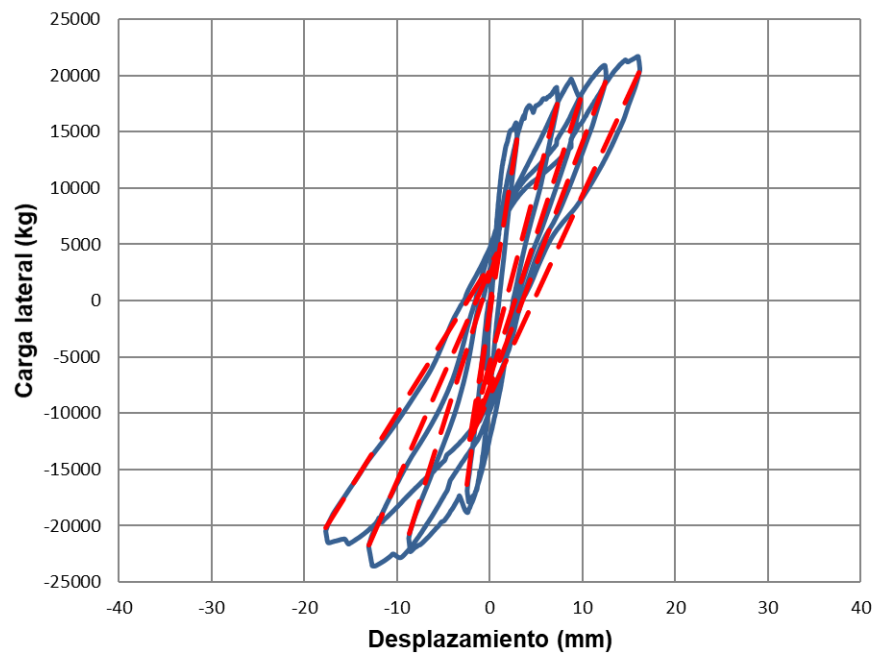


Figura 5.75 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-0.71-3.0-44.

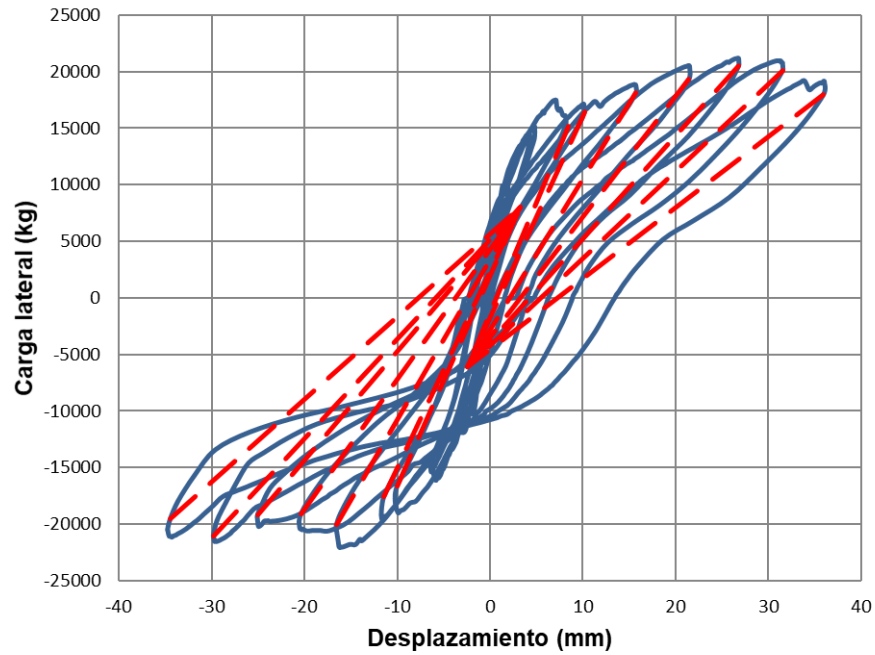


Figura 5.76 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-0.71-3.0-53.

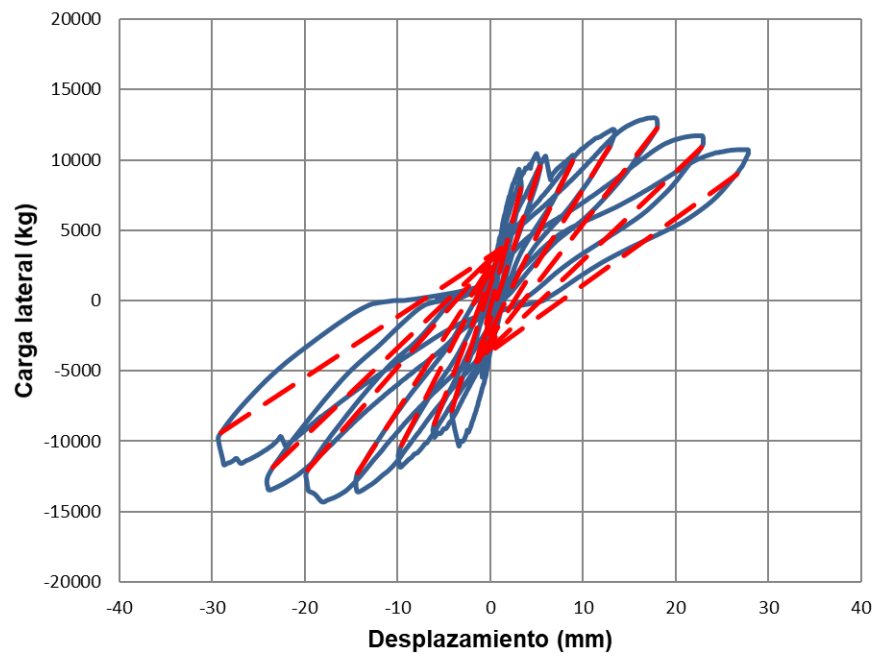


Figura 5.77 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-1.23-3.0-53.

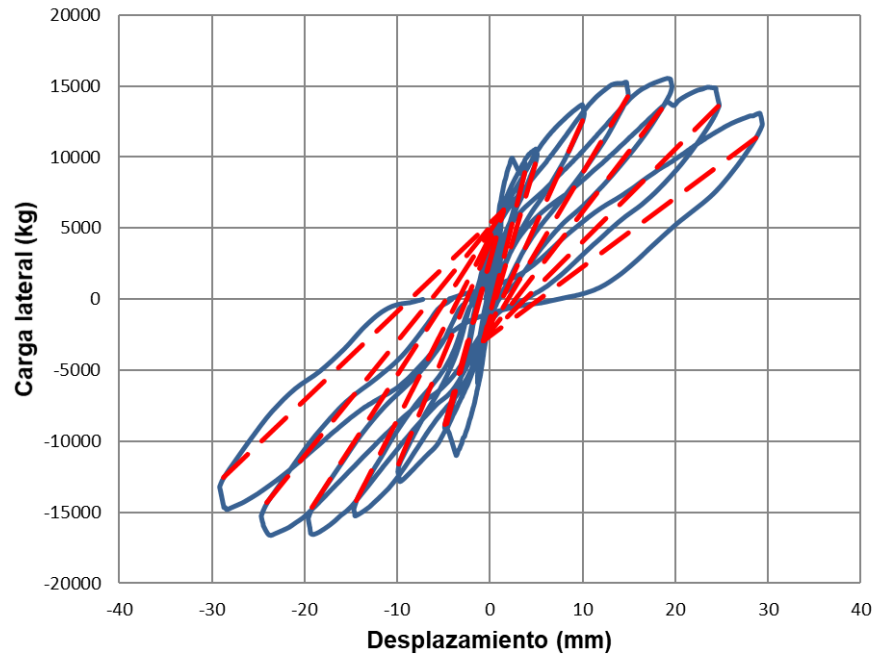


Figura 5.78 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-1.23-4.8-53.

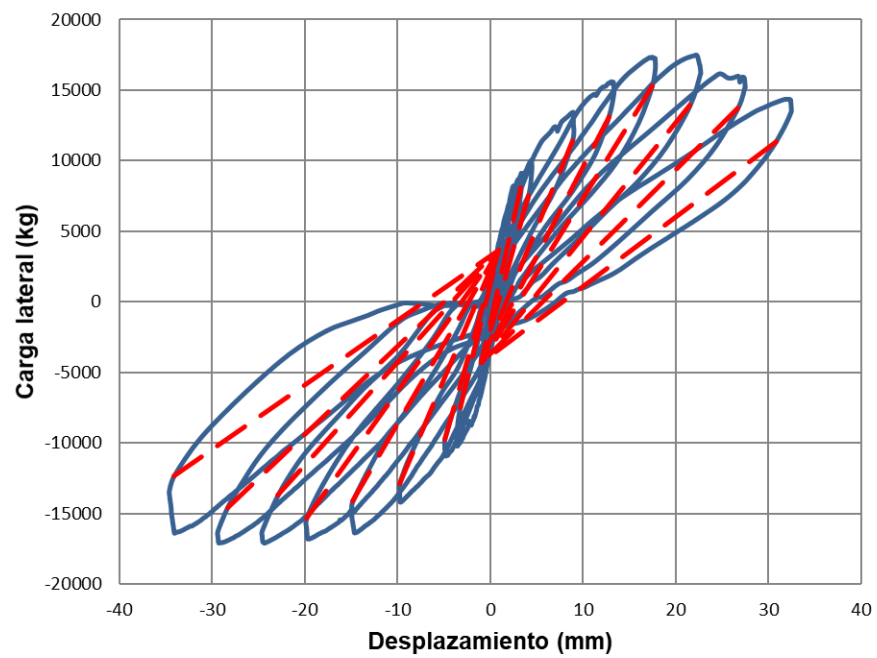


Figura 5.79 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-1.23-7.2-53.

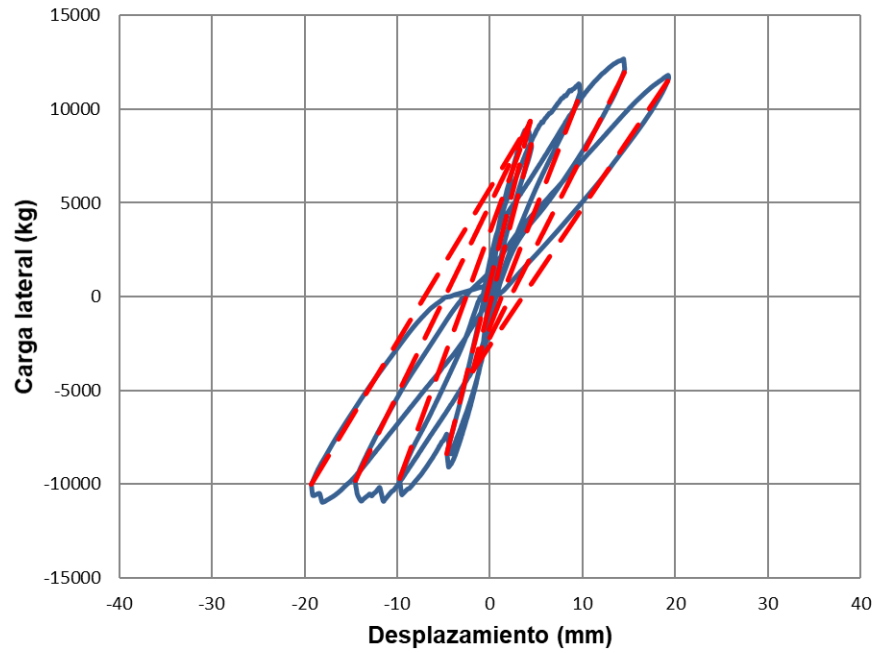


Figura 5.80 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-1.30-3.0-44.

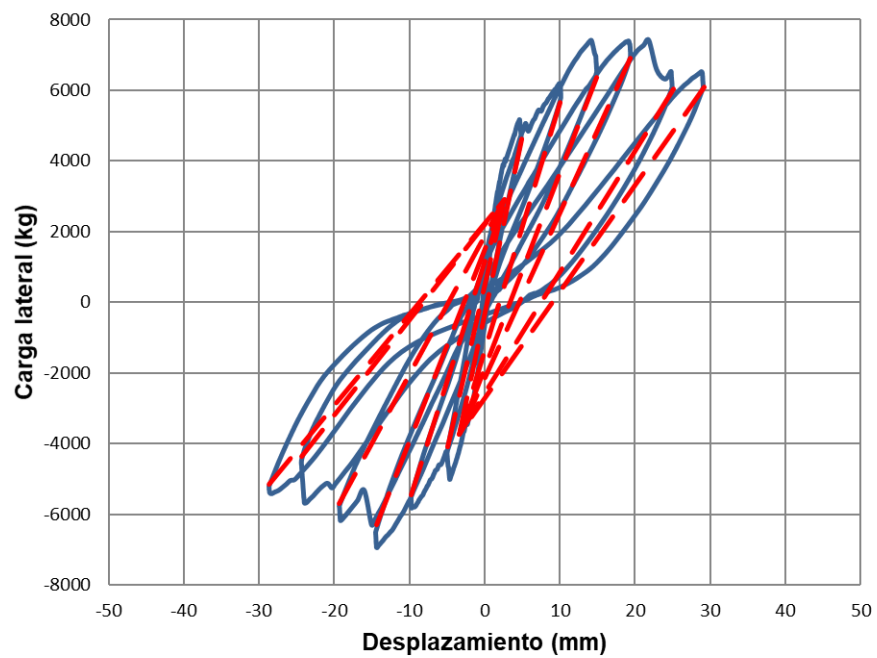


Figura 5.81 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-1.94-3.0-44.

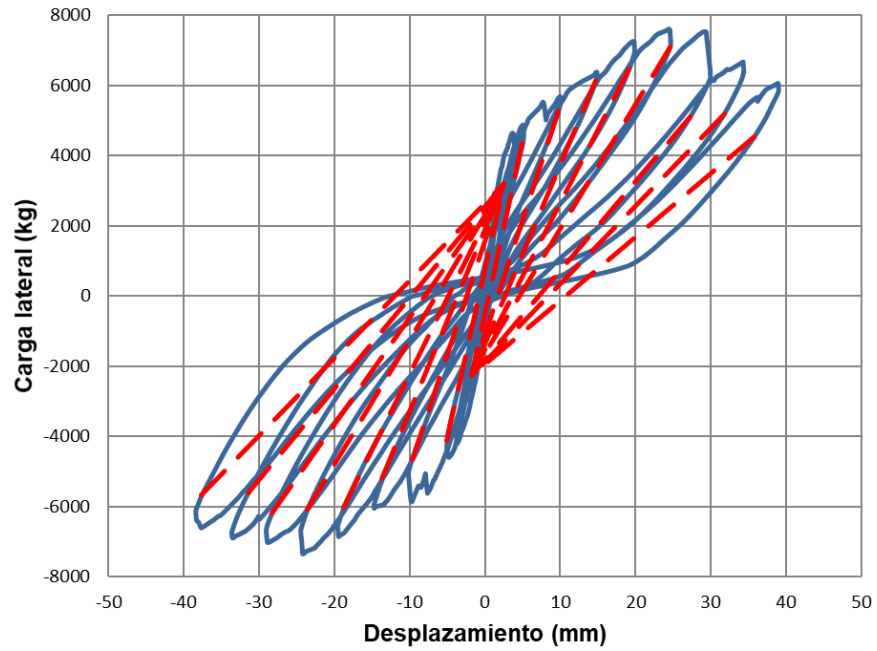


Figura 5.82 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-1.94-3.0-53.

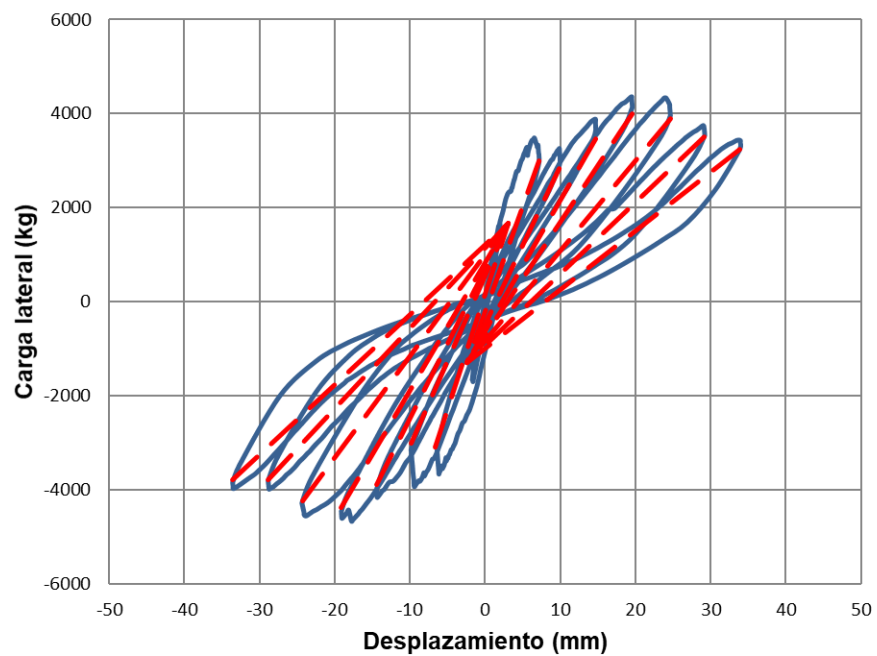


Figura 5.83 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-2.64-3.0-44.

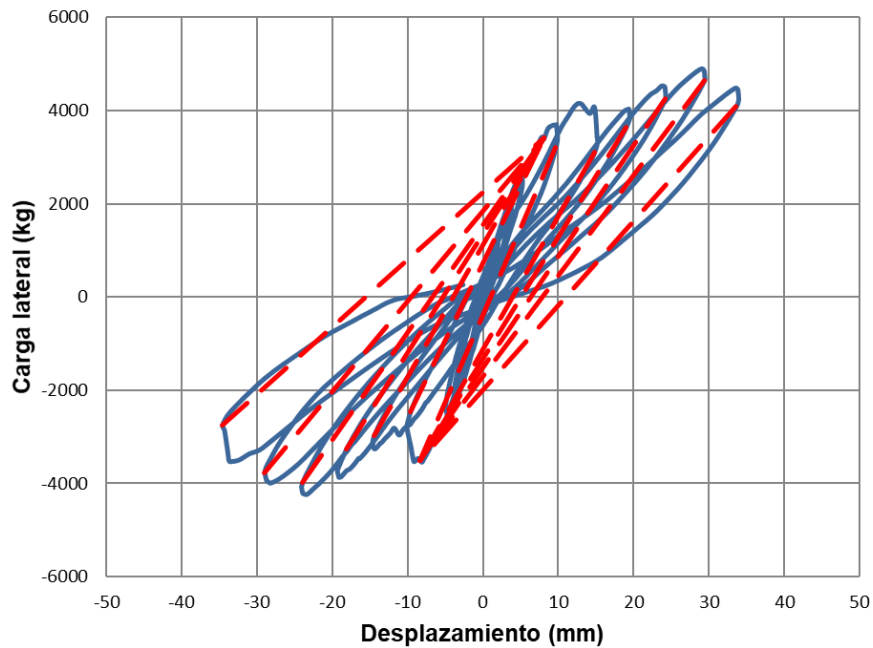


Figura 5.84 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-2.64-3.0-53.

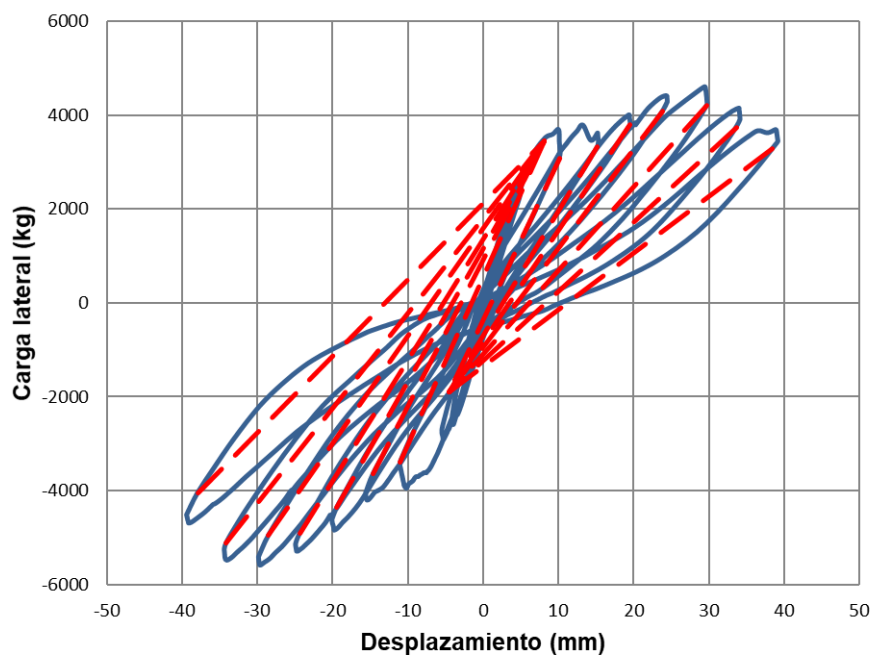


Figura 5.85 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-2.64-4.8-53.

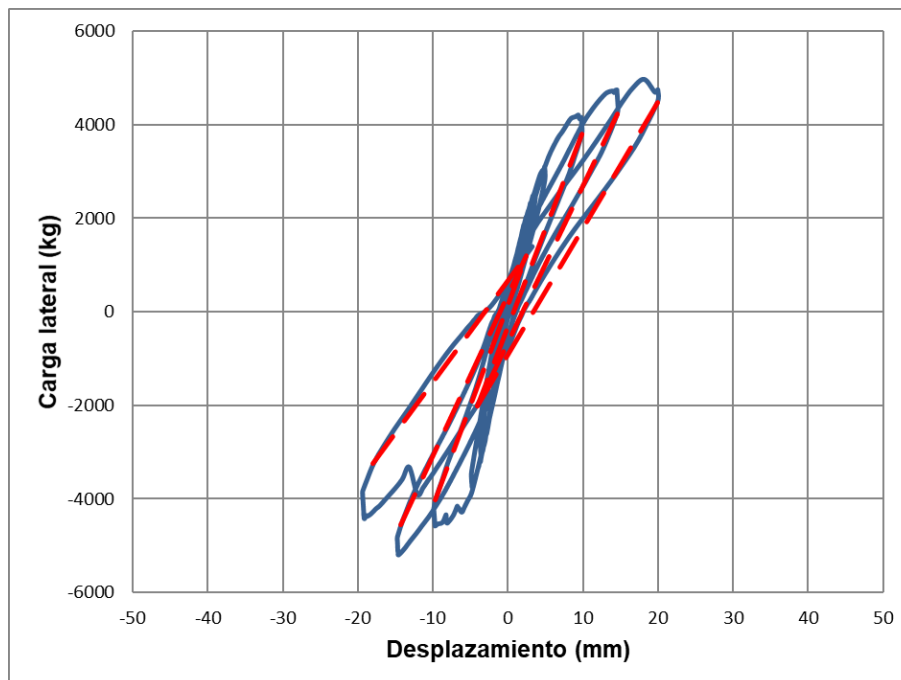


Figura 5.86 Ajuste del parámetro  $\theta$  para el muro M-2.64-7.2-53.

En la Tabla 5.10 se presentan los valores del parámetro  $\lambda_u$ . Se calcularon los valores de  $\lambda_u$  para cada ciclo posterior al de la carga máxima y para cada sentido de aplicación de carga ( $\lambda_{ui}$ ). Se observa que los valores del parámetro son similares conforme avanzan los ciclos y no presentan ninguna tendencia clara. Por tanto, se puede decir que la pérdida de resistencia es lineal entre ciclos del mismo sentido.

El valor de este parámetro se ajustó en los sentidos positivo y negativo ( $\lambda_u$  y  $\lambda'_u$ , respectivamente) con el promedio de los valores obtenidos para cada ciclo. La dispersión presentada en los valores del parámetro es demasiado grande, por lo que se recomienda utilizar los valores promedio independientes para cada muro.





<b>M-1.94-3.0-53</b>	0.36	7819	6943	7.19	0.13	7597	6648	9.31	0.14	7235	6313	11.06	0.14					0.14			
	-0.36	-7783	-6971	7.61	0.12	-7429	-6704	8.83	0.11	-7169	-6457	10.31	0.11						0.11		
<b>M-2.64-3.0-44</b>	0.65	4522	4077	3.36	0.14	4241	3689	4.27	0.17	4009	3491	5.21	0.16					0.16			
	-0.65	-5145	-4417	3.41	0.20	-4660	-3879	4.19	0.22	-4495	-3886	4.92	0.17						0.20		
<b>M-2.64-3.0-53</b>	0.86	5092	4385	3.72	0.19													0.19			
	-0.86	-4396	-3915	3.16	0.16	-3988	-3461	3.77	0.18										0.17		
<b>M-2.64-4.8-53</b>	0.83	4819	4165	4.07	0.18	4437	3877	4.72	0.16									0.17			
	-0.83	-5859	-5204	3.92	0.15	-5456	-4729	4.62	0.17										0.16		
<b>M-2.64-7.2-53</b>	0.84																				
	-0.84	-5694	-4180	2.09	0.51														0.51		
																		<b>Promedio</b>		0.15	0.19
																		<b>CV</b>		0.31	0.56

En la Tabla 5.11 se presentan los valores del parámetro  $\lambda_3$ . Se calcularon los valores de  $\lambda_3$  para cada ciclo posterior al de la carga máxima y para cada sentido de aplicación de carga ( $\lambda_{3i}$ ). Se observa que los valores del parámetro aumentan conforme avanzan los ciclos, es decir, el efecto de ablandamiento aumenta. De igual manera, el decremento de la rigidez posterior al agrietamiento es mayor en el primer ciclo posterior a la carga máxima, en el cual se observa un mayor efecto de ablandamiento.

El valor de este parámetro se ajustó en los sentidos positivo y negativo ( $\lambda_3$  y  $\lambda'_3$ , respectivamente) con el promedio de los valores obtenidos para cada ciclo. La dispersión presentada en los valores del parámetro es demasiado grande, por lo que se recomienda utilizar los valores promedio independientes para cada muro.

Tabla 5.11 Valores del parámetro  $\lambda_3$ .

Muro	$K_{pc}$ (kg/cm)	$\bar{K}_{pc1}$ (kg/cm)	$\mu_1$	$\lambda_{31}$	$\bar{K}_{pc2}$ (kg/cm)	$\mu_2$	$\lambda_{32}$	$\bar{K}_{pc3}$ (kg/cm)	$\mu_3$	$\lambda_{33}$	$\bar{K}_{pc4}$ (kg/cm)	$\mu_4$	$\lambda_{34}$	$\lambda_3$	$\lambda'_3$
<b>M-0.53-3.0-44</b>	3326	2347	12.41	0.32										0.32	
	7003	871	11.39	0.96											0.96
<b>M-0.71-3.0-44</b>	4480														
	8130	1716	5.36	0.97											0.97
<b>M-0.71-3.0-53</b>	1889	1886	4.02	0.00	754	4.76	0.76							0.38	
	4973	1918	2.59	1.00	1690	3.20	0.96	4973	3.88	0.00	4973	4.65	0.00		0.49
<b>M-1.23-3.0-53</b>	1889	1121	5.88	0.49	526	7.65	0.83							0.66	
	2701	857	6.82	0.80	522	8.12	0.92								0.86
<b>M-1.23-4.8-53</b>	4363	2791	7.03	0.42	2052	8.60	0.60	856	11.53	0.88				0.63	
	3993	2964	8.98	0.29	1261	11.40	0.75								0.52
<b>M-1.23-7.2-53</b>	5589	2176	9.81	0.68	674	11.90	0.96	580	15.05	0.96				0.87	
	4567	2291	10.67	0.55	1919	12.57	0.63	1621	15.33	0.69					0.62
<b>M-1.30-3.0-44</b>	3730	2947	4.00	0.28										0.28	
	2779	1913	3.88	0.42											0.42
<b>M-1.94-3.0-44</b>	2331	1120	3.59	0.72	783	4.39	0.86	489	6.28	0.94				0.84	
	1815	1059	3.40	0.59	793	4.58	0.72	507	5.83	0.87					0.73
<b>M-1.94-3.0-53</b>	1429	1249	7.19	0.15	893	9.31	0.42	740	11.06	0.53				0.37	
	1323	1013	7.61	0.27	913	8.83	0.35	654	10.31	0.56					0.39
<b>M-2.64-3.0-44</b>	677	430	3.36	0.52	392	4.27	0.55	338	5.21	0.62				0.56	
	1059	880	3.41	0.24	366	4.19	0.86	333	4.92	0.86					0.65
<b>M-2.64-3.0-53</b>	628	523	3.72	0.23										0.23	
	416	294	3.16	0.43	196	3.77	0.72								0.58
<b>M-2.64-4.8-53</b>	512	447	4.07	0.17	286	4.72	0.56							0.36	
	966	768	3.92	0.27	316	4.62	0.86								0.57
<b>M-2.64-7.2-53</b>	858														
	1714	1017	2.09	0.78											0.78
													<b>Promedio</b>	0.51	0.67
													<b>CV</b>	0.45	0.29

En la Tabla 5.12 se presentan los valores del parámetro  $\varepsilon$ . Este parámetro se calibró en los sentidos positivo y negativo ( $\varepsilon$  y  $\varepsilon'$ , respectivamente). Se presentan los valores promedio para  $d_u$  y  $d_e$ , considerando todos los ciclos posteriores al agrietamiento. Se

calculó el promedio de los sentidos positivo y negativo para considerar el daño en ambos sentidos. Se observa que al aumentar la relación de aspecto de los muros los valores del parámetro  $\bar{\varepsilon}$  tienden a aumentar, mientras que para relaciones de aspecto pequeñas los valores tienden a cero. Esto se puede justificar analizando el patrón de agrietamiento de los muros. Los muros con menor relación de aspecto tienden a acumular el daño en una sola grieta la cual se abre y cierra sin mayor acomodo. En los muros con relación de aspecto mayor el daño se reparte en diversas grietas pequeñas las cuales permiten un mayor desplazamiento sin resistencia generando el efecto de estrangulamiento en la curva de histéresis. La dispersión presentada en los valores del parámetro es demasiado grande, por lo que se recomienda utilizar los valores promedio independientes para cada muro.

Tabla 5.12 Valores del parámetro  $\varepsilon$ .

Muro	$d_u$ (cm)	$d_e$ (cm)	$\varepsilon$	$d'_u$ (cm)	$d'_e$ (cm)	$\varepsilon'$	$\bar{\varepsilon}$
<b>M-0.53-3.0-44</b>	0.31	0.00	0.00	-0.52	0.00	0.00	0.00
<b>M-0.71-3.0-44</b>	0.34	0.00	0.00	-0.20	0.00	0.00	0.00
<b>M-0.71-3.0-53</b>	0.53	0.00	0.00	-0.12	0.00	0.00	0.00
<b>M-1.23-3.0-53</b>	0.28	0.01	0.02	-0.39	-0.25	0.63	0.33
<b>M-1.23-4.8-53</b>	0.33	0.05	0.14	-0.38	-0.07	0.18	0.16
<b>M-1.23-7.2-53</b>	0.35	0.09	0.26	-0.41	-0.09	0.22	0.24
<b>M-1.30-3.0-44</b>	0.09	0.01	0.12	-0.27	-0.07	0.27	0.20
<b>M-1.94-3.0-44</b>	0.32	0.24	0.75	-0.54	-0.39	0.72	0.74
<b>M-1.94-3.0-53</b>	0.60	0.52	0.86	-0.73	-0.67	0.91	0.89
<b>M-2.64-3.0-44</b>	0.48	0.44	0.91	-0.48	-0.46	0.95	0.93
<b>M-2.64-3.0-53</b>	0.64	0.44	0.69	-0.76	-0.47	0.62	0.66
<b>M-2.64-4.8-53</b>	0.73	0.45	0.61	-0.78	-0.55	0.71	0.66
<b>M-2.64-7.2-53</b>	0.23	0.00	0.00	-0.33	0.00	0.00	0.00
	<b>Promedio</b>		0.36	<b>Promedio</b>		0.43	0.40
	<b>CV</b>		1.02	<b>CV</b>		0.83	0.89

En la Tabla 5.13 se presentan los valores del parámetro  $\lambda_s$ . Este parámetro se calibró en los sentidos positivo y negativo ( $\lambda_s$  y  $\lambda'_s$ , respectivamente). Se presentan los valores promedio para  $\bar{V}_m$  y  $d_m$ , considerando todos los ciclos posteriores al agrietamiento. Se calculó el promedio de los sentidos positivo y negativo para considerar el daño en ambos sentidos. Se observa que al aumentar la relación de aspecto de los muros los valores del parámetro  $\bar{\lambda}_s$  tienden a disminuir, mientras que para relaciones de aspecto pequeñas los valores tienden a uno. Igual que para el parámetro  $\varepsilon$ , esto se puede justificar con el patrón de agrietamiento presentado en los muros. La dispersión presentada en los valores del parámetro es demasiado grande, por lo que se recomienda utilizar los valores promedio independientes para cada muro.

Tabla 5.13 Valores del parámetro  $\lambda_s$ .

Muro	$V_e$ (kg)	$\bar{V}_m$ (kg)	$d_m$ (cm)	$\lambda_s$	$V'_e$ (kg)	$\bar{V}'_m$ (kg)	$d'_m$ (cm)	$\lambda'_s$	$\bar{\lambda}_s$
M-0.53-3.0-44	29520	29520	2.31	1.00	-31800	-31800	-2.13	1.00	1.00
M-0.71-3.0-44	21730	21730	1.65	1.00	-22748	-23621	-1.81	0.92	0.96
M-0.71-3.0-53	21222	21222	3.05	1.00	-22059	-22059	-2.53	1.00	1.00
M-1.23-3.0-53	11907	13010	2.34	0.89	-6875	-14328	-2.38	0.54	0.72
M-1.23-4.8-53	9301	15275	2.30	0.53	-8415	-16585	-2.52	0.41	0.47
M-1.23-7.2-53	13818	17320	2.54	0.72	-9205	-16792	-2.66	0.41	0.57
M-1.30-3.0-44	11097	12685	1.88	0.76	-7542	-10885	-1.64	0.58	0.67
M-1.94-3.0-44	3900	7416	2.16	0.38	-3049	-6930	-2.19	0.33	0.36
M-1.94-3.0-53	3457	7600	3.16	0.27	-2346	-7367	-3.15	0.17	0.22
M-2.64-3.0-44	1863	4353	2.70	0.27	-2194	-4670	-2.57	0.31	0.29
M-2.64-3.0-53	3280	4902	3.18	0.41	-2891	-4237	-2.90	0.48	0.45
M-2.64-4.8-53	2576	4596	3.42	0.19	-2970	-5577	-3.44	0.16	0.18
M-2.64-7.2-53	4971	4971	2.02	1.00	-5202	-5202	-1.84	1.00	1.00
			<b>Promedio</b>	0.62			<b>Promedio</b>	0.53	0.57
			<b>CV</b>	0.51			<b>CV</b>	0.57	0.52

En la Figura 5.87 a Figura 5.99 se presenta la comparación entre la curva carga lateral-desplazamiento experimental y el modelo de histéresis propuesto. Se emplearon los parámetros calculados para cada muro y para cada sentido de aplicación de carga. Se observa que el ajuste del modelo propuesto a la curva experimental es parcialmente adecuado. En los ciclos previos a la carga máxima se observa un buen ajuste ya que los desplazamientos laterales aún son pequeños y los valores promedio calculados del parámetro  $\theta$  no afectan sustancialmente a estos ciclos. Para los ciclos posteriores, los valores de este parámetro no ajustan correctamente, lo cual se observa en la descarga elástica de cada ciclo. Esto ocurre porque se consideró el promedio de todos los ciclos, lo cual afecta a los ciclos con mayores desplazamientos laterales. Debido a esto se recomienda utilizar el modelo de histéresis sin degradación.

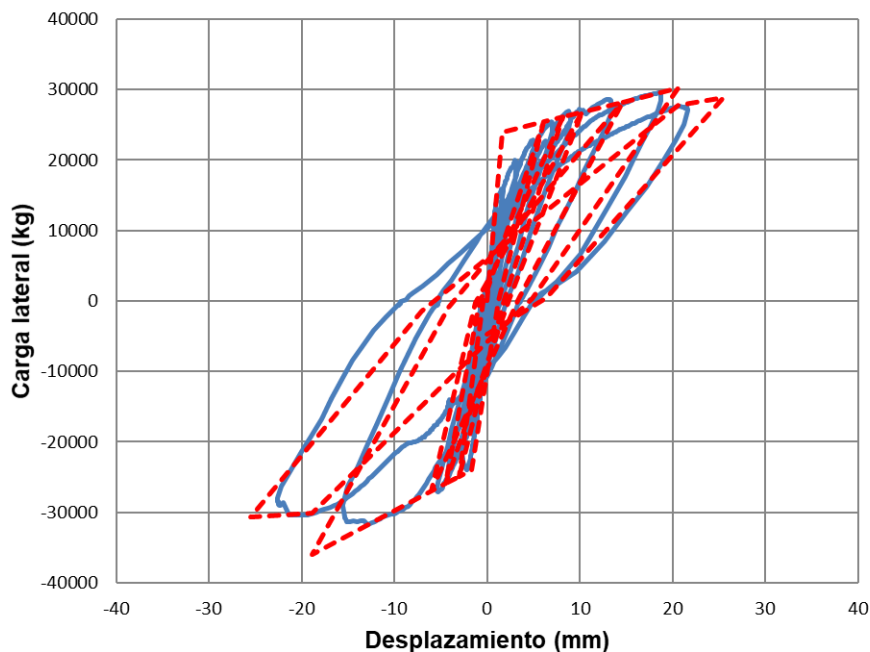


Figura 5.87 Modelo de histéresis del muro M-0.53-3.0-44.

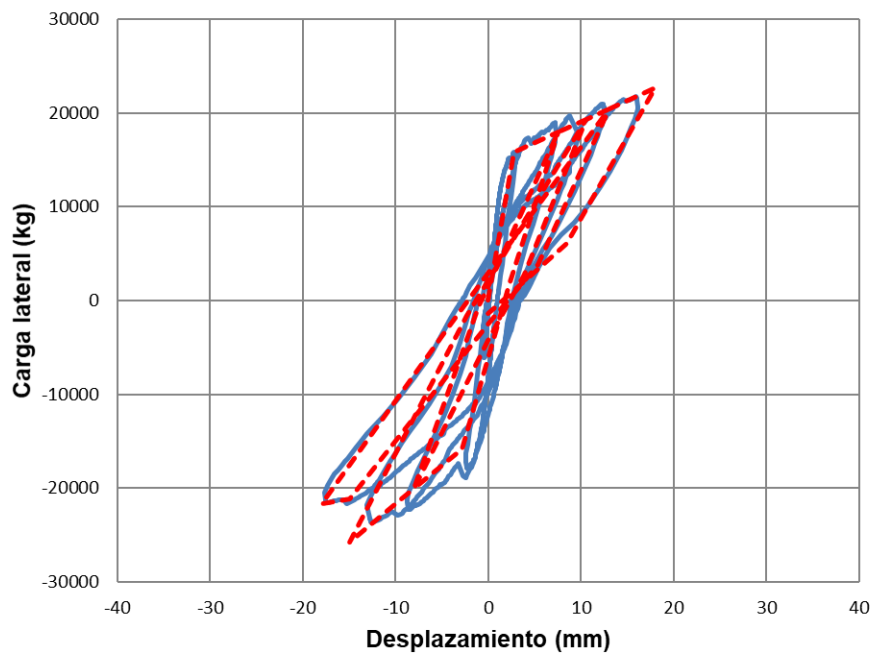


Figura 5.88 Modelo de histéresis del muro M-0.71-3.0-44.

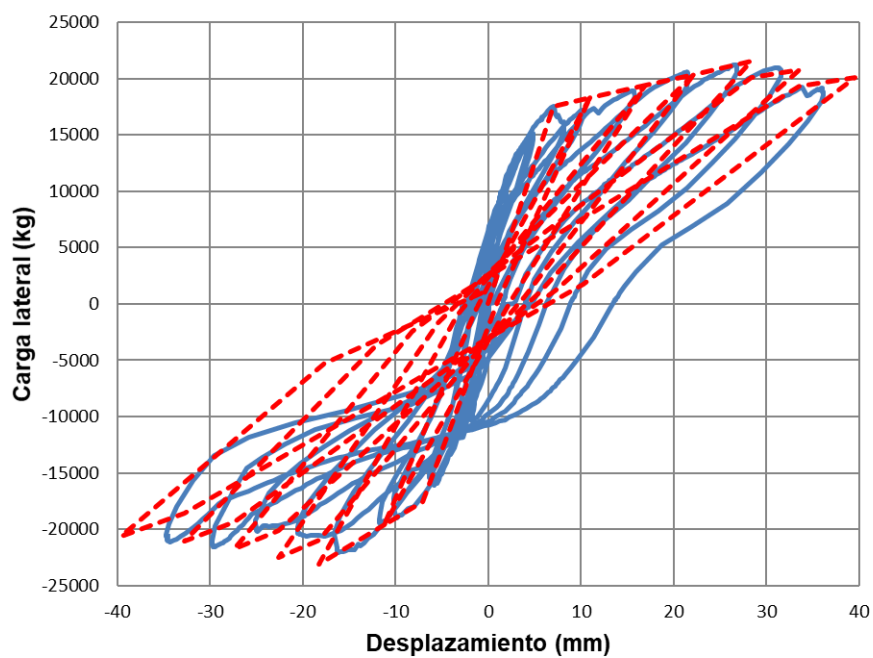


Figura 5.89 Modelo de histéresis del muro M-0.71-3.0-53.

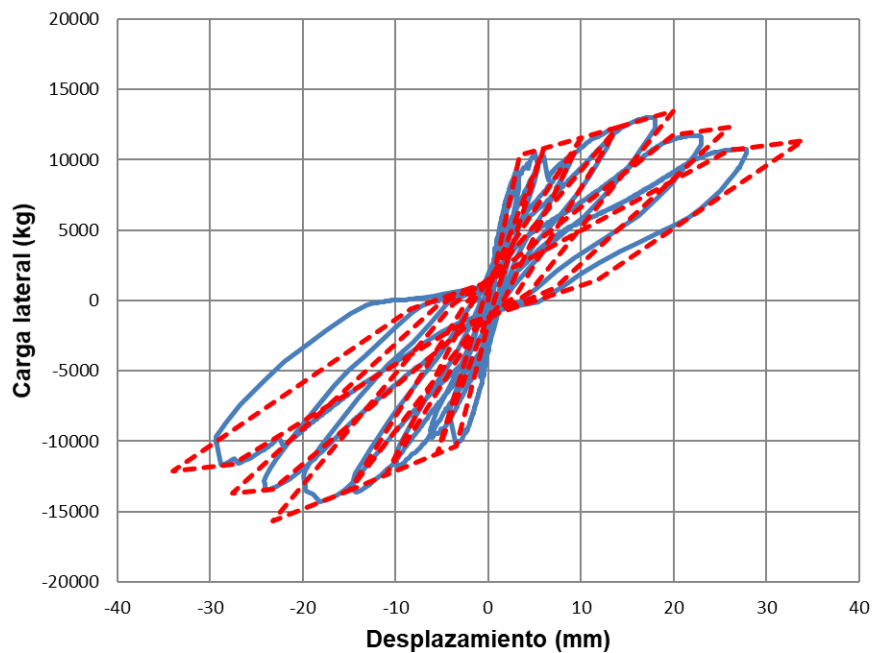


Figura 5.90 Modelo de histéresis del muro M-1.23-3.0-53.

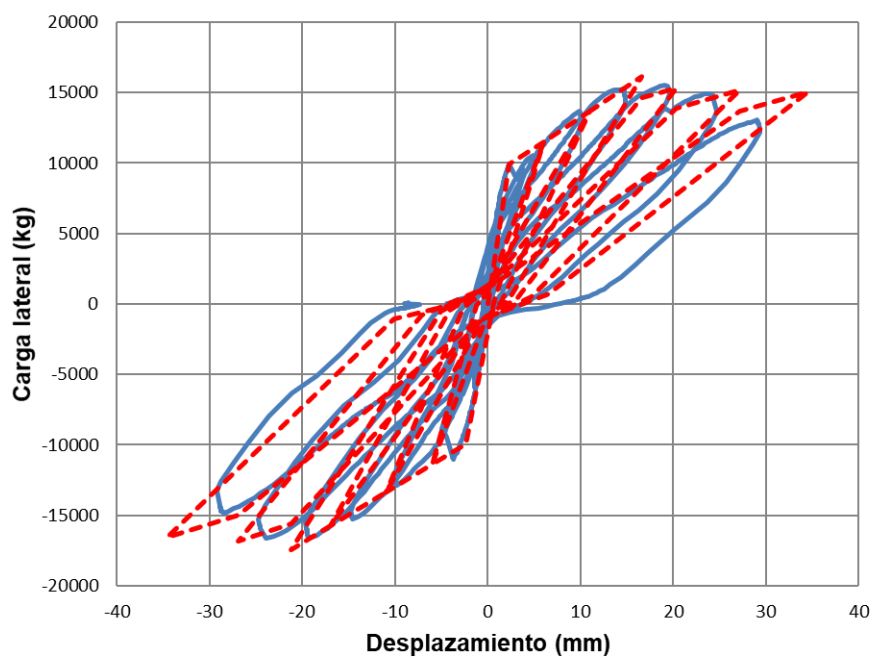


Figura 5.91 Modelo de histéresis del muro M-1.23-4.8-53.



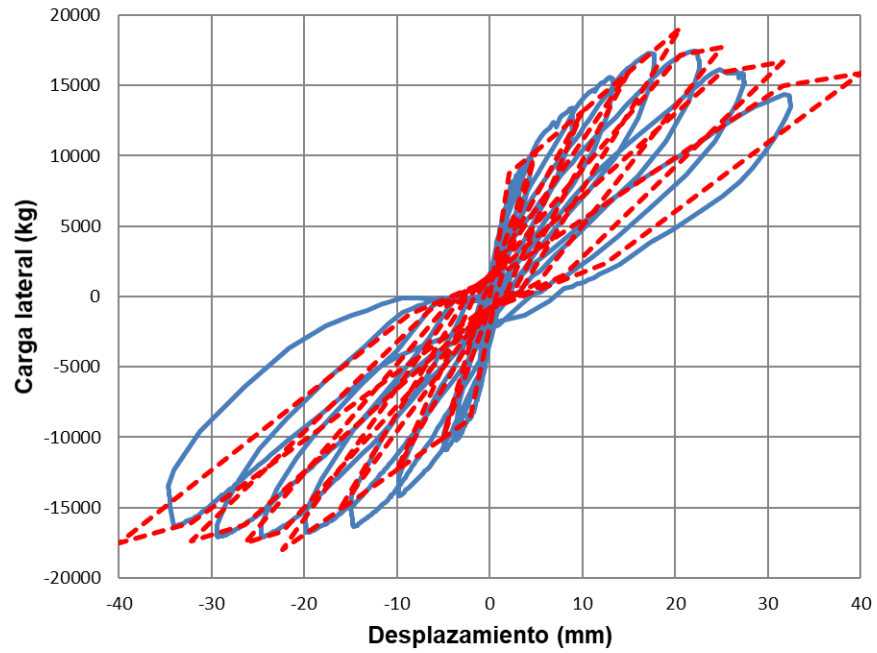


Figura 5.92 Modelo de histéresis del muro M-1.23-7.2-53.

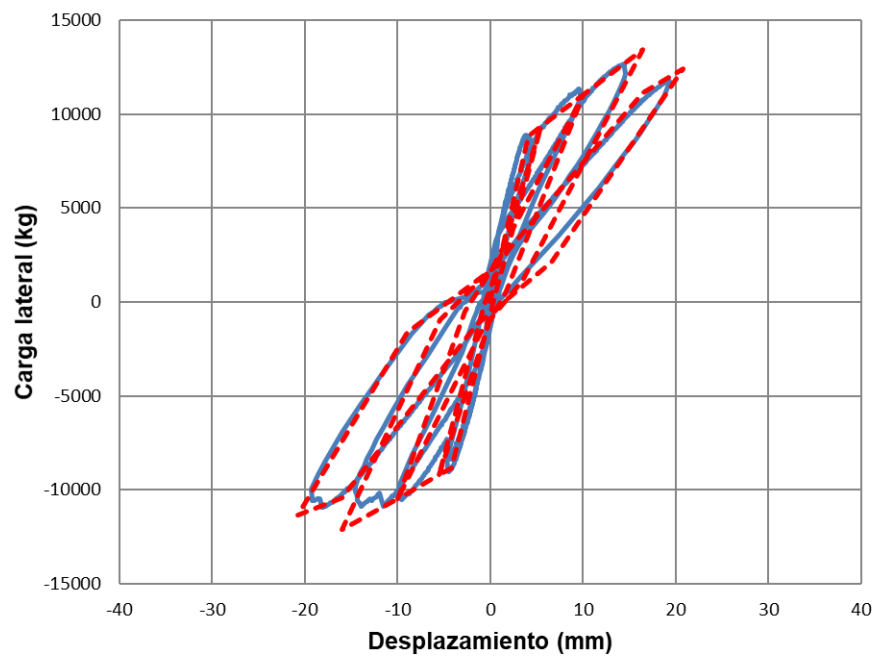


Figura 5.93 Modelo de histéresis del muro M-1.30-3.0-44.

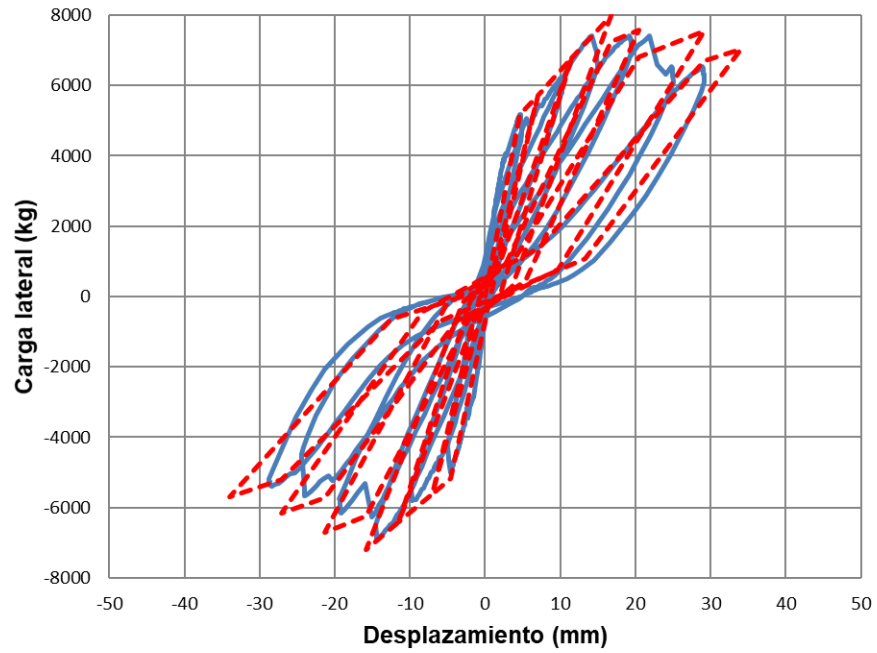


Figura 5.94 Modelo de histéresis del muro M-1.94-3.0-44.

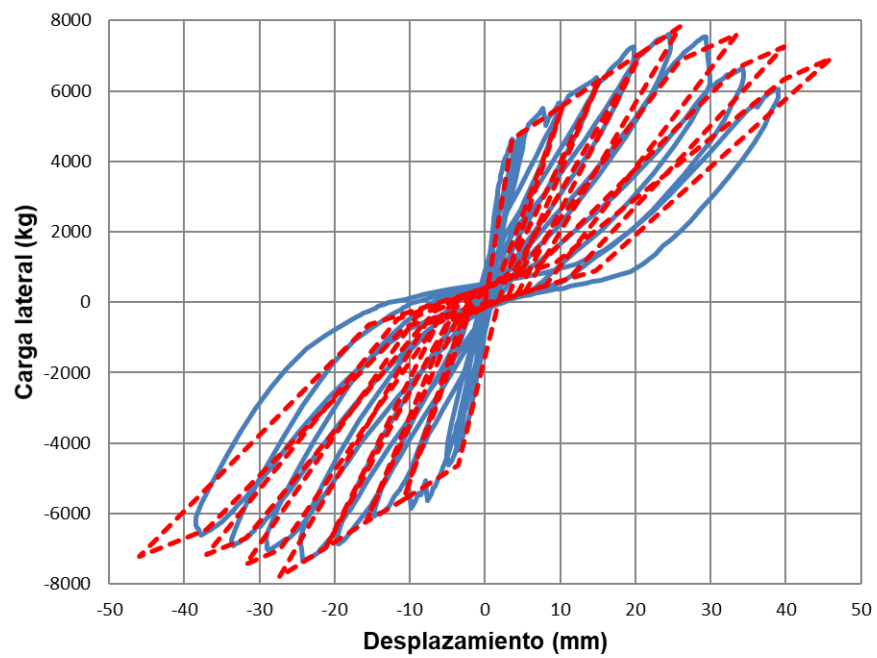


Figura 5.95 Modelo de histéresis del muro M-1.94-3.0-53.

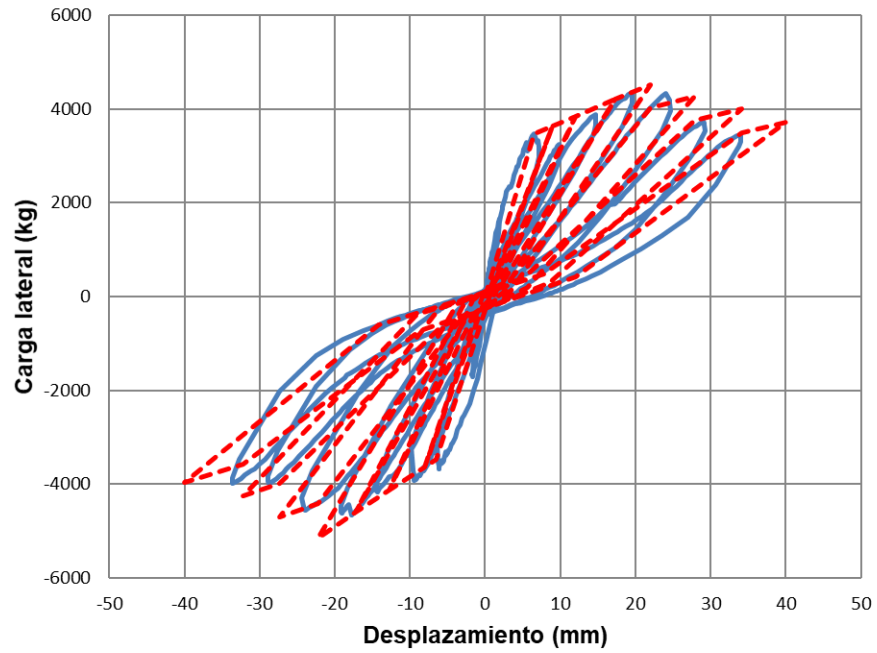


Figura 5.96 Modelo de histéresis del muro M-2.64-3.0-44.

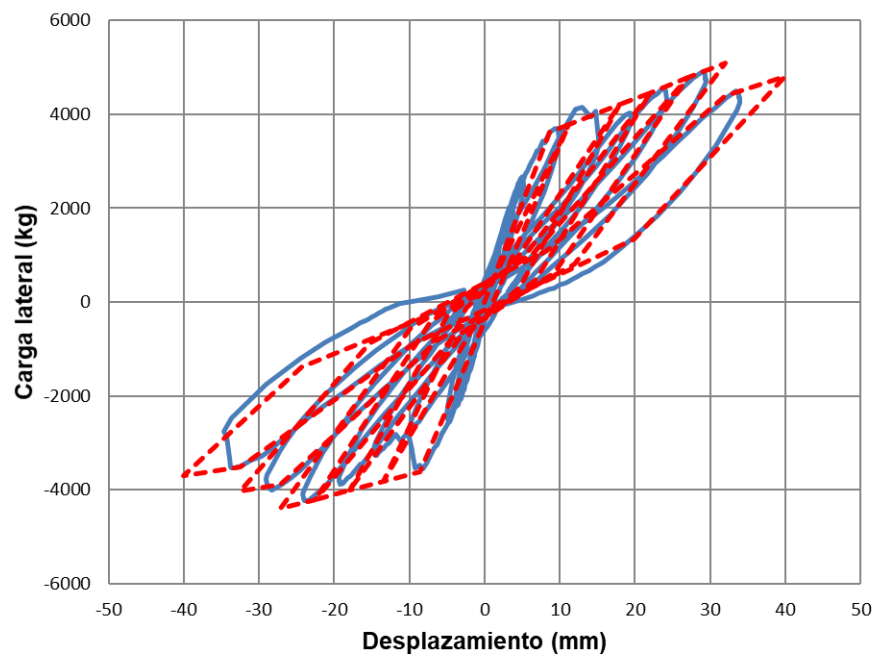


Figura 5.97 Modelo de histéresis del muro M-2.64-3.0-53.

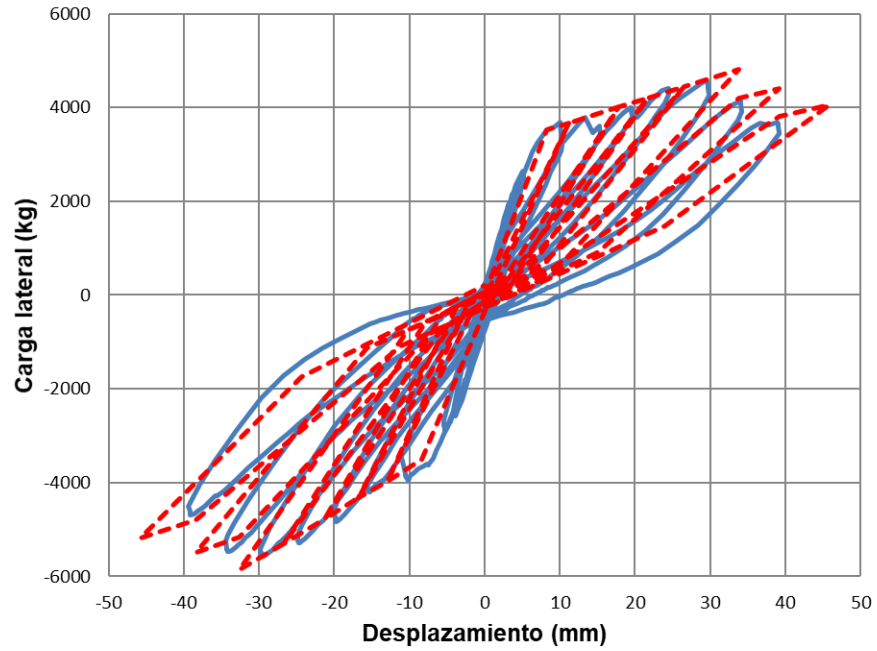


Figura 5.98 Modelo de histéresis del muro M-2.64-4.8-53.

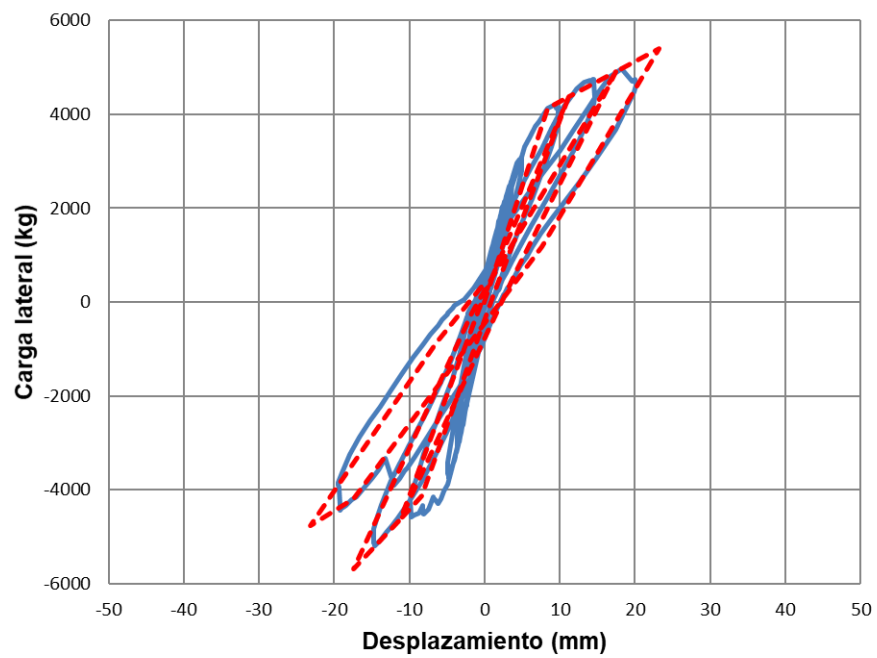


Figura 5.99 Modelo de histéresis del muro M-2.64-7.2-53.

## CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

El objetivo general de este trabajo de investigación fue desarrollar modelos de histéresis para muros de mampostería confinada de CCA con comportamiento dominado por cortante. Este trabajo es parte de un proyecto de investigación, en el cual se realizaron estudios experimentales considerando como variables de estudio la relación de aspecto ( $H/L$ ) y el esfuerzo axial ( $\sigma$ ) del muro. En este trabajo se ensayaron cuatro muros a escala natural. Se desarrollaron dos modelos de histéresis con base en los estudios experimentales de este trabajo y los obtenidos por otros autores (Fernández 2019, Naal 2019, Pinto 2018, Varela et al. 2018). A partir de los resultados experimentales y analíticos se formulan las siguientes conclusiones:

- La resistencia a cortante de los muros depende de su relación de aspecto. Conforme esta relación aumenta, la resistencia a cortante disminuye.
- El primer agrietamiento en los muros depende de su relación de aspecto. En los muros con mayor relación de aspecto se presentó primero un agrietamiento por flexo-cortante, mientras que en los muros con menor relación de aspecto se presentó primero un agrietamiento por cortante.
- El patrón de agrietamiento final fue en forma de “X”. Las grietas se presentaron en los bloques de CCA, por lo que se considera que los muros tuvieron un comportamiento monolítico.
- Debido a que el daño producido en un sentido afecta el comportamiento del sentido opuesto, se observa que la curva de histéresis experimental es asimétrica. Por lo tanto, para los modelos de histéresis, se recomienda utilizar parámetros (exceptuando  $\alpha$ ) para cada sentido de aplicación de carga. Sin embargo, el promedio es calculado para considerar el daño en ambos sentidos.
- Para los modelos de histéresis se propusieron dos valores de  $\alpha$ , dependientes del momento de inercia utilizado para el cálculo de la rigidez analítica ( $K_{tr}$ ,  $K_g$ ). Para la inercia transformada se propuso un  $\alpha$  promedio de 0.42 y para la inercia gruesa se propuso un  $\alpha_g$  promedio de 1.07. La dispersión de estos valores es alta, por lo que se recomienda utilizar los valores calculados para cada muro.

- Del modelo de histéresis sin degradación de resistencia: Los valores de los parámetros  $\gamma$  y  $\delta$  tienden a aumentar si la relación de aspecto o el esfuerzo axial del muro aumentan. El valor del parámetro  $\theta$  no presenta ninguna tendencia clara. En general, la dispersión de los valores de cada parámetro obtenido para cada muro es alta, por lo que se recomienda usar los valores calculados para cada muro. El modelo propuesto ajusta adecuadamente las curvas experimentales de los muros, aunque, para los muros con menor relación de aspecto la rigidez inicial y la resistencia del muro serán sobrestimadas en alguno de los sentidos de aplicación de carga.
- Del modelo de histéresis con degradación de resistencia: Los valores de los parámetros  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\theta$  presentan el mismo comportamiento que en el modelo sin degradación. Los valores de los parámetros  $\lambda_u$  y  $\lambda_3$  no presentan ninguna tendencia clara. Se considera que la degradación de resistencia es lineal conforme avanzan los ciclos. Se observó que al aumentar el desplazamiento el efecto de ablandamiento aumenta. Sin embargo, la mayor degradación de rigidez posterior al agrietamiento se presenta en el primer ciclo posterior al de carga máxima. El valor del parámetro  $\varepsilon$  aumenta conforme la relación de aspecto aumenta. El valor del parámetro  $\lambda_s$  disminuye conforme la relación de aspecto aumenta. En general, la dispersión de los valores de cada parámetro obtenido para cada muro es alta, por lo que se recomienda usar los valores calculados para cada muro. El modelo propuesto ajusta parcialmente las curvas experimentales de los muros. Los ciclos previos a la carga máxima ajustan correctamente, mientras que los posteriores son afectados por el valor de  $\theta$  promedio utilizado. Al aumentar el desplazamiento lateral, la recta de descarga elástica no ajusta correctamente.
- Se recomienda utilizar el modelo de histéresis sin degradación. Este modelo ajusta mejor el comportamiento del muro sujeto a cargas laterales. Además, debido a que posterior a la carga máxima la rigidez residual es muy pequeña, el modelo no permite un daño mayor en el muro.

## CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA

1. ACI (2013). Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures (TMS 402-13/ ACI 530 / ASCE 5-13; TMS 602-13 / ACI 530.1-13 / ASCE 6-13). 2013 edition. Farmington Hills, MI.
2. Aguilar G., Meli R., Díaz R. y Vázquez-del-Mercado R. (1996). Influence of horizontal reinforcement on the behavior of confined masonry walls. In “Eleventh World Conference on Earthquake Engineering”, National Center for Disaster Prevention, No. 1380, CDMX, México.
3. Alcocer R.A. (2017). Ecuaciones de diseño por cortante para muros confinados de CCA. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
4. Alcocer S.M. y Zepeda J.A. (1999). Behavior of multi-perforated clay brick walls under earthquake-type loading. In “Proceedings, eighth North American masonry conference”, CDROM.
5. Alcocer S.M., Ruiz J., Pineda J.A. y Zepeda J.A. (1996). Retrofitting of confined masonry walls with welded wire mesh. In “World conference on earthquake engineering”, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Acapulco; México.
6. ASTM – American Society for Testing and Materials (2017). Standard Specification for Autoclaved Aerated Concrete (AAC), ASTM C1693-11 (2017), ASTM International, West Conshohocken, PA.
7. ASTM - American Society for Testing and Materials (2013). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Masonry Units, ASTM C1006-07 (2013), ASTM International, West Conshohocken, PA.
8. ASTM - American Society for Testing and Materials (2018a). Standart Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM C39/C39M-18, ASTM International, West Conshohocken, PA.
9. ASTM - American Society for Testing and Materials (2018b). Standart Test Method and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. ASTM A370-18, ASTM International, West Conshohocken, PA.

10. ASTM – American Society for Testing and Materials (2018c). Standart Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). ASTM C78/C78M-18, ASTM International, West Conshohocken, PA.
11. ASTM – American Society for Testing and Materials (2016). Standart Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50–mm] Cube Specimens). ASTM C109/C109M-16a, ASTM International, West Conshohocken, PA.
12. Argudo J. (2003). Evaluation and synthesis of experimental data for Autoclaved Aerated Concrete, PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin, Texas, USA.
13. Bose, S. y Rai DC (2014). Behavior of AAC infilled RC frame under lateral loading, In Proceedings of the 10th National Conference in Earthquake Engineering, Anchorage, Alaska, Julio 21-25.
14. Bourzam A., Goto T. y Miyajima M. (2008). Shear capacity prediction of confined masonry walls subjected to cyclic lateral loading. “Structural engineering/earthquake engineering”, JSCE, Vol. 25, No. 2, 47s – 59s.
15. Chim R.U. (2017). Comportamiento a cortante en muros confinados de concreto celular de autoclave: Efecto de la relación de aspecto, Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
16. Cruz A.I., Pérez-Gavilán J.J. y Flores L. (2019). Experimental study of in-plane shear strength of confined concrete masonry walls with joint reinforcement. “Journal Engineering Structures”, Vol. 182, 213 – 226.
17. D. Ferretti E. M (2015). Cracking in autoclaved aerated concrete: Experimental investigation an XFEM modeling. "Cement and concrete research" (67), 156-167.
18. Drysdale G. R., y Hamid A. (2008). Masonry Structures Behavior and Design, 3° edition, The Masonry Society, Boulder Colorado.
19. Fernández Baqueiro L.E., Sosa Moreno M.I. y Varela Rivera J.L. (2014). Resistencia en el plano de muros de mampostería confinada: efecto de la relación de aspecto. En “Memorias del XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural”, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco, México.



20. Haach V.G., Vasconcelos G. y Lourenco P.B. (2010). Experimental analysis of reinforced concrete block masonry walls subjected to in-plane cyclic loading. Journal of Structural Engineering, 136 (4), 452 – 462.
21. Hernández M. y García L. (2015). Block Celular AAC4 y AAC6, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (Informe Técnico No. 222/223).
22. Mandirola M., Penna A., Rota M., Magenes G. (2012) Experimental Assessment of the Shear Response of Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Masonry with Flat Truss Bed-Join Reinforcement, In proceedings of the 15th International Brick and Block Masonry Conference, Florianopolis, Brazil, Junio 03-06.
23. Marinalli A. y Castilla E. (2004). Experimental evaluation of confined masonry walls with several confining-columns. In “13th World Conference on Earthquake Engineering”, August 1-6, No. 2129, Vancouver, B.C., Canada.
24. Marinalli A. y Castilla E. (2016). Evaluación sismorresistente de muros de mampostería confinada con dos o más machones. Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V., Vol. 31, 598-621.
25. Moreno Eric I. Solís Romel G., Varela Jorge L. y Gómez Marco A. (2016). Resistencia a tensión del concreto elaborado con agregado calizo de alta absorción. Concreto y Cemento. Investigación y desarrollo, Volumen 8, No.1, 35-45, Julio.
26. Narayanan, K.R. (2000). Structure and properties of aerated concrete: a review, "Cement & concrete Composites" (22) 321-329.
27. GCM – Gobierno de la Ciudad de México (2017). Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, “Gaceta Oficial de la Ciudad de México”, México.
28. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S. C. (2015a). Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes-método de ensayo, ONNCCENMX-C-083-ONNCCE-2002, Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México, México.
29. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S. C. (2011). Determinación de la resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante de muretes, así como determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla o de concreto-

- métodos de ensayo, NMX-C-464-ONNCCE-2010, Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México, México.
30. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S. C. (2015b). Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro, NMX-C-191-ONNCCE-2015, Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México, México.
31. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S. C. (2015c). Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos, NMX-C-061-ONNCCE-2015, Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México, México.
32. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S. C. (2014). Industria de la construcción-Concreto-Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto-Método de prueba, NMX-C-083-ONNCCE-2014, Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México, México.
33. Pérez Gavilán J.J., Flores L. y Alcocer S. (2013). Efecto de la esbeltez en la resistencia de muros de mampostería confinada. Revista de Ingeniería Sísmica, Vol. 89, 55-76.
34. Pérez Gavilán J.J., Flores L, y Alcocer S. (2011). An experimental study of confined masonry walls with varying aspect ratio, Earthquake Spectra, 31(2):945-968.
35. Pinto, J.A. (2018). Comportamiento a cortante de muros de mampostería confinada con baja relación de aspecto sujetos a cargas laterales, Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán, México.
36. Quiroz, L., Maruyama, Y., y Zavala, C. (2014). Cyclic behavior of Peruvian confined masonry walls and calibration of numerical model using genetic algorithms, ELSEVIER Journal of Engineering Structures, 75:561-576.
37. Ravichandran Shiv Shanker, Richard E: Klingner (2012). Behavior of Steel Moment Frames with Autoclaved Aerated Concrete Infills, ACI Structural Journal, Volume 109, Issue 1, 83-90, Enero 2012.
38. Raygoza L.E. (2012). Muros de mampostería confinada de bloques huecos de 15 cm, con relación de aspecto mayor a uno, sujetos a cargas laterales, Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán, México.

39. Riahi Z. (2007). Backbone model for confined masonry walls for performance based seismic design. Master's Thesis. The Faculty of Graduate Studies. The University of British Columbia. Vancouver B.C., Canada.
40. Ricalde J.L. (2017). Flexión en muros confinados de concreto celular de autoclave: Efecto de la carga axial, Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán, México.
41. RILEM (1993). Autoclaved Aerated Concrete: Properties, Testing and Design, RILEM Recommended Practice, RILEM Technical Committees 78- MCA and 51-ALC, E & FN SPON, London.
42. Rosado A.I (2014). Desempeño elástico y plástico del concreto fabricado con agregados reciclados de origen calizo de residuos de demolición, Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán, México.
43. San Bartolomé A, y Quiun D. (2010). Diseño sísmico de edificaciones de albañilería confinada, Revista ciencia, 13(2): 161-185.
44. San Bartolomé A, Quiun D y Torrealva, D. (1992). Seismic behavior of a three-story scale confined masonry Structure. Tenth world Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, Netherlands.
45. Solís E. (2014), Rehabilitación y reforzamiento de muros de mampostería confinada con relación de aspecto mayor a uno, sujetos a cargas en el plano. Tesis de Maestría.
46. Sosa M.I, (2013). Comportamiento de muros de mampostería confinada de bloques huecos de concreto, sujetos a cargas laterales en su plano. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán, México.
47. Tanner, J.E. (2003). Design provisions for autoclaved aerated concrete (AAC) Structural Systems, Ph. D. dissertation, Dept. of civil Engineering, The University of Texas at Austin, Mayo 2003.
48. Tanner Jennifer E., Varela Jorge L. y Klinger Richard E. (2005). Design and Seismic Testing of Two-History, full scale Autoclaved Aerated concrete Assemblage Specimen, ACI Structural Journal, Volume 102, Issue 1, 114-119, Enero 1.
49. Tena, A., Juárez A., y Salinas, V.H. (2009). Cyclic behavior of combined and confined masonry walls, Journal of Engineering Structures, 31 (1): 250-259.

50. Tomazevic Miha y Klemenc Iztok (1997). Seismic behavior of confined masonry walls, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, 1059 – 1071.
51. Treviño, E.L., Alcocer, S.M. y Flores, L.E. (2004). Investigación experimental del comportamiento de muros de mampostería confinada de bloques de concreto sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles reforzados con acero de grados 60 y 42, In proceedings of the XIV National Congress of Structural Engineering, Acapulco, México 29 Oct-1 Nov 2004. Mexican Society of Structural Engineering, México D.F.
52. Unzúa Pineda, D.A. Padilla Mora R. y Loza Jaramillo R. (2014). Influencia de la carga vertical en la resistencia sísmica de muros de mampostería confinada con materiales típicos de Guadalajara, Memorias del XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guadalajara, México, 31 Oct- 3 Nov 2001. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, México D.F.
53. Varela-Rivera J., Fernández-Baqueiro L., Alcocer-Canché R., Ricalde-Jiménez J. y Chim-May R. (2018). Shear and Flexural Behavior of Autoclaved Aerated Concrete Confined Masonry Walls, ACI STRUCTURAL JOURNAL, Vol. 115, No.5.
54. Zepeda J.A., Ojeda M. y Alcocer S.M. (1997). Comportamiento ante cargas laterales de muros de tabique perforado y multiperforado de arcilla, en “Memoria del XI Congreso Nacional de ingeniería Sísmica”, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica A.C., Veracruz; Ver., México.