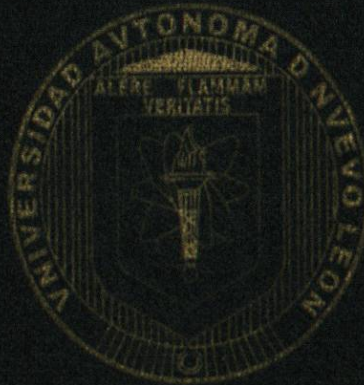


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Facultad de Ingeniería Civil



ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE MUROS DE
MAMPOSTERÍA CONFINADA DE BLOQUES DE CONCRETO SOMETIDOS
A CARGAS LATERALES CÍCLICAS REVERSIBLES. RESPUESTA
GENERAL DE LOS ESPECÍMENES Y COMPORTAMIENTO DEL ACERO
DE REFUERZO

TESIS QUE PRESENTA

Leucía Gallegos Montalvo

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA
ESTRUCTURAL

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.

OCTUBRE 2008

T

TA440

G3

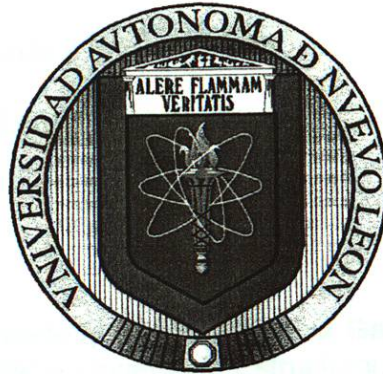
2008

c.1



1090020075

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Civil



T
TA440
G3
2008
C1

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE MUROS DE
MAMPOSTERÍA CONFINADA DE BLOQUES DE CONCRETO SOMETIDOS
A CARGAS LATERALES CÍCLICAS REVERSIBLES: RESPUESTA
GENERAL DE LOS ESPECÍMENES Y COMPORTAMIENTO DEL ACERO DE
REFUERZO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS CON
ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**

PRESENTA

Ing. Leticia Gallegos Montalvo

San Nicolás de los Garza N.L.
OCTUBRE 2008



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Sr. Dr. Pedro L. Valdez Tamez
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León

Muy estimado Dr. Valdez:

El propósito de la presente es informarle que la **Ing. Leticia Gallegos Montalvo**, pasante de la Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Estructural, ha concluido satisfactoriamente su tesis de grado titulada: **"Estudio Experimental de Muros de Mampostería Confinada de Bloques de Concreto Sometidos a Cargas Laterales Cíclicas Reversibles. Respuesta General de los Especímenes y Comportamiento del Acero de Refuerzo"**.

En tal virtud, puede atenderse la solicitud de examen de grado de la Ing. Gallegos, así como girar a quien corresponda las instrucciones necesarias para la realización de los trámites que procedan, en apego a los requisitos que exige el reglamento de exámenes profesionales de nuestra institución .

Agradezco de antemano la atención que se sirva brindar a la presente, y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración que estime necesaria.

ATENTAMENTE
"ALERE FLAMMAM VERITATIS"
Cd. Universitaria, 21 de Noviembre de 2008

Dr. Ernesto L. Treviño Treviño
Director de Tesis

c.c.p. Ing. Leticia Gallegos Montalvo



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Dr. Pedro L. Valdez Tamez
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León

Estimado Dr. Valdez Tamez:

En atención a su oficio, en el que me informa que he sido designado como Evaluador de la tesis **"ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA DE BLOQUES DE CONCRETO SOMETIDOS A CARGAS LATERALES CÍCLICAS REVERSIBLES. RESPUESTA GENERAL DE LOS ESPECÍMENES Y COMPORTAMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO"** que presenta el Ing. **Leticia Gallegos Montalvo**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Estructural, comunico a Usted que he leído y evaluado la calidad de dicha tesis, considerándola como **APROBADA**.

Sin otro particular por el momento, quedo a sus órdenes para cualquier aclaración que considere pertinente.

ATENTAMENTE
"ALERE FLAMMAM VERITATIS"
Cd. Universitaria, 23 de octubre del 2008.

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
Coordinador de Investigación
Evaluador de Tesis de Maestría





UANL



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

Dr. Pedro L. Valdez Tamez
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León

Estimado Dr. Valdez Tamez:

En atención a su oficio, en el que me informa que he sido designado como Evaluador de la tesis "ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA DE BLOQUES DE CONCRETO SOMETIDOS A CARGAS LATERALES CÍCLICAS REVERSIBLES. RESPUESTA GENERAL DE LOS ESPECÍMENES Y COMPORTAMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO" que presenta el Ing. Leticia Gallegos Montalvo, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Estructural, comunico a Usted que he leído y evaluado la calidad de dicha tesis, considerándola como **APROBADA**.

Sin otro particular por el momento, quedo a sus órdenes para cualquier aclaración que considere pertinente.

ATENTAMENTE
"ALERE FLAMMAM VERITATIS"
Cd. Universitaria, 23 de octubre del 2008.


DR. RICARDO GONZÁLEZ ALCORTA
Jefe del Departamento de Estructuras
Evaluador de Tesis de Maestría



UANL



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA DE BLOQUES DE CONCRETO SOMETIDOS A CARGAS LATERALES CÍCLICAS REVERSIBLES. RESPUESTA GENERAL DE LOS ESPECÍMENES Y COMPORTAMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO”

Aprobación de la Tesis:

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
Evaluador de tesis

DR. RICARDO GONZÁLEZ ALCORTA
Evaluador de tesis

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, a 23 de octubre de 2008



COMPROBANTE DE CORRECCIÓN

Tesista: LETICIA GALLEGOS MONTALVO

Tema de la tesis: ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENT-
TO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA DE BLOQUES DE CON-
CRETO SOMETIDOS A CARGAS LATERALES CICLICAS REVERSIBLES. RES-
PUESTA GENERAL DE LOS ESPECÍMENES Y COMPORTAMIENTO DEL ACERO
DE REFUERZO.

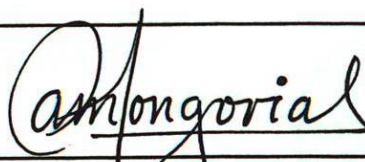
Este documento certifica la corrección DEFINITIVA

Del trabajo de tesis arriba identificado, en los aspectos: ortográfico,
metodológico y estilístico.

Recomendaciones adicionales:

(NINGUNA)

Nombre y firma de quien corrigió:



Arq. Ramón Longoria Ramírez



DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

Ciudad Universitaria, a 5 de SEPTIEMBRE de 2008.

ING. LÁZARO VARGAS GUERRA

Director del Departamento de Escolar y de Archivo
UANL

PRESENTE.-

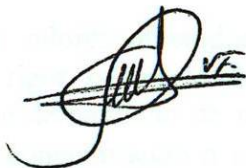
Por este conducto me permito comunicarle que la **Ing. Leticia Gallegos Montalvo**, pasante de la **Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Estructural**, ha solicitado su examen de grado, para lo cual ha cubierto con la totalidad de los requisitos académicos y administrativos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales y el Reglamento General de Estudios de Posgrado de nuestra Institución. De la manera más atenta, le solicito su colaboración para que se de el trámite correspondiente en el Departamento a su digno cargo.

Sin otro particular por el momento, me es grato enviarle un cordial saludo y reiterarme a sus respetables órdenes.

ATENTAMENTE

"ALERE FLAMMAM VERITATIS"

Cd. Universitaria a 24 de Noviembre del 2008



Dr. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación



SUB DIRECCION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION

C.c.p. Archivo.

RESUMEN**Ing. Leticia Gallegos Montalvo****Fecha de graduación: Julio de 2003****Universidad Autónoma de Nuevo León****Facultad de Ingeniería Civil****Título del Estudio:** *ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA DE BLOQUES DE CONCRETO SOMETIDOS A CARGAS LATERALES CÍCLICAS REVERSIBLES: RESPUESTA GENERAL DE LOS ESPECÍMENES Y COMPORTAMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO***Número de páginas: 126****Candidata para el grado de Maestría en Ciencias con especialidad en Estructuras****Área de Estudio: Ingeniería Civil**

Propósito y método del estudio: Se desarrolló una investigación que nos permitió evaluar y comparar el comportamiento de muros de mampostería confinada de bloques huecos de concreto reforzados con aceros de los grados 42 y 23 o con armazones electrosoldadas de los grados 60 y 50 y con refuerzo transversal uniformemente distribuido o concentrado en los elementos confinantes, al ser sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles, en presencia de una carga vertical constante. En esta parte de la investigación se caracterizaron las propiedades mecánicas de los materiales que forman los muros; se obtuvieron experimentalmente las respuestas de los muros al ser sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles, en presencia de una carga vertical constante; se analizó el comportamiento general de los especímenes; y, por último, se estudió el comportamiento general del acero de refuerzo.

Contribuciones y conclusiones: Los valores obtenidos de los ensayos de los materiales son suficientes y cuentan con el rigor necesario de la normatividad mexicana. Se pudo concluir que el refuerzo no fue demandado de manera significativa, además de que las diferencias en el refuerzo y la concentración o no de los estribos no tienen efecto en la evolución del daño de los especímenes. A partir de las conclusiones a las que se llegó, se recomienda realizar otros ensayos con el fin de caracterizar las propiedades mecánicas y físicas de la mampostería en las diferentes regiones del país. También se recomienda realizar investigaciones con mampostería de bloques huecos de concreto de mayor resistencia, o con refuerzo horizontal, con el fin de que sea más demandado el acero de refuerzo de los elementos confinantes.

FIRMA DEL ASESOR:

Ing. Leticia Gallegos Montalvo.

CONTENIDO

CONTENIDO	vi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	4
1.1 Introducción	4
1.2 Historia de la mampostería	4
1.3 Estado del conocimiento	6
1.4 Justificación y objetivos	10
CAPÍTULO II. DISEÑO DEL EXPERIMENTO Y DESARROLLO DE LOS ENSAYOS	13
2.1 Introducción	13
2.2 Diseño del experimento	14
2.3 Características del elemento de ensayo	16
2.3.1 Materiales	18
2.3.2 Armado	31
2.4 Respuesta teórica	34
2.5 Construcción	38
2.6 Dispositivo de carga	39
2.7 Instrumentación	41
2.8 Historias de cargas y de desplazamientos	45
2.9 Captura de datos	51
<i>Conclusiones parciales</i>	51
CAPÍTULO III. RESPUESTA GENERAL DE LOS ESPECÍMENES	53
3.1 Introducción	53
3.2 Evolución del daño	53
3.3 Comportamiento histerético	70
3.4 Componentes de la distorsión	74
3.5 Expansión	78
<i>Conclusiones parciales</i>	79

CAPÍTULO IV. COMPORTAMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO	82
.....	
4.1 Introducción	82
4.2 Consideraciones sobre el análisis de los deformímetros	82
4.3 Comportamiento del acero de refuerzo en los especímenes	85
<i>Conclusiones parciales</i>	107
CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES	109
BIBLIOGRAFÍA	112
APÉNDICE	122

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.**TABLAS**

Tabla 2.1:	Matriz del experimento	16
Tabla 2.2:	Características generales de los especímenes según el diseño del experimento	16
Tabla 2.3:	Resultados de ensayos a compresión de las unidades de mampostería	20
Tabla 2.4:	Resultados de ensayos a compresión de pilas de mampostería	23
Tabla 2.5:	Resultados de ensayos a compresión diagonal de muretes de mampostería	25
Tabla 2.6:	Resultados de ensayos a compresión de cubos de mortero	27
Tabla 2.7:	Resultados de ensayos a compresión de cilindros de concreto	28
Tabla 2.8:	Resumen de resultados de ensayos a tensión del acero de refuerzo	30
Tabla 2.9:	Resultados de ensayos a tensión de varillas corrugadas, de grado 42 (apéndice)	122
Tabla 2.10:	Resultados de ensayos a tensión de alambón liso, de Grado 23 (apéndice)	123
Tabla 2.11:	Resultados de ensayos a tensión de varillas corrugadas laminadas en frío, de grado 60 (apéndice)	124
Tabla 2.12:	Resultados de ensayos a tensión de alambre liso trefilado en frío, de grado 50 (apéndice)	125
Tabla 2.13:	Resumen de las características del armado de los especímenes	33
Tabla 2.14:	Resistencia teórica de los especímenes	36
Tabla 3.1:	Características del primer agrietamiento	54
Tabla 3.2:	Anchura de grietas en picos positivos de ciclos impares	69
Tabla 4.1:	Propiedades idealizadas del acero de refuerzo	84

FIGURAS

Figura 2.1:	Dimensiones generales de los especímenes	17
Figura 2.2:	Resumen de los resultados de las mediciones y ensayos de piezas de mampostería. Valores redondeados	19
Figura 2.3:	Resumen de los resultados de ensayos de pilas a compresión axial	22

Figura 2.4:	Resumen de los resultados de ensayos de muretes a compresión diagonal	24
Figura 2.5:	Ensayos a tensión del acero de refuerzo	29
Figura 2.6:	Armado de muros: 421, 422, 423 y 424	32
Figura 2.7:	Armado de muros: 601, 602, 603 y 604	33
Figura 2.8:	Diagramas momento - curvatura	37
Figura 2.9:	Aspectos del proceso constructivo y montaje de los especímenes	39
Figura 2.10:	Dispositivo de aplicación de carga. Elevación	40
Figura 2.11:	Dispositivo de aplicación de carga. Perspectiva	40
Figura 2.12:	Instrumentación externa	42
Figura 2.13:	Instrumentación interna. Muros: 421, 422, 423 y 424	43
Figura 2.14:	Instrumentación interna. Muros: 601, 602, 603 y 604	44
Figura 2.15:	Historia nominal de cargas y de distorsiones	46
Figura 2.16:	Historia real de las cargas aplicadas. Muros: 421, 422, 423 y 424	47
Figura 2.17:	Historia real de las cargas aplicadas. Muros: 601, 602, 603 y 604	48
Figura 2.18:	Historia real de distorsiones aplicadas. Muros: 421, 422, 423 y 424	49
Figura 2.19:	Historia real de distorsiones aplicadas. Muros: 601, 602, 603 y 604	50
Figura 3.1:	Evolución del deterioro en el espécimen 421	56
Figura 3.2:	Evolución del deterioro en el espécimen 422	57
Figura 3.3:	Evolución del deterioro en el espécimen 423	58
Figura 3.4:	Evolución del deterioro en el espécimen 424	59
Figura 3.5:	Evolución del deterioro en el espécimen 601	60
Figura 3.6:	Evolución del deterioro en el espécimen 602	61
Figura 3.7:	Evolución del deterioro en el espécimen 603	62
Figura 3.8:	Evolución del deterioro en el espécimen 604	63
Figura 3.9:	Estado final de daño. Muros: 422, 423, 601 y 604	65
Figura 3.10:	Estado final de daño. Muros: 421, 424, 602 y 603	66
Figura 3.11:	Estado final de daño. Detalles diversos	67
Figura 3.12:	Estado final de daño. Detalles diversos	68
Figura 3.13:	Medición de la Anchura de las Grietas	69
Figura 3.14:	Curvas Histeréticas de la Carga Lateral-Distorsión. Muros: 421, 422, 423 y 424	71
Figura 3.15:	Curvas Histeréticas de la Carga Lateral-Distorsión. Muros: 601, 602, 603 y 604	72
Figura 3.16:	Componentes de la distorsión	74
Figura 3.17:	Contribución de las deformaciones por cortante y por flexión a la distorsión	76

Figura 3.18: Curvaturas promedio en la altura de los muros 422 y 603	77
Figura 3.19: Deformación angular en los muros 422 y 603	77
Figura 3.20: Expansión a la mitad de la altura. Muros: 422, 424, 601 y 603	78
Figura 4.1: Propiedades idealizadas del acero de refuerzo	83
Figura 4.2: Modelos idealizados del comportamiento del acero de refuerzo	84
Figura 4.3: Historias de las deformaciones unitarias en los deformímetros adheridos al refuerzo longitudinal	87
Figura 4.4: Historias de las deformaciones unitarias en los deformímetros adheridos al refuerzo transversal	88
Figura 4.5: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 421	89
Figura 4.6: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 422	90
Figura 4.7: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 423	91
Figura 4.8: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 424	92
Figura 4.9: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 601	93
Figura 4.10: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 602	94
Figura 4.11: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 603	95
Figura 4.12: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 604	96
Figura 4.13: Nivel de esfuerzos de las varillas longitudinales perpendiculares al plano del muro	97
Figura 4.14: Nivel de esfuerzos en las varillas longitudinales en el plano del muro	97
Figura 4.15: Nivel de esfuerzos en los estribos	98
Figura 4.16: Respuesta del deformímetro 8 del muro 603	100
Figura 4.17: Respuesta del deformímetro 22 del muro 604	101
Figura 4.18: Respuesta del deformímetro 8 del muro 424	102
Figura 4.19: Respuesta del deformímetro 6 del muro 601	104
Figura 4.20: Respuesta del deformímetro 6 del muro 602	105
Figura 4.21: Respuesta del deformímetro 21 del muro 603	106

INTRODUCCIÓN

La humanidad, desde sus orígenes, ha buscado la manera de protegerse de las inclemencias del tiempo. En un principio el ser humano se refugiaba en cavernas naturales en las montañas; pero con la necesidad de moverse a otros lugares para satisfacer algunas de sus necesidades, como son el suministro de agua o el alimento, empezó a idear otro tipo de refugio, construido en el sitio, con ramas y hojas o de piedras apiladas. En lugares donde no se conseguía la piedra, se usaron bloques de arcilla secada al sol. A partir del uso de materiales de origen pétreo para los refugios, inició la utilización de la mampostería [**De mampuesto, derivación de mano y puesto; latín: manus, mano y positura, asiento; de ponere, poner. Piedra que se coloca con la mano**].

La mampostería ha sido utilizada a lo largo de la historia por diferentes culturas: la egipcia, la romana, la griega, la maya y la azteca, entre otras; quienes la utilizaron tanto para edificar sus templos y palacios, como sus viviendas.

En la actualidad, se define la mampostería como un material estructural compuesto, integrado por piezas prismáticas de origen pétreo, naturales o artificiales, unidas con un mortero aglutinante.

La mampostería se utiliza mucho actualmente en nuestro país y, por ende, es muy importante su estudio y clasificación, ya que forma parte de la mayoría de los hogares y el patrimonio de muchos mexicanos.

En México no se cuenta con información científicamente fundamentada del comportamiento de la mampostería confinada de bloques huecos de concreto, reforzada con armazones electrosoldadas como armado de los elementos confinantes, al ser sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles y en presencia de una carga vertical constante. Y aunque se reconoce el beneficio de concentrar estribos en las esquinas de los castillos y las dalas, no se cuenta con información científica que lo valide al utilizarse con bloques huecos de concreto.

Por lo antes mencionado, se decidió realizar una investigación experimental de tableros de mampostería confinada, a escala natural, con la finalidad de analizar la incidencia del tipo de acero de refuerzo longitudinal en los elementos confinantes, en el comportamiento de los especímenes y analizar la incidencia de la concentración de estribos en las esquinas de los elementos confinantes, en el comportamiento de los especímenes.

Esta investigación se planeó para desarrollarse en dos etapas: la primera, que es el tema de esta tesis, se enfoca en el estudio del comportamiento general de los especímenes y del acero de refuerzo. Como **comportamiento general** definimos: a) comportamiento histerético, b) evolución del daño, c) expansión, d) curvatura, y e) deformación angular.

En la segunda etapa, y con la información generada en este trabajo, se estudiarán las respuestas asociadas con el comportamiento cíclico de los especímenes, con el propósito de cuantificar la degradación estructural de los mismos (*Zárate, 2008*).

El material presentado en esta tesis se organizó en cuatro capítulos:

En el Capítulo I se introduce la información con que se cuenta sobre la inmersión de la mampostería en el campo de la construcción, las modificaciones que ha tenido a lo largo de la historia y las investigaciones respectivas que se han realizado en el mundo. También se justifica la realización de esta investigación y los objetivos que se trataron de alcanzar en este trabajo.

En el Capítulo II se explica cómo se diseñó el experimento, de manera que se pudiera contar con una validez científica y se detallan las pruebas que se hicieron en cada uno de los materiales que influyen en la respuesta de los especímenes. Además, se describe el proceso de construcción e instrumentación de los especímenes y el dispositivo que se utilizó para los ensayos. Finalmente, se menciona el procedimiento de los ensayos y cómo se capturaron los valores obtenidos de éste.

En el Capítulo III se analiza la evolución del daño de los especímenes y su comportamiento general a lo largo de los ensayos, comparando los diferentes resultados obtenidos en cada espécimen.

En el Capítulo IV se estudia el comportamiento del acero de refuerzo, comparando los valores obtenidos de las diferentes etapas de los ensayos, con otras respuestas, para determinar su participación e importancia en el comportamiento general de los especímenes.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas del trabajo realizado.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1 Introducción.

La mampostería es uno de los materiales de construcción más antiguos y más utilizados por la humanidad, debido a que se le ha dado un uso muy variado; desde casas residenciales hasta edificios públicos. Esta gran aceptación en las edificaciones de baja y mediana altura se debe a las ventajas que presenta en cuanto a sus características térmicas, acústicas, estéticas y económicas, entre otras.

1.2 Historia de la mampostería (*Zúñiga, 2005*).

Desde el inicio de la civilización, el humano ha tenido la necesidad de contar con un espacio que lo proteja de las inclemencias del medio ambiente y de los depredadores. El hombre primitivo vivía en cavernas y, al nacer la necesidad de trasladarse de un lugar a otro, comenzó a construir viviendas artificiales. Entre los años 8000 y 4000 a. C., el hombre se hizo sedentario y necesitó un espacio que le permitiera protegerse del clima y de sus enemigos. Así nació la idea de apilar piedras.

La dificultad de apilar rocas de formas irregulares dio lugar a la utilización del barro como mortero y de esta manera aparecieron las primeras estructuras de mampostería. Muy probablemente esa fue la etapa en que se posibilitaron los primeros asentamientos humanos de importancia.

Debido a la falta de piedras naturales, en el año 4000 a. C., los sumerios comenzaron a fabricar piezas artificiales de arcilla y paja, mediante el uso de moldes, que se dejaban secar al sol. El uso del molde permitió que las piezas fueran del tamaño y forma similar, con lo cual hubo mayor libertad para la construcción de edificaciones y monumentos.

A principios del año 3000, a. C., el adobe se llevó al horno, iniciándose así la fabricación de ladrillos cerámicos. Como mortero utilizaron el alquitrán, permitiendo que las estructuras fueran tan grandes y duraderas, que algunas prevalecen hasta nuestros días.

La cultura romana contribuyó significativamente al desarrollo de la construcción de edificaciones de mampostería, a través de la invención del mortero hidráulico, haciendo posible la construcción de estructuras mucho más grandes y con resistencias superiores a las construidas hasta entonces.

El material que proporcionó a los romanos su gran reputación como fabricantes de mortero hidráulico fue la puzolana, que es una ceniza procedente de las erupciones volcánicas acaecidas en la prehistoria.

En el caso de los egipcios, éstos aprovechaban la materia prima existente en la región, ya que preferían la roca de las montañas, a lo largo del río Nilo, para la construcción de sus pirámides, mientras que en las construcciones comunes usaron generalmente el adobe.

En la Grecia antigua se contaba ya con grandes yacimientos de mármoles, usando este material para revestir la mampostería de piedra caliza, pegada con mortero de cal.

Al igual que en las grandes culturas del mundo, en las culturas mexicanas se construyeron estructuras de gran tamaño, utilizando piedras naturales y artificiales y se descubrió la gran actividad puzolánica de diferentes materiales como el nejayote, las cenizas volcánicas y las arcillas calcinadas y finamente molidas.

Los olmecas (1200 a. C.) construían con bloques de barro rojo y amarillo, unidos con barro. Los mayas hicieron aportaciones técnicas muy importantes para la construcción de edificios de mampostería, a través de la bóveda maya. En general, las culturas antiguas de México, además de utilizar la mampostería para la construcción de templos y viviendas, la utilizaron para la construcción de obras civiles, tales como muros de contención, escalinatas, etc.

El avance de las civilizaciones requirió de estructuras cada vez más complejas, de tal manera que las técnicas de construcción utilizadas en la antigüedad resultaran obsoletas. Es por esto que la mampostería evolucionó con el fin de mantenerse viable en la construcción.

En 1813, el ingeniero británico Brunel propuso el refuerzo de una chimenea de mampostería con barras de acero forjado, pero fue hasta la construcción del túnel bajo el río Támesis, en 1825, que se utilizó la mampostería reforzada.

En 1889, el ingeniero francés Paul Cottancin patentó un método para reforzar y construir edificios de mampostería que resultó impráctico debido a la falta de evidencia experimental y a la gran densidad de los muros. Fue hasta 1913 que se iniciaron proyectos de investigación que pretendían revivir el uso de la mampostería como material estructural.

1.3 Estado del conocimiento.

En la actualidad, la mampostería se puede clasificar, según su función, en: a) muros de carga, b) muros no cargadores y c) muros diafragma (*San Bartolomé, 1994*). En la primera categoría, el muro se utiliza como elemento resistente de cargas, tanto verticales como horizontales, coplanares y perpendiculares a su plano; en la segunda, se utiliza para soportar cargas perpendiculares a su plano, como las del viento, además de soportar su peso propio; en la tercera, se colocan entre marcos formados por vigas y columnas de edificios esqueléticos con la finalidad de aumentar la resistencia y rigidez ante las fuerzas horizontales.

La piedra, por su naturaleza, es débil ante las fuerzas de tensión, por lo que la inclusión del acero de refuerzo -el cual tiene gran resistencia a la tensión- mejora su comportamiento ante la presencia de fuerzas horizontales coplanares y mejora significativamente su capacidad de deformación.

Según el refuerzo que se utilice se puede clasificar en: a) mampostería simple, b) mampostería confinada y c) mampostería reforzada interiormente. En la mampostería simple no se coloca

refuerzo alguno. El confinamiento de la mampostería se obtiene colocando elementos de concreto reforzado de sección transversal pequeña, generalmente del ancho del muro, denominados castillos y dalas, formando tableros que permiten la continuidad entre los muros, los pisos y las losas. Esto incrementa las capacidades de resistencia, de deformación y de disipación de energía, logrando un buen desempeño ante cargas laterales como las inducidas en regiones de alta sismicidad.

En el caso de la mampostería reforzada interiormente, el acero de refuerzo se distribuye en los sentidos horizontal y vertical, colocándolo dentro de las juntas entre hiladas y en el interior de las celdas, respectivamente, relleno las celdas con concreto. Este sistema puede compararse con los muros estructurales de concreto reforzado.

A continuación se muestran las características típicas del comportamiento estructural de la mampostería confinada (*Jean y Cesin, 2000*):

- a) La estabilidad ante cargas gravitacionales depende del confinamiento, principalmente después de ocurrir los agrietamientos inclinados inducidos por cargas horizontales o asentamientos diferenciales. Cuando se presentan grandes distorsiones y la mampostería muestra daños importantes, el confinamiento permite mantener y garantizar la capacidad de carga del sistema.
- b) La contribución del confinamiento a la carga horizontal que genera el agrietamiento inclinado es insignificante; sin embargo, una vez que éste ocurre, la evolución del deterioro se controla por el confinamiento.
- c) El refuerzo transversal de los castillos, en forma de estribos con separaciones y en áreas adecuadas, contribuye a la generación de lazos histeréticos estables, con buena capacidad de deformación y de disipación de energía.
- d) Después del agrietamiento, el desempeño depende de los elementos confinantes, los cuales mantienen una buena resistencia y rigidez del muro, aún cuando se presentan grandes deformaciones.

- e) Los muros confinados con castillos exteriores muestran un mejor desempeño, en términos de nivel del daño y de la degradación de la resistencia y de la rigidez, que los confinados con castillos ahogados dentro de las celdas de las unidades, para similares niveles de deformación.
- f) Cuando a los muros confinados se les coloca refuerzo embebido en las juntas horizontales de mortero entre hiladas, el desempeño estructural ante sollicitaciones sísmicas mejora notablemente, en cuanto a la resistencia a cortante, a la capacidad de deformación y a la capacidad de disipación de energía; además, hay una distribución más uniforme de las grietas y una disminución en el ancho de éstas.

Se ha comprobado que la mampostería bien aplicada exhibe un buen comportamiento ante las sollicitaciones sísmicas. Sin embargo, los casos de fallas graves en los edificios, atribuibles a errores de diseño o a un mal proceso constructivo, han dado un fuerte impulso a extensos programas de investigación experimental, en varios países del mundo, con el afán de llegar a una buena aproximación del comportamiento de los sistemas estructurales construidos con mampostería confinada.

El comportamiento de la mampostería ha tomado diversos caminos de un país a otro, e inclusive de una región a otra, dentro de un mismo país. Lo anterior se debe a que el factor humano sigue siendo fundamental en la calidad del producto terminado y a que los materiales de que se dispone en las diferentes regiones y países son muy variados. Es por esto que se hace muy difícil su comparación.

Tomando en cuenta lo anterior, es comprensible que las diferentes investigaciones alrededor del mundo, con el propósito de caracterizar el comportamiento de la mampostería confinada para las condiciones de cada país, muestren el estudio de las mismas variables de manera aparentemente redundante, a saber: el tipo y la calidad de las unidades y del mortero de pega; el tipo, calidad y disposición del refuerzo; el tipo de carga, ya sea monótona o cíclica, y sus características de aplicación; las dimensiones y relación de aspecto de los muros y la influencia de las aberturas de diferente tamaño, entre otras (*Treviño, 2007*).

Entre los investigadores de mampostería que destacan en América Latina se encuentran: Decanini, Ochat, Michelini y Olivencia, en Argentina; Yamín y García en Colombia; Gutiérrez, Bermúdez y Cruz en Costa Rica; Hidalgo, Astroza, Delfín, Lüders y Moroni en Chile; O'Reilly en la República Dominicana; Vaca, en Ecuador; Hernández, en El Salvador; Gándara en Guatemala; Zúñiga en Honduras; Gallegos, San Bartolomé, Casabonne, Quinn, Bariola y Pastorutti en Perú; y Carvajal, Castilla y La Fuente, en Venezuela (*Treviño, 2007*).

En los Estados Unidos de Norteamérica sobresalen las aportaciones del Comité Técnico Coordinador para la Investigación de Mampostería (*Wallace, Klinger y Schuller, 1998*), cuyo trabajo de diez años estableció las bases técnicas para el diseño “por estados límite” de edificaciones de mampostería reforzada interiormente y de sus componentes, en zonas sísmicas; y en Eslovenia, el investigador Tomazevic ha destacado en la realización de investigaciones durante la última década (*Tomazevic; Tomazevic y otros, 1992-1994-1996-1999-2004*).

En México, a partir de los sismos de 1957, se han venido realizando programas de investigación sobre mampostería en el Instituto y en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

A finales de la época de los setenta se presentaron los resultados obtenidos de distintos estudios realizados, además de algunas observaciones de los efectos en las estructuras, causados por sismos y recomendaciones de diseño sísmico de estructuras con muros de mampostería (*Meli, 1979*).

En los años ochenta se introdujeron al mercado armazones prefabricadas, electrosoldadas de alambre trefilado de alta resistencia, para utilizarlas como armado en los elementos confinantes de la mampostería. Para estudiar el efecto de la utilización de esos productos como refuerzo, se ensayaron cuatro muros de mampostería de ladrillo macizo de barro recocido, reforzados con acero de los grados 42 y 50 (*Hernández y Guzmán, 1987; Hernández, 1991*).

A partir de la década de los noventas, del siglo XX, los programas experimentales que se realizaron en la UNAM se llevaron a cabo desde entonces en el Centro Nacional de Prevención de Desastres, sobre seguridad sísmica de la vivienda económica (*Alcocer y Meli, 1995; Alcocer, 1996*). Se realizaron ensayos de componentes y sistemas estructurales de mampostería confinada, a escala natural, para estudiar su comportamiento ante sollicitaciones sísmicas (*Alcocer, Sánchez y Meli, 1993; Alcocer, Meli, Sánchez y Flores, 1994; Alcocer, Sánchez, Vázquez y Díaz, 1994; Alcocer, Aguilar y Cano, 1995; Alcocer, Zepeda y Ojeda, 1997; Álvarez y Alcocer, 1994; Flores y Alcocer, 1998; Flores, Mendoza y Reyes, 2004; Flores, Ríos y Reyes, 2004; García, Flores y Reyes, 2004*).

A partir del año 2000, se han venido realizando estudios experimentales que comprenden la construcción y ensayo, en mesa vibradora, de modelos tridimensionales a escala reducida, representativos de las viviendas de mampostería confinada, unifamiliares y multifamiliares más comunes en el país, con el objetivo de proponer un método de diseño basado en los desplazamientos de la estructura (*Alcocer, Arias y Vázquez, 2004; Arias, Alcocer y Vázquez, 2004; Arias, 2005; Barragán, 2005; Vázquez, 2005*).

Las aportaciones más importantes de estos programas de investigación han sido incluidas en el Reglamento de Construcciones y Servicios Urbanos del Distrito Federal, de 1996, así como en las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de 1976 y sus actualizaciones, hasta la última versión, de 2004, que sigue vigente (*Alcocer y otros, 2003; GDF, 2004*).

1.4 Justificación y objetivos

Como hemos visto, existen numerosas investigaciones sobre la mampostería confinada en México; sin embargo, en la mayoría se han utilizado ladrillos de barro recocido, ya sean piezas macizas o huecas. Solamente se tiene conocimiento de unos trabajos experimentales de hace 35 años, en la Universidad Nacional Autónoma de México, donde se incluyeron bloques huecos de concreto vibro-compactados (*Meli, Zeevaert y Esteva, 1968; Meli y Salgado, 1969; Madinaveitia y Rodríguez, 1970*). Los valores de resistencia a la compresión y a la compresión

diagonal obtenidos de estas investigaciones se incluyeron en las Normas Técnicas Complementarias, como valores indicativos, pero las piezas que se comercializan actualmente en el mercado nacional han reducido su resistencia, si se comparan con las de hace 35 años (*Hernández, 1993-1996-1997-1998a; Hernández, Camargo, Leal y Ruiz, 1996; Fajardi, 1999*).

Además, no existen estudios realizados con varillas corrugadas y alambres laminados en frío como refuerzo de castillos y dalas confinantes en muros de mampostería de bloques de concreto. La única investigación se realizó en la UNAM (*Hernández y Guzmán, 1987; Hernández, 1991*), sin embargo, el tipo de acero, las piezas y las sollicitaciones de carga son diferentes a las que requiere esta investigación. Si bien, es cierto que en las Normas Técnicas Complementarias se permite el uso de este acero como refuerzo en los elementos confinantes, no se han propuesto disposiciones específicas para su empleo (*GDF, 2004b*).

Finalmente, se ha reconocido que existe un beneficio al concentrar estribos en las esquinas de las dalas y los castillos; sin embargo, hasta el momento no se cuenta con estudios que validen este efecto benéfico, particularmente en el caso de la mampostería de bloques huecos de concreto (*Alcocer, citado por Ruiz, Sánchez y Miranda, 1999*).

Por lo anteriormente descrito y con el fin de mejorar la comprensión del comportamiento de los muros de mampostería confinada ante la sollicitación de cargas laterales cíclicas reversibles, se requiere estudiar y profundizar los siguientes aspectos, debido a la importancia que tienen en la respuesta de los muros:

- a) El uso de armazones electrosoldadas con varillas y alambres laminados en frío, de los grados 60 y 50, como refuerzo en los castillos y las dalas confinantes.
- b) La utilización de mampostería con menor resistencia a la compresión que la que se utilizó en la época en que se realizaron las investigaciones que sirvieron de base para obtener los valores y calibrar las expresiones que se utilizan en la normatividad vigente.

- c) La concentración de los estribos en las regiones cercanas a los extremos de los elementos confinantes, ya que se ha observado que el deterioro en la capacidad de deformación de los muros ante cargas laterales depende de la evolución del daño en los castillos.

Con la finalidad de encontrar respuestas para los aspectos anteriores y contar con una aportación a la comunidad científica por medio de esta investigación, se planteó el siguiente objetivo general:

Evaluar comparativamente el comportamiento general de los muros de mampostería confinada de bloques huecos de concreto con elementos confinantes reforzados longitudinalmente, con aceros de los grados 42 y 23 o con armazones electrosoldadas de los grados 60 y 50, y con refuerzo transversal uniformemente distribuido en toda su altura o concentrados en las regiones cercanas a los extremos, al ser sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles, en presencia de una carga vertical constante.

Además, es necesario determinar estos objetivos específicos:

- a) La caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales que forman los muros: las unidades, el mortero de pega, el concreto y el acero de los elementos confinantes, en la mampostería simple.
- b) La obtención experimental de las respuestas de los muros al ser sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles, en presencia de una carga vertical constante.
- c) El comportamiento general de los muros, a saber: el comportamiento histerético, la evolución del daño, la expansión, la curvatura y la deformación angular.
- d) El comportamiento general del acero de refuerzo.

Esta tesis tiene como principal finalidad proporcionar valores índice de capacidad de resistencia y capacidad de deformación, específicamente en las unidades de bloques huecos de concreto. Además, se pretende que las respuestas que se obtengan en estos ensayos sirvan de base para una evaluación más profunda sobre el comportamiento de estos especímenes.

CAPÍTULO II

DISEÑO DEL EXPERIMENTO Y DESARROLLO DE LOS ENSAYOS.

2.1 Introducción.

En este capítulo se describirá el modelo estadístico con el cual fue diseñado este experimento y se explicarán las variables involucradas en dicho modelo. Además, se hará una descripción detallada del desarrollo de los ensayos. Como ya se mencionó en la introducción de este trabajo, se ensayaron ocho especímenes (esta cantidad se determinó en el diseño del experimento, lo cual se explicará en el siguiente punto) cuyas variables son: el tipo de acero de refuerzo y la concentración de los estribos, los que también se comentarán dentro de este capítulo.

Se detallarán las dimensiones generales de los especímenes, el tipo de refuerzo utilizado, su configuración y las propiedades de los materiales con los que se construyeron dichos modelos. Se presentará la teoría con la que se calcularon varias respuestas de especial importancia en el desarrollo de la prueba, para estimar con anticipación la magnitud que estas variables pudieran tener.

Se mencionará el procedimiento que se siguió para la construcción de los especímenes, desde la base en donde se empotraron los castillos y se desplantó la mampostería, hasta la fabricación del dispositivo de aplicación de carga, con el cual se ensayaron los muros.

Cada modelo se instrumentó externamente, para reunir los datos necesarios que describen el comportamiento general; asimismo, se instrumentó internamente para observar el comportamiento del acero de refuerzo. Por último, se describirá el protocolo que se siguió en la aplicación de las cargas, así como los métodos que se utilizaron para recopilar la información.

2.2 Diseño del experimento

Para el logro del objetivo general de este trabajo, fue diseñado un experimento en plan factorial para dos variables, en dos niveles y se replicó completo. Las dos variables de carácter cualitativo que fueron consideradas, también llamadas factores experimentales, son las siguientes: a) el factor X1, que corresponde al tipo de armado longitudinal y, b) el factor X2, que corresponde al tipo y distribución del refuerzo transversal de los elementos confinantes.

El factor X1 se consideró en dos niveles de carácter cualitativo, que son: a) armado tradicional (-1) con varillas corrugadas de acero laminadas en caliente grado 42, con área mínima según la normatividad vigente y b) armado electrosoldado (+1) con varillas de acero laminadas en frío grado 60, de diámetro igual al producto que se comercializa actualmente a nivel nacional. En lo que se refiere al factor X2, los dos niveles de carácter cualitativo son: a) estribos uniformemente distribuidos (-1) en toda la altura de los elementos confinantes y b) estribos concentrados (+1) en las esquinas en una longitud no menor que tres veces la dimensión de los castillos (*Art. 5.1.1 (h), GDF, 2004b*).

En la tabla 2.1 se indican las características de la matriz del experimento y en la tabla 2.2 se muestra un resumen de las características generales de los especímenes, según el diseño del experimento. Las variables de respuesta que están asociadas al comportamiento cíclico y permiten cuantificar la degradación de los especímenes, fueron evaluadas estadísticamente. Cabe señalar que éstas pertenecen a una segunda etapa de esta investigación, sólo serán mencionadas en este trabajo (*Zárate, 2008*) y son las siguientes:

Respuestas asociadas a la resistencia.

- Y1: Carga lateral promedio, al primer agrietamiento.
- Y2: Carga lateral máxima, o resistencia.
- Y3: Reserva de resistencia.
- Y4: Resistencia residual positiva, a la repetición del ciclo de 0.4%.
- Y5: Resistencia residual negativa, a la repetición del ciclo de 0.4%.

Respuestas asociadas a la rigidez.

- Y6: Rigidez pico a pico, del primer ciclo.
- Y7: Rigidez pico a pico residual, a la repetición del ciclo de 0.4%.
- Y8: Rigidez secante de las envolventes, al primer agrietamiento.
- Y9: Rigidez equivalente positiva, del primer ciclo.
- Y10: Rigidez equivalente negativa, del primer ciclo.
- Y11: Rigidez equivalente positiva residual, a la repetición del ciclo de 0.4%.
- Y12: Rigidez equivalente negativa residual, a la repetición del ciclo de 0.4%.

Tabla 2.2: Características de respuesta de un sistema.**Respuestas asociadas a la disipación de energía.**

- Y13: Energía disipada acumulada.
- Y14: Energía disipada equivalente, a la repetición del ciclo de 0.4%.
- Y15: Amortiguamiento viscoso equivalente positivo, a la resistencia.
- Y16: Amortiguamiento viscoso equivalente negativo, a la resistencia.
- Y17: Amortiguamiento viscoso equivalente positivo, a la repetición del ciclo de 0.4%.
- Y18: Amortiguamiento viscoso equivalente negativo, a la repetición del ciclo de 0.4%.

Respuestas asociadas a la capacidad de deformación.

- Y19: Ductilidad positiva, según el criterio de Park.
- Y20: Ductilidad positiva, según el criterio de igualación de energías.
- Y21: Ductilidad negativa, según el criterio de Park.
- Y22: Ductilidad negativa, según el criterio de igualación de energías.
- Y23: Factor de comportamiento sísmico, a partir de la ductilidad, según el criterio de Park.
- Y24: Factor de comportamiento sísmico, a partir de la ductilidad, según el criterio de igualación de energías.

Tabla 2.1: Matriz del experimento

NÚMERO DE EXPERIENCIA	FACTOR O VARIABLE	
	X1	X2
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+

Tabla 2.2: Características generales de los especímenes según el diseño del experimento

ESPÉCIMEN	DENOMINACIÓN	FACTOR O VARIABLE	
		X1 ARMADO LONGITUDINAL	X2 DISTRIBUCIÓN DE ESTRIBOS
1	421	Tradicional	Uniforme
2	601	Electrosoldado	Uniforme
3	423	Tradicional	Concentrada
4	603	Electrosoldado	Concentrada
5	422	Tradicional	Uniforme
6	602	Electrosoldado	Uniforme
7	424	Tradicional	Concentrada
8	604	Electrosoldado	Concentrada

2.3 Características del elemento de ensayo

El diseño de este experimento requirió de la fabricación y ensaye de ocho modelos, cuyas dimensiones globales nominales fueron 2.50m de ancho, 2.45m de alto y 15cm de espesor. La altura corresponde al nivel de entepiso de una vivienda multifamiliar común. Los modelos se desplantaron sobre vigas de concreto reforzado de 60cm de ancho, por 40cm de alto, por 400cm de largo.

Las piezas de mampostería que se utilizaron fueron bloques de concreto de tres celdas, con dimensiones nominales de 15x20x40cm. Se colocaron 5 piezas y media al hilo en dirección horizontal y 11 hiladas en dirección vertical. El espesor de las juntas varió entre 12 y 13 mm. La sección nominal de los castillos y de la dala fue de 15 por 15 cm, y se colaron directamente sobre la mampostería; es decir, la interfase castillo-mampostería fue no dentada (Ver fig. 2.1). El mortero se colocó como es usual en una obra, o sea en las caras exteriores de las piezas y se terminó la junta a “mezcla cortada”.

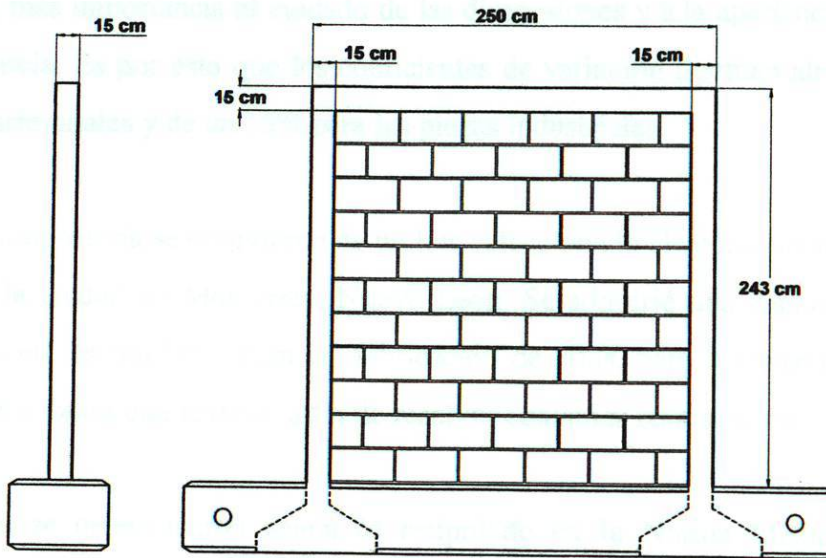


Figura 2.1: Dimensiones generales de los especímenes

Los especímenes fueron nombrados de la siguiente manera: del 421 al 424, que consistieron en el refuerzo longitudinal de los castillos y dalas de varillas corrugadas de grado 42 laminadas en caliente y el refuerzo transversal de los mismos de alambón liso de grado 23 laminado en caliente; y del 601 al 604, que consistieron en el refuerzo longitudinal de varillas de grado 60 laminadas en frío y el refuerzo transversal de alambre liso de grado 50 trefilado en frío.

En los modelos 421, 422, 601 y 602 los estribos se distribuyeron uniformemente en toda la longitud de los castillos y en los modelos 423, 424, 603 y 604 se intercalaron estribos adicionales

en las esquinas de los castillos, colocados a la mitad del espaciamiento, en una longitud aproximada de tres veces la dimensión del castillo.

2.3.1 Materiales:

Mampostería.- Una de las propiedades estructurales más importantes es la resistencia a la compresión. En general, la resistencia tiene una gran dispersión tanto para piezas fabricadas artesanalmente como para unidades de fabricación industrial, esto es debido a que en el control de calidad se le da más importancia al cuidado de las dimensiones y a la apariencia de las unidades, que a su resistencia. Es por esto que los coeficientes de variación fluctúan alrededor de un 25% para las piezas artesanales y de un 15% para las piezas industriales.

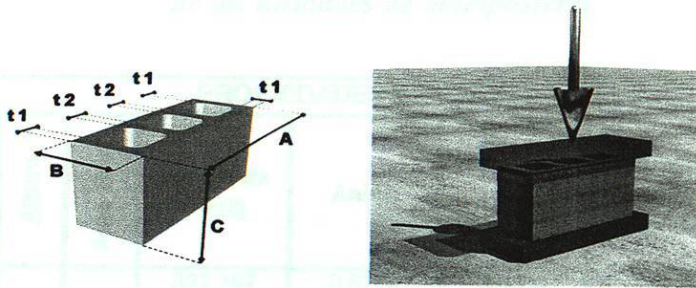
Las piezas de mampostería se obtuvieron de un lote seleccionado aleatoriamente, de un fabricante de prestigio en la ciudad de Monterrey, Nuevo León. Se adquirió una cantidad suficiente para efectuar pruebas en las unidades para la fabricación de pilas, para los muretes y los muros; y también para que sobrara una reserva, a fin de resolver cualquier contingencia.

Las dimensiones se determinaron según lo estipulado en la Norma Mexicana NMX-C-038 (*SECOFI, 1974*), a partir de una muestra de 20 unidades. El peso volumétrico (γ), la absorción (%), y la resistencia a la compresión $\overline{f_p}$, se obtuvieron de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-C-404 (*ONNCCE, 2005*), a partir de una muestra de 12 unidades que fueron preparadas para su ensayo, a una edad de 30 días. Los coeficientes de variación para las dimensiones, el peso volumétrico y la absorción, oscilaron entre 0.1 y 0.11.

En la figura 2.2 se muestra un resumen de los resultados de las mediciones y de los ensayos, de las unidades, a compresión. La resistencia media, $\overline{f_p}$, obtenida, fue de 93.23 kg/cm² (9.14MPa), con un coeficiente de variación, c_p , de 0.10. El esfuerzo de diseño, f_p^* , calculado según la Norma NMX-C-404 (*ONNCCE, 2005*) y según la Norma para diseño de estructuras de mampostería

(GDF, 2004b) mediante la ecuación 2.1, tomando la resistencia media obtenida de los ensayos y el coeficiente de variación obtenido experimentalmente, resultó de 74.93 kg/cm^2 (7.35 MPa).

$$f_p^* = \frac{\bar{f}_p}{1 + 2.5c_p} \quad (2.1)$$



PROPIEDADES DE PIEZAS					
DIMENSIONES PROMEDIO (mm)					An Ab
A	B	C	t 1	t 2	
396	143	193	27	30	0.55

PROPIEDADES DE PIEZAS					
Absorción		Peso vol. seco bruto (kg/m³)	Peso vol. seco neto (kg/m³)	Esfuerzo en área bruta (kg/cm²)	Esfuerzo en área neta (kg/cm²)
L/m³	(%)				
127	5.6	1201	2263	93	168
Coeficiente de Variación (Cp)				0.10	0.10

Nota: 1 MPa = 10.19 kgf/cm²

Figura 2.2: Resumen de los resultados de las mediciones y ensayos de piezas de mampostería. Valores redondeados

Por otra parte, si en la misma ecuación 2.1 se toma el valor mínimo de 0.20 para el coeficiente de variación, estipulado en las referidas normas (ONNCCE, 2005) (GDF, 2004b), para tomar en cuenta la dispersión de esta propiedad en la obra, el esfuerzo de diseño, f_p^* , resulta ser de 62.15 kg/cm^2 (6.1 MPa). Los resultados completos de los ensayos a compresión, de las unidades, se muestran en la tabla 2.3.

De los resultados obtenidos se concluye que la resistencia de los bloques de concreto utilizados para la construcción de los modelos cumplió la Norma NMX-C-404 (ONNCCE, 2005); sin embargo, el esfuerzo de diseño no alcanza el mínimo estipulado en la Norma para diseño de estructuras de mampostería (GDF, 2004b), para utilizar los valores indicativos de resistencia a la

compresión y a la tensión diagonal, de la mampostería, sugeridos. Esto se debe, como se había mencionado anteriormente, a que la capacidad de resistencia de las piezas de los años setenta era mayor que la de las piezas actuales.

Tabla 2.3: Resultados de ensayos a compresión de las unidades de mampostería

PROPIEDADES DE PIEZAS									
Probeta	Largo	Ancho	Altura	Área Bruta	Área Neta (cm ²)	An/Ab	Carga (kg)	Esfuerzo en área bruta (kg/cm ²)	Esfuerzo en área neta (kg/cm ²)
U1	39.60 cm	14.30 cm	19.30 cm	566.28 cm ²	327.197	0.5778	46900	82.82	143.34
U2					309.585	0.5467	44500	78.58	143.74
U3					321.421	0.5676	50680	89.50	157.68
U4					327.536	0.5784	49096	86.70	149.89
U5					305.848	0.5401	65106	114.97	212.87
U6					296.391	0.5234	52291	92.34	176.43
U7					318.136	0.5618	52671	93.01	165.56
U8					297.863	0.5260	53223	93.99	178.68
U9					311.058	0.5493	54671	96.54	175.76
U10					313.323	0.5533	55333	97.71	176.60
U11					320.571	0.5661	55715	98.39	173.80
U12					318.589	0.5626	53339	94.19	167.42
Promedio					313.960	0.5544	52794	93.23	168.48
C.V.								0.10	0.11

Está comprobado que la resistencia de los muros estructurales sometidos a diferentes sollicitaciones puede asociarse, mediante fórmulas empíricas, con propiedades mecánicas básicas o propiedades índice, obtenidas a partir del ensayo de conjuntos de piezas y mortero, sujetos a sollicitaciones simples. Los ensayos más comunes son los de pilas y muretes.

Para determinar la resistencia y el módulo de elasticidad a la compresión, de la mampostería, se ensayaron nueve pilas, a la edad de 28 días, según la Norma Mexicana (ONNCCE, 2002a), que consistieron en tres piezas superpuestas y pegadas con mortero. Tanto el material como la mano de obra fueron las mismas que las empleadas para la fabricación de los modelos; en esta forma, la relación de aspecto (altura / espesor) fue igual a cuatro. Así, al calcular los valores índice se utilizó un factor de corrección por esbeltez igual a uno. Antes del ensayo, las pilas se prepararon como está estipulado en la norma correspondiente.

Al modo de falla de las pilas sometidas a compresión, que depende de la interacción pieza-mortero, se le denomina efecto de junta, y se explica a continuación. Al ser la resistencia y el módulo de elasticidad del mortero menores que los de las piezas, las deformaciones axiales y transversales de éste son mayores que las de las unidades. Al aproximarse el esfuerzo axial a la resistencia a la compresión del mortero sin confinar, su relación de Poisson se incrementa significativamente y, consecuentemente, sus deformaciones transversales tienen un aumento importante.

Este efecto combinado, produce deformaciones transversales del mortero que exceden las de las unidades. Sin embargo, la fricción y la adherencia del mortero con las piezas hacen que se igualen las deformaciones de ambos e inducen esfuerzos transversales biaxiales de tensión, en las unidades y de compresión, en el mortero. Esto produce una compresión triaxial en el mortero, que mejora su resistencia, mientras que reduce la resistencia a compresión de las unidades que, finalmente, llegan a la falla por agrietamiento vertical.

En la figura 2.3 se presenta un resumen de los resultados de los ensayos a compresión de las nueve pilas. La resistencia media, $\overline{f_m}$, obtenida, fue de 53.47 kg/cm² (5.24 MPa), con un coeficiente de variación, c_m , de 0.15. El esfuerzo de diseño, f_m^* , resultó de 38.61 kg/cm² (3.79 MPa), calculado según la Norma para diseño de estructuras de mampostería (*GDF, 2004b*), mediante la ecuación 2.2, tomando la resistencia media obtenida de los ensayos, y el valor de 0.15 para el coeficiente de variación.

$$f_m^* = \frac{\overline{f_m}}{1 + 2.5c_m} \quad (2.2)$$

Según la Norma (*ONNCCE, 2002a*), el módulo de elasticidad E_m se define como el módulo secante de la curva esfuerzo-deformación, hasta el 40% de la resistencia obtenida en los ensayos. El cálculo se realizó mediante la ecuación 2.3.

$$E_m = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (2.3)$$

en la cual: E_m es el módulo de elasticidad de la mampostería;
 σ_1 es el esfuerzo axial correspondiente a 0,00005 de deformación;
 σ_2 es el esfuerzo axial correspondiente al 40% de la carga máxima;
 ε_2 es la deformación producida por el esfuerzo σ_2 .



PROPIEDADES DE PILAS.				
Carga Máxima	Resistencia Media	Resistencia de Diseño	Módulo de Elasticidad	Cociente
Pmax (kg)	\bar{f}_m (kg/cm ²)	f_m^* (kg/cm ²)	E_m (kg/cm ²)	E_m / \bar{f}_m
30217	53.47	38.89	40333	754
	c_m 0.15		c_m 0.27	

Nota: 1 Mpa = 10.19 kgf/cm²

Figura 2.3: Resumen de los resultados de ensayos de pilas a compresión axial

El módulo de elasticidad promedio, E_m , resultó de 40, 333 kg/cm² (3, 955 MPa), con un coeficiente de variación, c_m , de 0.275. Los resultados completos de los ensayos a compresión, de las pilas, se consignan en la tabla 2.4.

Tabla 2.4: Resultados de ensayos a compresión de pilas de mampostería

PROPIEDADES DE PILAS			
Probeta	Carga máxima P_{max} (kg)	Resistencia media f_m (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad E_m (kg/cm ²)
P1	37811	66.77	37258
P2	33195	58.62	54106
P3	28263	49.91	38730
P4	27878	49.23	40566
P5	29588	52.25	57632
P6	33916	65.19	45503
P7	27163	43.67	38473
P8	25669	45.33	26246
P9	28467	50.27	24481
Promedio	30217	53.47	40333
C_m	0.130	0.154	0.275

Notas: 1 kN = 101.97 kgf

1 MPa = 10.19 kgf/cm²

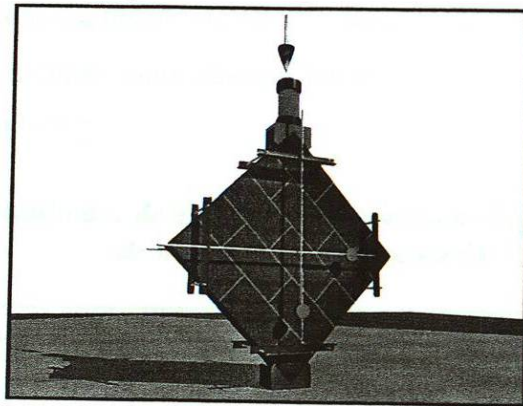
La resistencia a la tensión diagonal y el módulo de elasticidad al cortante o módulo de rigidez se determinaron como se menciona en la Norma (*ONNCCE, 2002b*), ensayando nueve muretes, a la edad de 28 días, mediante la aplicación monotónica de una carga de compresión a lo largo de una de sus diagonales. Los muretes consistieron en cinco hiladas de dos piezas y media cada una, unidas con juntas de mortero del mismo espesor que el empleado para los muros, a manera de obtener una sección de 1.0m por lado. Se colocaron unos cabezales en cada esquina de la diagonal sobre la que se le aplicó la carga, asegurándose de que cubrieran menos de la longitud de la primera hilada. Al igual que las pilas, tanto el material utilizado como la mano de obra fueron los mismos que los que se utilizaron en la fabricación de los muros.

En un ensayo de la compresión diagonal se presentan tres modos de falla, a saber: cuando la resistencia a tensión, de las unidades, es mayor en relación con la resistencia de adherencia del mortero con las piezas, se produce un agrietamiento, a lo largo de las juntas; cuando la resistencia a tensión de las unidades es menor, en relación con la resistencia de adherencia del mortero con las piezas, se presenta un agrietamiento diagonal, a través de las unidades; y el agrietamiento mixto, es decir, tanto en las juntas como en las unidades, que ocurre cuando la resistencia a la

tensión, de las piezas, es comparable con la resistencia de adherencia del mortero con las unidades (*Miranda, 1999*).

En la figura 2.4 se presenta un resumen de los resultados de los ensayos a la compresión diagonal de los nueve muretes. La resistencia media, \bar{v}_m , obtenida fue de 4.31 kg/cm^2 (0.42 MPa), con un coeficiente de variación, c_v , de 0.18. El esfuerzo de diseño, v_m^* , calculado según la Norma para diseño de estructuras de mampostería (*GDF, 2004b*), mediante la ecuación 2.4, tomando la resistencia media obtenida de los ensayos y el coeficiente de variación obtenido experimentalmente, resultó de 2.96 kg/cm^2 (0.29 MPa).

$$v_m^* = \frac{\bar{v}_m}{1 + 2.5c_v} \quad (2.4)$$



PROPIEDADES DE MURETES.				
Carga Máxima	Resistencia Media	Resistencia de Diseño	Módulo de Cortante	Cociente
P_{max} (kg)	\bar{v}_m (kg/cm ²)	v_m^* (kg/cm ²)	G_m (kg/cm ²)	G_m / \bar{v}_m
8709	4.31	2.87	19782	4590
	c_v 0.18		c_v 0.24	

Nota: 1 MPa = 10.19 kgf/cm²

Figura 2.4: Resumen de resultados de ensayos de muretes a compresión diagonal

Ahora bien, si en la misma ecuación 2.4 se toma el valor mínimo de 0.20 estipulado para el coeficiente de variación para tomar en cuenta la dispersión de esta resistencia en obra, el esfuerzo de diseño resulta ser de 2.87 kg/cm^2 (0.28 MPa).

De manera análoga que para las pilas, en el referido proyecto de Norma (*ONNCCE, 2002b*), el módulo de rigidez G_m se define como el módulo secante de la curva de esfuerzo cortante-deformación angular, hasta el 40% de la resistencia obtenida en los ensayos. El cálculo se realizó mediante la ecuación 2.5.

$$G_m = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\gamma_2 - 0.00005} \quad (2.5)$$

donde: G_m es el módulo de rigidez o módulo de elasticidad al cortante,
 τ_1 es el esfuerzo cortante correspondiente a 0,00005 de deformación angular,
 τ_2 es el esfuerzo cortante correspondiente al 40% de la carga máxima,
 γ_2 es la deformación angular producida por el esfuerzo τ_2 .

El módulo de rigidez promedio G_m resultó de 19, 782 kg/cm² (1, 940 MPa), con un coeficiente de variación de 0.243. Los resultados completos de los ensayos a la compresión diagonal, de los muretes, se incluyen en la tabla 2.5.

Tabla 2.5: Resultados de ensayos a compresión diagonal de muretes de mampostería

PROPIEDADES DE MURETES							
Probeta	loc (cm)	lot (cm)	Lc (cm)	t (cm)	Carga máxima P _{max} (kg)	Resistencia media V _{max} (kg)	Módulo de cortante G _m (kg/cm ²)
MU1	105.60	107.35	141.05	14.50	7056	3.45	13636
MU2	107.50	105.45	140.65	14.30	7735	3.85	17662
MU3	107.50	105.45	140.65	14.30	8576	4.26	22841
MU4	104.25	106.10	140.00	14.40	9248	4.59	17764
MU5	107.83	107.10	140.85	14.50	9416	4.61	19435
MU6	106.10	106.65	139.95	14.30	12275	6.13	29546
MU7	107.83	107.10	140.85	14.50	8527	4.18	22857
MU8	107.30	106.50	139.75	14.30	7964	3.99	19437
MU9	106.25	105.90	140.65	14.40	7588	3.75	14862
Promedio	106.68	106.40	140.49	14.39	8709	4.31	19782
C _v					0.177	0.181	0.243

Notas: 1 kN = 101.97 kgf 1 MPa = 10.19 kgf/cm²

De los resultados anteriores se puede inferir que los coeficientes de variación de los valores de las propiedades mecánicas, obtenidos de las pruebas de las unidades y de la mampostería, en general,

se mantuvieron menores que los mínimos sugeridos en la Norma para diseño de estructuras de mampostería (*GDF, 2004b*), con excepción de las pilas, donde el coeficiente se excedió en 3%, en comparación con el valor mínimo estipulado en la Norma.

Concreto y mortero.- El concreto utilizado para la fabricación de castillos y dalas se dosificó por peso para una resistencia nominal, f'_c , de 200 kg/cm² (19.6 MPa). Para verificar lo anterior, se ensayaron, a la compresión, una serie de tres cilindros, según la Norma NMX-C-083 (*ONNCCE, 1997b*), por cada muro; un total de 24 cilindros. El peso volumétrico fue de 2.3 t/m³. El cemento utilizado fue Portland tipo CPC-30R según la clasificación de la Norma NMX-C-414 (*ONNCCE, 1999*). La resistencia media a la compresión obtenida, \bar{f}_c , a los 28 días, fue de 235 kg/cm² (23.0 MPa) con un coeficiente de variación de 0.033 (ver tabla 2.7).

El mortero que se utiliza para unir las piezas representa aproximadamente el 8% del área total de los muros en las edificaciones de mampostería; sin embargo, esto influye significativamente en el comportamiento estructural de los muros. Algunas de las principales funciones del mortero son: constituir la cama de asiento y adherencia entre las unidades; permitir la correcta colocación y nivelación de las piezas, ya que compensa las irregularidades de éstas; formar junto con las piezas un conjunto resistente a la compresión y al cortante, principalmente en el plano del muro; en caso de colocar acero de refuerzo en las juntas, se encarga de adherirlo; y también de evitar filtraciones de aire y agua, sellando las juntas de las piezas.

Las propiedades del mortero que más influyen en la respuesta de los elementos estructurales de mampostería son: la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, que afectan la resistencia a la carga vertical y a la deformabilidad de la mampostería; la resistencia a la adherencia o a la tensión, que a su vez afecta la resistencia a la compresión diagonal de la mampostería.

El mortero para unir las piezas fue del tipo I, utilizando cemento Portland tipo CPC-30R, la proporción volumétrica cemento : arena fue de 1:3. El muestreo, consistió en la obtención de dos series de tres cubos de 5 cm de arista por cada muro: un total de 48 cubos que fueron ensayados a

compresión. Este procedimiento está bien establecido y normado y su uso se ha generalizado debido a la facilidad con la que se obtienen y ensayan las muestras y, además, porque sus resultados se pueden asociar a otras propiedades de la mampostería. (Alcocer y Klingner, 1994).

El peso volumétrico fue de 2.1 t/m³. La resistencia promedio a la compresión \bar{f}_j obtenida de los ensayos fue de 231 kg/cm² (22.7 MPa), con un coeficiente de variación del 3.1%. Las tablas 2.6 y 2.7 presentan los resultados completos de las pruebas efectuadas al mortero y al concreto, respectivamente.

Tabla 2.6: Resultados de ensayos a compresión de cubos de mortero

Consecutivo	Probeta	a (cm)	b (cm)	c (cm)	Peso volumétrico (t/m ³)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	M1-421	5.10	5.00	5.00	2.20	244
2	M2-421	5.20	5.10	5.10	2.10	230
3	M3-421	5.20	5.00	5.00	2.10	237
4	M4-421	5.30	5.20	5.00	2.10	236
5	M5-421	5.10	5.10	5.00	2.10	231
6	M6-421	5.10	5.10	5.00	2.20	235
7	M1-422	5.20	5.00	5.10	2.10	233
8	M2-422	5.30	5.00	5.20	2.10	238
9	M3-422	5.30	5.00	5.10	2.10	233
10	M4-422	5.10	5.10	5.00	2.00	239
11	M5-422	5.10	5.10	5.00	2.10	217
12	M6-422	5.10	5.20	5.10	2.10	235
13	M1-423	5.20	5.10	5.00	2.10	235
14	M2-423	5.10	5.00	5.00	2.10	219
15	M3-423	5.10	5.10	5.00	2.20	228
16	M4-423	5.30	5.10	5.00	2.10	233
17	M5-423	5.20	5.20	5.00	2.00	241
18	M6-423	5.30	5.10	5.10	2.10	237
19	M1-424	5.10	5.10	5.10	2.10	234
20	M2-424	5.10	5.00	5.00	2.10	211
21	M3-424	5.20	5.20	5.20	2.10	220
22	M4-424	5.10	5.20	5.10	2.10	235
23	M5-424	5.10	5.00	5.00	2.10	229
24	M6-424	5.10	5.10	5.10	2.10	239
25	M1-601	5.20	5.10	5.10	2.10	233
26	M2-601	5.10	5.10	5.10	2.10	232
27	M3-601	5.10	5.10	5.20	2.00	231
28	M4-601	5.10	5.20	5.20	2.10	235
29	M5-601	5.00	5.00	5.20	2.20	236
30	M6-601	5.20	5.20	5.10	2.10	239

Continuación.

Tabla 2.6: Resultados de ensayos a compresión de cubos de mortero

31	M1-602	5.20	5.20	5.20	2.10	235
32	M2-602	5.20	5.20	5.20	2.10	230
33	M3-602	5.10	5.10	5.10	2.10	241
34	M4-602	5.10	5.10	5.00	2.10	225
35	M5-602	5.10	5.10	5.20	2.00	232
36	M6-602	5.10	5.10	5.10	2.10	230
37	M1-603	5.20	5.10	5.10	2.10	221
38	M2-603	5.00	5.00	5.10	2.10	220
39	M3-603	5.20	5.00	5.10	2.10	230
40	M4-603	5.20	5.20	5.00	2.10	233
41	M5-603	5.10	5.00	5.10	2.10	234
42	M6-603	5.10	5.20	5.00	2.10	236
43	M1-604	5.10	5.10	5.20	2.10	210
44	M2-604	5.10	5.10	5.20	2.10	235
45	M3-604	5.10	5.00	5.20	2.10	234
46	M4-604	5.00	5.00	5.20	2.10	232
47	M5-604	5.10	5.20	5.20	2.20	230
48	M6-604	5.00	5.00	5.00	2.00	228
PROMEDIO		5.14	5.09	5.09	2.10	231
C.V.					0.022	0.031

Tabla 2.7: Resultados de ensayos a compresión de cilindros de concreto

Consecutivo	Probeta	d1 (cm)	d2 (cm)	h (cm)	Peso volumétrico (t/m ³)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	C1-421	15.1	15.1	30.2	2.3	234.0
2	C2-421	15.2	15.2	30.3	2.4	240.0
3	C3-421	15.1	15.1	30.1	2.4	230.0
4	C1-422	15.3	15.2	30.0	2.3	235.0
5	C2-422	15.2	15.2	30.2	2.2	237.0
6	C3-422	15.1	15.3	30.1	2.2	244.0
7	C1-423	15.1	15.2	30.3	2.3	254.0
8	C2-423	15.1	15.3	30.1	2.3	231.0
9	C3-423	15.2	15.2	30.4	2.3	230.0
10	C1-424	15.2	15.1	30.1	2.3	228.0
11	C2-424	15.1	15.1	30.2	2.3	225.0
12	C3-424	15.1	15.1	30.2	2.3	230.0
13	C1-601	15.2	15.0	30.3	2.4	232.0
14	C2-601	15.1	15.1	30.1	2.2	234.0
15	C3-601	15.1	15.3	30.1	2.4	235.0

Continuación.

Tabla 2.7: Resultados de ensayos a compresión de cilindros de concreto

16	C1-602	15.1	15.3	30.3	2.3	235.0
17	C2-602	15.3	15.2	30.1	2.3	237.0
18	C3-602	15.0	15.1	30.2	2.3	241.0
19	C1-603	15.1	15.1	30.2	2.3	253.0
20	C2-603	15.2	15.2	30.1	2.3	228.0
21	C3-603	15.2	15.3	30.1	2.3	225.0
22	C1-604	15.2	15.3	30.3	2.2	226.0
23	C2-604	15.1	15.2	30.3	2.4	232.0
24	C3-604	15.2	15.0	30.4	2.2	243.0
PROMEDIO.		15.2	15.2	30.2	2.3	235.0
C.V.					0.029	0.033

Nota: 1 MPa = 10.19 kgf/cm²

Acero de Refuerzo.- El comportamiento del acero de refuerzo ante cargas monótonas, se determinó mediante ensayos a tensión; según las Normas NMX-C-407 (ONNCCE, 2001b); NMX-B-072 (SECOFI, 1986b); NMX-B-172 (SECOFI, 1988a), NMX-B-253 (SECOFI, 1988b) y NMX-B-309 (SECOFI, 1971) (ver Figura 2.5).

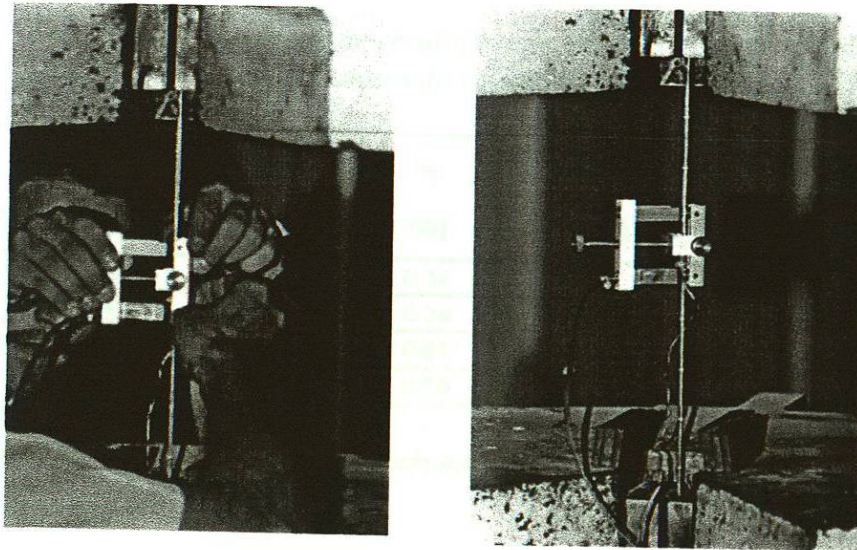


Figura 2.5: Ensayos a tensión del acero de refuerzo

Se obtuvieron 50 probetas, de 60 cm de longitud, de los muros 421, 422, 423 y 424; a saber: a) cinco especímenes de cada uno de los modelos: 421, 422, 423 y 424, de las barras corrugadas de 9.5mm de diámetro, que corresponden al refuerzo longitudinal de los castillos y dalas. b) seis especímenes de cada uno de los muros, 421 y 422, y nueve especímenes de cada uno de los muros 423 y 424, del alambón liso de 6.3 mm, usado como refuerzo transversal de los castillos y dalas.

Además se obtuvieron 34 probetas de 60 cm de longitud de los muros: 601, 602, 603 y 604, de los cuales son: a) seis especímenes de cada uno de los modelos: 601, 602, 603 y 604, de alambón corrugado estirado en frío, de 6.3 mm de diámetro, correspondiente al refuerzo longitudinal de los castillos y dalas y, b) diez especímenes, en total, de los modelos: 601, 602, 603 y 604, de alambre liso de 4.1 mm de diámetro, utilizado como refuerzo transversal de los castillos y dalas.

Un resumen de los resultados de estos ensayos, se muestra en la tabla 2.8, donde se puede observar que el refuerzo empleado en la fabricación de los modelos correspondió a los estándares que se estipulan en las Normas Mexicanas. Los resultados completos, para los cuatro tipos de acero, se muestran en las tablas: 2.9, 2.10, 2.11 y 2.12. Ver Apéndice.

Tabla 2.8: Resumen de resultados de ensayos a tensión del acero de refuerzo

PROPIEDADES DESIGNACION	fy [Kg/cm2]	εy [%]	fmax [Kg/cm2]	ALARGAMIENTO	
				BASE DE MEDICIÓN	%
6.3 mm (1/4") Gr. 23	2542 (a)	0.14	4457	200 mm	23.0
9.5 mm (3/8") Gr. 42	4546 (a)	0.24	7237	200 mm	13.8
4.1 mm, cal. 8 Gr. 50	6917 (b)	0.51	7258	10 diámetros	6.3
6 mm (Gr. 60)	7402 (b)	0.59	7940	10 diámetros	8.2

(a) Punto de Fluencia

(b) Resistencia de Fluencia o Esfuerzo de Fluencia Aparente

1 MPa = 10.19 kgf/cm²

2.3.2 Armados

El armado correspondiente a los muros 421 y 422 es el que se utiliza en una vivienda típica unifamiliar o multifamiliar y satisface los requerimientos mínimos estipulados en la Norma para diseño de estructuras de mampostería (*GDF, 2004b*). Mientras que el refuerzo utilizado en los muros 601 y 602 es el que se ha introducido en años recientes al mercado nacional por algunos fabricantes. La concentración de estribos en los extremos de los castillos corresponde al diseño del experimento. A continuación se explica el procedimiento de refuerzo de los elementos confinantes de los muros.

Según lo especifica el diseño del experimento, el armado de las dalas y castillos para los especímenes 421 y 422 consistió en armazones habilitadas en el laboratorio, con cuatro varillas corrugadas, en dirección longitudinal, grado 42 ($f_y = 4\,200 \text{ kg/cm}^2$) (412 MPa), de 9.5 mm (3/8") de diámetro; y estribos de alambroń liso, grado 23 ($f_y = 2\,300 \text{ kg/cm}^2$) (226 MPa), de 6.3 mm (1/4") de diámetro, espaciados a cada 200 mm, para el caso de distribución uniforme. Para el caso de los especímenes 423 y 424, en los que la distribución fue concentrada, se intercalaron estribos adicionales en los extremos de los castillos, de tal forma que quedarán estribos a cada 100 mm, en una longitud de 600 mm, a partir de las esquinas de los tableros.

Para el caso de los especímenes 601 y 602, el armado consistió en armazones electrosoldadas prefabricadas, formadas por cuatro varillas corrugadas, en dirección longitudinal, grado 60 ($f_y = 6\,000 \text{ kg/cm}^2$) (588 MPa), de 6.0 mm de diámetro; y estribos de alambre liso, grado 50 ($f_y = 5\,000 \text{ kg/cm}^2$) (490 MPa), de 4.1 mm (calibre 8) de diámetro, espaciados a cada 158 mm, para el caso de distribución uniforme. Para el caso de los especímenes con distribución concentrada, nombrados 603 y 604, se intercalaron estribos adicionales de alambre corrugado grado 60, de 3.97 mm (5/32") de diámetro, en los extremos de los castillos, habilitados y colocados en el laboratorio, de tal forma que los estribos quedarán a cada 79 mm, en una longitud de 474 mm, a partir de las esquinas de los tableros.

En todos los especímenes, el primer estribo del extremo inferior de los castillos se colocó en la posición más desfavorable; quedando de la siguiente manera: en los modelos 421 y 422, el primer estribo quedó ubicado 200 mm arriba del lecho superior de la viga de desplante; en los modelos 601 y 602, el primer estribo se colocó 158 mm arriba del lecho superior de la viga de desplante; y para los modelos 423, 424, 603 y 604, el espacio se redujo a la mitad.

Sin embargo, en todos los casos el primer estribo quedó localizado a no más de la mitad del espaciamiento establecido para los armados con refuerzo transversal, uniformemente distribuido. Así, en el caso de las armazones electro-soldadas, se situó a 68 mm, mientras que en el caso de acero tradicional se colocó a 80 mm. Además, en todos muros, los extremos de los estribos se anclaron en el corazón de los castillos, mediante terminación en ganchos con doblez a 135 °.

En las figuras 2.6 y 2.7 se muestra la disposición del armado, y en la tabla 2.13 se consignan algunas características del refuerzo colocado, tales como: diámetro, espaciamiento, área y cuantía, según el caso.

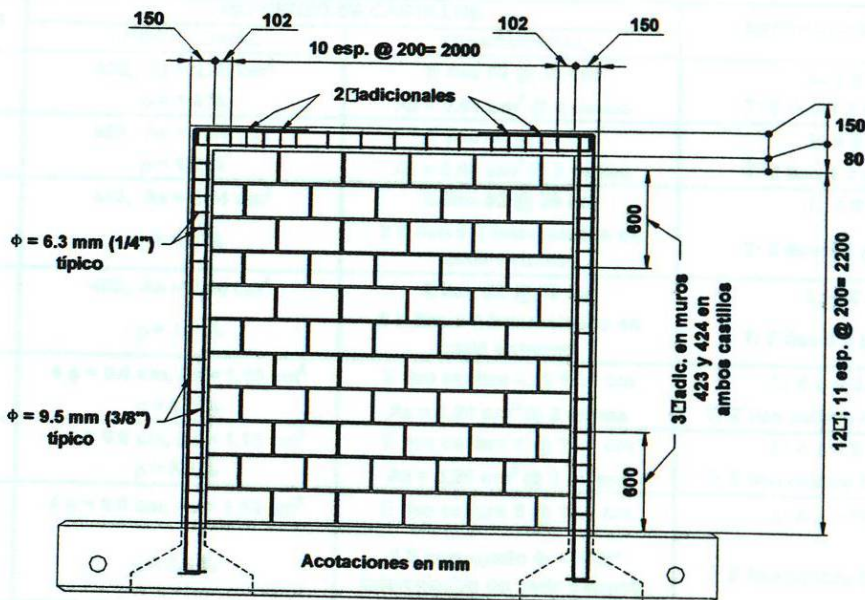


Figura 2.6: Armado de muros: 421, 422, 423 y 424

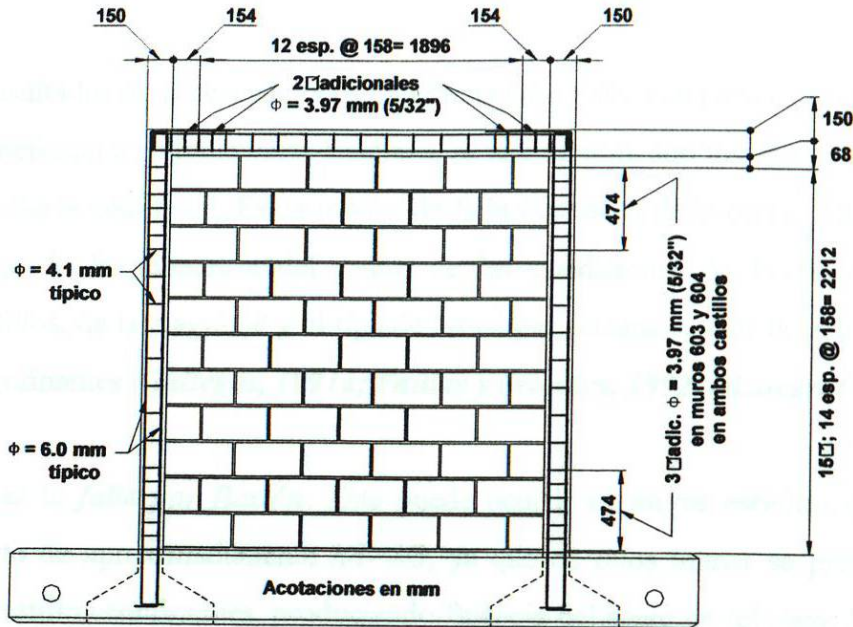


Figura 2.7: Armado de muros: 601, 602, 603 y 604

Tabla 2.13: Resumen de las características del armado de los especímenes

ESPÉCIMEN	REFUERZO EN CASTILLOS		REFUERZO EN DALA
	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL	
421	4#3, $A_s = 2.84 \text{ cm}^2$ $\rho = 1.4 \%$	E liso #2 @ 20 cm $A_s = 0.64 \text{ cm}^2 @ 2 \text{ ramas}$	L: 4 # 3 T: E liso # 2 @ 20 cm
422	4#3, $A_s = 2.84 \text{ cm}^2$ $\rho = 1.4 \%$	E liso #2 @ 20 cm $A_s = 0.64 \text{ cm}^2 @ 2 \text{ ramas}$	L: 4 # 3 T: E liso # 2 @ 20 cm
423	4#3, $A_s = 2.84 \text{ cm}^2$ $\rho = 1.4 \%$	E liso #2 @ 20 cm 3 E liso # 2 intercalados en cada extremo	L: 4 # 3 T: E liso # 2 @ 20 cm
424	4#3, $A_s = 2.84 \text{ cm}^2$ $\rho = 1.4 \%$	E liso #2 @ 20 cm 3 E liso # 2 intercalados en cada extremo	L: 4 # 3 T: E liso # 2 @ 20 cm
601	4 $\phi = 0.6 \text{ cm}$, $A_s = 1.13 \text{ cm}^2$ $\rho = 0.6 \%$	E liso calibre 8 @ 15.8 cm $A_s = 0.26 \text{ cm}^2 @ 2 \text{ ramas}$	L: 4 $\phi = 0.6 \text{ cm}$ T: E liso calibre 8 @ 15.8 cm
602	4 $\phi = 0.6 \text{ cm}$, $A_s = 1.13 \text{ cm}^2$ $\rho = 0.6 \%$	E liso calibre 8 @ 15.8 cm $A_s = 0.26 \text{ cm}^2 @ 2 \text{ ramas}$	L: 4 $\phi = 0.6 \text{ cm}$ T: E liso calibre 8 @ 15.8 cm
603	4 $\phi = 0.6 \text{ cm}$, $A_s = 1.13 \text{ cm}^2$ $\rho = 0.6 \%$	E liso calibre 8 @ 15.8 cm 3 E corrugado $\phi = 5/32''$ intercalados en cada extremo	L: 4 $\phi = 0.6 \text{ cm}$ T: E liso calibre 8 @ 15.8 cm
604	4 $\phi = 0.6 \text{ cm}$, $A_s = 1.13 \text{ cm}^2$ $\rho = 0.6 \%$	E liso calibre 8 @ 15.8 cm 3 E corrugado $\phi = 5/32''$ intercalados en cada extremo	L: 4 $\phi = 0.6 \text{ cm}$ T: E liso calibre 8 @ 15.8 cm

2.4 Respuesta teórica

A partir de los resultados de investigaciones experimentales y del comportamiento de estructuras reales que se sometieron a sollicitaciones sísmicas, se han identificado tres modos de falla en los muros de mampostería confinada. Estos modos de falla dependen de la capacidad de resistencia de los materiales, de la geometría del muro, de las condiciones de borde en la interfase mampostería-castillos, de la magnitud y el tipo de las cargas actuantes, y de la cuantía de refuerzo en los castillos confinantes (*Gallegos, 1991a; Paulay y Priestley, 1992; Alcocer, 1997*).

El primer modo es la *falla por flexión*. Ésta puede ocurrir en muros esbeltos que tienen una relación de aspecto de aproximadamente $h/l > 4/3$, ya que en estos muros se presentan grandes esfuerzos en los castillos confinantes, produciendo fluencia del acero de refuerzo longitudinal en el extremo de tensión y aplastamiento de la mampostería en el extremo de compresión.

Otro modo es la *falla por cortante*. Ésta se representa por el agrietamiento diagonal a través de las piezas, o siguiendo las juntas de mortero, y ocurre cuando los esfuerzos principales de tensión diagonal exceden la resistencia de la mampostería. Una variante de este modo es la *falla por compresión diagonal*, que se produce por el efecto de puntal que genera grandes esfuerzos de compresión en las esquinas del tablero, y puede conducir al aplastamiento de las piezas si éstas son de baja calidad, si se usan unidades multiperforadas, o si son piezas huecas de pared delgada. También puede ocurrir al reforzar los muros a lo largo de las juntas horizontales, o con mallas embebidas en los aplanados con cuantías generalmente mayores que el 0.2%, o si la carga horizontal se combina con una carga vertical alta.

Finalmente, está el modo de *falla por deslizamiento*. Éste se produce a lo largo de las juntas horizontales de mortero y ocurre debido a una falla de adherencia en la junta, cuando son bajos los niveles de carga vertical.

La relación de aspecto de un muro es el cociente de dividir su altura entre su longitud. Si la relación de aspecto cambia, también varía la importancia relativa de los esfuerzos cortantes y

flexionantes. Esta relación se expresa en términos de (M/VL) , ya que el momento flector M y la fuerza cortante V actúan en la sección transversal crítica del muro, siendo L la longitud del muro.

Es por esto que, en muros en voladizo, a mayor cociente (M/VL) , más importantes son las deformaciones y los esfuerzos inducidos por la flexión en el desempeño del sistema, ya que contribuyen a reducir la resistencia del muro a cortante.

Para poder anticipar el modo probable de falla de los especímenes, se consideraron éstos en voladizo y se calcularon las resistencias al cortante y a la flexión, a partir de los siguientes criterios:

- 1) utilizando la expresión 1.1 de las Normas Técnicas Complementarias para Estructuras de Mampostería del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (*GDF, 2004b*), donde se calcula la resistencia a cargas laterales que está asociada a la falla por tensión diagonal;
- 2) utilizando las expresiones 1.7 a 1.8 de las Normas anteriores donde se calcula la resistencia a la flexo-compresión en el plano del muro;
- 3) se construyó el diagrama momento-curvatura para pronosticar la resistencia a la flexo-compresión de los muros.

Los valores obtenidos sobre la resistencia a la flexo-compresión permitieron calcular las fuerzas cortantes asociadas a la falla por flexión, dividiendo dichos valores entre la altura del muro. Además, la resistencia teórica se calculó a partir de los incisos 1.1, 1.7 y 1.8 de la Norma descrita anteriormente, sobre la base de las dimensiones reales de los modelos, de la carga vertical aplicada durante el ensayo, de las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos de materiales, y finalmente, utilizando factores de reducción iguales a la unidad; en virtud de que los ensayos se realizaron en condiciones controladas, en las que el número de incertidumbres se reduce significativamente.

Para el cálculo de la resistencia teórica para fuerzas laterales, se utilizó el esfuerzo de diseño v_m^* , asociado al coeficiente de variación obtenido en las pruebas de muretes. Para la construcción del diagrama momento-curvatura, se utilizó el modelo de Kent y Park, para representar el comportamiento de los castillos (*Park y Paulay, 1994*). La mampostería se consideró elástica, hasta alcanzar la resistencia de diseño obtenida de las pruebas de pilas a compresión, en correspondencia con el 0.35% de deformación unitaria. El comportamiento del acero de grado 42 se consideró similar al propuesto por *Rodríguez y Botero (1998)*, y el del acero de grado 60 se consideró como elasto-plástico perfecto.

De esta forma, para $v_m^* = 2.96 \text{ kg/cm}^2$ (0.29 MPa) y $f_m^* = 38.6 \text{ kg/cm}^2$ (3.79 MPa), y para los valores medios de esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo obtenidos experimentalmente, se deduce que la resistencia nominal a compresión pura de los muros, P_R , es de 164 t (1 608 kN) y de 155 t (1 520 kN), para los reforzados con acero de grado 42 y con acero de grado 60, respectivamente.

Durante los ensayos, las cargas gravitacionales sobre los muros se simularon mediante la aplicación de un esfuerzo vertical constante de 5.5 kg/cm^2 (0.54 MPa), el cual equivale a una carga axial de diseño P_u de 20 t (196 kN), con un factor de carga unitario. Al incorporar los valores de P_R y P_u anteriores en las expresiones 1.1, 1.7 y 1.8, se obtienen las fuerzas cortantes resistentes teóricas nominales, que se consignan en la tabla 2.14, donde además se presentan las fuerzas cortantes resistentes, obtenidas de los diagramas momento-curvatura, para la fluencia del refuerzo longitudinal de los castillos.

Tabla 2.14: Resistencia teórica de los especímenes

Respuesta Teórica					
Muro	V (NTC)	M (NTC)	V (M, NTC)	M (DIAG)	V (M, DIAG)
	[t]	[m.t]	[t]	[m.t]	[t]
421, 422, 423, 424	11.3	44.9	19.1	50.0	21.2
601, 602, 603, 604	11.3	34.2	14.5	38.7	16.4

- V (NTC) :** Fuerza cortante resistente calculada con la ecuación 1.1 empleando resultados de los ensayos de muretes y factor de reducción igual a la unidad.
- M (NTC):** Momento resistente a flexo-compresión calculado con la ecuación 1.7 empleando propiedades experimentales y factor de reducción igual a la unidad.
- V (M, NTC):** Fuerza cortante asociada a **M** (NTC) para muros en voladizo, empotrados en su base ($V = M/h$).
- M (DIAG):** Momento resistente obtenido del diagrama Momento-Curvatura para la fluencia del acero vertical, empleando propiedades experimentales.
- V (M, DIAG):** Fuerza cortante asociada a **M** (DIAG) para muros en voladizo, empotrados en su base ($V = M/h$).

De lo anterior se concluye que la falla por tensión diagonal se anticipará a la falla por flexión debido a que la fuerza cortante que induce esta última falla es mayor que la que provoca la falla por tensión diagonal, $V_{mR} = 11.3 \text{ t}$ (111 kN). En la figura 2.8 se muestran los diagramas donde se señalan estos valores.

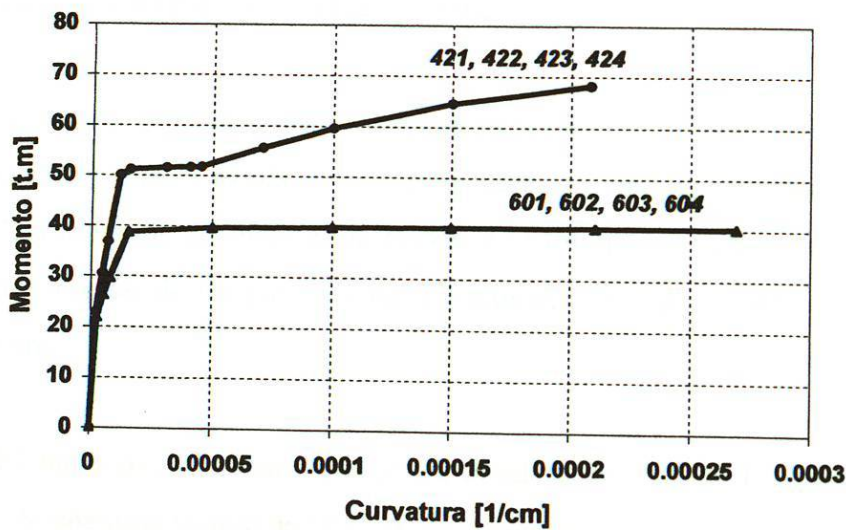


Figura 2.8: Diagramas momento - curvatura

Nota: 1 kN = 0.102 t

2.5 Construcción

Todos los especímenes se construyeron en el laboratorio del Instituto de Ingeniería Civil, de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por personal calificado procedente de una compañía constructora de vivienda de interés social de la ciudad de Monterrey, Nuevo León. Todos los especímenes fueron desplantados en vigas de desplante, las cuales sirvieron de cimentación para cada muro, dejando en éstas unas cavidades en forma de pirámide truncada, donde se colarían los castillos.

El procedimiento constructivo utilizado fue el siguiente: primero se colocó el armado de los castillos dentro de las cavidades de la viga, colándolas con concreto para dejar bien anclado el armado; después se procedió a la escarificación del desplante de la mampostería, para obtener una buena adherencia; se colocó la mampostería, el armado de la dala y la cimbra de los castillos y la dala; finalmente, se coló el concreto de los elementos confinantes para la obtención de una estructura monolítica. Todo se compactó con vibradores eléctricos de contacto. Cabe recordar que la interfase entre los castillos y la mampostería fue no dentada, como resultado de la utilización de piezas enteras y medias piezas en la mampostería.

El curado del concreto se llevó a cabo mediante la aplicación de una película de agua, 72 hrs. después del colado y con la ayuda de una membrana de curado, inmediatamente después del descimbrado. Los modelos se pintaron de blanco y se dibujó una retícula en ambas caras, para facilitar la identificación de los patrones de agrietamiento y para reportar la observación de la evolución del daño.

El transporte del muro hasta la losa de reacción, donde se realizarían los ensayos mecánicos, se hizo por medio de una grúa viajera de 10 t (98 kN) de capacidad, por medio de dos mangas que se colocaron en dos orificios, ubicados en los extremos de la viga de desplante, para este propósito. En la figura 2.9, se muestran algunos aspectos del proceso constructivo y el montaje de los especímenes.

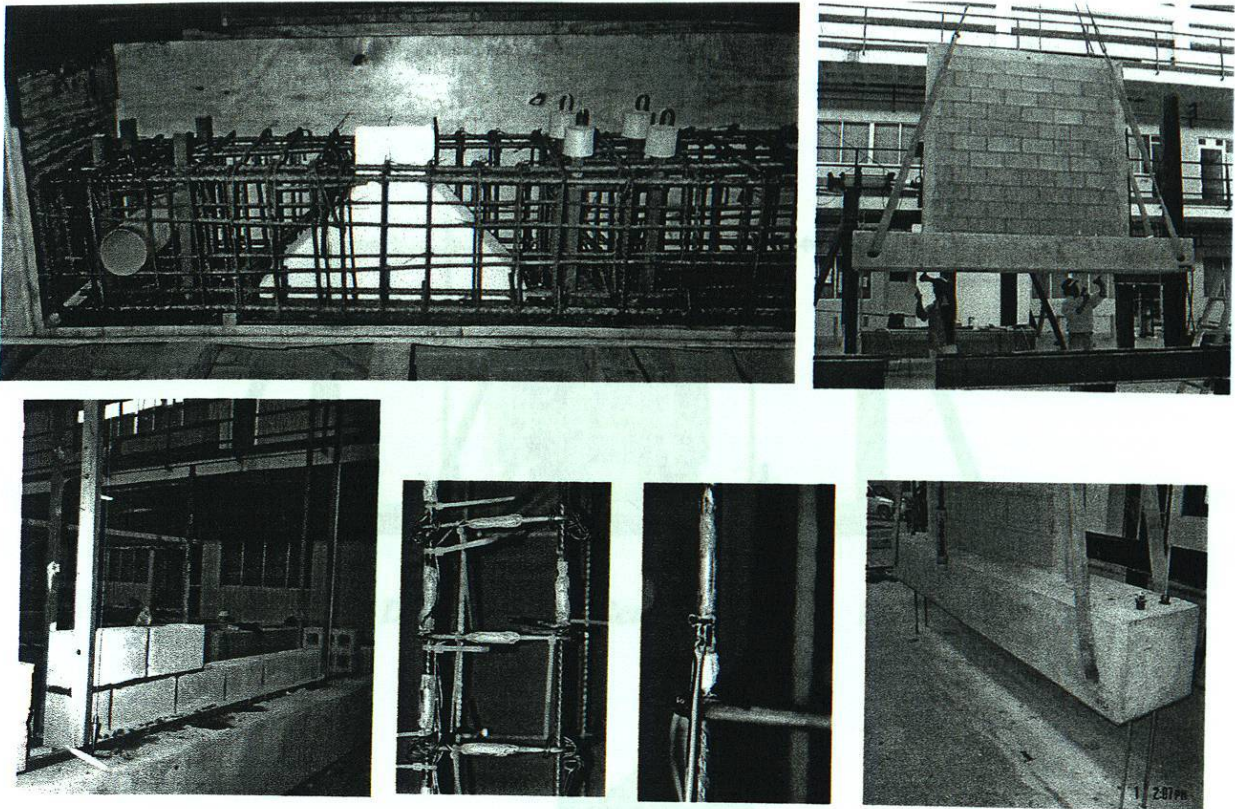


Figura 2.9: Aspectos del proceso constructivo y montaje de los especímenes

2.6 Dispositivo de carga.

Se diseñó y fabricó una estructura de acero y se ancló a la losa de reacción, del Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León; este dispositivo se puede utilizar para ensayos de muros a escala natural, de tipo voladizo, en modo cuasiestático. Ver figs. 2.10 y 2.11.

Figura 2.10: Dispositivo de aplicación de carga. Formación

La aplicación de las cargas verticales y laterales se realizaron tres ganchos horizontales de 20 x 20 cm cada uno, accionados por dos bombas manuales. Se realizó un estudio de estado de tensiones

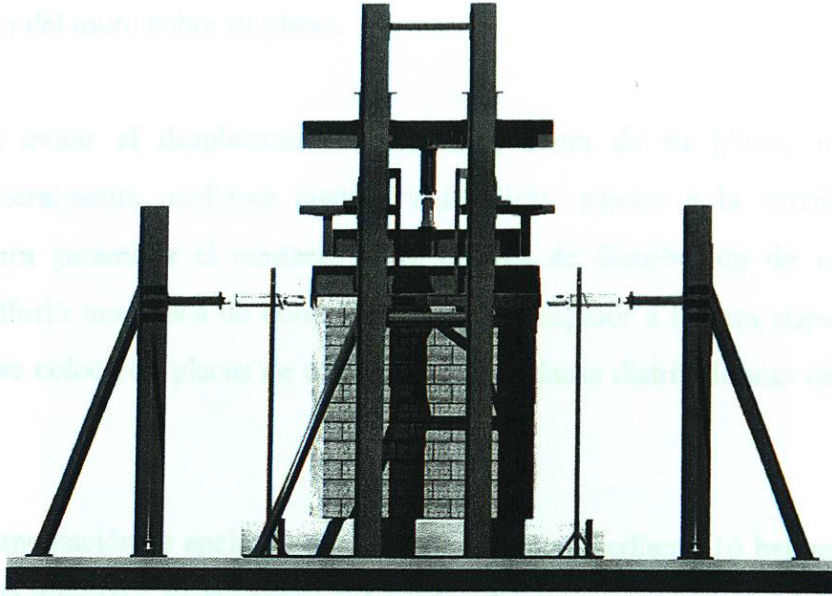


Figura 2.10: Dispositivo de aplicación de carga. Elevación

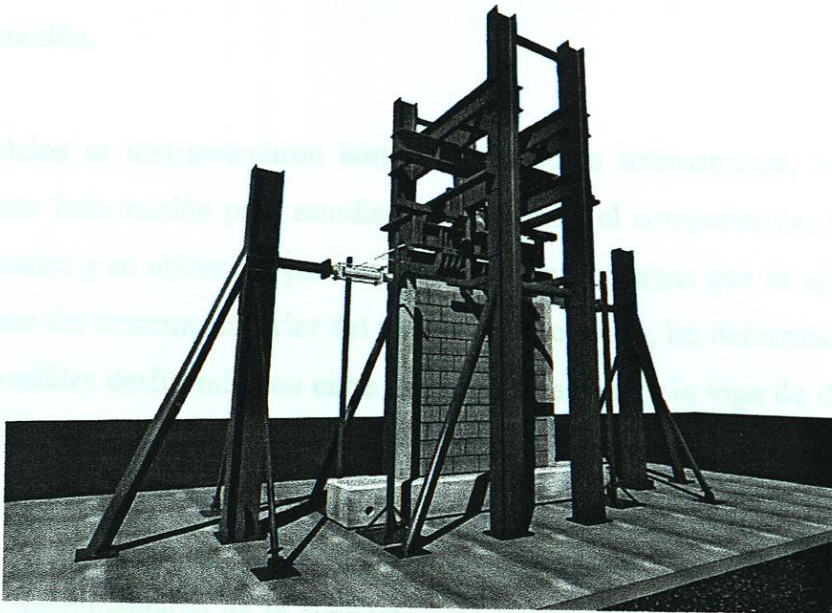


Figura 2.11: Dispositivo de aplicación de carga. Perspectiva

Para la aplicación de las cargas vertical y laterales se utilizaron tres gatos hidráulicos, de 50 t (490 kN) cada uno, accionados por dos bombas manuales. Se realizó un arreglo de vigas y chumaceras

para la distribución uniforme de la carga vertical y, al mismo tiempo, permitir el libre desplazamiento del muro sobre su plano.

Además, para evitar el desplazamiento del muro fuera de su plano, los especímenes se arriostraron lateralmente mediante cuatro ruedas lisas, sujetas a la estructura principal del dispositivo. Para garantizar el contacto entre la viga de distribución de carga vertical y los modelos, se adhirió una placa de corcho de 6 mm de espesor a la cara superior de la dala. De igual manera, se colocaron placas de corcho entre las placas distribuidoras de carga lateral y los especímenes.

Las vigas de cimentación se anclaron a la losa de reacción mediante 16 barras de acero de grado 75, de 25 mm de diámetro, postensadas, aplicando a las tuercas un giro de $\frac{1}{4}$ de vuelta, a partir de su apriete con herramienta de mano contra las placas de apoyo.

2.7 Instrumentación.

Todos los modelos se instrumentaron tanto externa como internamente, con el propósito de obtener suficiente información para estudiar y caracterizar el comportamiento de los muros. El tipo de instrumentos y su ubicación permitieron conocer: las cargas que se aplicaron en el muro; el desplazamiento del extremo superior del muro sobre su plano; las deformaciones por flexión y por corte; los posibles deslizamientos entre la losa de reacción y la viga de desplante, y entre la viga de aplicación de carga vertical y el tablero; y la deformación del acero de refuerzo, tanto longitudinal como transversal.

Los modelos se instrumentaron de la siguiente manera: se utilizaron tres celdas de carga, cuatro extensómetros de alambre, dos extensómetros potenciométricos de vástago, seis micrómetros de carátula y deformímetros eléctricos, para las barras del refuerzo longitudinal y transversal de los castillos. Los cuatro primeros instrumentos se colocaron externamente en los ocho muros, tal como se muestra en la figura 2.12.

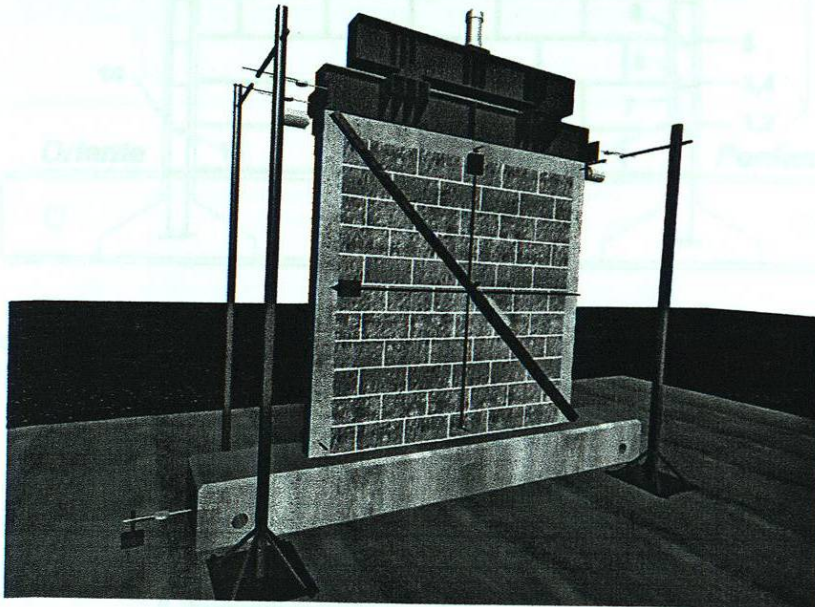
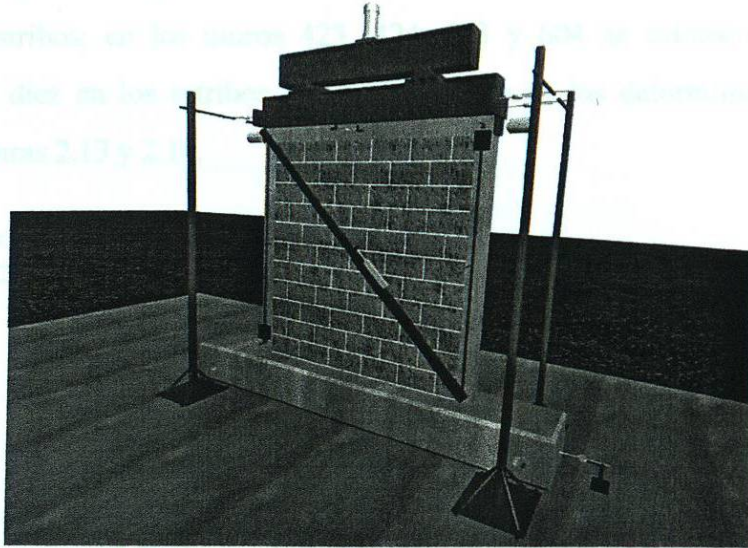


Figura 2.12: Instrumentación externa.

Los deformímetros eléctricos se adhirieron al acero de refuerzo para conocer el comportamiento interno del muro. En total, se colocaron 148 deformímetros en las barras longitudinales y transversales de los castillos de los ocho muros. Su cantidad y ubicación varía, según las diferencias en el refuerzo, y según se juzgó relevante para la investigación.

Figura 2.13: Instrumentación interna.
Muros 421, 422, 423 y 424

En los muros 421, 422, 601 y 602 se colocaron nueve deformímetros en las barras longitudinales y seis en los estribos; en los muros 423, 424, 603 y 604 se colocaron doce en las barras longitudinales y diez en los estribos. La nomenclatura de los deformímetros de los muros se detalla en las figuras 2.13 y 2.14.

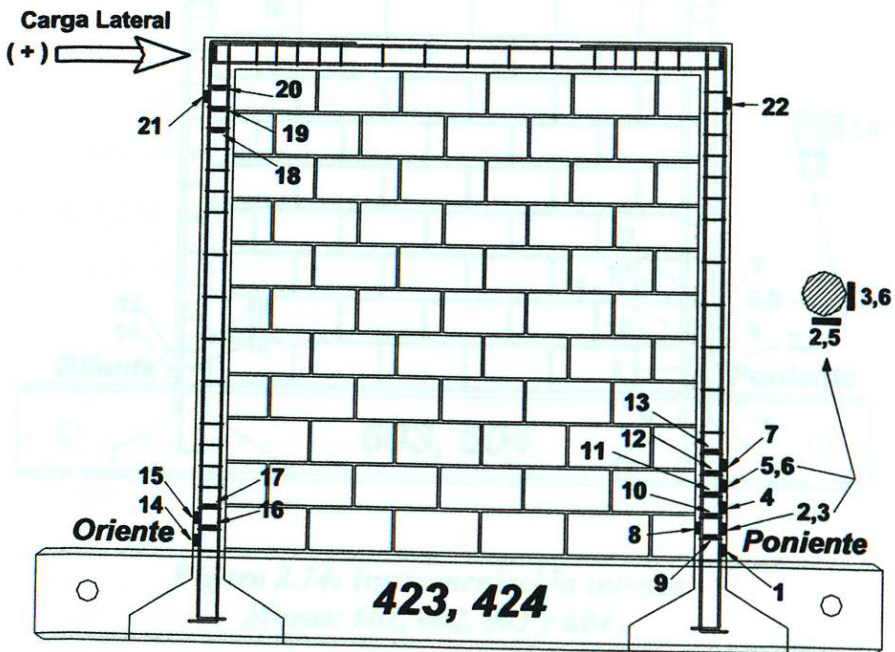
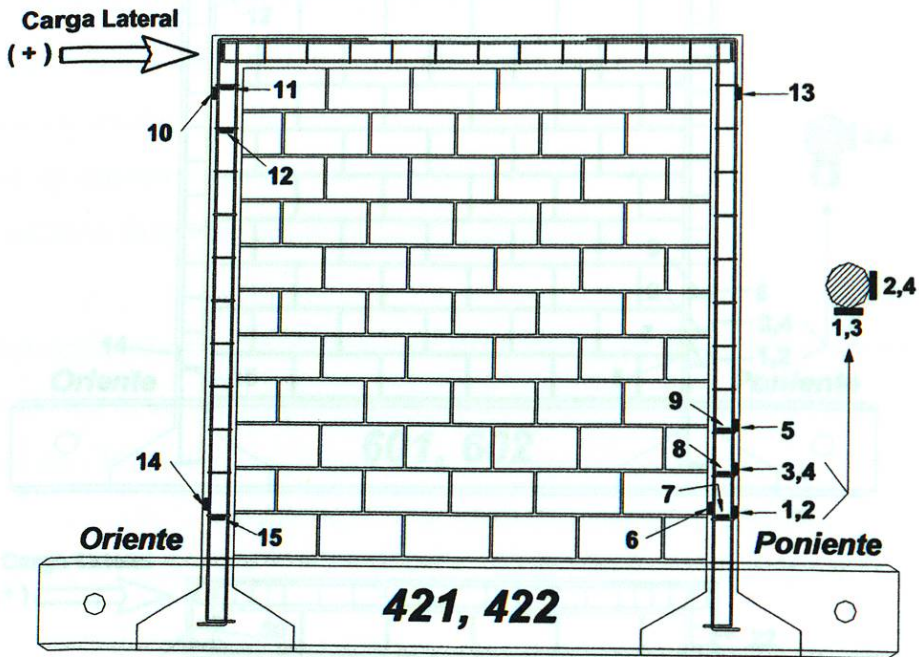
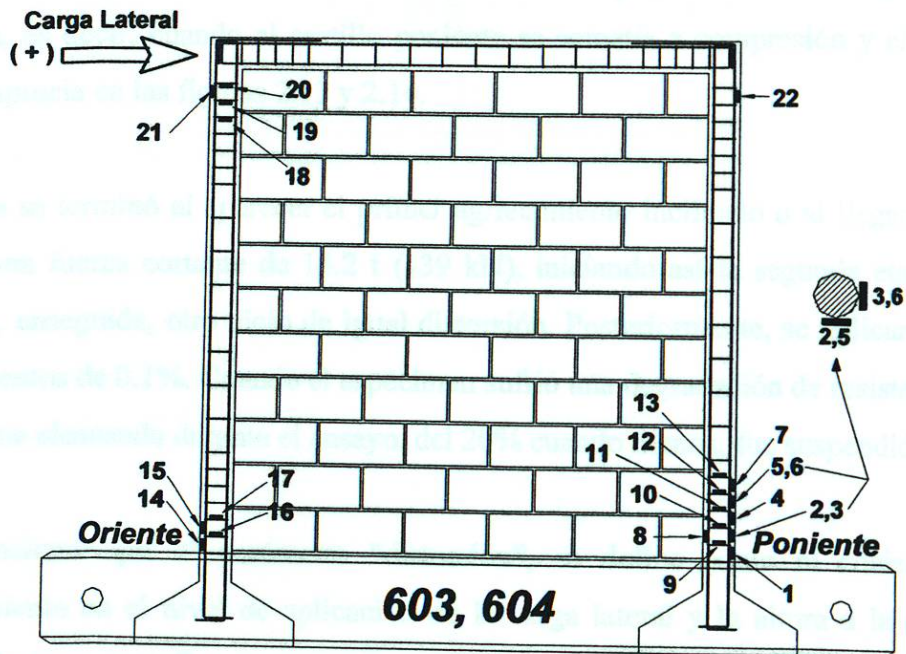
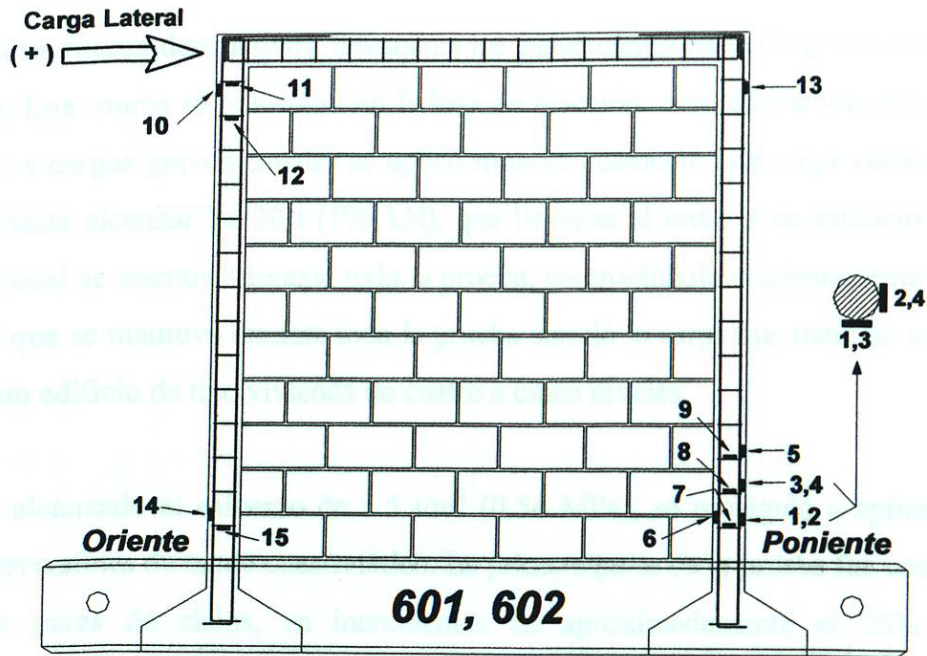


Figura 2.13: Instrumentación interna
Muros: 421, 422, 423 y 424



**Figura 2.14: Instrumentación interna
Muros: 601, 602, 603 y 604**

2.8 Historias de carga y de desplazamiento.

Los ensayos fueron destructivos, llevando a los especímenes hasta el agotamiento de su capacidad de carga. Los muros se colocaron en la losa de reacción, con orientación oriente-poniente. Para simular las cargas gravitacionales se aplicó monotónicamente una carga vertical en cuatro pasos iguales, hasta alcanzar las 20 t (196 kN), que llevaron al muro a un esfuerzo de 5.5 t/m^2 (0.54 MPa), el cual se mantuvo durante toda la prueba, controlándolo continuamente de forma manual. La carga que se mantuvo durante toda la prueba simuló la carga que tiene un muro de una planta baja, en un edificio de tipo vivienda de cuatro a cinco niveles.

Una vez alcanzado el esfuerzo de 5.5 t/m^2 (0.54 MPa), se prosiguió a aplicar cargas laterales cíclicas reversibles de modo cuasiestático. La primera parte de la prueba fue controlada por carga, aplicando pares de ciclos, en incrementos de aproximadamente el 25% de la carga de agrietamiento estimada. Los semiciclos se consideraron positivos cuando el gato del lado oriente empujaba, es decir, cuando el castillo poniente se sometía a compresión y el oriente a tensión, como se aprecia en las figuras 2.13 y 2.14.

Esta etapa se terminó al aparecer el primer agrietamiento inclinado o al llegar a la distorsión de 0.1%, a una fuerza cortante de 14.2 t (139 kN), iniciando así la segunda etapa de la prueba y aplicando, enseguida, otro ciclo de igual distorsión. Posteriormente, se aplicaron pares de ciclos en incrementos de 0.1%. Cuando el espécimen sufrió una degradación de resistencia, con respecto a la máxima alcanzada durante el ensayo, del 20% cuando menos, fue suspendida la prueba.

Cabe mencionar que el parámetro “distorsión”, se define como el cociente de dividir el desplazamiento en el nivel de aplicación de la carga lateral y la altura a la que se aplica esta carga; se designa como R , y se expresa en porcentaje o en unidades por millar.

En la figura 2.15 se muestra la historia nominal de cargas y distorsiones. En las figuras 2.16 y 2.17, se incluyen las historias reales de carga, y en las figuras 2.18 y 2.19, las historias reales de distorsiones, correspondientes a los ocho muros.

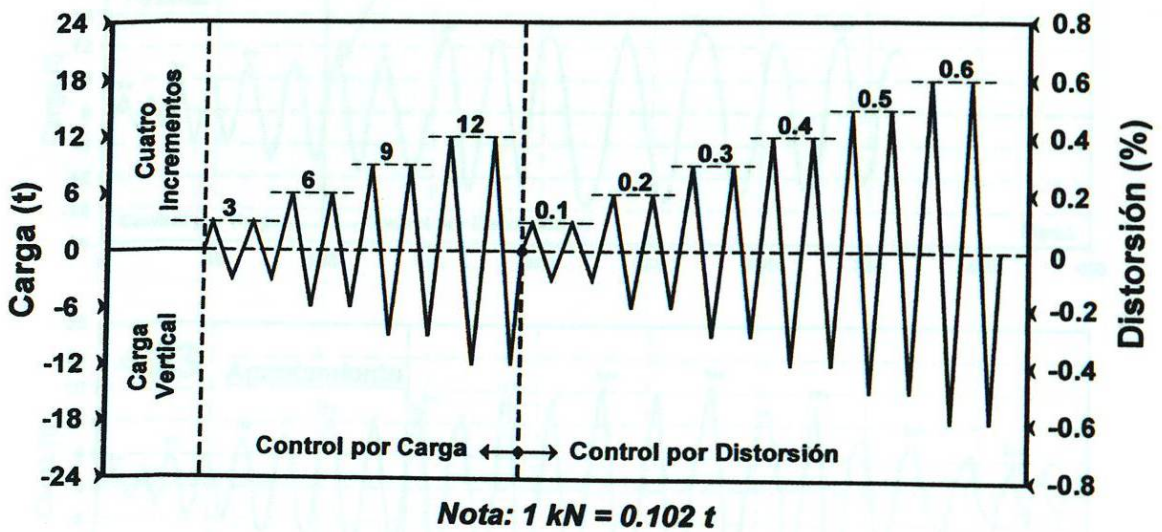


Figura 2.15: Historia nominal de cargas y de distorsiones

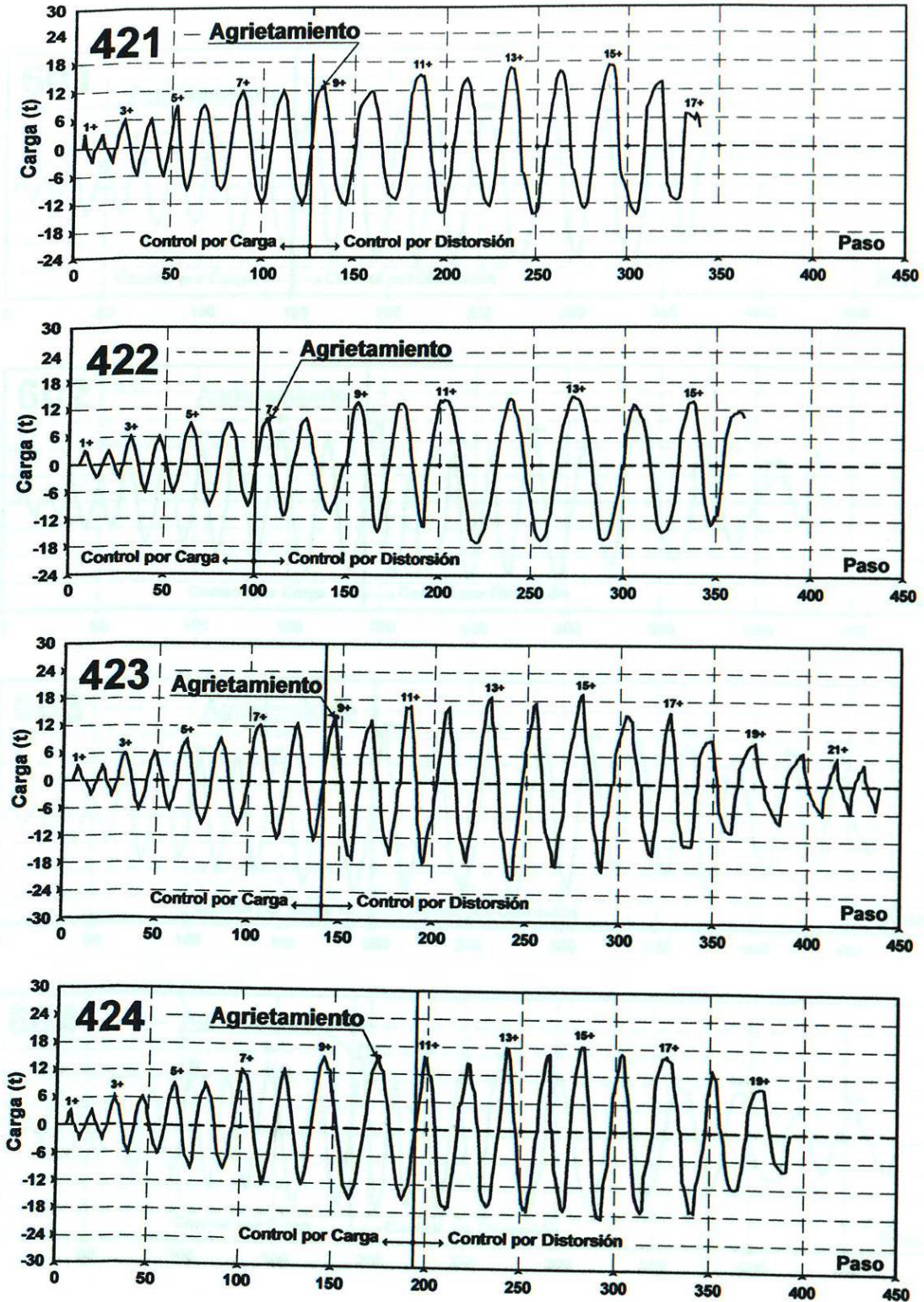
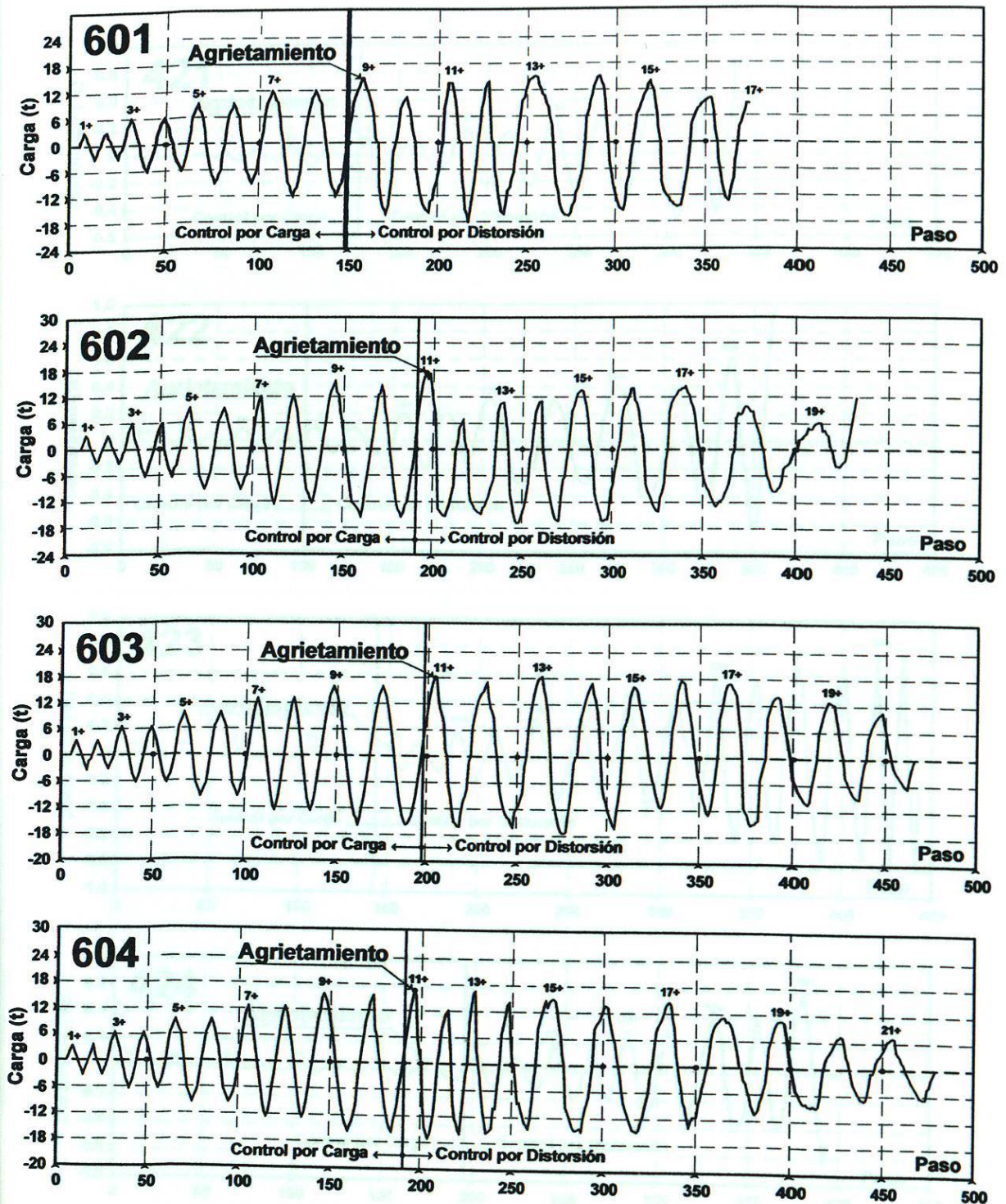
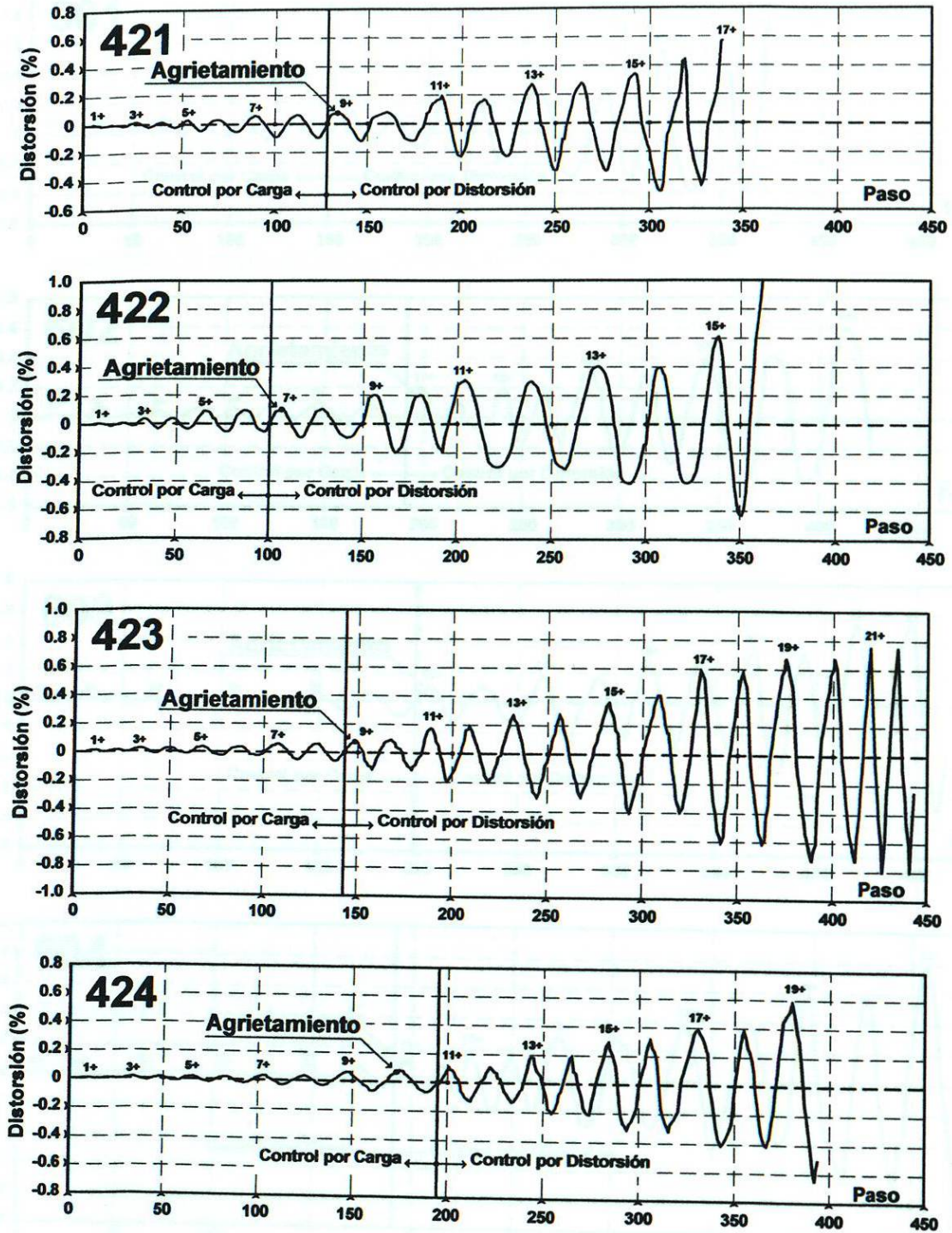


Figura 2.16: Historia real de las cargas aplicadas.
Muros: 421, 422, 423 y 424



**Figura 2.17: Historia real de las cargas aplicadas.
Muros: 601, 602, 603 y 604**



**Fig. 2.18: Historia real de las distorsiones aplicadas.
Muros: 421, 422, 423 y 424**

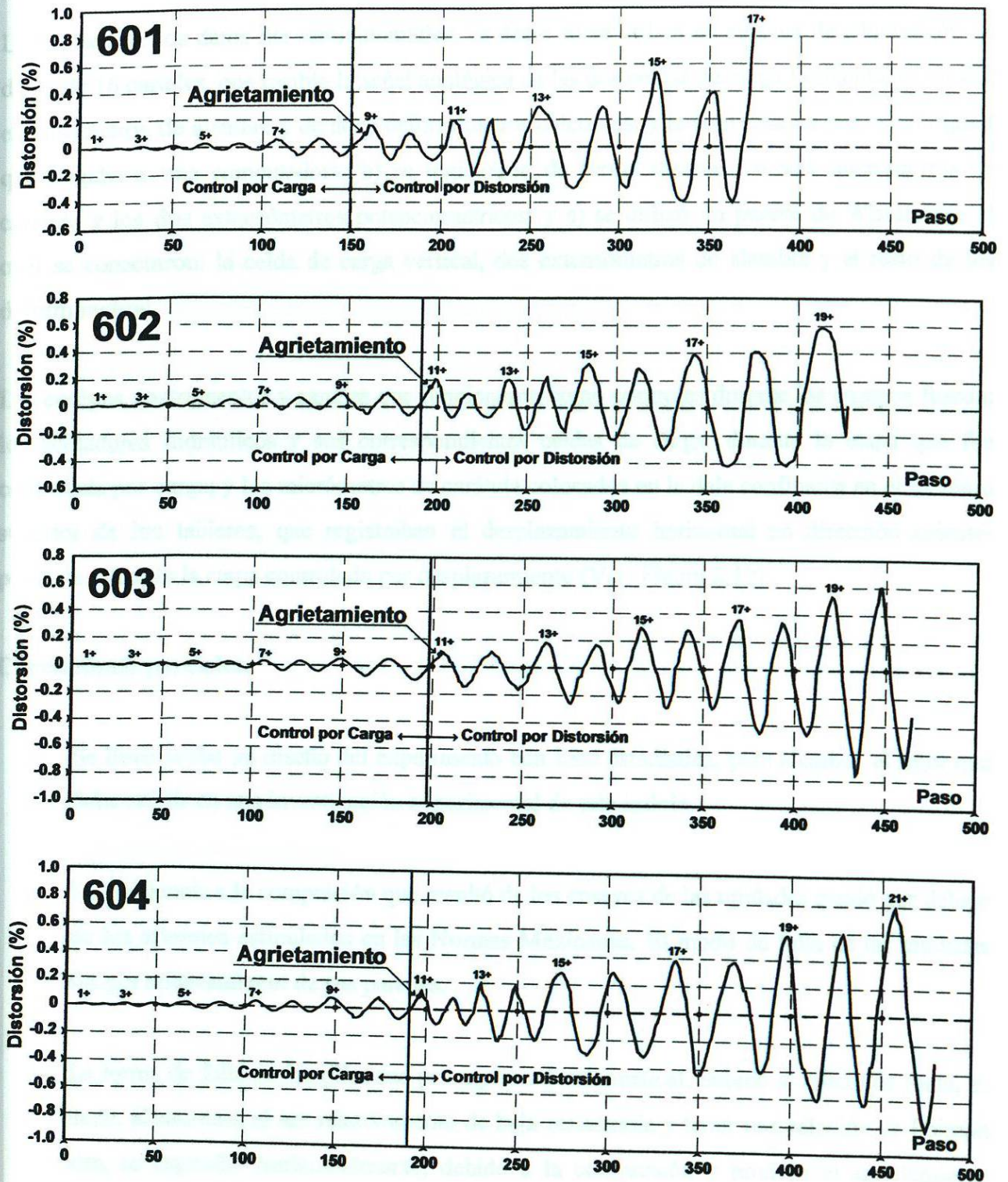


Fig. 2.19: Historia real de las distorsiones aplicadas.
Muros: 601, 602, 603 y 604

2.9 Captura de datos.

La captura de los datos fue semiautomática, es decir: a) se utilizó un sistema de adquisición de datos de 16 canales, que recibía la señal analógica de las dos celdas de carga horizontales, de dos extensómetros de alambre y de doce deformímetros eléctricos, y la convertía en una señal digital que llegaba a una computadora; b) se registraron de forma manual los seis micrómetros de carátula y los dos extensómetros potenciométricos; y c) se utilizó un puente de Wheatstone al cual se conectaron: la celda de carga vertical, dos extensómetros de alambre y el resto de los deformímetros.

Los equipos, instrumentos y canales que funcionaron como controles durante los ensayos fueron: los actuadores hidráulicos y sus correspondientes celdas de carga, durante la etapa que fue controlada por carga; y los micrómetros de carátula colocados en la dala confinante en el extremo superior de los tableros, que registraban el desplazamiento horizontal en dirección oriente-poniente, durante la etapa controlada por desplazamiento (Ver Figura 2.12).

Conclusiones parciales.

- Se llevó a cabo un diseño del experimento con base estadística, para alcanzar el rigor que debe existir en una investigación experimental de esta índole.
- La resistencia a la compresión que resultó de los ensayos de las unidades quedó por debajo de los mínimos estipulados en las Normas Mexicanas. El modo de falla de las unidades fue por aplastamiento de sus paredes.
- La forma de falla de las pilas fue por agrietamiento vertical, debido al efecto de junta, es decir, el mortero, al ser relativamente de baja resistencia y tener una relación de Poisson alta, se expandió horizontalmente, debido a la compresión y produjo el agrietamiento vertical de la mampostería.

- El coeficiente de variación del módulo de elasticidad obtenido de los ensayos de pilas, excedió en un 3% los valores estipulados en las Normas Mexicanas.
- El modo de falla de los muretes fue por tensión diagonal; es decir, a lo largo de la diagonal donde se aplicó la carga de compresión, atravesando piezas y agrietando la junta de mortero de pega.
- El coeficiente de variación del módulo de rigidez obtenido de los ensayos de muretes, se mantuvo por debajo de los valores mínimos estipulados en las Normas Mexicanas.
- La resistencia a la compresión, tanto del concreto como la del mortero, fue mayor que las mínimas especificadas en la normatividad mexicana.
- Los esfuerzos de fluencia, los esfuerzos últimos y el alargamiento a la ruptura obtenidos de los ensayos a tensión del refuerzo tanto longitudinal como transversal, utilizados en la fabricación de los modelos, alcanzaron los valores establecidos en las Normas Mexicanas.
- El valor del cortante teórico (11.3t) (111kN) que se indica en la sección para llegar al agrietamiento inclinado, estuvo por debajo, en un 27%, del cortante real con el que se llegó a dicho agrietamiento.
- La distorsión a la que ocurrió el agrietamiento inclinado, en todos los especímenes, fue de alrededor del 0.1% y el cortante promedio asociado fue de 14.2t (139 kN).
- Tanto la instrumentación como el sistema de captura de datos fueron eficientes y proporcionaron suficiente confiabilidad en la información adquirida para los fines de esta investigación.

CAPÍTULO III

RESPUESTA GENERAL DE LOS ESPECÍMENES.

3.1 Introducción.

En este capítulo se describirá el daño que sufrieron los especímenes en el transcurso del desarrollo de las pruebas. Se explicará cómo fueron evolucionando las grietas y los desplazamientos, a la altura donde se aplicaron las cargas laterales en los muros, el espesor de las grietas, el desprendimiento de las paredes de la mampostería y la razón de este comportamiento.

Se comentará sobre el comportamiento histerético de cada espécimen. Se mostrarán las curvas histeréticas de los muros, que fueron graficadas a partir de la carga aplicada lateralmente y las distorsiones obtenidas en cada etapa de la prueba.

Se hará un análisis detallado de las deformaciones por flexión y por cortante, ya que éstos son los principales componentes de la distorsión y, al estudiar los valores obtenidos, se tendrá una mejor comprensión del comportamiento de los muros.

Se estudiará la expansión de los especímenes, que es consecuencia del agrietamiento de la mampostería. Se explicará este comportamiento y en qué etapas de las pruebas sucedió.

3.2 Evolución del daño.

En general, el deterioro en los ocho especímenes fue muy similar. A continuación se mencionan los sucesos más significativos en el desarrollo de las pruebas:

En la tabla 3.1 se muestran los diferentes ciclos en los que se presentó el primer agrietamiento diagonal de los ocho especímenes, la dirección de carga, la magnitud de ésta, el esfuerzo cortante y la distorsión asociada.

Tabla 3.1: Características del primer agrietamiento.

PRIMER AGRIETAMIENTO - CICLOS POSITIVOS				
MURO	CICLO	FUERZA CORTANTE (t)	ESFUERZO CORTANTE (Kg/cm ²)	DISTORSIÓN (R/000)
421	9 +	12.6	3.52	0.752
422	7 +	9.8	2.74	1.000
423	9 +	13.6	3.81	0.776
424	10 +	15.1	4.22	0.744
601	9 +	14.4	4.03	0.971
602	11 +	17.0	4.76	1.540
603	11 +	17.1	4.78	0.698
604	11 +	16.1	4.49	1.070

PRIMER AGRIETAMIENTO - CICLOS NEGATIVOS				
MURO	CICLO	FUERZA CORTANTE (t)	ESFUERZO CORTANTE (Kg/cm ²)	DISTORSIÓN (R/000)
421	11 -	13.9	3.89	1.269
422	9 -	11.6	3.25	1.005
423	9 -	16.2	4.53	1.200
424	11 -	16.3	4.55	1.020
601	9 -	15.5	4.34	0.815
602	12 -	14.0	3.91	0.666
603	12 -	11.5	3.22	0.960
604	12 -	12.9	3.62	0.742

PRIMER AGRIETAMIENTO PROMEDIO DE CICLOS POSITIVOS Y NEGATIVOS			
MURO	FUERZA CORTANTE (t)	ESFUERZO CORTANTE (Kg/cm ²)	DISTORSIÓN (R/000)
421	13.3	3.71	1.010
422	10.7	3.00	1.002
423	14.9	4.17	0.998
424	15.7	4.38	0.882
601	15.0	4.18	0.893
602	15.5	4.33	1.103
603	14.3	4.00	0.829
604	14.5	4.05	0.906

Nota: 1 kN = 0.102 t

1 MPa = 10.2 kgf/cm²

En todos los muros se manifestó una falla representada por dos grietas diagonales de 45° aproximadamente, en forma de cruz y sensiblemente similares en ambas caras de cada muro. El primer agrietamiento inclinado se presentó al llegar a una distorsión cercana o igual al 0.1% en forma escalonada a través de las juntas de la mampostería. Antes de presentarse el agrietamiento inclinado aparecieron pequeñas grietas horizontales en la parte inferior de los castillos.

En los ciclos posteriores al primer agrietamiento, se comenzó a hacer más visible el daño que iba sufriendo el muro. Comenzaron a hacerse más largas y anchas las grietas inclinadas, aparecieron nuevas grietas en los tres cuartos inferiores de los castillos, hubo penetración de grietas en algunas piezas en las cercanías de los agrietamientos inclinados, a una distorsión aproximada de 0.2%, se formaron agrietamientos inclinados en ambas direcciones de aplicación de carga lateral; hubo aplastamiento de la mampostería y pequeños desprendimientos en sus caras a lo largo de las diagonales. Esto le sucedió a una distorsión de 0.3%, cuando el ensaye ya había alcanzado la resistencia.

Al llegar a una distorsión del 0.4% y a una degradación de resistencia mayor que el 20%, se produjo una acentuación en el aplastamiento y desprendimiento de paredes en la mampostería, además de que algunas diagonales llegaron a las esquinas de los castillos. Finalmente, se propuso llegar a una distorsión del 0.6%, para observar el comportamiento de los especímenes en deformaciones mayores.

En las figuras 3.1 al 3.8 se muestran los ocho especímenes: 421, 422, 423, 424, 601, 602, 603 y 604, respectivamente, en tres etapas de la evolución de daño, a saber: el primer agrietamiento inclinado, la resistencia máxima y el estado de daño al final de las pruebas.

Figura 3.1: Evolución del deterioro en el espécimen 421.

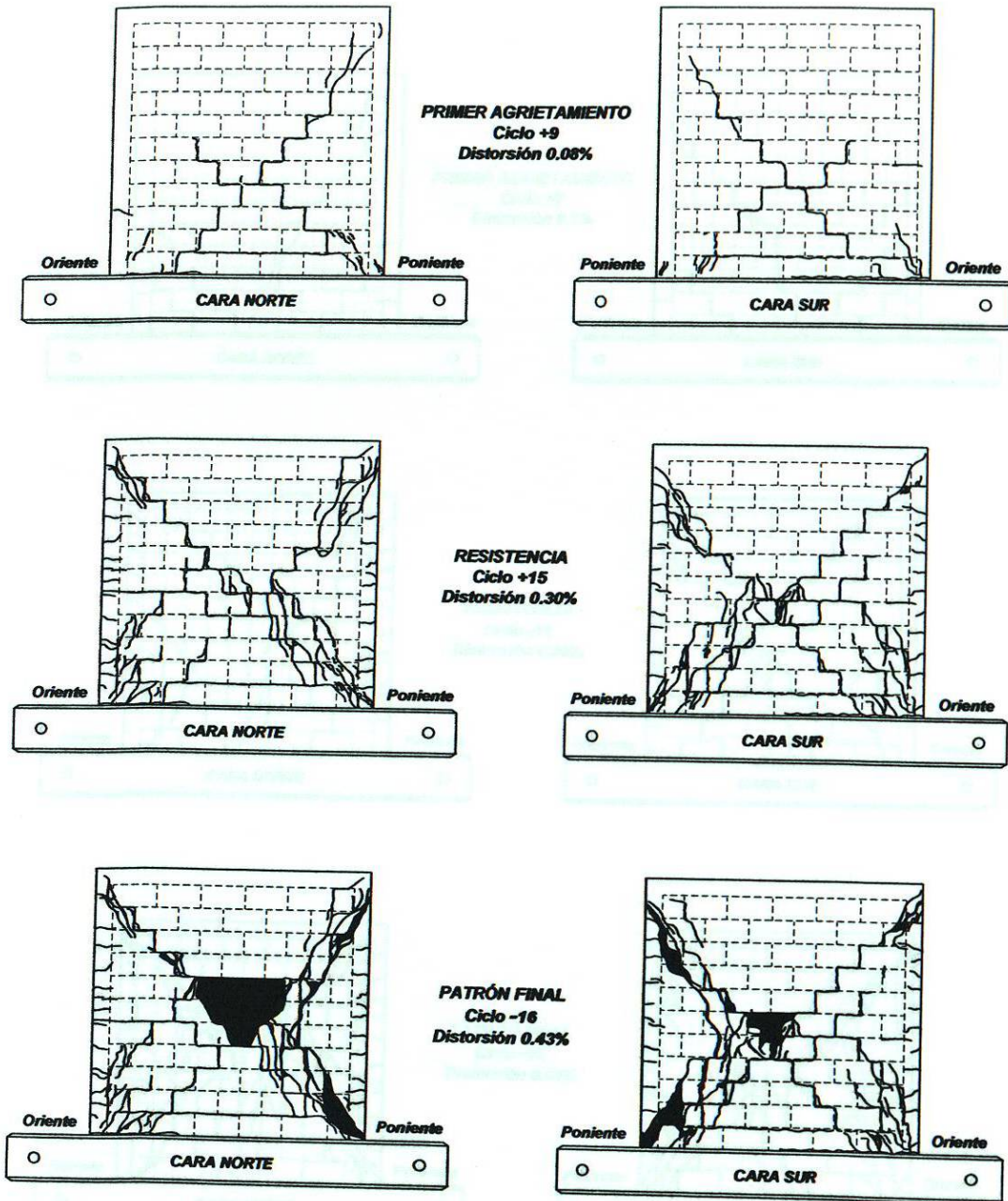


Figura 3.1: Evolución del deterioro en el espécimen 421.

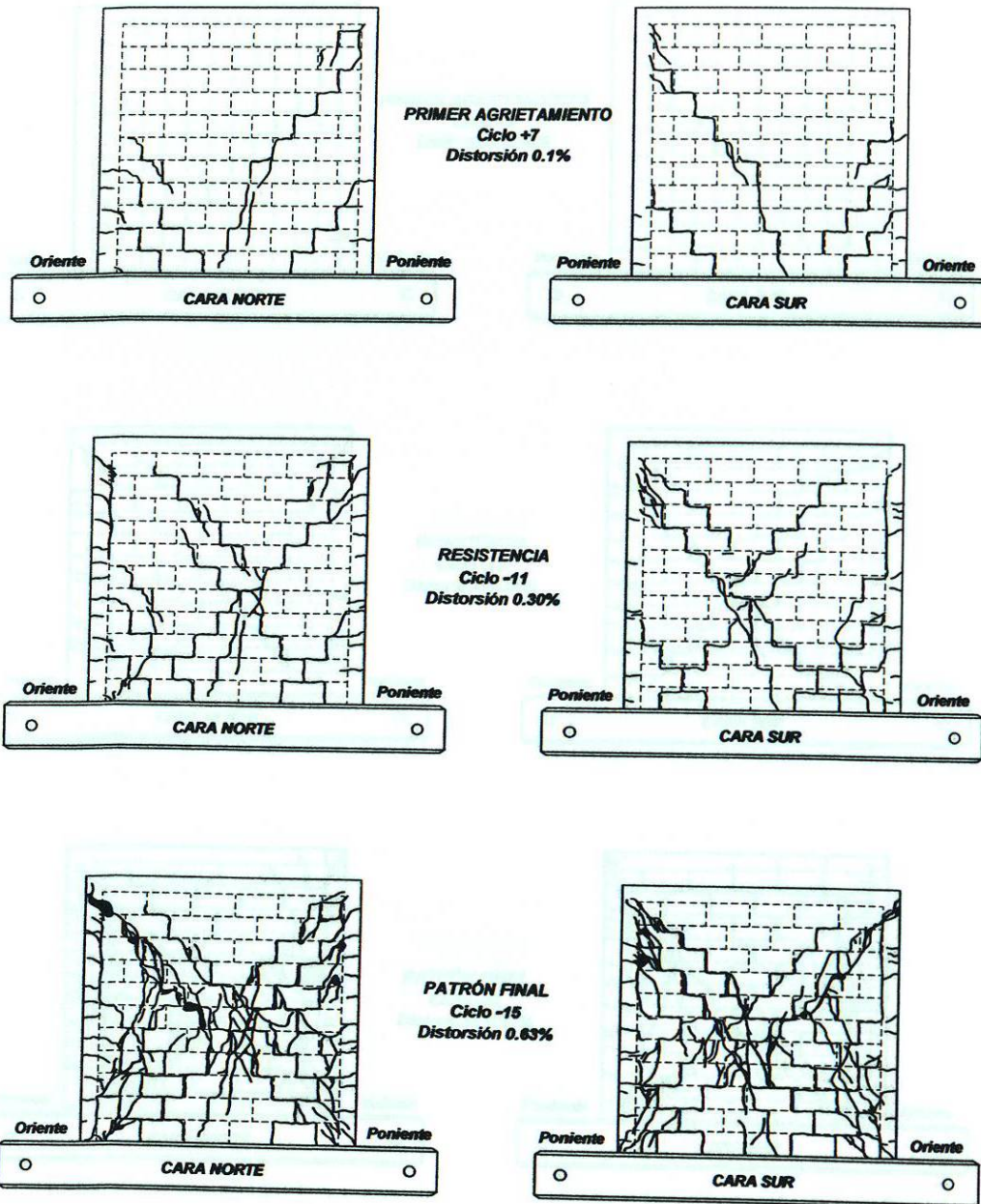


Figura 3.2: Evolución del deterioro en el espécimen 422.

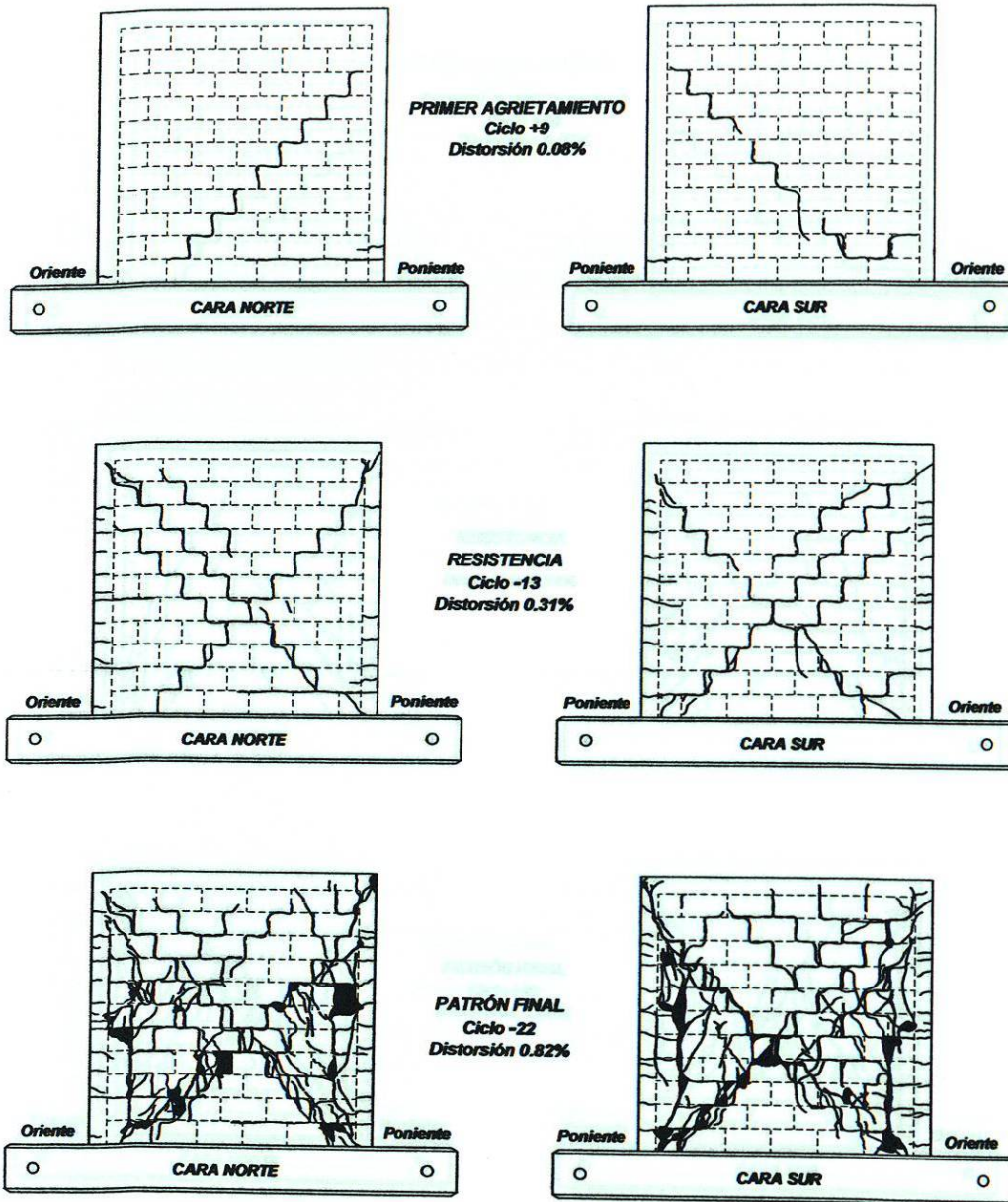


Figura 3.4: Evolución del deterioro en el espécimen C4.

Figura 3.3: Evolución del deterioro en el espécimen 423.

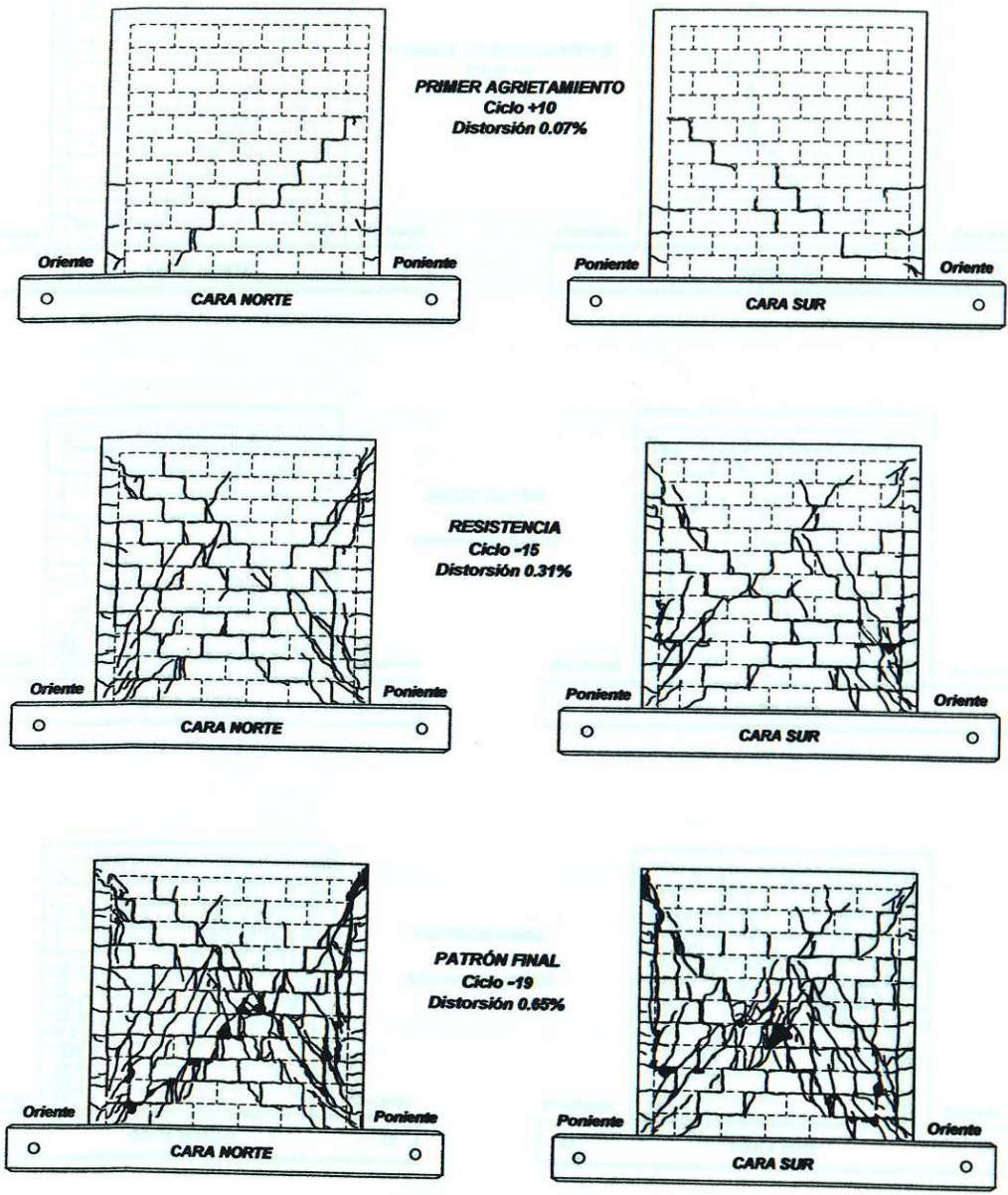


Figura 3.4: Evolución del deterioro en el espécimen 424.

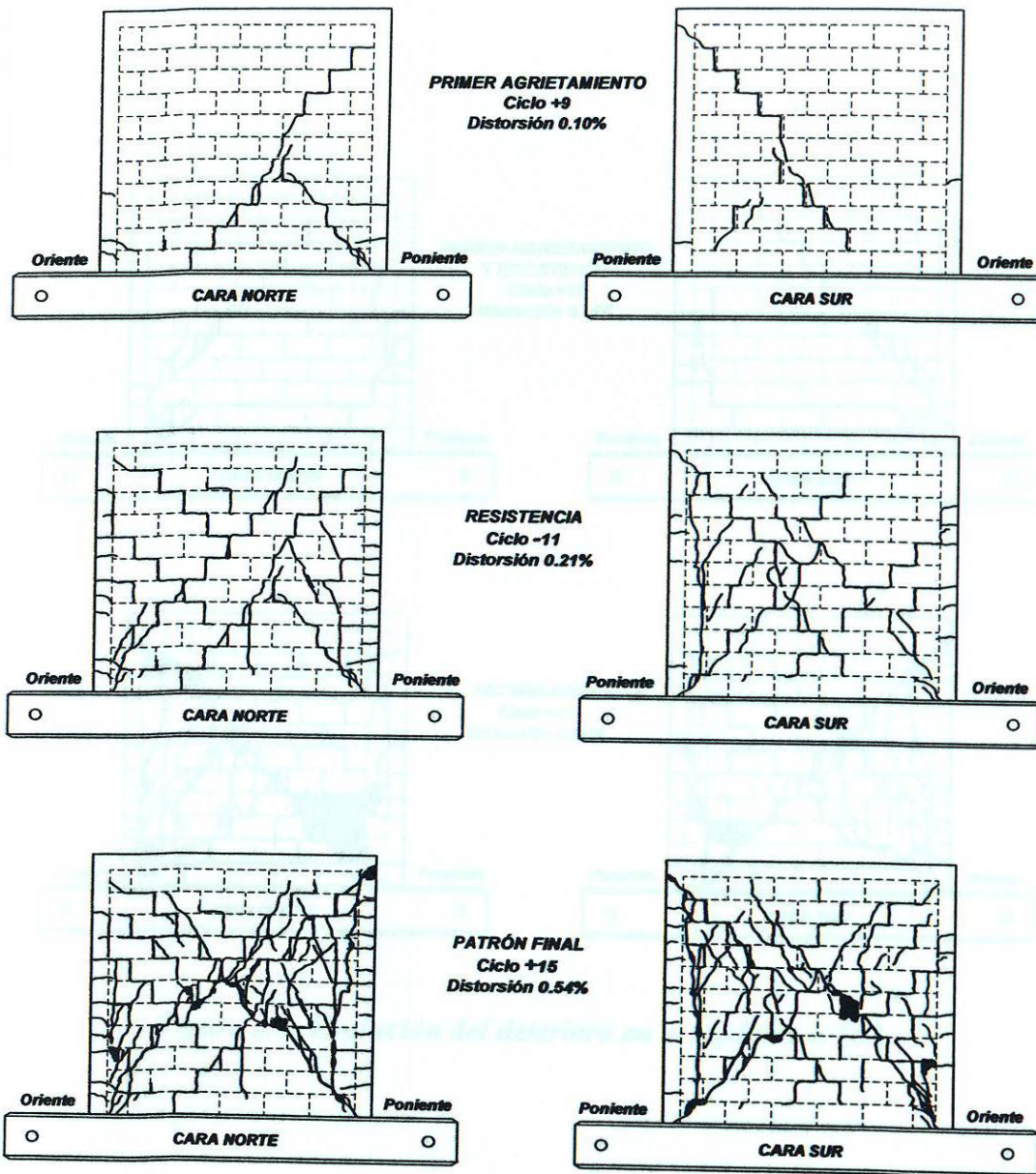


Figura 3.5: Evolución del deterioro en el espécimen 601.

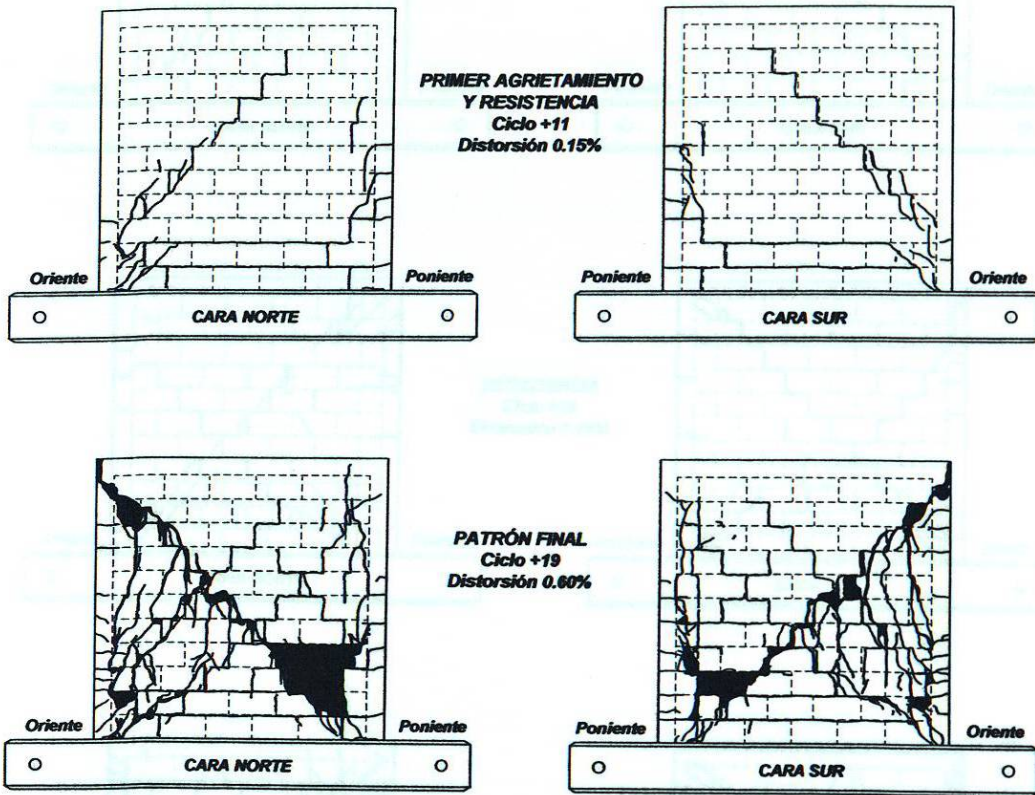


Figura 3.6: Evolución del deterioro en el espécimen 602.

Figura 3.7: Evolución del deterioro en el espécimen 603.

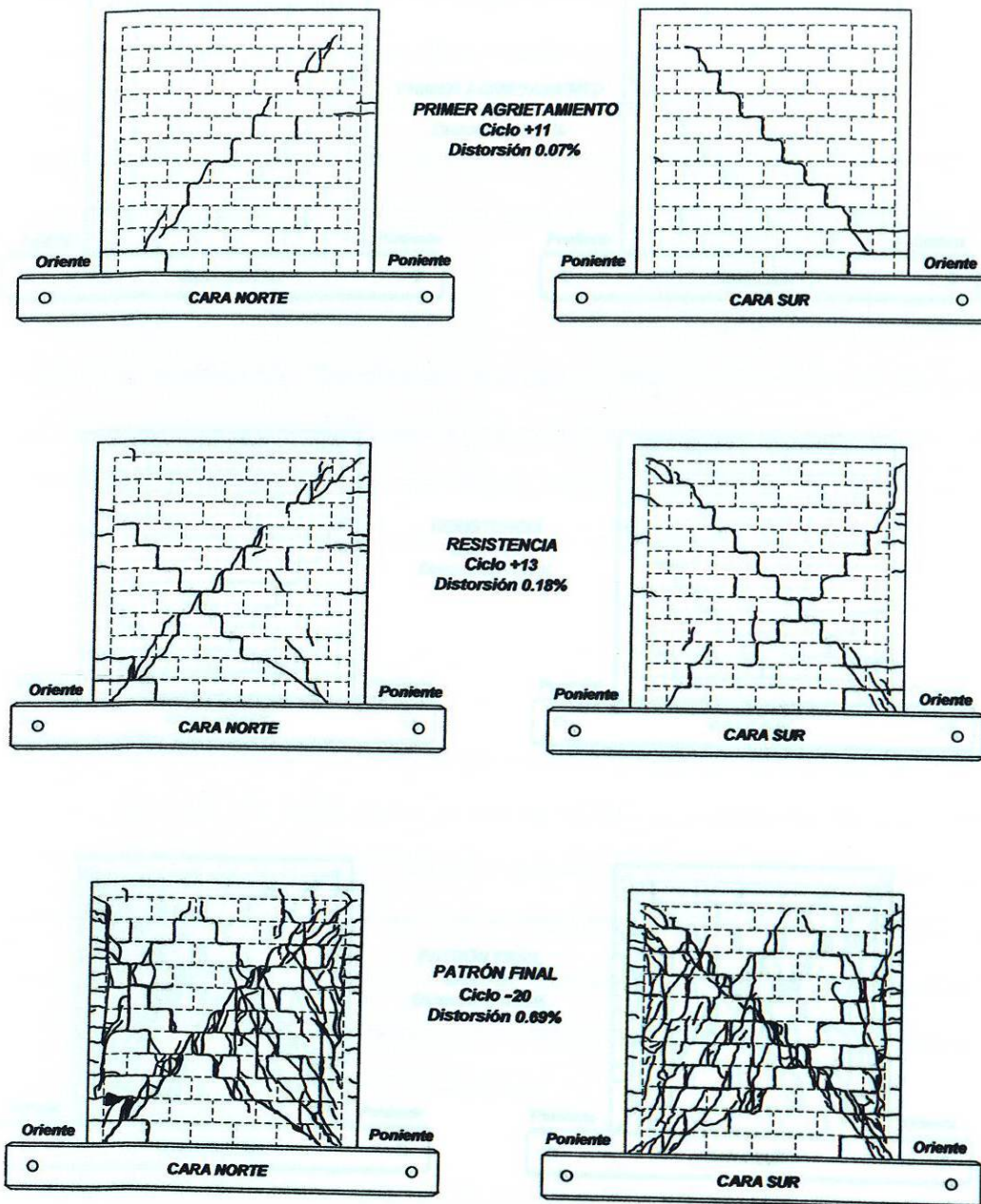


Figura 3.7: Evolución del deterioro en el espécimen 603.

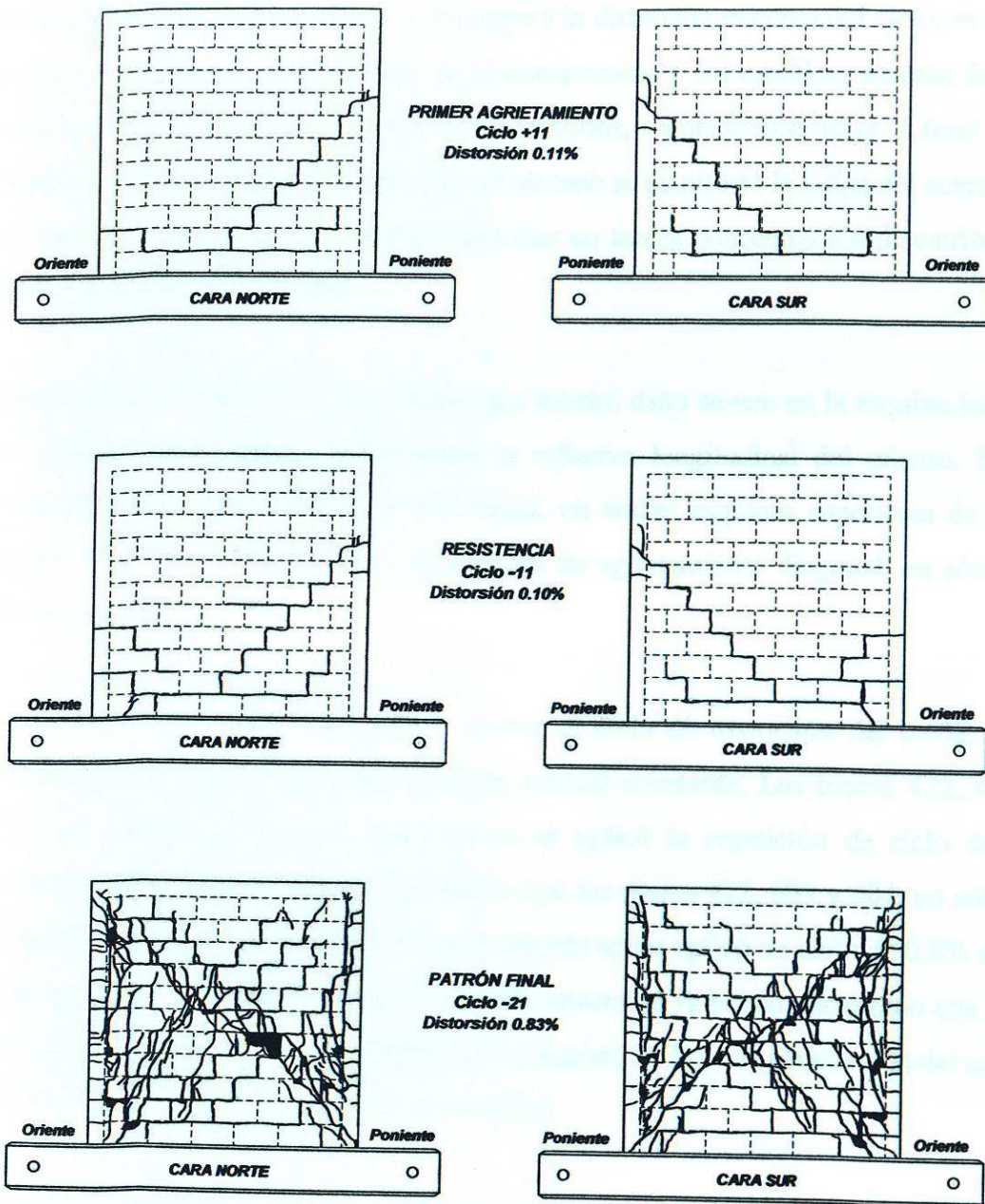


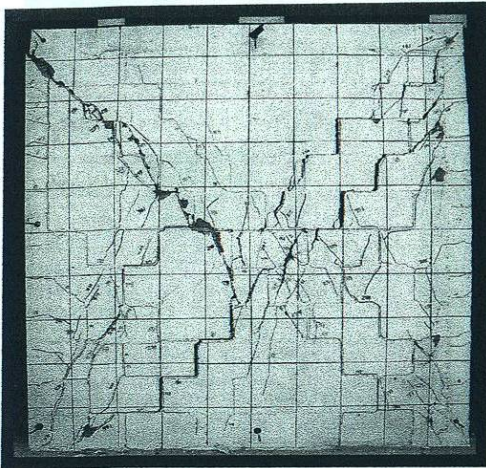
Figura 3.8: Evolución del deterioro en el espécimen 604.

Estado final de daño. Al iniciar el ciclo de distorsión de 0.6% se hizo más evidente el desprendimiento de las paredes de la mampostería, así como una gran profusión de grietas, sobre todo en la parte inferior de los muros. Al llegar a la distorsión máxima del ciclo, se hizo evidente en algunos especímenes la separación de la mampostería y los castillos, además de aumentar la penetración del agrietamiento diagonal en los castillos, acentuándose hacia el final de la prueba, sobre todo en las esquinas superiores; sólo en un caso se manifestó la fatiga del acero longitudinal en una esquina del castillo. Los especímenes que no tenían concentración de estribos fueron los que presentaron este tipo de falla.

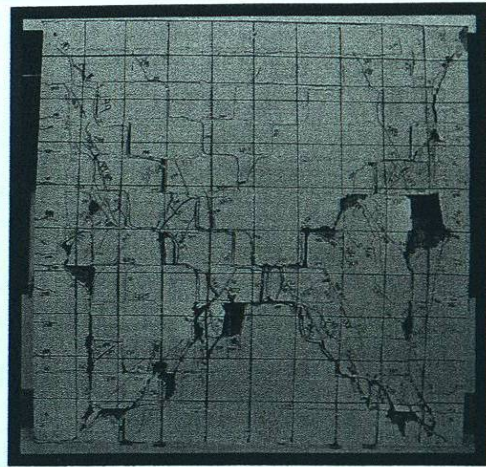
De tal forma que, el muro 421 fue el único que mostró daño severo en la esquina inferior de uno de sus castillos, deformando visiblemente el refuerzo longitudinal del mismo. El muro 422 mostró penetración, una incipiente y una franca, en ambas esquinas superiores de los castillos. Los muros 424, 601 y 602 tuvieron penetración de agrietamiento diagonal, en sólo una de sus esquinas superiores.

En los muros 421 y 601 no se llegó a aplicar el ciclo de distorsión del 0.6%, debido a su inestabilidad y a no poder mantener la carga vertical constante. Los muros 422, 424 y 602 sí llegaron a la distorsión de 0.6% pero ya no se aplicó la repetición de ciclo debido a que comenzaron a presentar inestabilidad. Mientras que los muros 423, 603 y 604, no sólo llegaron a la terminación del ciclo y su réplica, sino que además se les aplicó un ciclo de 0.8% de distorsión y, a pesar que al término de los ciclos de 0.6% de distorsión ya habían alcanzado una degradación de resistencia mayor al 50%, no se manifestó en ninguno de los tres penetración del agrietamiento diagonal en ninguna de las esquinas de los castillos.

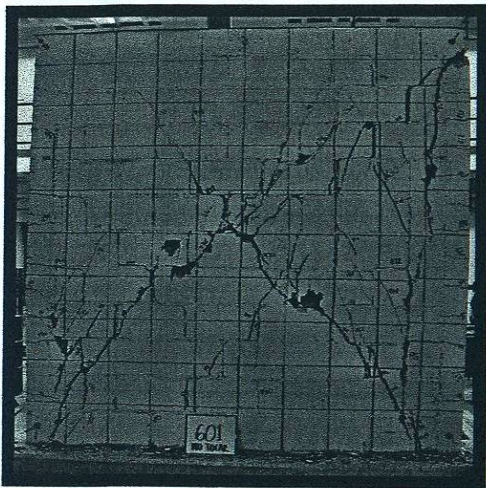
Los muros que presentaron separación en la interfase castillo-mampostería fueron, de manera incipiente, el 422, el 602 y el 603 a una distorsión del 0.4%; y de manera más evidente, pero sólo en algunos segmentos, el muro 424, a una distorsión del 0.6%. En las figuras 3.9 al 3.12 se muestran imágenes de algunos aspectos importantes de estos daños, así como el estado final de daño de los ocho muros.



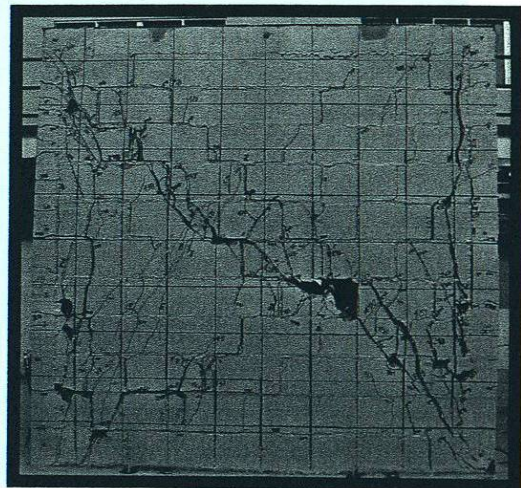
Cara Norte 422



Cara Norte 423

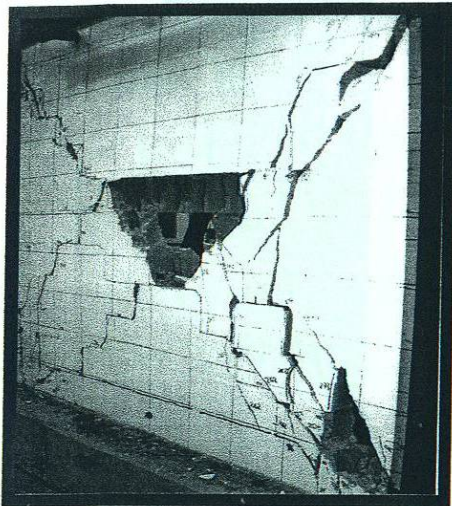


Cara Norte 601

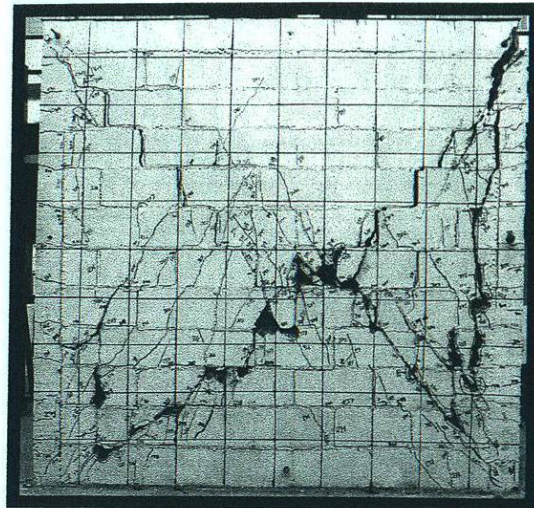


Cara Norte 604

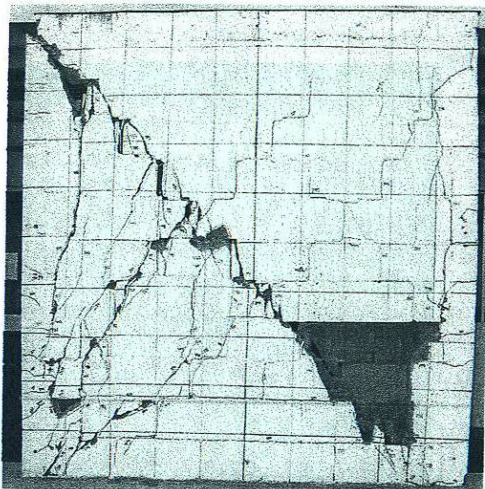
**Figura 3.9: Estado final de daño.
Muros: 422, 423, 601 y 604.**



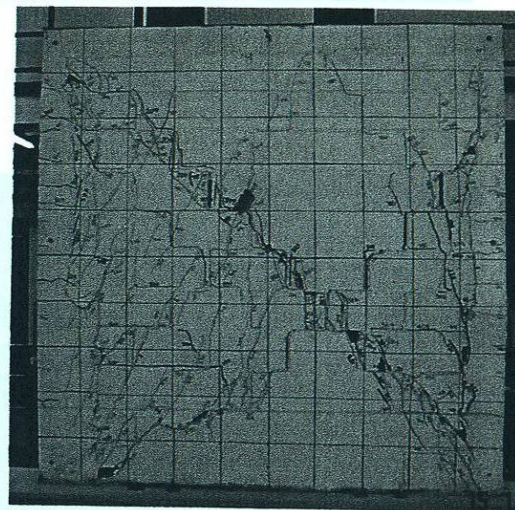
Cara Norte 421



Cara Norte 424

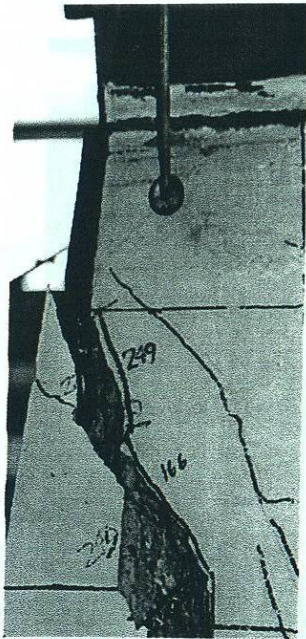


Cara Norte 602

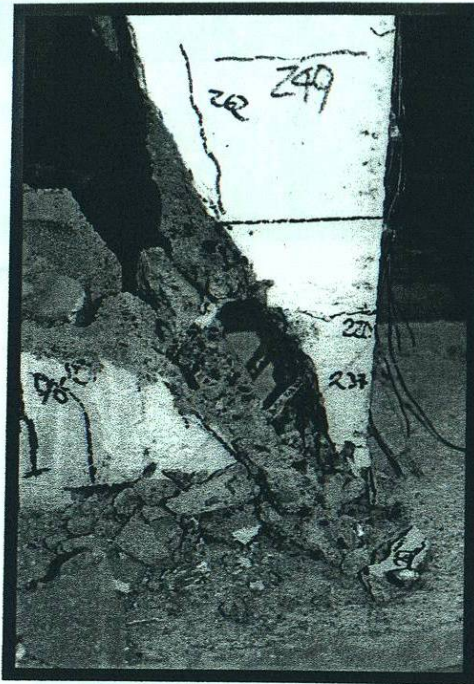


Cara Sur 603

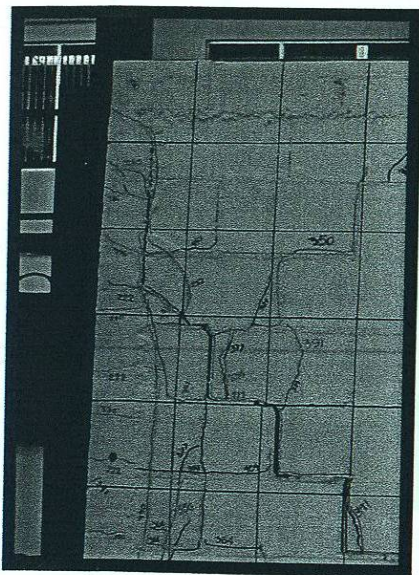
**Figura 3.10: Estado final de daño.
Muros: 421, 424, 602, 603.**



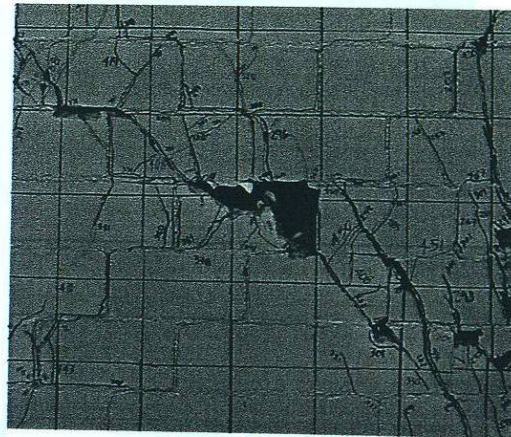
Esquina Superior Poniente, 421



Esquina Inferior Poniente, 421

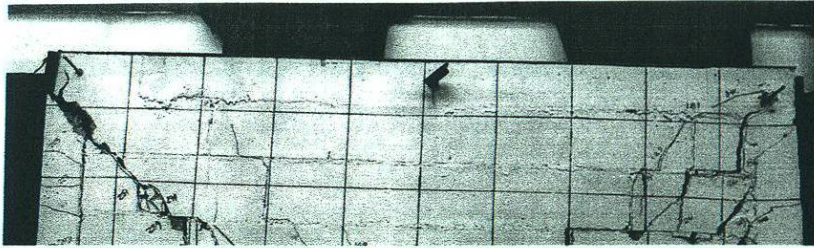


**Separación Incipiente
Castillo-Mampostería, 603**



**Desprendimiento de las
Paredes, 604**

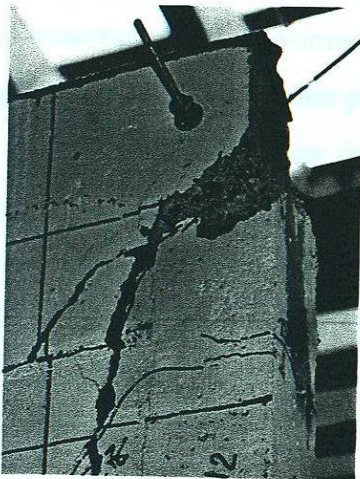
Figura 3.11: Estado final de daño. Detalles diversos.



Esquinas superiores cara norte 422



Esquina Superior Oriente 602



Esquina Superior Poniente 601



Extremo Poniente 424

**Figura 3.12: Estado final de daño.
Detalles diversos.**

Anchura de las grietas. Durante el desarrollo de las pruebas se tomaron medidas del espesor de las grietas y se llevó un registro de su evolución a lo largo del ensayo. Ver fig. 3.13. Esto permitió observar que el espesor de las grietas fue aumentando progresivamente en cada ciclo.

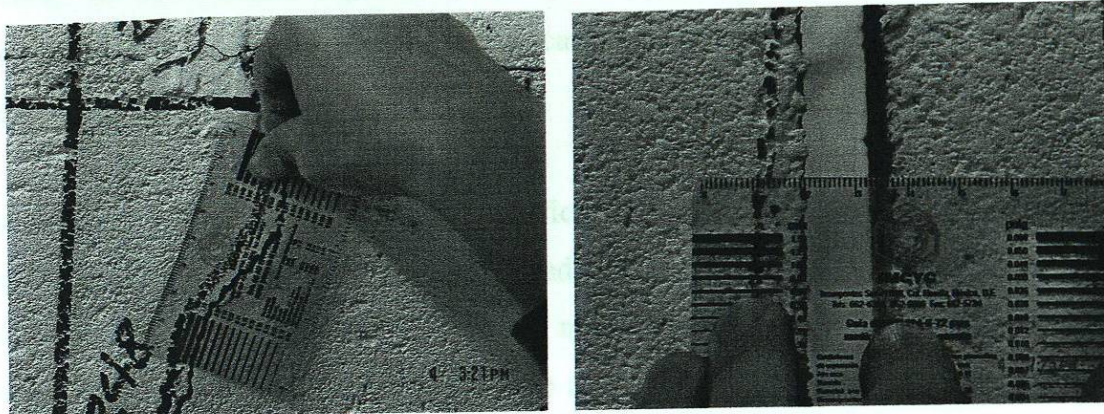


Figura 3.13: Medición de la anchura de las grietas.

En la tabla 3.2 se muestran las dimensiones de los espesores de las grietas en los picos positivos de los ciclos impares. De aquí que, en los picos negativos la anchura de las grietas es semejante a la de los picos positivos; en los ciclos de distorsiones menores al 0.3%, durante la etapa de descarga el espesor de las grietas disminuía significativamente. Finalmente, se observa que en los ciclos iguales o mayores al 0.4% de distorsión la recuperación de ancho de grietas fue cada vez menor (entre el 30 y 50%).

Tabla 3.2: Anchura de las grietas en picos positivos de ciclos impares.

ETAPA	ANCHURA [mm]	RECUPERACIÓN (%)	OBSERVACIONES
PRIMER AGRIETAMIENTO VISIBLE	0.10 - 0.25	100	R = 0.05 %
AGRIETAMIENTO DIAGONAL	0.18 - 0.30	100	R = 0.07 - 0.15 %
R = 0.2%	0.60 - 1.25	90 - 100	R. NOMINAL
R = 0.3%	2.00 - 4.00	70 - 80	R. NOMINAL
R = 0.4%	8.00 - 14.00	40 - 60	R. NOMINAL
FINAL DE LA PRUEBA	30.00 - 50.00	30 - 50	R = 0.4 - 0.8 %

3.3 Comportamiento histerético.

La curva histerética de un espécimen, es la representación gráfica de la relación entre la carga lateral y la deformación asociada durante el ensaye, expresada en términos de distorsión. Como se mencionó en el segundo capítulo de este trabajo, la distorsión se calcula dividiendo el desplazamiento a la altura de aplicación de carga lateral entre la altura a la que se aplica esta carga.

En las figuras 3.14 y 3.15 se muestran las gráficas histeréticas de los ocho muros. En el eje de las ordenadas se presentan la fuerza o carga aplicada y el esfuerzo, que se obtuvo dividiendo la carga lateral entre la sección transversal bruta del muro. En el eje de las abscisas, se encuentra la distorsión neta sufrida por el espécimen, que se calculó restando el desplazamiento de cuerpo rígido a la distorsión medida asociada a la carga lateral aplicada.

En dichas gráficas también se muestran los puntos más importantes de las pruebas, tales como: el punto donde se presentó el primer agrietamiento inclinado (marcado como Agrietamiento), la etapa de la prueba donde el muro presentó su resistencia máxima, los picos de algunos ciclos impares, y la resistencia teórica de $V_{NTCM}=11.3t$, calculada como se describe en el capítulo 2.

El fenómeno por el que las ramas ascendentes o de aplicación de la carga, y las descendentes o de descarga no se superponen, se denomina histéresis. Los lazos histeréticos obtenidos de cada una de las pruebas de los ocho muros son muy semejantes entre sí y presentan la forma típica de una mampostería confinada. Los lazos de los semiciclos positivos y negativos son casi simétricos. Antes del primer agrietamiento se manifestó un comportamiento sensiblemente elástico-lineal, sin embargo, desde los primeros ciclos se advirtió una disminución lenta de la rigidez inicial, seguramente debido a las grietas que se manifestaron en los castillos desde los primeros ciclos y al reacomodo de la mampostería, que siguió aumentando progresivamente durante el ensaye. En estos casos, no se recuperó la totalidad del trabajo invertido en la deformación del muro, produciendo una disipación de energía.

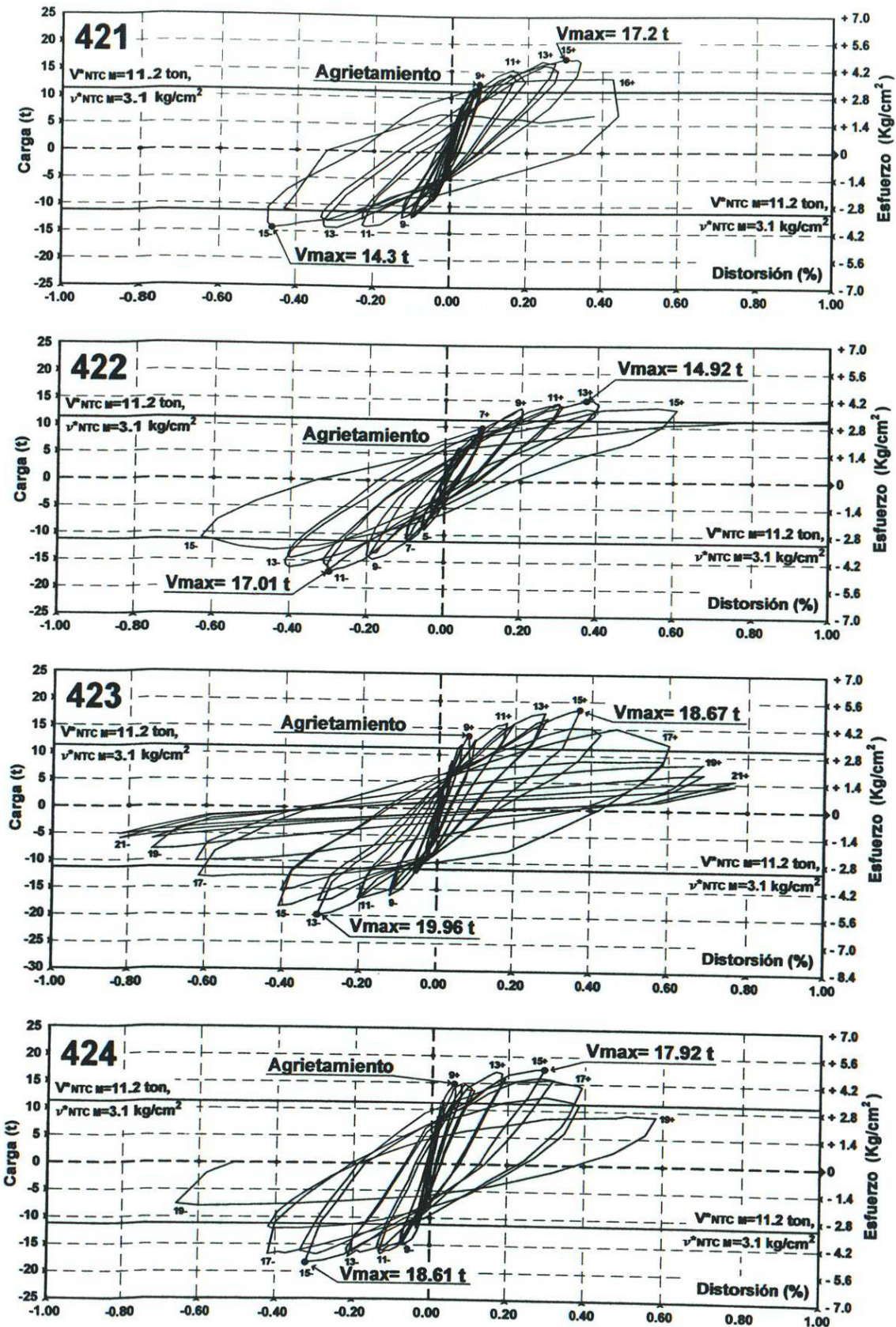


Figura 3.14: Curvas histeréticas de la carga lateral – distorsión.
Muros: 421, 422, 423 y 424.

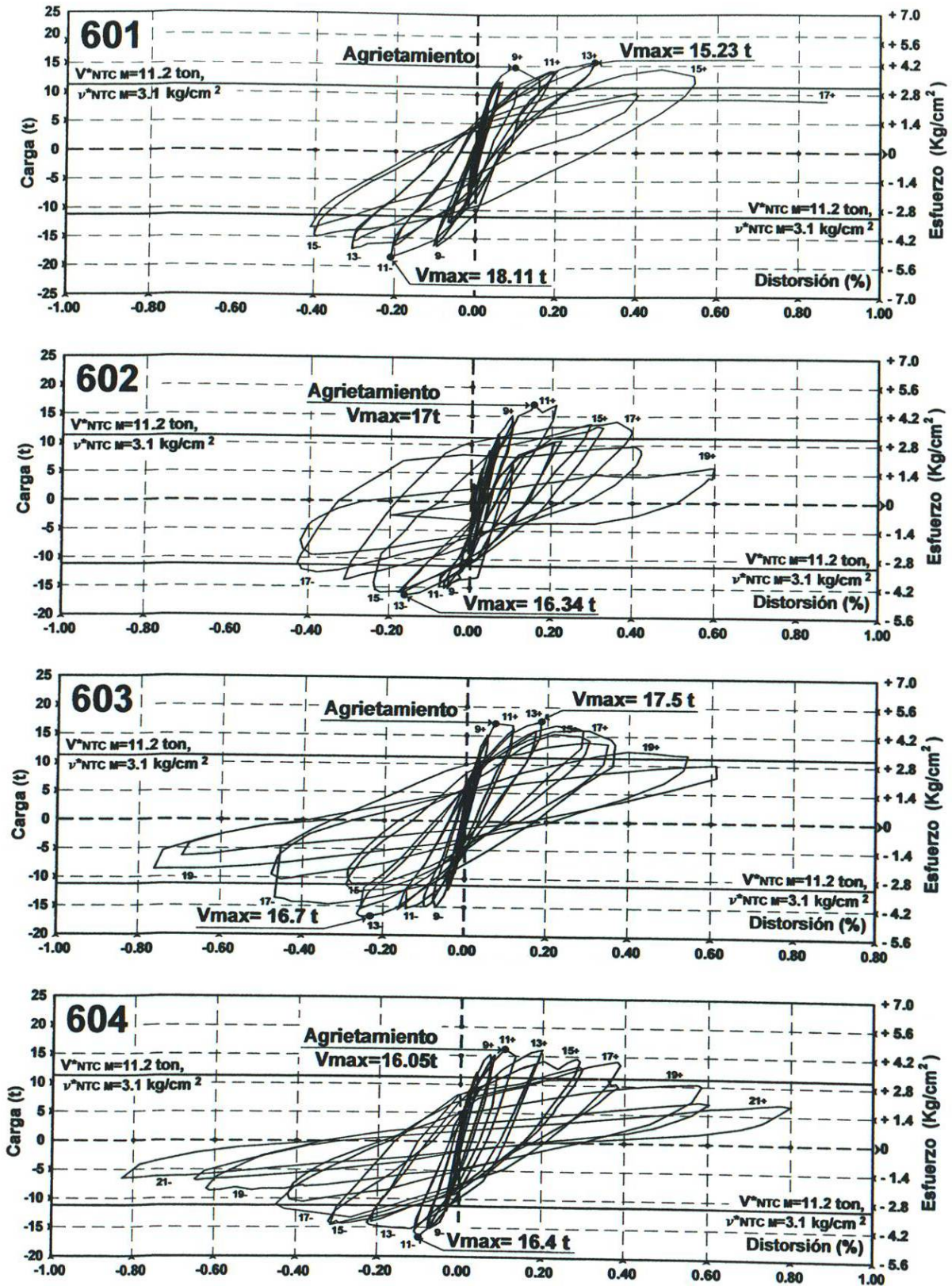


Figura 3.15: Curvas histeréticas de la carga lateral – distorsión.
Muros: 601, 602, 603 y 604.

En las gráficas es posible constatar lo que ya se había mencionado, es decir, que el primer agrietamiento se manifestó, en todos los especímenes, cuando los desplazamientos alcanzaron una distorsión cercana al 0.1%, a una fuerza cortante de agrietamiento promedio de 14.2 t (139 kN), mayor que la fuerza cortante teórica calculada de 11.3 t (111 kN). Además, se puede observar que después del primer agrietamiento inclinado, siguieron aumentando las fuerzas cortantes hasta alcanzar la resistencia máxima promedio de los ocho muros de 17.7 t (174 kN), a una distorsión promedio de 0.23%, haciendo evidente que se consiguió una reserva de resistencia promedio de 24%, gracias al confinamiento proporcionado por castillos y dalas. El término: “reserva de resistencia” se refiere a la diferencia entre la resistencia o carga lateral máxima y la carga que produce el agrietamiento diagonal.

Después del primer agrietamiento inclinado, comienza el comportamiento francamente no lineal, observando una histéresis significativa, aumentando notablemente la degradación de la rigidez, que se relacionó con el aumento de las grietas en la mampostería y el aplastamiento de la misma, donde se hace evidente la pérdida de proporcionalidad entre las cargas y los desplazamientos, e iniciándose la disipación de energía, a través de los agrietamientos en las juntas, la fricción entre los materiales y el desplazamiento de las piezas.

La etapa posterior a haber alcanzado la máxima resistencia, inició con la degradación de la resistencia, ya que en esta etapa comenzó el aplastamiento y desprendimiento de las paredes de la mampostería. El confinamiento por medio de los castillos y dalas fue de suma importancia para mantener la estabilidad del muro y para alcanzar grandes niveles de deformación con una reserva de resistencia que no se hubiera conseguido con la mampostería simple, ya que al llegar al primer agrietamiento inclinado sin confinamiento, aumentaría drásticamente la degradación de rigidez y de resistencia, llevando al sistema a la falla frágil.

3.4 Componentes de la distorsión.

Deformación angular o deformación por cortante. Tomando en cuenta el diseño del dispositivo de carga y la instrumentación externa del presente experimento, el desplazamiento lateral total (Δ_{total}), que fue medido en el plano medio de la viga, que se encuentra sobre el extremo superior del muro y distribuye la carga vertical (ver figura 3.16) se compone de:

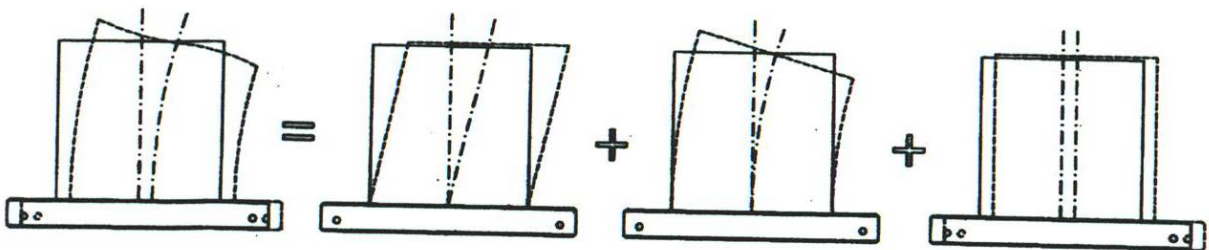


Figura 3.16: Componentes de la distorsión.

- La suma de las contribuciones de las deformaciones por cortante y por flexión del tablero ($\Delta_{cort} + \Delta_{flex}$);
- La suma de las traslaciones de cuerpo rígido ($\sum \Delta_{cr}$), por eventuales corrimientos del conjunto de la viga distribuidora de la carga vertical, el muro y la viga de desplante, con respecto a la losa de reacción; y de la viga distribuidora de la carga vertical, con respecto al extremo superior del muro;
- Las rotaciones de cuerpo rígido (Δ_{rot}) del tablero, con respecto a la viga de desplante, por eventuales corrimientos del anclaje del armado de los castillos; y
- La contribución de la expansión del tablero en su propio plano (Δ_{ex}), que produce flexión de los castillos en curvatura simple, es decir:

$$\Delta_{total} = \Delta_{cort} + \Delta_{flex} + \sum \Delta_{cr} + \Delta_{rot} + \Delta_{ex} \quad (3.1)$$

La cantidad y colocación adecuada de los micrómetros de carátula hizo posible medir, el desplazamiento lateral total (Δ_{total}), la traslación de cuerpo rígido del conjunto de la viga

distribuidora de la carga vertical, el muro y la viga de desplante, con respecto a la losa de reacción, y la traslación de cuerpo rígido del extremo superior del muro, con respecto a la viga distribuidora de carga la vertical.

Los extensómetros potenciométricos, colocados sobre las diagonales de los tableros, nos permitieron obtener la contribución de las deformaciones por cortante o deformaciones angulares, (Δ_{cort}) al desplazamiento lateral total. La deformación angular resultó de la suma del valor absoluto de las deformaciones de las diagonales; esta expresión es válida para tableros cuadrados con relación de aspecto igual a la unidad, como es este caso.

De esta forma, si se desprecia la contribución de la expansión del tablero y se considera que no habrá corrimientos del anclaje de los castillos; la contribución de las deformaciones por flexión del tablero puede obtenerse por diferencia, despejando de la ecuación 3.1 como sigue:

$$\Delta_{flex} = \Delta_{total} - \Delta_{cort} - \sum \Delta_{cr} \quad (3.2)$$

Al dividir todos los términos entre la altura de los especímenes, la ecuación anterior puede expresarse en función de deformaciones unitarias, dando como resultado la siguiente ecuación:

$$\Theta = R_{total} - \gamma - \sum R_{cr} \quad (3.3)$$

- donde: Θ , es la contribución de la deformación por flexión, a la distorsión del tablero;
 R_{total} , es la distorsión total en el plano medio de la viga distribuidora de carga vertical, medida durante la prueba;
 γ , es la contribución de la deformación por corte a la distorsión del tablero, medida durante la prueba;
 $\sum R_{cr}$, es la contribución de las traslaciones de cuerpo rígido a la distorsión total, medida durante la prueba.

En la figura 3.17, se muestran las contribuciones de las deformaciones por corte y por flexión al desplazamiento total del extremo superior de los especímenes, obtenidas de las mediciones y de la ecuación 3.3.

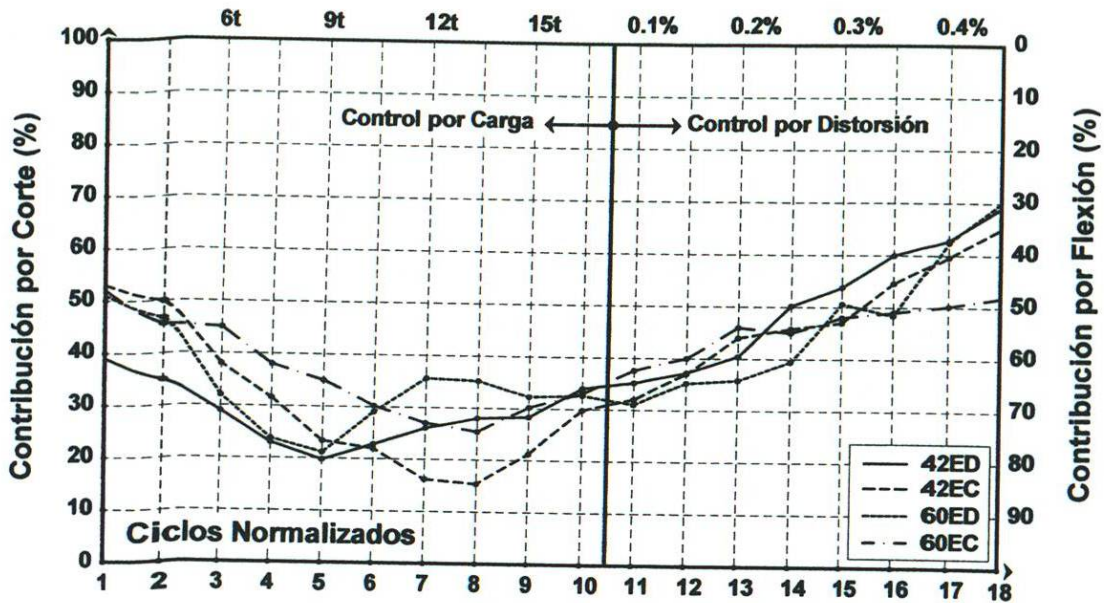


Figura 3.17: Contribución de las deformaciones por cortante y por flexión a la distorsión.

De los resultados obtenidos es posible inferir que antes del primer agrietamiento inclinado, la contribución del cortante a la distorsión osciló entre el 40 y 50%, mostrando una tendencia a disminuir. Después del primer agrietamiento hubo un aumento progresivo en la contribución de las deformaciones por cortante a la distorsión total de hasta un 70%, a una distorsión del 0.4%. A partir de la resistencia, las deformaciones por cortante controlaron la respuesta de los especímenes.

Las gráficas de la figura 3.17 terminan en los ciclos correspondientes a una distorsión del 0.4%, esto se debe a que, después de esta distorsión se retiraron los extensómetros potenciométricos y de alambre, para evitar que sufrieran daños al caer fragmentos de mampostería, ya que a distorsiones mayores se presentaba una notoria inestabilidad en el sistema. Además, al haber una pérdida de continuidad del tablero, las lecturas de los extensómetros sobreestimarían la deformación angular.

Curvatura. Como ya se mencionó anteriormente, los muros se instrumentaron con extensómetros potenciométricos sobre las diagonales de éstos y con extensómetros de alambre a lo largo de los castillos, con el fin de separar las contribuciones de las deformaciones por cortante y las deformaciones por flexión a la distorsión total. Y, como también se describió, la deformación angular se calculó con la suma del valor absoluto de las deformaciones de las diagonales y la deformación por flexión o curvatura se obtuvo por diferencia con la deformación total.

Según la teoría de flexión simple, las curvaturas deberán variar linealmente desde cero, en su extremo superior, hasta el valor máximo en su base. Los extensómetros de alambre sólo sirvieron para medir el valor medio de curvatura en la altura de los especímenes; sin embargo, esto sirvió para estimar la contribución de la flexión a la distorsión total, mediante la aplicación del segundo teorema de Mohr-Greene. En las figuras 3.18 y 3.19 se muestran las curvaturas promedio y las deformaciones angulares, respectivamente, de los muros 422 y 603.

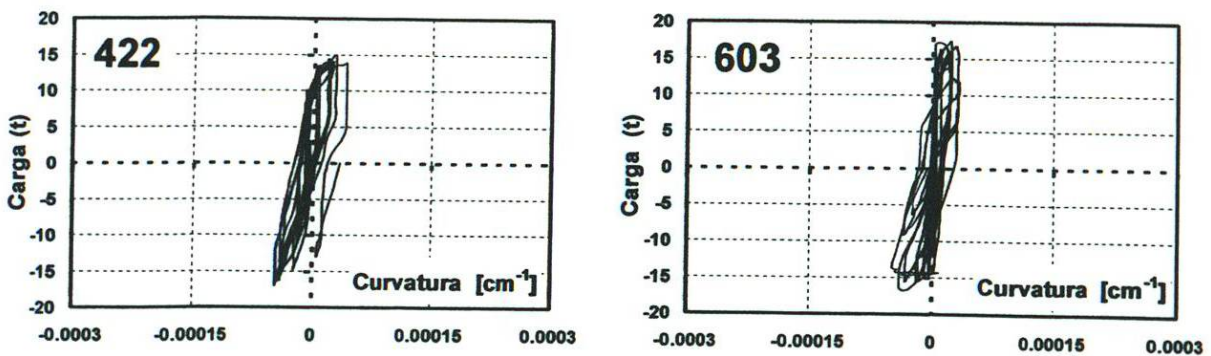


Figura 3.18: Curvaturas promedio en la altura de los muros 422 y 603.

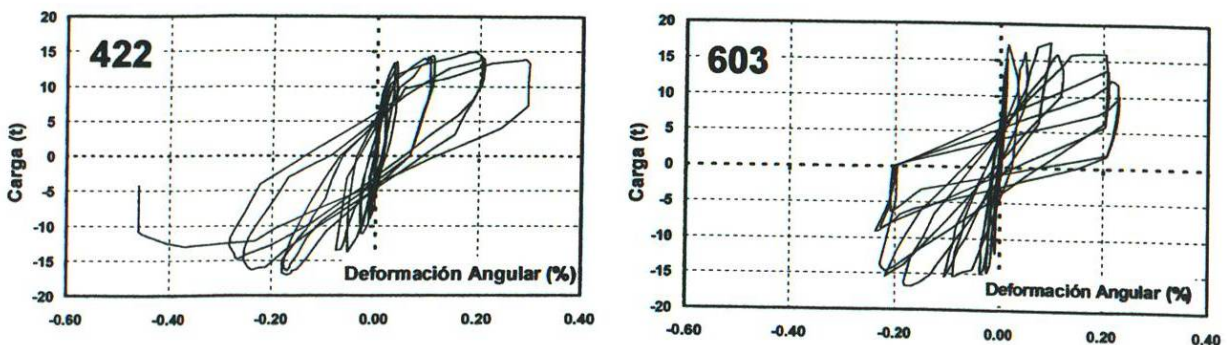
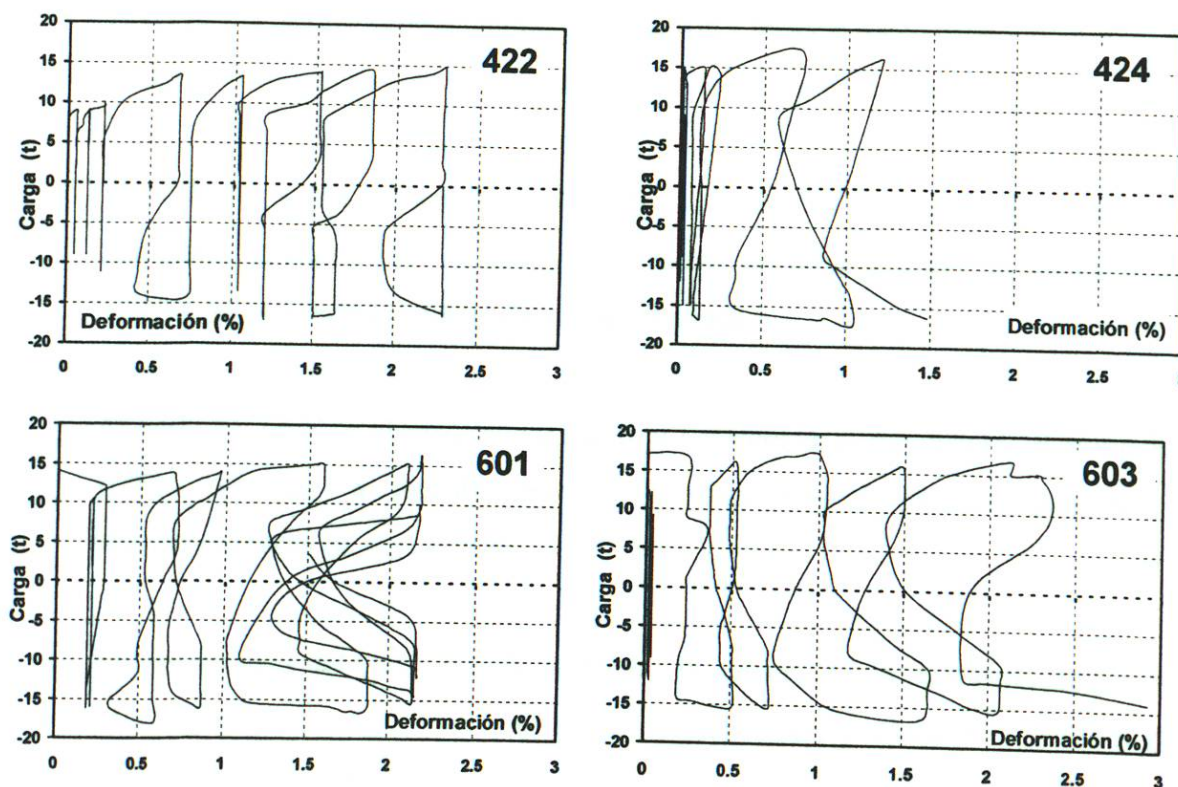


Figura 3.19: Deformación angular en muros 422 y 603

Al comparar la suma de las deformaciones por cortante y por flexión con la distorsión total, se encontró que los valores concuerdan muy bien entre sí, para distorsiones menores a las asociadas con el primer agrietamiento diagonal.

3.5 Expansión.

La expansión de los especímenes tuvo lugar a la altura del primer agrietamiento diagonal, porque después de esta etapa las expansiones fueron permanentes. Esto concuerda con el hecho de que, posterior a la distorsión del 0.1%, los especímenes iniciaron la incursión al comportamiento inelástico. En la figura 3.20 se muestran las variaciones de la expansión con respecto a la carga lateral, aplicada a los especímenes: 422, 424, 601 y 603.



**Figura 3.20: Expansión a la mitad de la altura.
Muros: 422, 424, 601 y 603.**

Los valores máximos de expansión coinciden con los picos máximos de los ciclos y concuerdan con el aumento de la anchura de grietas, con la penetración de grietas en las piezas de mampostería, con el aumento progresivo de grietas en el muro y, finalmente, con el aplastamiento

y desprendimiento de las paredes de la mampostería. La anchura de las grietas en las etapas de las pruebas de distorsiones mayores que el 0.4% osciló entre los 40 y 50mm. El aumento progresivo en la expansión se manifestó debido a la falta de refuerzo horizontal en las juntas. Las expansiones máximas estuvieron cercanas al 2%.

Conclusiones parciales.

- En general, antes del primer agrietamiento inclinado, en las distorsiones cercanas al 0.1%, los especímenes mostraron grietas incipientes, tanto en las juntas de mortero como en los castillos que, al descargar el muro, prácticamente se cerraban.
- A partir del primer agrietamiento, comenzaron a hacerse más visibles las grietas en las juntas y hubo penetración de grietas en las piezas de mampostería.
- Cuando los especímenes llegaron a distorsiones del 0.2%, aproximadamente, se formaron agrietamientos diagonales en forma de cruz, y hubo un aumento de las grietas, atravesando las piezas de la mampostería.
- Cuando las pruebas alcanzaron su máxima resistencia, a una distorsión promedio del 0.3%, comenzó a manifestarse el aplastamiento de la mampostería y el desprendimiento de sus paredes.
- En distorsiones del 0.4%, cuando se llegó a una degradación de resistencia mayor que el 20%, aumentó significativamente el aplastamiento y el desprendimiento de las piezas, además de que, en algunos especímenes, las grietas de las diagonales atravesaron los castillos en sus equinas.
- Las pruebas se llevaron al 0.6% de distorsión, manifestándose una significativa inestabilidad en los especímenes, a excepción de los muros 421 y 601, que no llegaron a la distorsión del 0.6%, debido a una severa inestabilidad, y los muros 423, 603 y 604

que no sólo alcanzaron la distorsión del 0.6%, sino que, además, se llevaron hasta el 0.8% de distorsión.

- En etapas finales de las pruebas, se manifestaron desprendimientos de las paredes de las piezas y, en algunos muros se observó desprendimiento en la interfase castillo-mampostería, tal es el caso de los muros 422, 602 y 603, de manera incipiente, a una distorsión promedio del 0.4%, y de manera más notoria, el muro 424, pero sólo en algunos fragmentos y a una distorsión del 0.6%. Sin embargo, es posible concluir que el hecho de que esta interfase fuera no dentada no influyó en el comportamiento del muro, ya que la falla por tensión diagonal ocurrió mucho antes del desprendimiento del castillo y la mampostería, que se presentó hasta una distorsión aproximada del 0.6%.
- Se observaron grietas en las esquinas de los castillos, generalmente en la parte superior de los mismos; sólo hubo un caso, en el muro 421, donde se manifestó una falla en el refuerzo longitudinal del extremo inferior del castillo.
- Se puede concluir que la evolución del deterioro de los ocho especímenes fue muy semejante y, por lo tanto, se puede validar el procedimiento de ensaye; además es notoria la falla de la mampostería, que se presentó mucho antes de que los agrietamientos pudieran manifestarse en los castillos.
- También se puede llegar a la conclusión de que las predicciones de los modos de falla fueron acertadas, ya que se puede observar que los castillos no tuvieron una demanda significativa.
- Antes del primer agrietamiento inclinado, la recuperación de las grietas fue del 100%. En etapas finales de las pruebas, a distorsiones aproximadas del 0.6%, la recuperación sólo era del 30 al 50% y llegaron hasta 30 a 50 mm de espesor.

- Las curvas histeréticas tuvieron gran similitud en los semiciclos positivos y negativos de la prueba de los ocho muros. Al inicio del ensaye se pudo observar que el comportamiento fue elástico, aunque hubo muy pequeña pero constante degradación de rigidez en los muros, que se acentuó notoriamente al incursionar en el rango inelástico.
- La resistencia teórica fue de 11.3 t (111 kN). El primer agrietamiento inclinado surgió en distorsiones cercanas al 0.1% con un valor de resistencia promedio de 14.2 t (139 kN), 27%, mayor que el estimado.
- La resistencia máxima alcanzada durante la prueba fue en promedio de 17.7 t (174 kN) a distorsiones cercanas al 0.23%. El confinamiento de la mampostería a través de los castillos y dalas le proporcionó a los especímenes una reserva de resistencia que le permitió mayor estabilidad al presentarse deformaciones mayores que la del primer agrietamiento.
- Para distorsiones menores que las asociadas al primer agrietamiento inclinado, al comparar la suma de las deformaciones por cortante y por flexión tomadas con los extensómetros con la distorsión total medida con los micrómetros, se obtuvo muy buena concordancia en la respuesta.
- Al inicio de las pruebas, las contribuciones por corte oscilaban entre un 40 y 50%; pero en etapas finales llegaron hasta un 70%. Al alcanzar la máxima resistencia, las contribuciones por corte controlaron el comportamiento de los especímenes.
- Los incrementos en la expansión de los especímenes se manifestaron en los picos de cada semiciclo, y esto concuerda con el aumento de anchura de grietas, la profusión y penetración de las mismas en las piezas y, finalmente, con el aplastamiento y desprendimiento de las paredes de la mampostería.

CAPÍTULO IV

COMPORTAMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO.

4.1 Introducción.

En este capítulo se comentará acerca de las pruebas que se realizaron a las probetas de acero de refuerzo de los castillos, para obtener valores de esfuerzos de fluencia y últimos, además de deformaciones unitarias.

Se mencionarán los procedimientos para obtener los valores indicativos sobre el comportamiento del acero de refuerzo ante cargas cíclicas reversibles.

Se analizarán los resultados obtenidos durante las pruebas, con el fin de describir el comportamiento del acero de refuerzo de los castillos confinantes.

Se realizarán correlaciones de los valores obtenidos en los deformímetros con las distorsiones que se presentaron durante las pruebas, con el fin de estudiar su influencia en el comportamiento de los especímenes.

4.2 Consideraciones sobre el análisis de los deformímetros.

Como se mencionó en el capítulo 2, se realizaron ensayos de tensión a las probetas de acero de refuerzo, con el fin de obtener su comportamiento ante cargas monótonas. Debido a las limitaciones del equipo disponible para los ensayos, sólo se pudieron obtener los siguientes resultados:

- a) El esfuerzo de fluencia de los aceros laminados en caliente Gr 42 y Gr 23;
- b) El esfuerzo de fluencia aparente de los aceros laminados en frío Gr s 60 y Gr 50;
- c) Las deformaciones unitarias asociadas con estos esfuerzos;

- d) El esfuerzo máximo permitido por las probetas; y
- e) El alargamiento a la ruptura en la longitud calibrada.

Al no poder realizar ensayos ante cargas cíclicas reversibles, se tuvo que buscar información existente de pruebas similares realizadas en el país, para complementar los parámetros que caracterizarían al comportamiento del acero de refuerzo ante cargas monótonas y cargas cíclicas reversibles.

Así, para los parámetros que caracterizan el comportamiento del acero ante cargas monótonas, las deformaciones asociadas al endurecimiento por deformación ϵ_{sh} y el esfuerzo máximo o último ϵ_{su} , se tomaron de *Rodríguez y Botero (1996)*, para el acero Gr 42; para el acero Gr 23 se tomó información del fabricante (*HYLSA, 2001*). Para obtener la deformación asociada al esfuerzo máximo resistido ϵ_{su} de los aceros Gr 50 y Gr 60, se hizo una extrapolación gráfica de las curvas esfuerzo-deformación obtenidas experimentalmente. En la figura 4.1 y en la tabla 4.1 se muestran dichos valores para los cuatro tipos de acero.

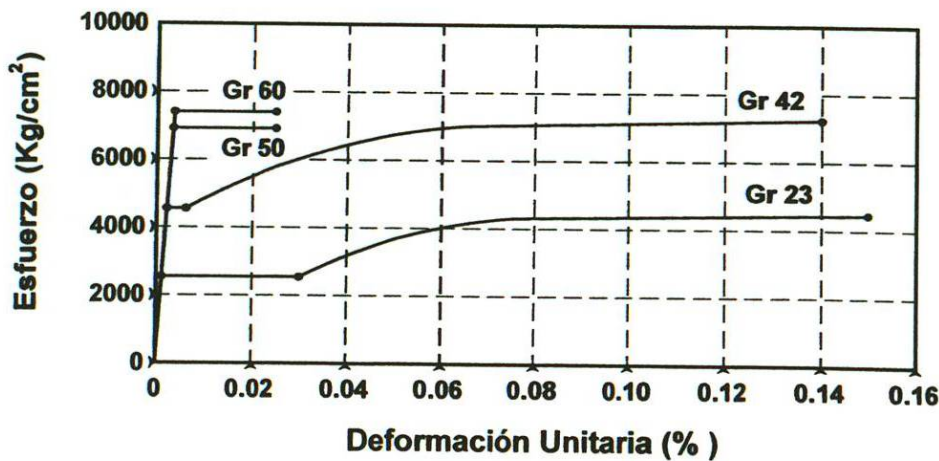


Figura 4.1: Propiedades idealizadas del acero de refuerzo.

Tabla 4.1: Propiedades idealizadas del acero de refuerzo.

PROPIEDADES DESIGNACION	f_y [Kg/cm ²]	f_{max} [Kg/cm ²]	ϵ_y [%]	ϵ_{sh} [%]	ϵ_{su} [%]
6.3 mm (1/4") Gr. 23	2542	4457	0.12	3 (**)	15 (**)
9.5 mm (3/8") Gr. 42	4546	7237	0.22	0,6 (*)	14 (*)
4.1 mm (Cal. 8) Gr. 50	6917	—	0.33	—	2.5
6 mm (Gr. 60)	7402	—	0.35	—	2.5
(*) Rodríguez y Botero (1996)			(**) HYLSA (2001)		

Para caracterizar el comportamiento del acero ante cargas cíclicas reversibles, en el caso de los aceros Gr 23 y Gr 42, se utilizó la curva idealizada esfuerzo-deformación, donde se tomó en cuenta el efecto Baushinger (Zuhua, 1987), y para los aceros Gr 50 y Gr 60 se utilizó un modelo elasto-plástico perfecto. Ver figura 4.2.

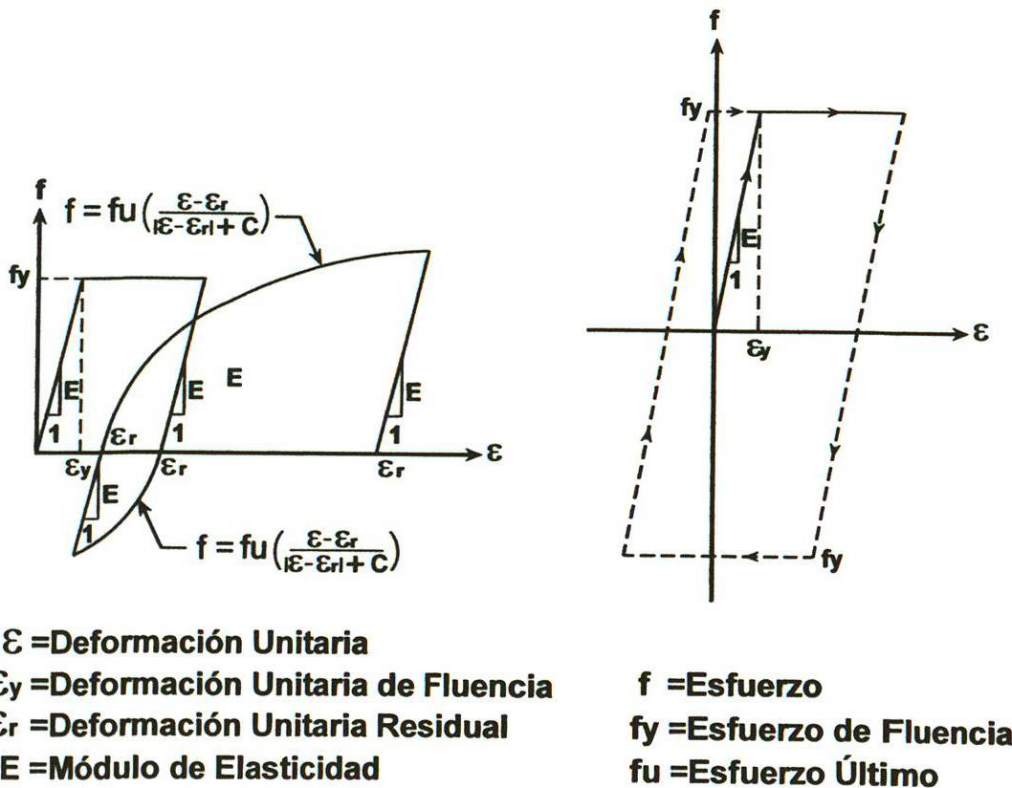


Figura 4.2: Modelos idealizados del comportamiento del acero de refuerzo.

La rigidez inicial de ambas curvas idealizadas se igualó con el valor del módulo de elasticidad del acero, de $2\ 100\ 000\ \text{kg/cm}^2$ ($205\ 947\ \text{MPa}$); las deformaciones asociadas con la fluencia se obtuvieron del cociente entre el punto de fluencia o el esfuerzo de fluencia aparente, según el caso, y la rigidez inicial. El resto de los parámetros necesarios para realizar los modelos idealizados, se obtuvieron de los resultados de las pruebas en el acero de refuerzo y de los valores que se necesitaban para complementar la información faltante en las pruebas monótonas.

Con lo anterior, se admite como comportamiento ante cargas monótonas el representado por las gráficas convencionales que se muestran en la figura 4.1; además, que las curvas de las pruebas monótonas coinciden con las envolventes de las curvas idealizadas ante cargas cíclicas; y que, tanto en las curvas ante cargas monótonas como ante cargas cíclicas, la fluencia del acero representa en realidad el límite de proporcionalidad, ya que los valores de las curvas corresponden con los valores que se obtuvieron experimentalmente hacia el final del rango elástico de los aceros.

Es por esto que las gráficas de la figura 4.2 deben tomarse como indicativas y no como modelos rigurosamente representativos del comportamiento real ante cargas cíclicas reversibles del acero empleado en la construcción de los especímenes. De igual forma, los esfuerzos en el acero obtenidos a partir de las referidas gráficas idealizadas, deberán considerarse sólo como indicativos. Sin embargo, las tendencias son válidas, ya que son independientes del modelo de comportamiento esfuerzo – deformación del acero.

4.3 Comportamiento del acero de refuerzo en los especímenes

Para estudiar el comportamiento del acero de refuerzo se partió de la necesidad de abordar los siguientes aspectos:

- a) Comprobar cualitativamente la congruencia entre los signos de las deformaciones unitarias que se registraron durante los ensayos y el sentido de aplicación de la carga lateral;

- b) Realizar un análisis cualitativo del comportamiento de las deformaciones unitarias registradas durante las etapas de primer agrietamiento, resistencia máxima y distorsión última; y
- c) Efectuar la identificación de los deformímetros que registraron valores de fluencia.

Para llevar a cabo estos puntos, se construyeron gráficas con las historias de las deformaciones unitarias y las curvas histeréticas de cada deformímetro; así como también se realizaron diagramas de barras de las etapas más importantes de las pruebas de los mismos. Finalmente, se graficaron los esfuerzos contra las deformaciones unitarias de los deformímetros que incursionaron en el régimen inelástico.

En las figuras 4.3 y 4.4 se muestran las historias de deformación unitaria de cuatro deformímetros colocados en las barras longitudinales y de cuatro en los estribos, sobrepuestas a las historias de las distorsiones presentadas en las pruebas. En todos los casos, los picos del lado positivo inducen tensión y los picos en el sentido negativo inducen compresión.

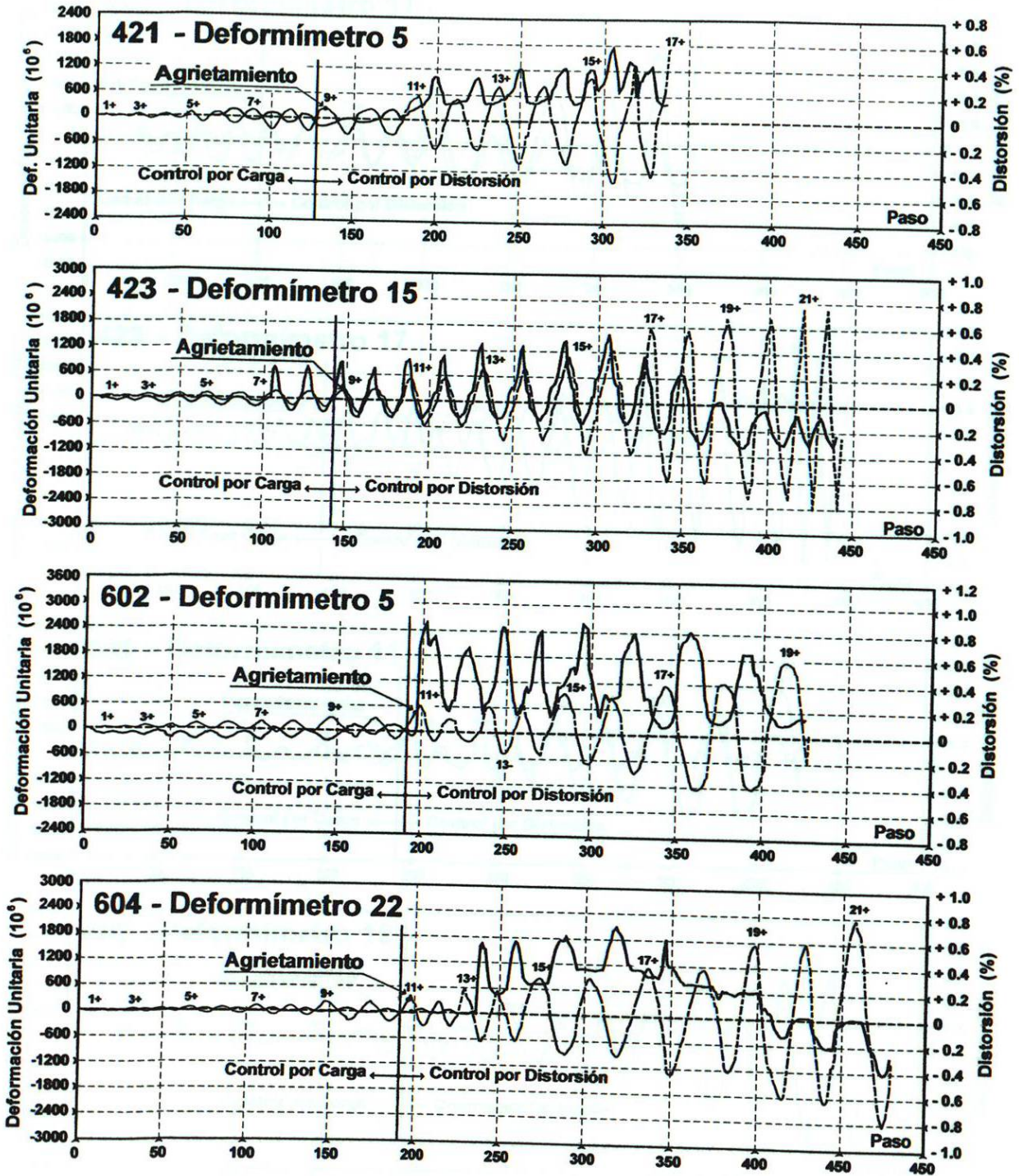


Figura 4.3: Historias de las deformaciones unitarias en los deformímetros adheridos al refuerzo longitudinal.

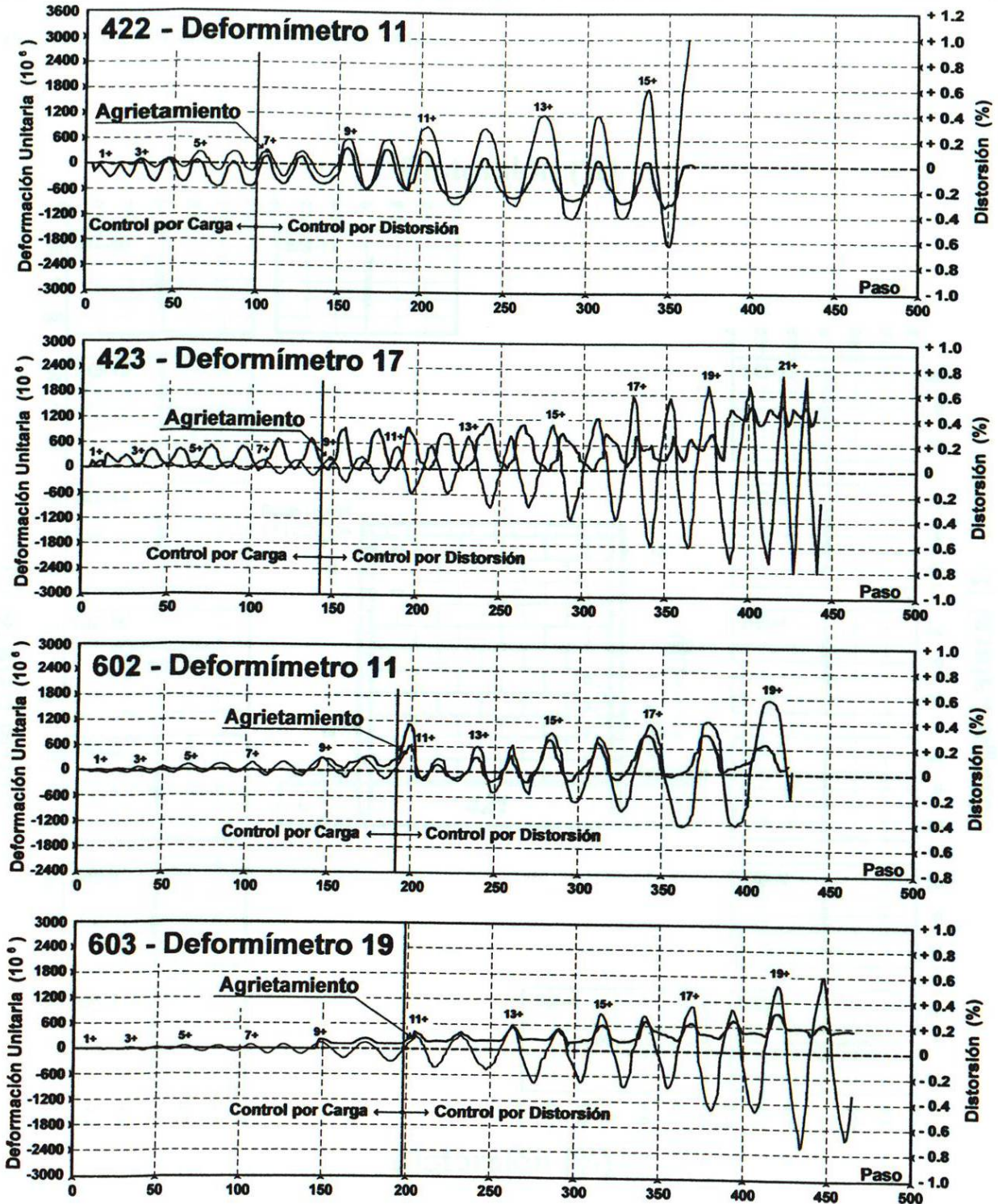


Figura 4.4: Historias de las deformaciones unitarias en los deformímetros adheridos al refuerzo transversal.

En las figuras 4.5 al 4.12 se muestran las gráficas histeréticas de todos los deformímetros de los ocho muros; las gráficas que tienen la leyenda “no disponible” son los deformímetros que presentaron anomalías en la toma de lecturas.

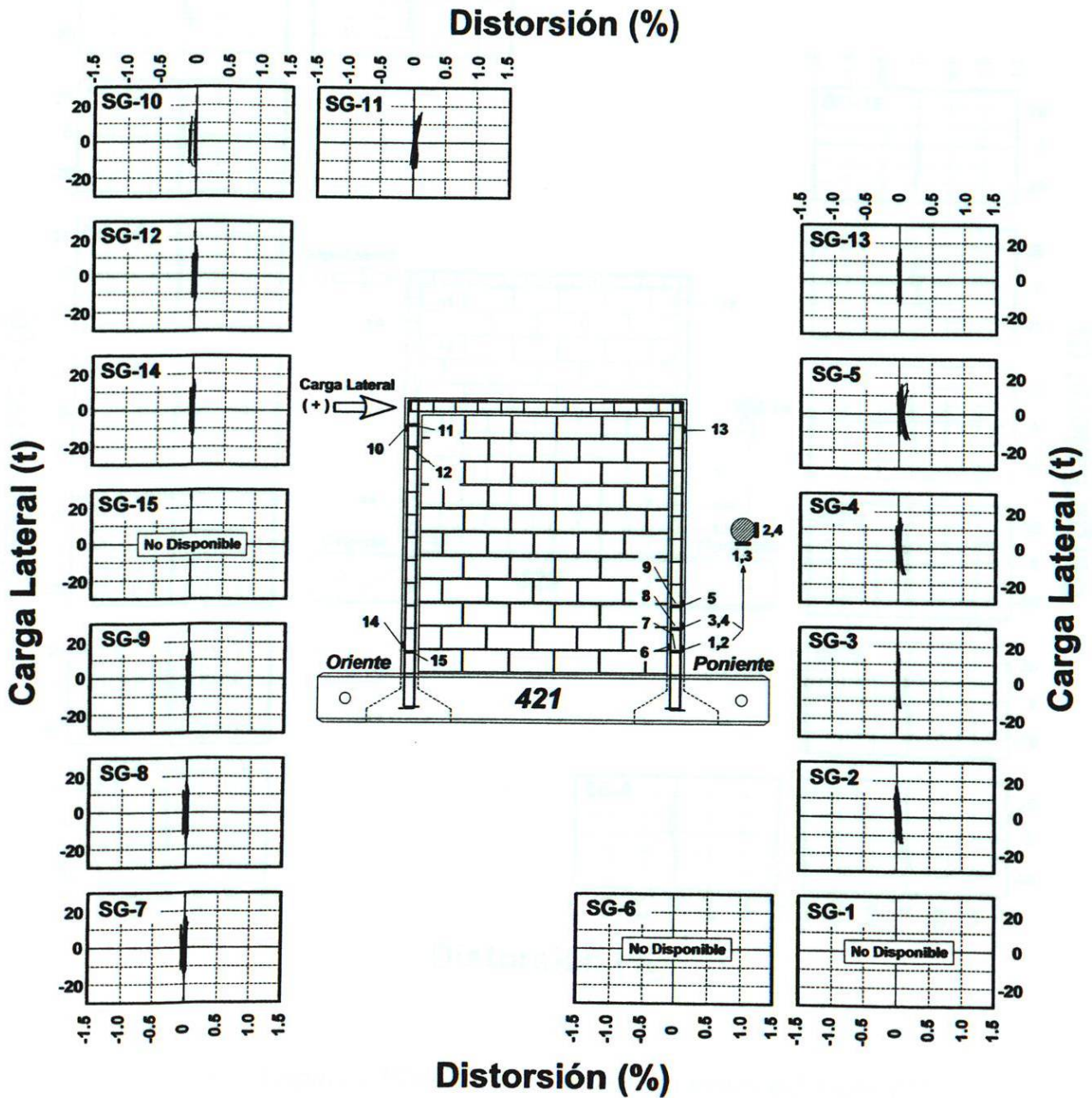


Figura 4.5: Respuesta histerética de los deformímetros del Muro 421.

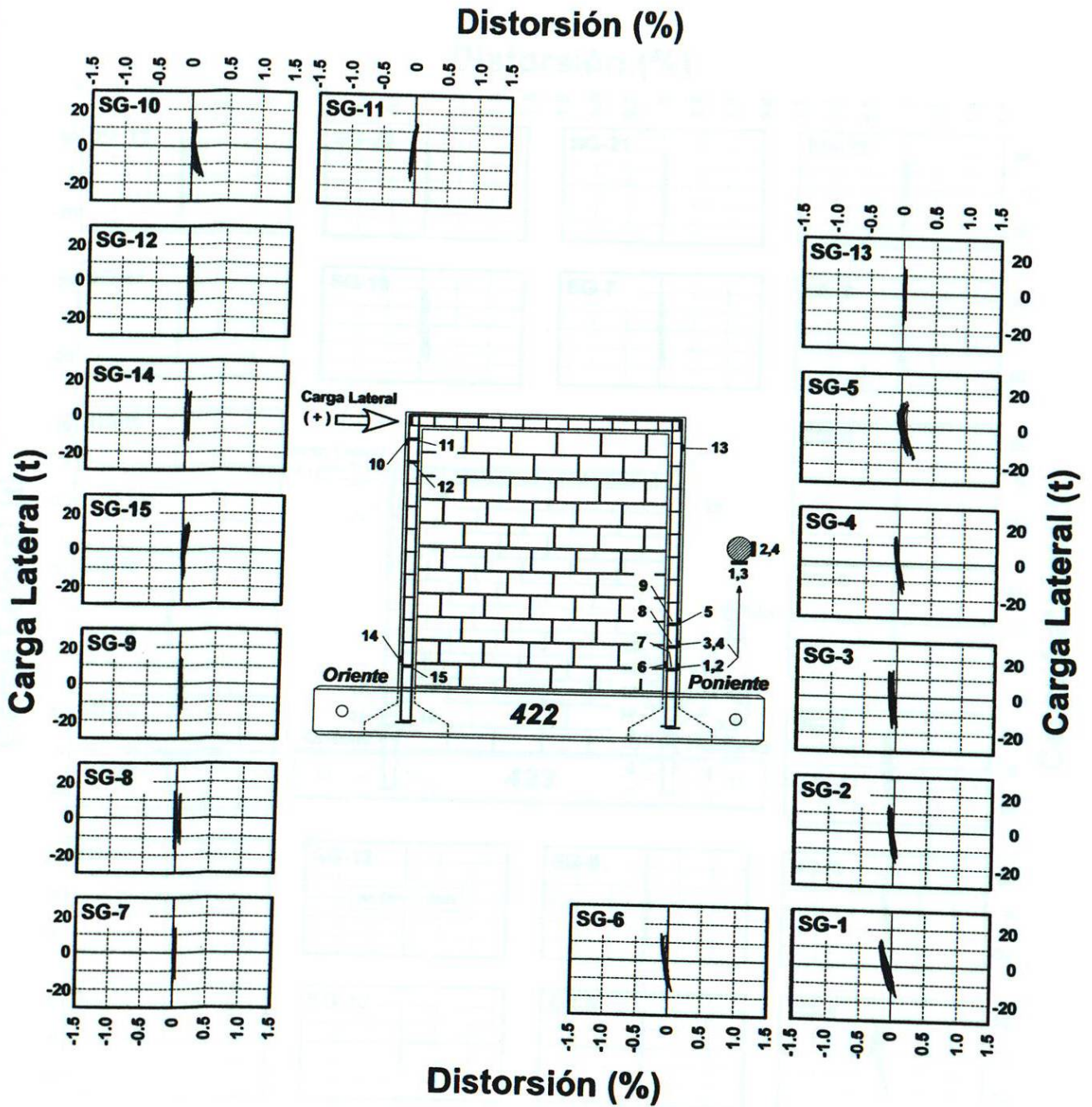


Figura 4.6: Respuesta Histerética de los Deformímetros del Muro 422

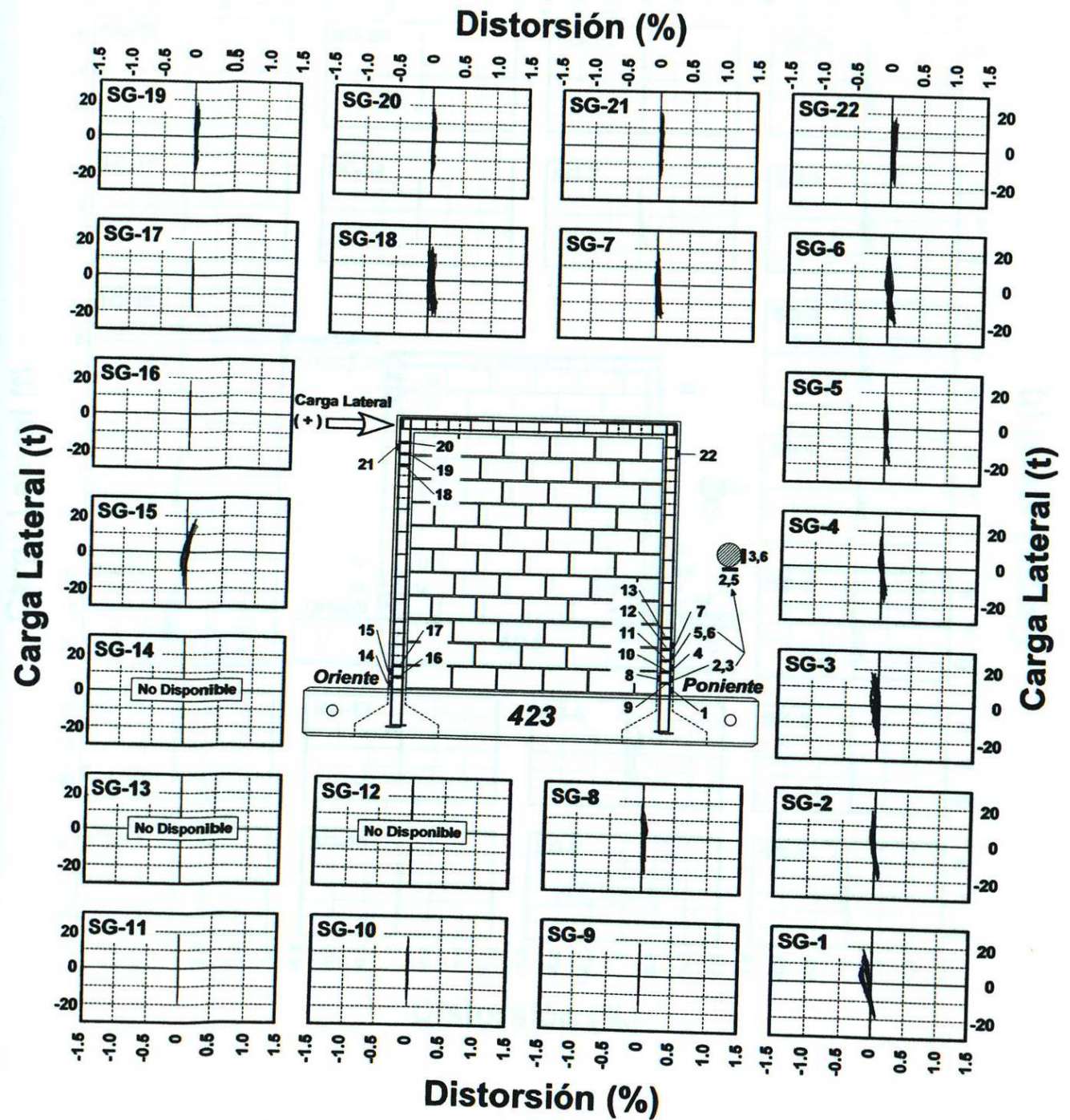


Figura 4.7: Respuesta histerética de los deformímetros del Muro 423.

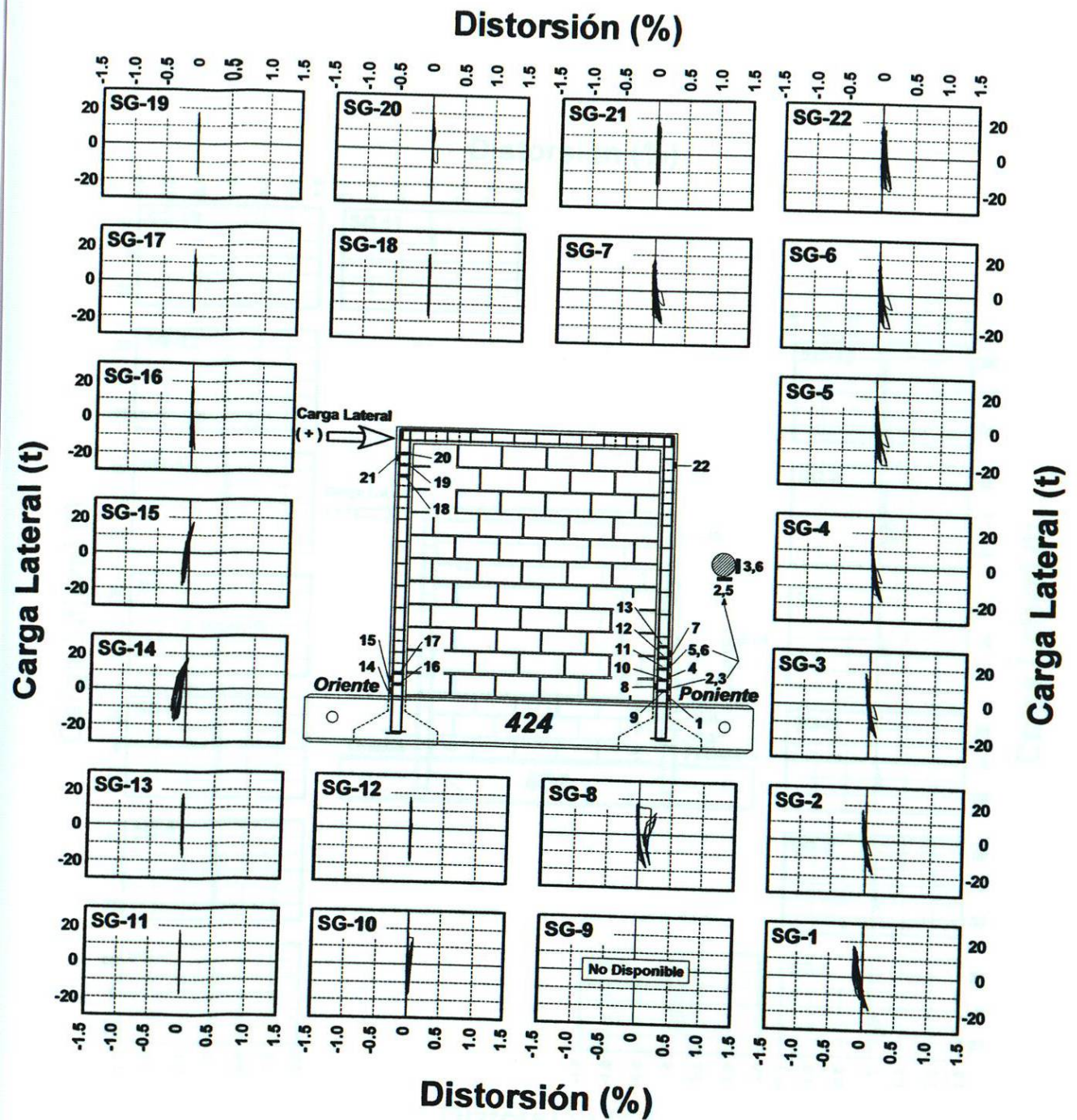


Figura 4.8: Respuesta Histerética de los Deformímetros del Muro 424

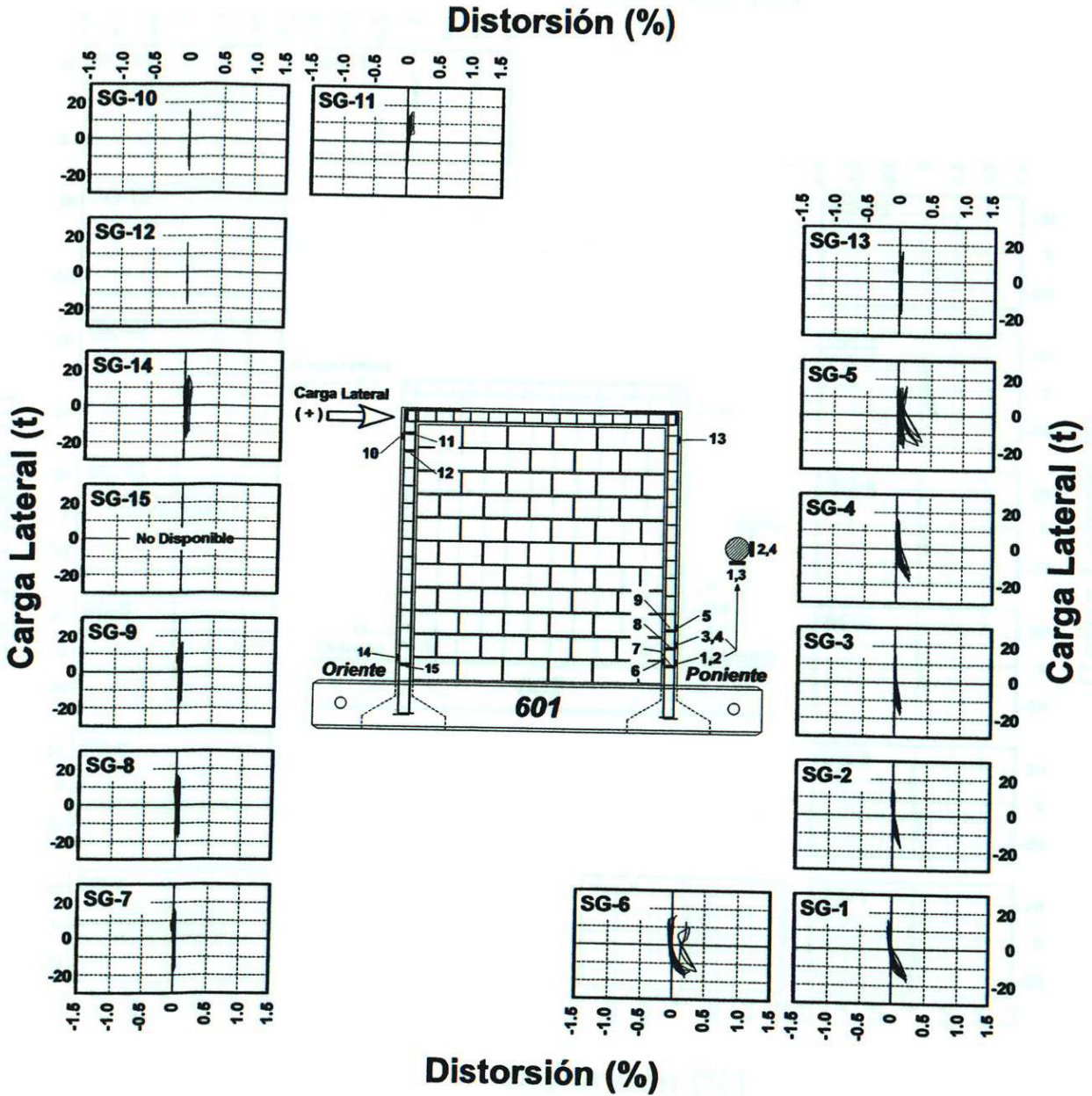


Figura 4.9: Respuesta histerética de los deformímetros del Muro 601.

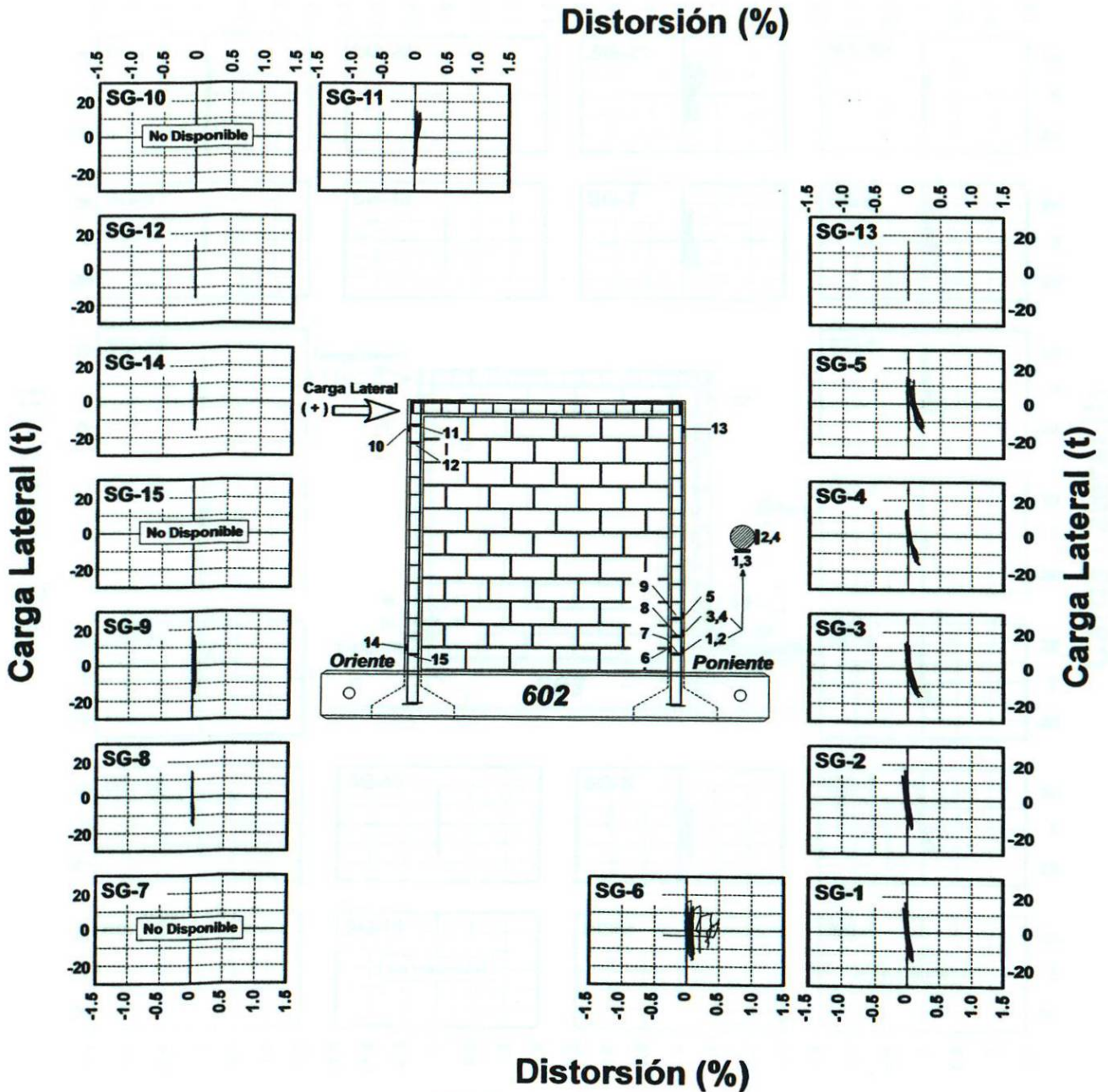


Figura 4.10: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 602.

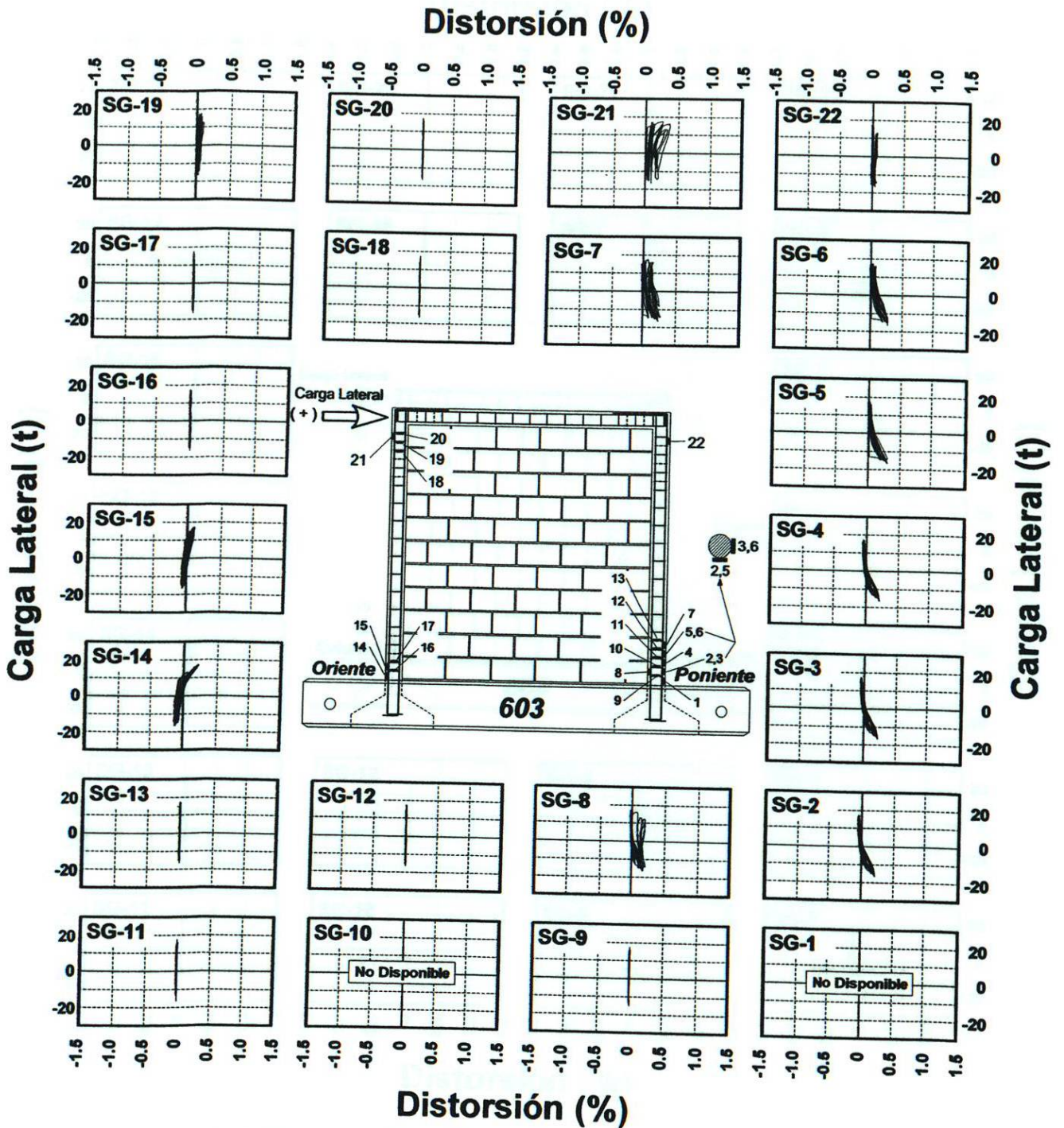


Figura 4.11: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 603.

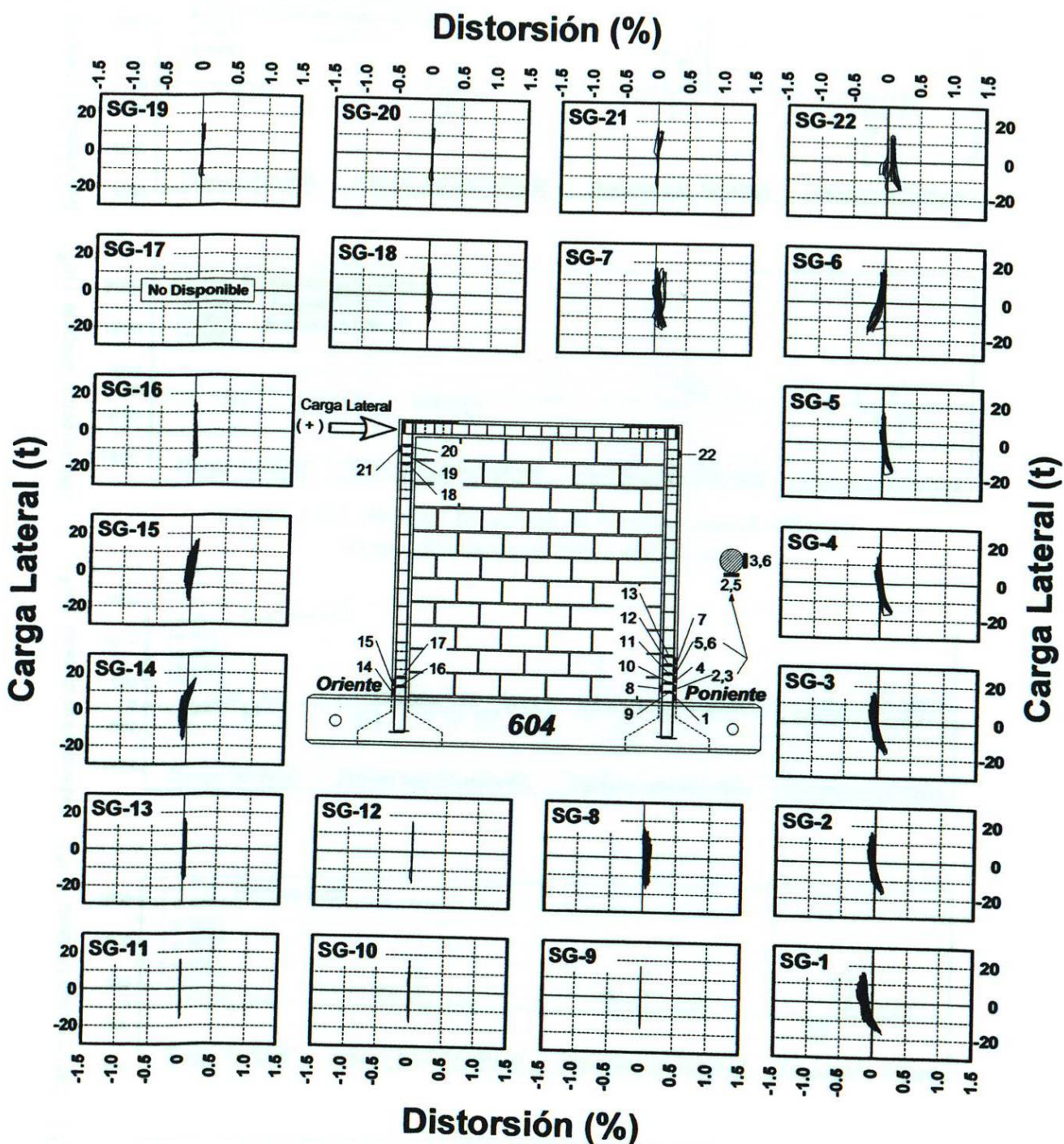


Figura 4.12: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 604.

En las figuras 4.13 al 4.15 se incluyen los diagramas de barras para todos los deformímetros en las etapas más importantes en el desarrollo de las pruebas.

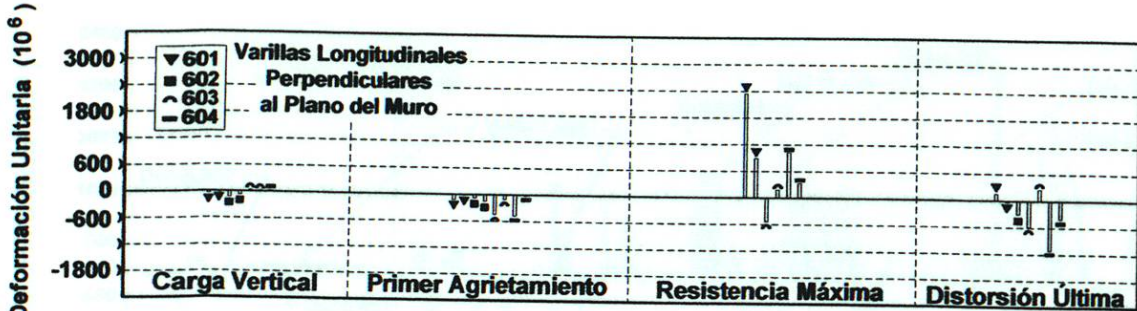
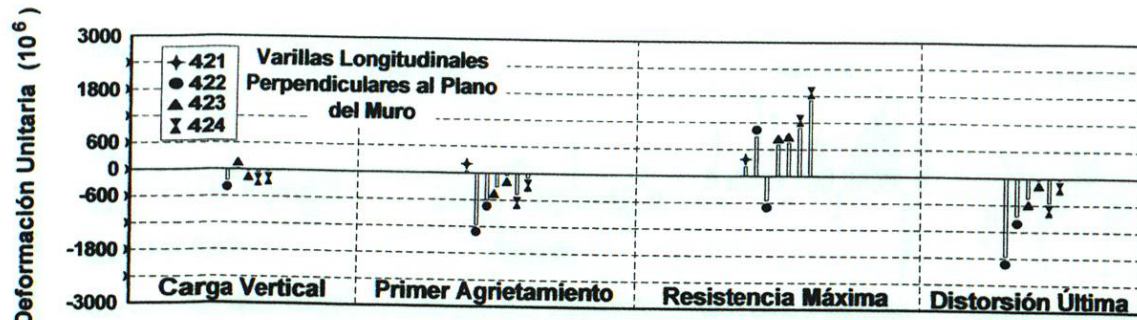


Figura 4.13: Nivel de Esfuerzos de Varillas Longitudinales Perpendiculares al Plano del Muro

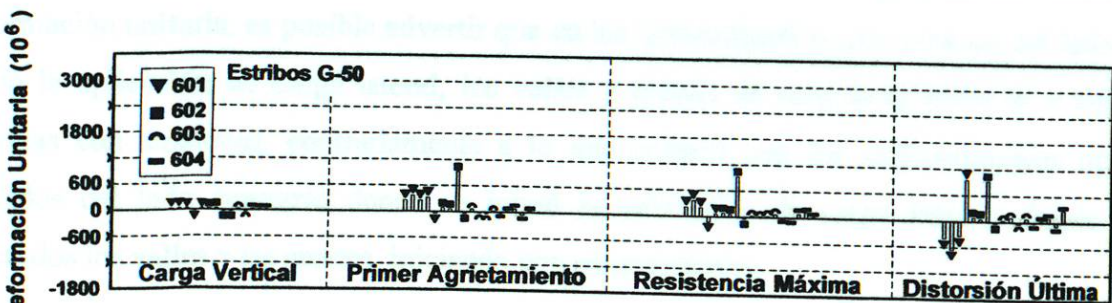
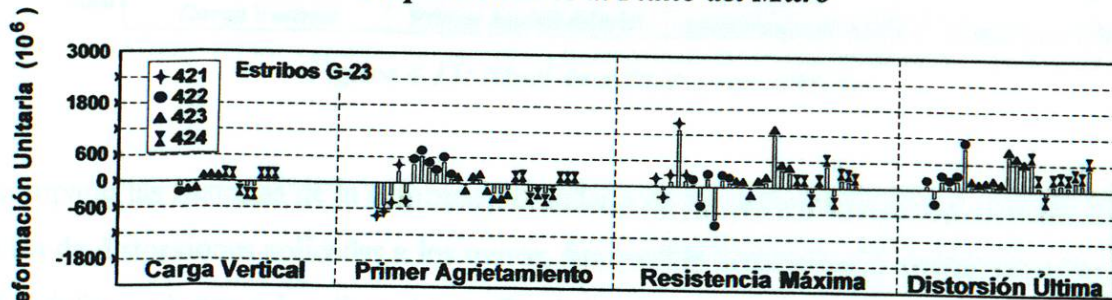


Figura 4.14: Nivel de esfuerzos en varillas longitudinales en el plano del muro.

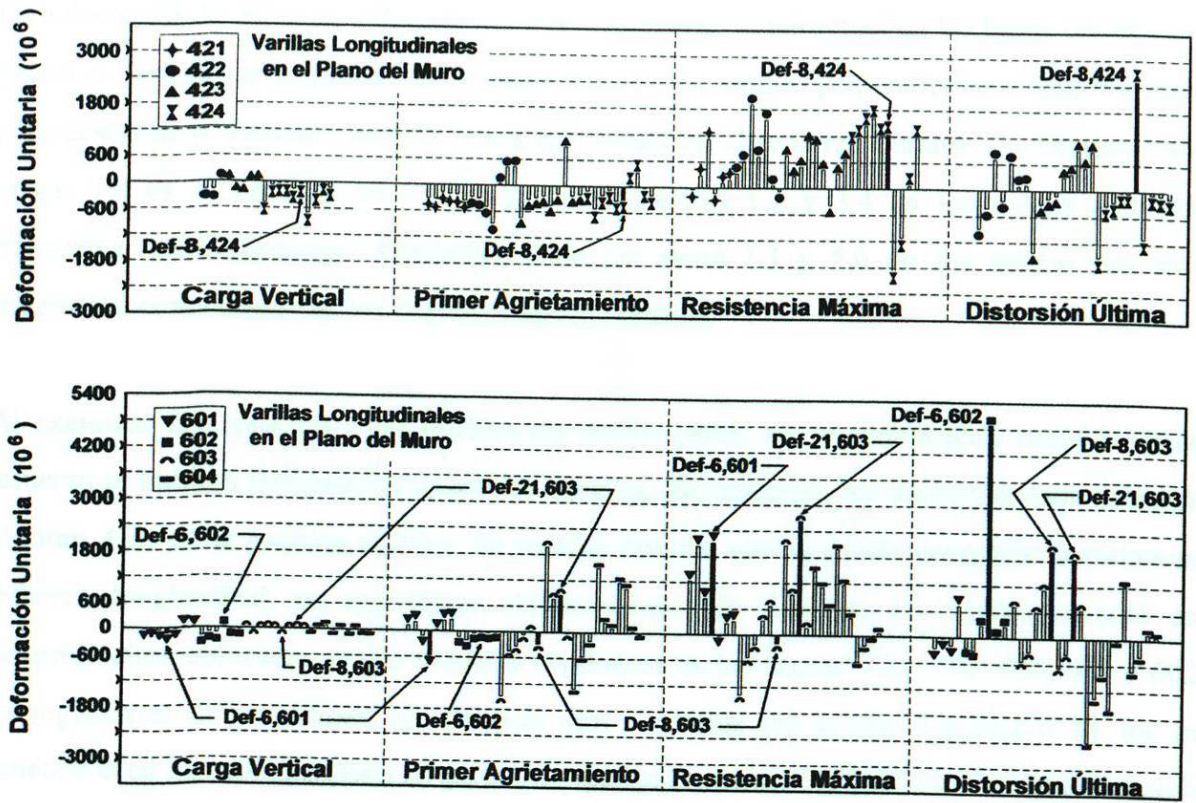


Figura 4.15: Nivel de esfuerzos en estribos.

Al comparar las historias de la deformación unitaria de los deformímetros en el acero longitudinal con las de distorsiones aplicadas a los muros, fue posible determinar la congruencia en los signos de las deformaciones y las distorsiones. Es decir, si se observan las gráficas de las historias de deformación unitaria, es posible advertir que en los deformímetros que estaban del lado donde se inició la aplicación de carga lateral, los valles y crestas se acoplaron entre sí e iniciaron las historias con tensiones, contrariamente a lo que ocurrió con los deformímetros que estaban ubicados del lado contrario donde se inició la aplicación de carga lateral, donde quedaron invertidos los valles y las crestas, iniciando con compresiones.

Con el análisis de las gráficas anteriormente descritas se pudo constatar que el acero de refuerzo tanto longitudinal como transversal, se mantuvo dentro del régimen elástico, debido a que las deformaciones del acero fueron menores que las deformaciones de fluencia correspondientes. Asimismo, los estribos prácticamente no fueron solicitados en las pruebas.

La colocación de pares de deformímetros en el refuerzo longitudinal en las bases de los castillos, ya sea en sentido de la aplicación de carga lateral y en sentido perpendicular a esta, fue relevante para descartar o detectar posibles fluencias locales en el refuerzo durante los últimos ciclos de carga. Tal es el caso de los pares de deformímetros 1,2 y 3,4 en los muros con refuerzo transversal uniformemente distribuido y de los pares 2,3 y 5,6 en los muros con refuerzo transversal concentrado en los extremos de los castillos.

Al examinar los registros y las gráficas de dichos pares, no se encontraron indicios de que el refuerzo se hubiera flexionado durante los ensayos. Sin embargo, los deformímetros colocados en el muro 421, en la esquina inferior del castillo oriente, que se cizalló plegando notoriamente el refuerzo longitudinal, no registraron deformaciones de fluencia. Lo mismo sucedió en los deformímetros colocados en las esquinas superiores de los muros: 421, 422, 424, 601 y 602 que no registraron deformaciones de fluencia aún y cuando las grietas diagonales de los muros penetraron en los castillos. Esto se atribuye a que seguramente las fallas de las varillas sucedieron fuera de los puntos donde se adhirieron los deformímetros.

En las figuras 4.16 y 4.17 se muestran las gráficas representativas de los deformímetros que permanecieron dentro del rango elástico, sin mostrar indicios de fluencia ni incursión en el límite de proporcionalidad del acero, los deformímetros que se muestran son el 8 del muro 603 y el 22 del muro 604. Cabe mencionar que hubo algunos deformímetros que presentaron indicios de comportamiento no lineal.

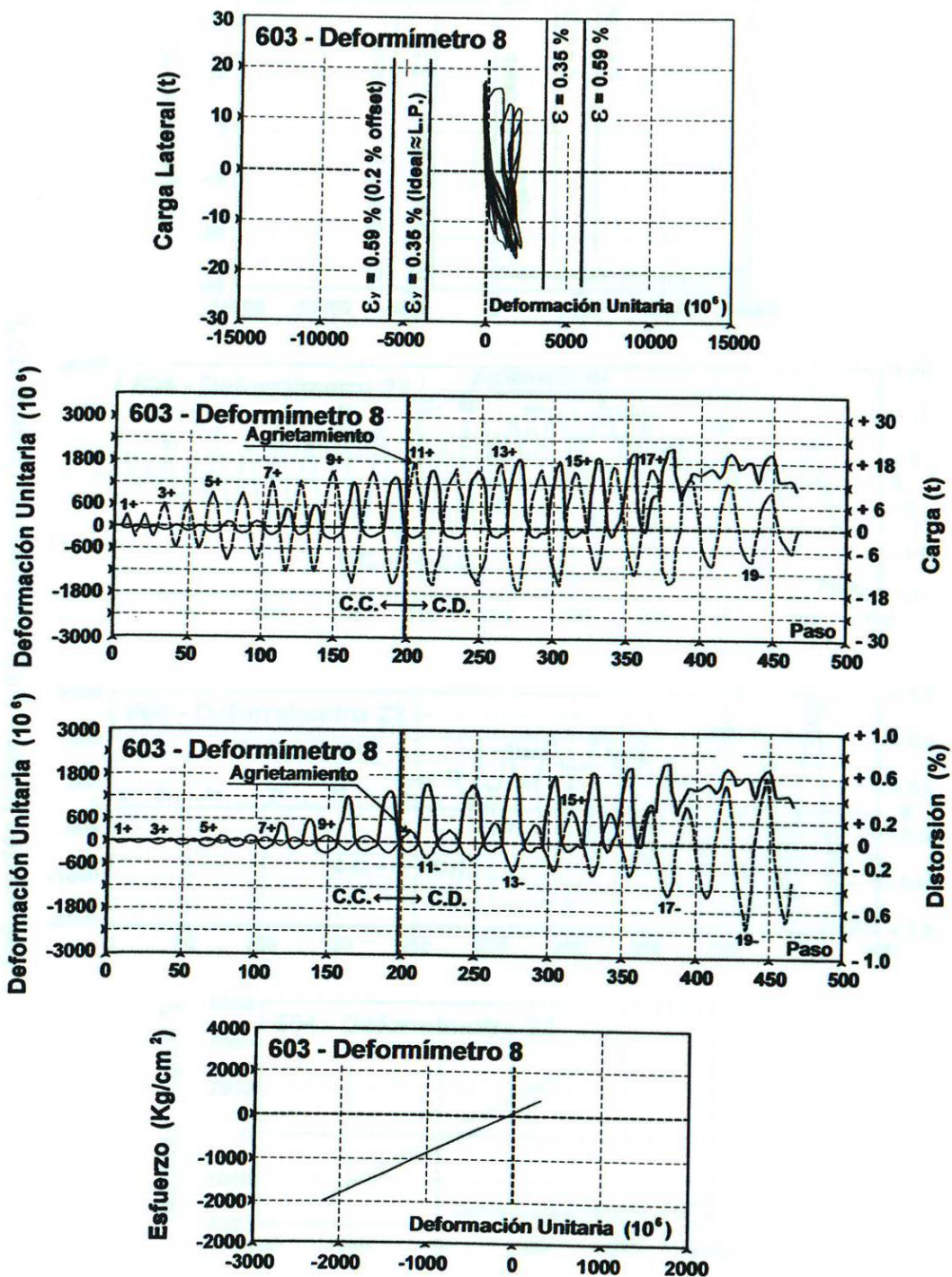


Figura 4.16: Respuesta del deformímetro 8 del muro 603.

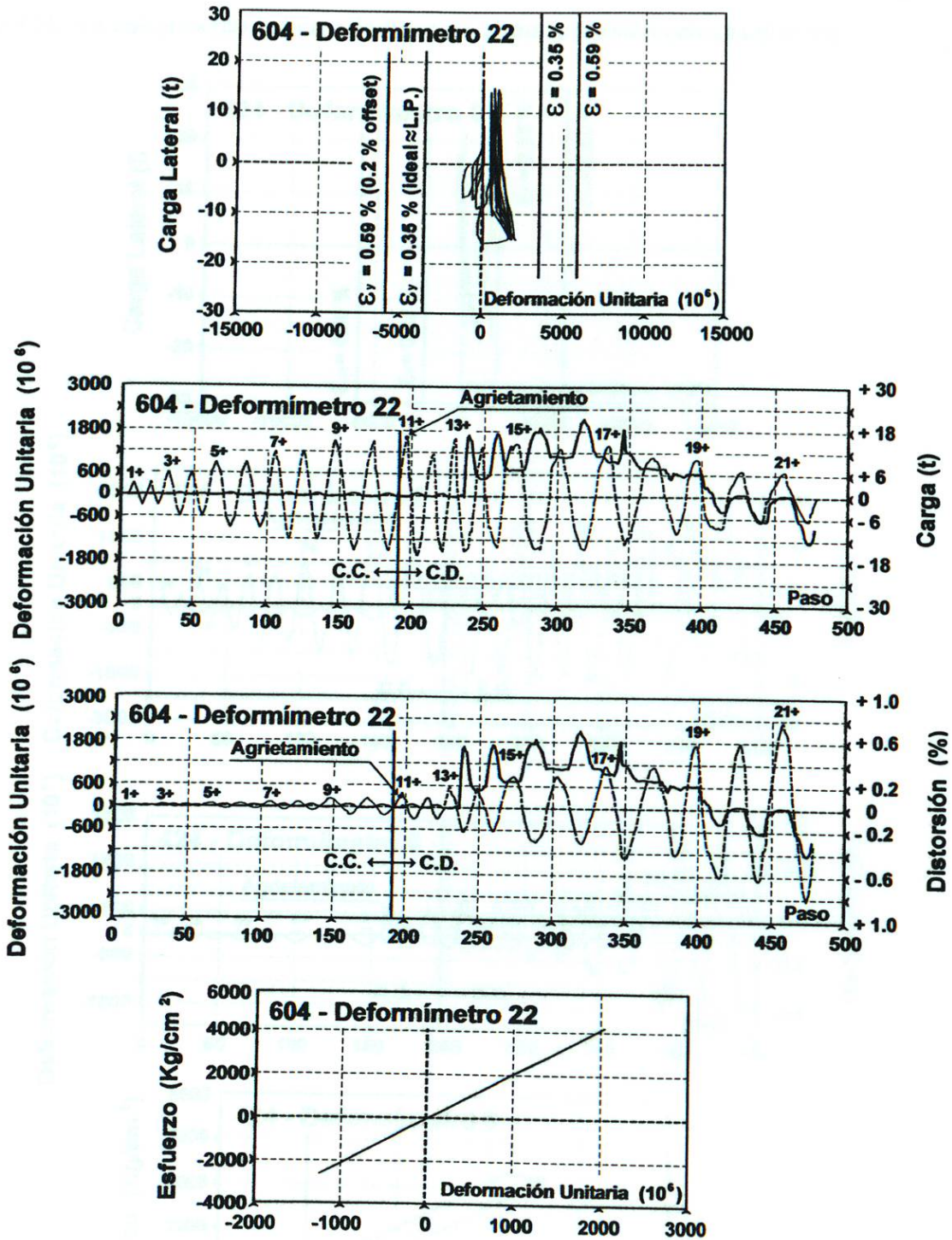


Figura 4.17: Respuesta del deformímetro 22 del muro 604.

En la figura 4.18 se muestran la gráfica histerética, la historia de deformación unitaria–distorsión y la curva esfuerzo–deformación del deformímetro 8, ubicado en la base del castillo poniente del muro 424, el cual presentó indicios de fluencia, a una distorsión cercana al 0.6%.

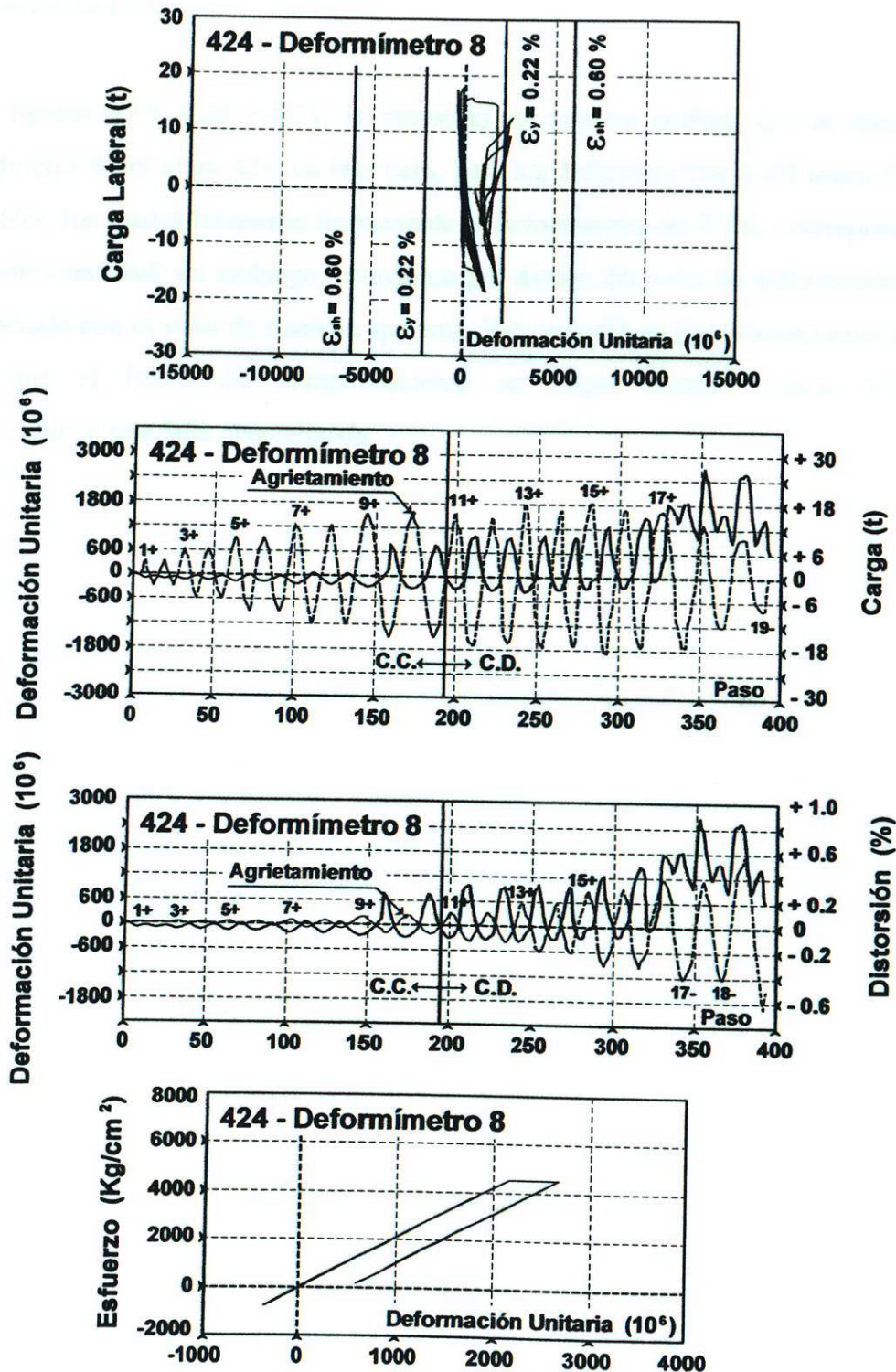


Figura 4.18: Respuesta del deformímetro 8 del muro 424.

En las gráficas se puede observar que hay concordancia en la aplicación de la carga vertical y la deformación del refuerzo. Se pudo comparar la penetración de las grietas en la esquina inferior del castillo donde se colocó el deformímetro, con el inicio de la plastificación en los valores de deformación unitaria.

En las figuras 4.19, 4.20 y 4.21, se muestran las mismas gráficas que se mencionan para el deformímetro 8 del muro 424; en este caso, para los deformímetros 6 del muro 601, 6 del 602 y 21 del 603, los cuales rebasaron ligeramente la deformación del 0.3%, correspondiente al límite de proporcionalidad; sin embargo, estuvieron por debajo del valor de deformación del 0.6%, que está asociado con el valor de fluencia aparente. Esto sucedió en los últimos pasos de carga, lo que indica que el inicio del comportamiento no lineal sucedió cuando los especímenes experimentaban una falla generalizada.

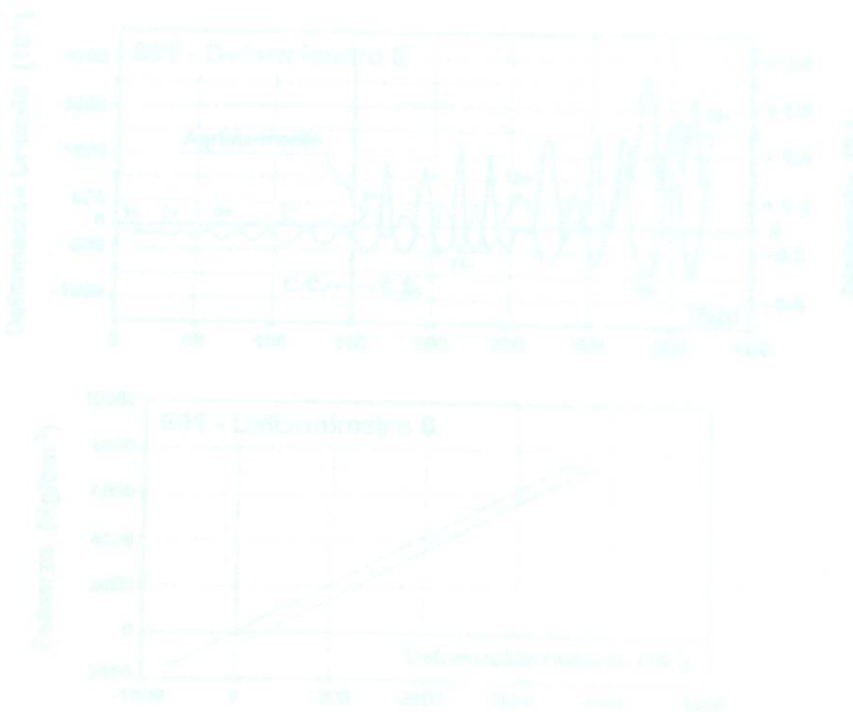


Figura 4.19: Comparación de la carga vertical y la deformación unitaria.

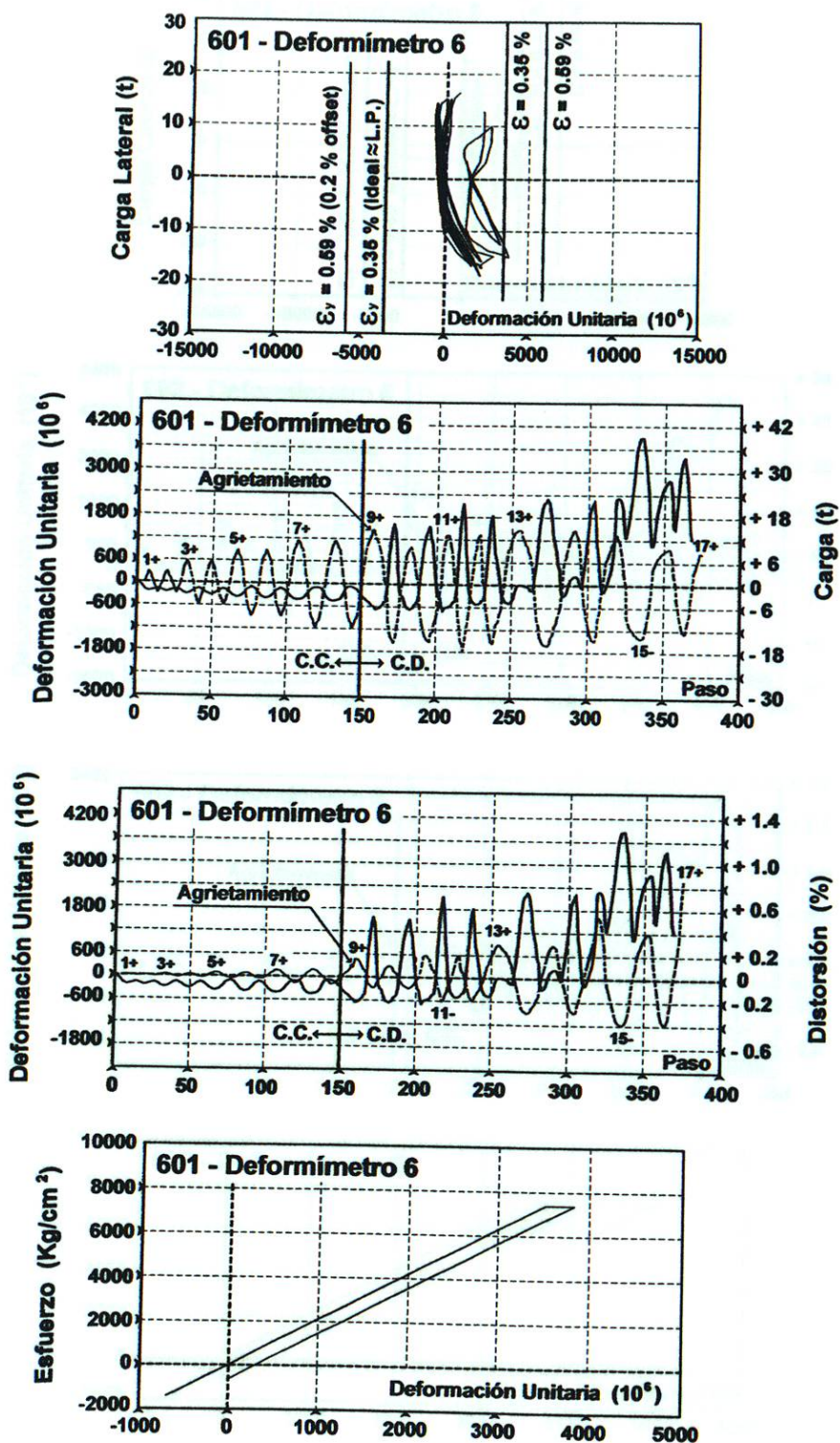


Figura 4.19: Respuesta del deformímetro 6 del muro 601.

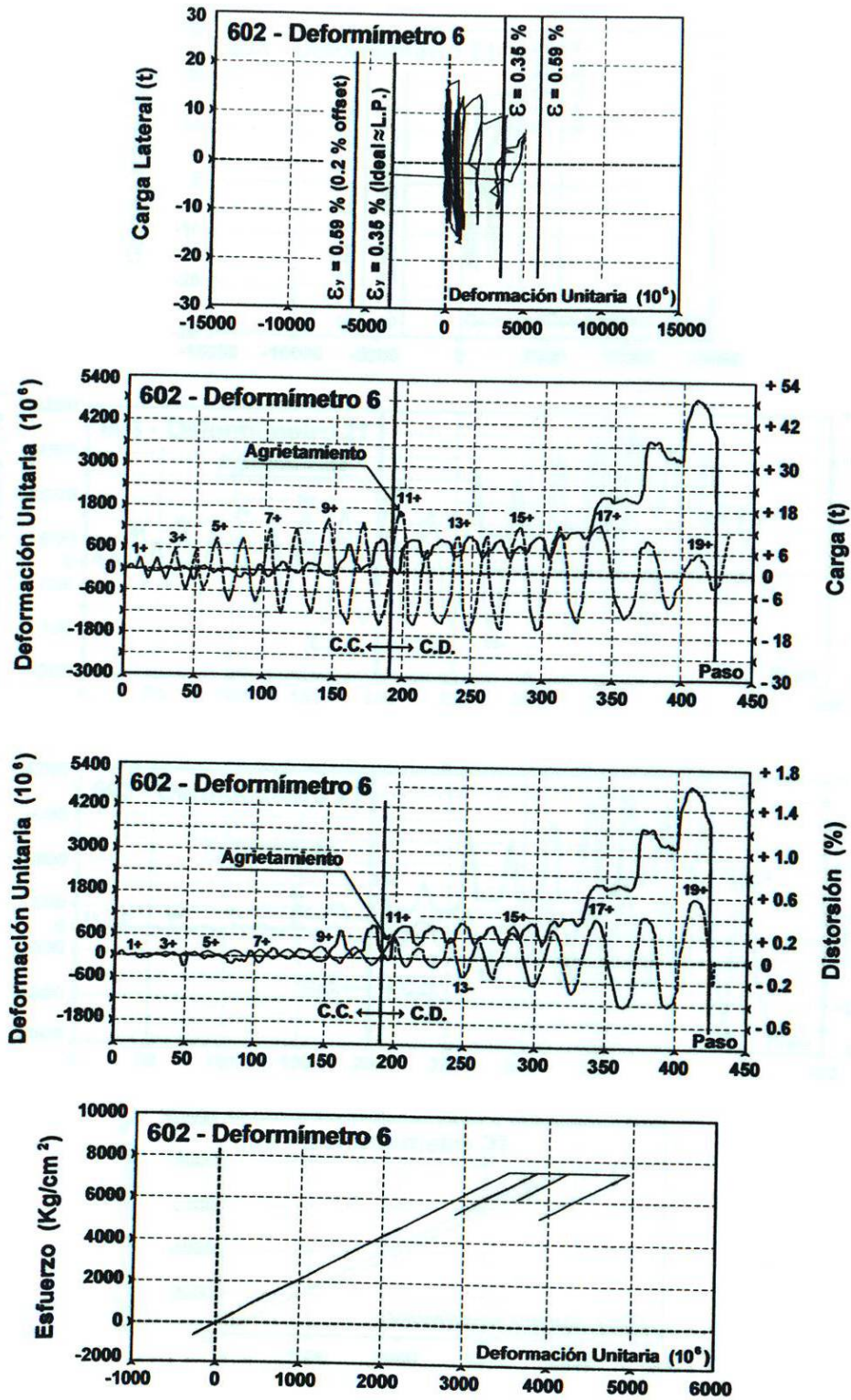


Figura 4.20: Respuesta del deformímetro 6 del muro 602.

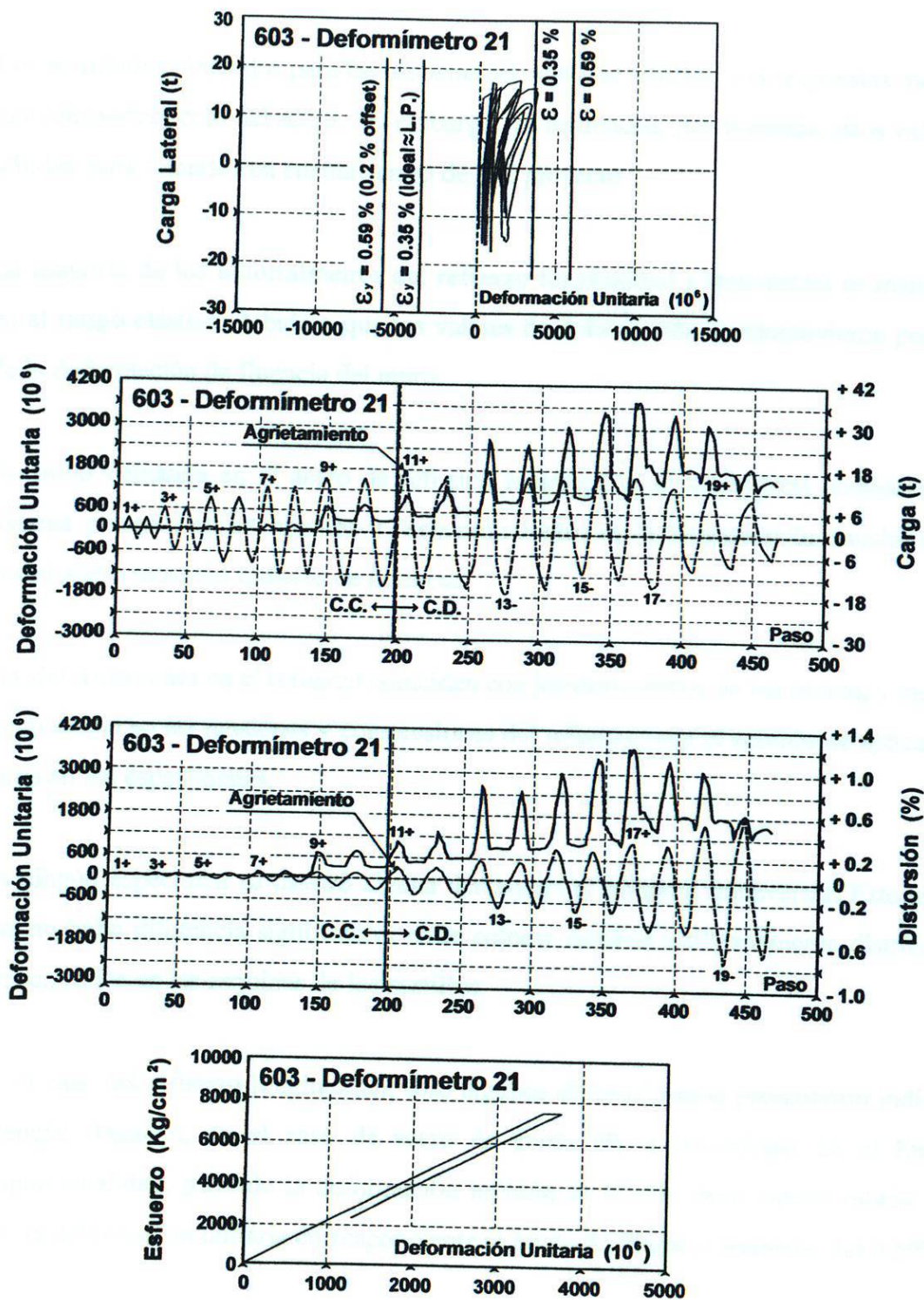


Figura 4.21: Respuesta del deformímetro 21 del muro 603.

Conclusiones parciales.

- Los resultados obtenidos para las probetas del acero de refuerzo son respuestas indicativas del comportamiento del acero. Sin embargo, las tendencias que muestran estos valores son válidos para tomarlos en cuenta dentro de este proyecto.
- La mayoría de los deformímetros del refuerzo longitudinal y transversal se mantuvieron en el rango elástico, debido a que los valores de deformación se mantuvieron por debajo de la deformación de fluencia del muro.
- No hubo demanda en el acero de refuerzo longitudinal ni transversal, debido a que el sistema presentó aplastamientos y desprendimientos en la mampostería, mucho antes de que el acero mostrara indicios de fluencia.
- Las deformaciones en el refuerzo coinciden con las distorsiones de los muros, y mostraron congruencia en las tensiones y compresiones del refuerzo, con el sentido de aplicación de carga en los especímenes.
- En ningún espécimen se mostró alguna demanda del refuerzo transversal. Esto significa que no hubo diferencia significativa entre colocar estribos uniformemente distribuidos y concentrarlos en las esquinas de los castillos.
- En el caso del refuerzo longitudinal, sólo algunos deformímetros presentaron indicios de fluencia; llegando, en el caso de acero de grado 60, a incursionar en el límite de proporcionalidad, pasando la deformación unitaria de 0.35%, pero siendo mucho menor que la deformación unitaria correspondiente al punto de fluencia aparente, del 0.59%.
- En el caso del acero de grado 42, con un solo caso, en el cual pasó la deformación unitaria de fluencia del 0.22%, sin llegar a la deformación unitaria asociada al esfuerzo máximo del 0.6%. Sin embargo, los deformímetros que incursionaron en el rango inelástico lo

hicieron de manera incipiente, y a distorsiones mayores que el 0.4%, donde la degradación de la resistencia fue mayor que el 20%.

- En general, el hecho de que algunos castillos hayan tenido fluencia en el refuerzo longitudinal, no es indicativo de que hubo demanda por parte de los especímenes, ya que sucedió en niveles muy altos de distorsión, donde los especímenes ya no mantenían constante la carga vertical, las deformaciones eran muy grandes, la mampostería había sufrido severos daños y había una inestabilidad importante en el sistema.

CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

Al inicio de esta tesis se comentó acerca de la necesidad de contar con información sobre la respuesta de los muros confinados ante cargas laterales cíclicas reversibles que simulen un sismo para viviendas típicas en México y sobre la importancia de que cada región del país cuente con información suficiente acerca de las propiedades de los materiales utilizados en las mismas, lo anterior debido a las diferencias en mano de obra y materia prima.

Esta investigación se realizó con el fin de obtener conclusiones que permitan validar o no el uso de mampostería confinada con armazones electro soldadas en zonas sujetas a fuerzas sísmicas, y verificar que el hecho de concentrar estribos en las esquinas de los elementos confinantes, ya sea con acero convencional o con armazones electro soldadas beneficia el comportamiento del sistema estructural constituido por mampostería confinada.

La realización de las pruebas sobre cada uno de los materiales, la obtención de las propiedades de los mismos, los ensayos de los especímenes y los resultados obtenidos, nos han dejado respuestas aceptables que conducen a las siguientes conclusiones:

- Para el diseño experimental de esta investigación, se utilizó una modelación estadística, que permite tener certidumbre en cuanto a la validez científica del proyecto. Por tanto, la cantidad de especímenes ensayados fue suficiente para evaluar las respuestas planteadas en el inicio de la investigación. Dichas respuestas se evaluarán en la segunda fase del proyecto (*Zárate, 2008*).
- Se ensayaron todos los materiales utilizados en la fabricación de los especímenes, obteniendo las propiedades mecánicas de éstos, las cuales influyen directamente en el comportamiento del sistema. Los valores obtenidos son suficientes y cuentan con el rigor necesario acostumbrado en la normatividad mexicana para la estimación de los diferentes parámetros evaluados en este trabajo.

- Las pruebas en pilas y muretes confirmaron que la sugerencia de la normatividad mexicana sobre la determinación del módulo de elasticidad y el módulo de cortante para la mampostería es acertado.
- La instrumentación externa fue adecuada para la obtención de los datos necesarios en la evaluación del comportamiento general de los especímenes.
- La fórmula para el cálculo del esfuerzo al agrietamiento inclinado que mencionan las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento del Distrito Federal, subestima la resistencia real de los especímenes, aproximadamente con un 27% de diferencia.
- En general, los esfuerzos en el acero de refuerzo se mantuvieron dentro del rango elástico, los esfuerzos en los estribos se mantuvieron aún mas bajos que los esfuerzos en el refuerzo longitudinal. Con base en lo anterior, es posible concluir que el refuerzo no fue demandado de manera significativa.
- El patrón de daño observado en todos los especímenes es similar, lo cual permite concluir que en la evolución del daño de los especímenes no tienen efecto las diferencias en el refuerzo.
- En todos los especímenes, el modo de falla del sistema fue por compresión diagonal, mostrando aplastamiento y desprendimiento de las paredes de la mampostería.
- Con los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo, se puede concluir que no existen diferencias notables en cuanto al comportamiento general de los especímenes, usando refuerzo convencional o usando refuerzo con armazones electro soldadas.

- También es posible concluir que no existen deferencias notables en el comportamiento general de los especímenes, al concentrar estribos en las esquinas de los elementos confinantes de los tableros.

A partir de estas conclusiones, se pueden hacer las siguientes recomendaciones:

- En el país de México se han realizado ensayos de mampostería fabricada con bloques de barro macizo. Dado que en las diferentes entidades del país los materiales son muy variados y el proceso de fabricación también, sus propiedades mecánicas no serán las mismas; se recomienda realizar ensayos con el fin de contar con la caracterización de las propiedades mecánicas y físicas de las unidades y con la caracterización de las propiedades mecánicas de la mampostería de todas las regiones del país.
- Se recomienda ampliar los ensayos de mampostería confinada con armazones electrosoldadas, con el fin de contar con más información sobre el comportamiento que ésta tiene ante cargas cíclicas reversibles.
- Se recomienda realizar investigaciones con mampostería de bloques huecos de concreto de mayor resistencia, o con refuerzo horizontal, de manera que sea más demandado el acero de refuerzo de los elementos confinantes.

BIBLIOGRAFÍA

Alcocer, S. (1996). Implications Derived from Recent Research in Mexico on Confined Masonry Structures. *Memorias. CCMS Symposium*. Chicago, Estados Unidos: Sociedad Americana de Ingenieros Civiles. pp. 82-92.

Alcocer, S. (1997). Comportamiento Sísmico de Estructuras de Mampostería: Una Revisión. *Memorias. XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. México, pp. 164-191.

Alcocer, S., & Meli, R. (1995). Test Program on the Seismic Behavior of Confined Masonry Structures. *The Masonry Society Journal*, 13 (2): 68-76.

Alcocer, S., Aguilar, G., & Cano, G. (1995). *Determinación de las Propiedades Mecánicas de los Tabiques Extruidos tipo Vintex, Multex y Aremax*, Informe ES/01/95. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México.

Alcocer, S., Arias, J., & Vazquez, A. (2004). Response Assessment of Mexican Confined Masonry Structures Through Shaking Table Tests. *Memorias. 13ª Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, artículo 2130*. Vancouver, Canadá.

Alcocer, S., Cesin, J., Flores, L., Hernandez, O., Meli, R., Tena, A., & Vasconcelos, D. (2003). The New Mexico City Building Code Requirements for Design and Construction of Masonry Structures. *Memorias. 9ª Conferencia Norteamericana de Mampostería*. Estados Unidos, pp. 656-667.

Alcocer, S., & Klingner, R. (1994). Masonry Research in the Americas. En: *Masonry in the Americas*. Estados Unidos: American Concrete Institute, SP 147, pp. 127-169.

Alcocer, S., Meli, R., Sánchez, T., & Flores, L., (1994). Comportamiento Ante Cargas Laterales de Sistemas de Muros de Mampostería Confinada con Diferentes Grados de Acoplamiento a

Flexión. En: *Cuaderno de Investigación No. 17*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Alcocer, S., Sánchez, T., & Meli, R. (1993). *Comportamiento de la Estructura Tridimensional de Mampostería Confinada de Dos Niveles del Cenapred*. Informe ES/01/93. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México.

Alcocer, S., Sánchez, T., Vázquez, R., & Díaz, R. (1994) Comportamiento Ante Cargas Laterales de Sistemas de Muros de Mampostería Confinada con Distintos Tipos de Refuerzo Horizontal. En: *Cuaderno de Investigación No. 17*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Alcocer, S., Zepeda, J., & Ojeda, M. (1997). *Estudio de la Factibilidad Técnica del Uso de Tabique VINTEX y MULTEX para Vivienda Económica*. Informe IEG/01/97. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México.

Alvarez, J., & Alcocer, S. (1994). Influencia del Refuerzo Horizontal y de la Relación de Aspecto en Muros de Mampostería Confinada. *Memorias. IX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, pp. 815-825.

Arias, J. (2005). *Ensayos en Mesa Vibradora de un Modelo a Escala 1:2 de un Edificio de Mampostería Confinada de Tres Niveles*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Arias, J., Alcocer, S., & Vázquez, A. (2004). Respuesta Dinámica de Modelos a Escala 1:2 de Viviendas de Mampostería Confinada de Uno y Tres Pisos Ensayados en Mesa Vibradora. *Memorias. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.

Barragán, R. (2005). *Ensayo de una Vivienda a Escala, de Dos Niveles, de Mampostería Confinada*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Faradji, M. (1999). Aseguramiento de la Calidad de Materiales y Elementos Estructurales. En: *Edificaciones de Mampostería para Vivienda*. México: Fundación ICA, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural y Universidad Autónoma del Estado de México.

Flores, L., & Alcocer, S. (1998). Evaluación experimental del desempeño de muros de bloque hueco de concreto reforzado con malla electrosoldada y recubrimiento de concreto. *Memorias. XI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*. México, pp. 802–811.

Flores, L., Mendoza, J., & Reyes, C. (2004). Ensayo de Muros de Mampostería con y sin Refuerzo Alrededor de la Abertura. *Memorias. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*. México.

Flores, L., Ríos, M., & Reyes, C. (2004). Rehabilitación con Malla y Mortero de Muros de Mampostería con Aberturas. *Memorias. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*. México.

Gallegos, H. (1991a). *Albañilería Estructural*. Fondo Editorial Pontificia Universidad Católica del Perú.

García, I., Flores, L., & Reyes, C. (2004). Estudio Experimental de Muros de Mampostería de Barro Sometidos a Compresión Pura. *Memorias. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. México.

GDF (2004a). *Norma Mexicana. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. México: Gobierno del Distrito Federal. Gaceta Oficial, Enero 29, 63 pp.

- GDF (2004b).** *Norma Mexicana. Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería.* México: Gobierno del Distrito Federal. Gaceta Oficial, Octubre 6, 49 pp.
- GDF (2004c).** *Norma Mexicana. Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo.* México: Gobierno del Distrito Federal. Gaceta Oficial, Octubre 6, 22 pp.
- Hernández, H. (1991).** Materiales y Procedimientos Constructivos en El Salvador. *Memorias. Primer Simposio Internacional sobre Seguridad Sísmica de la Vivienda Económica.* pp. 212-237. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Hernández, O. (1993).** Las Mamposterías y su Refuerzo. *Ingeniería Civil, CICM, No. 294, Octubre.*
- Hernández, O. (1996).** La Mampostería en México. *Ingeniería Civil, CICM, No. 322, Febrero,* pp. 23-30.
- Hernández, O. (1997).** Reflexiones Sobre la Mampostería en México. *Memorias. Curso sobre Edificaciones de Mampostería para Vivienda.* México: Colegio de Ingenieros Civiles de México y Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- Hernández, O. (1998a).** Reflexiones Sobre la Mampostería en México. *Ingeniería Civil, CICM, No. 350, Junio,* pp. 17-28.
- Hernández, O., Camargo, I., Leal, E., & Ruiz, L. (1996).** Resistencia Nominal de Diseño de Mamposterías de Barro en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Puebla. Propuesta de Estandarización de Ensayes. *Memorias. X Congreso Nacional de Ingeniería Estructural.* México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.

Hernández, O., & Guzmán, H. (1987). *Uso de Aceros de Alto Grado de Fluencia para Confinar Muros de Tabique Rojo.* Informe Interno. Laboratorio de Materiales. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

HYLSA (2001). *Ensayos Mecánicos para Control de Calidad de la Producción de Alambrón Grado 23.* Informe Interno 147-2001. No publicado. Laboratorio de Resistencia de Materiales. Hylsa, S.A. Monterrey, N.L., México.

Jean, R. & Cesin, J. (2000). Recomendaciones Para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería. *Memorias. XII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural.* México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.

Madinaveitia, M., & Rodríguez, G. (1970). *Resistencia a Carga Vertical de Muros Fabricados con Materiales Usuales en el Distrito Federal.* Informe No. 261. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

Meli, R. (1979). *Comportamiento Sísmico de Muros de Mampostería. 2ª edición, corregida y aumentada.* Informe No. 352. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. 141 pp.

Meli, R., & Salgado, G. (1969). *Comportamiento de Muros de Mampostería Sujetos a Carga Lateral, Segundo Informe.* Informe No. 237. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

Meli, R., Zeevaert A., & Esteva, L. (1968). *Comportamiento de Muros de Mampostería Hueca Ante Carga Lateral Alternada.* Informe No. 156. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

Miranda, E. (1999). Comportamiento Mecánico de la Mampostería No Reforzada. En: *Edificaciones de Mampostería para Vivienda*. México: Fundación ICA, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural y Universidad Autónoma del Estado de México.

ONNCCE (1997b). *Norma Mexicana NMX-C-083-ONNCCE. Industria de la construcción - Concreto – Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto. Métodos de Prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 11 pp.

ONNCCE (1999). *Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE. Industria de la Construcción – Cementos Hidráulicos – Especificaciones y Métodos de Prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 20 pp.

ONNCCE (2001b). *Norma Mexicana NMX-C-407-ONNCCE. Industria de la construcción – Varilla Corrugada de Acero Proveniente de Lingote o Palanquilla para Refuerzo de Concreto – Especificaciones y Métodos de Prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 14 pp.

ONNCCE (2002a). *Proyecto de Norma Mexicana para la Determinación de la Resistencia a la Compresión y del Módulo de Elasticidad de Pilas de Mampostería de Barro y de Concreto*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C.

ONNCCE (2002b). *Proyecto de Norma Mexicana para la Determinación de la Resistencia a la Compresión Diagonal y la Rigidez a Cortante de Muretes de Mampostería de Barro y de Concreto*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C.

ONNCCE (2005). *Norma Mexicana NMX-C-404-ONNCCE. Industria de la construcción - Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural - Especificaciones y métodos de*

prueba. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 11 pp.

Park, R., & Paulay, T. (1994). *Estructuras de Concreto Reforzado*. México: Editorial Limusa, S.A., pp. 13-50.

Paulay, T., & Priestley, M.J.N. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. Nueva York, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.

Rodríguez, M., & Botero, J. (1996). *Aspectos del Comportamiento Sísmico de Estructuras de Concreto Reforzado Considerando las Propiedades Mecánicas de Aceros de Refuerzo Producidos en México*. Series del Instituto de Ingeniería, No. 575. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ruiz, J., Sánchez, T., & Miranda, E. (1999). Observaciones Sobre el Comportamiento y Diseño de Edificaciones de Mampostería en Zonas Sísmicas. En: *Edificaciones de Mampostería para Vivienda*. México: Fundación ICA, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural y Universidad Autónoma del Estado de México.

San Bartolomé, A. (1994). *Construcciones de Albañilería. Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural*. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

SECOFI (1971). *Norma Mexicana NMX-B-309. Nomenclatura para Términos Usados en los Métodos de Prueba Mecánicos*. México: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Dirección General de Normas.

SECOFI (1974). *Norma Mexicana NMX-C-038. Industria de la Construcción – Determinación de las Dimensiones de Bloques, Ladrillos o Tabiques, y Tabicones*. México: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Dirección General de Normas.

SECOFI (1986b). *Norma Mexicana NMX-B-072. Alambre Corrugado de Acero, Laminado en Frío para Refuerzo de Concreto.* México: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Dirección General de Normas., 11 pp.

SECOFI (1988a). *Norma Mexicana NMX-B-172. Métodos de Prueba Mecánicos para Productos de Acero.* México: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Dirección General de Normas.

SECOFI (1988b). *Norma Mexicana NMX-B-253. Alambre Liso de Acero Estirado en Frío para Refuerzo de Concreto.* México: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Dirección General de Normas., 9 pp.

Tomazevic, M. & Weiss, P. (1994). Seismic Behavior of Plain and Reinforced-Masonry Buildings. *Journal of Structural Engineering, Vol. 120*, pp. 323-338

Tomazevic, M. (1996). Recent Advances in Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings: European Prospective. *Memorias. 11ª Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, artículo 2012.* Acapulco, México.

Tomazevic, M. (1999). *Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings*, Londres, Inglaterra. Imperial College Press.

Tomazevic, M., & Velechovsky, T. (1992). Some Aspects of Testing Small-Scale Masonry Building Models on Earthquake Simulators. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 21, Marzo*, pp. 945-963

Tomazevic, M., Bosiljkov, V., & Weiss, P. (2004). Structural Behavior Factor for Masonry Structures. *Memorias. 13ª Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, artículo 2642.* Vancouver, Canadá.

Tomazevic, M., Klemenc, I., Petkovic, L., & Lutman, M. (1996a). *Seismic Behavior of Confined Masonry Buildings, part one.* Ljubljana, Eslovenia: National Building and Civil Engineering Institute.

Tomazevic, M., Klemenc, I., Petkovic, L., & Lutman, M. (1996b). *Seismic Behavior of Confined Masonry Buildings, part two.* Ljubljana, Eslovenia: National Building and Civil Engineering Institute.

Tomazevic, M., Lutman, M., & Petkovic, L. (1996). Seismic Behavior of Masonry Walls: Experimental Simulation. *Journal of Structural Engineering, Vol 122, No.9, Septiembre*, pp. 1040-1047

Treviño, E. (2007). *Caracterización Experimental del Comportamiento de Muros de Mampostería Confinada de Bloques de Concreto Sometidos a Cargas Laterales Cíclicas Reversibles.* Tesis de Doctorado. Universidad Central “Marta Abreau” de las Villas. Santa Clara, Cuba.

Vázquez, A. (2005). *Estudio Experimental de Viviendas de Mampostería Confinada de un Piso Mediante el Ensaye en Mesa Vibradora.* Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Wallace, M., Klingner, R., & Schuller, M. (1998). What TCCMAR Taught Us. *Masonry Construction, Vol 11, No.10, Octubre*, pp. 523-529.

Zárate, J. (2008). *Estudio del Comportamiento de Muros de Mampostería Confinada de Bloques de Concreto Sometidos a Cargas Laterales Cíclicas Reversibles: Caracterización de la Respuesta y Modelación Analítica.* Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolás de los Garza, Nuevo León.

Zuhua, L. (1987). *Stress and Bond Behavior of Beam and Column Longitudinal Bars Inside the Joint, A Calculation Report.* Informe Interno. Universidad de Texas en Austin. Estados Unidos. Junio.

Zúñiga, O. (2005). *Evaluación Estadística de la Respuesta Sísmica de la Edificación de Mampostería.* Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Azcapotzalco, Estado de México.

APÉNDICE

Tabla 2.9: Resultados de ensayos a tensión de varillas corrugadas, de grado 42.

VARILLA CORRUGADA GRADO 42, DIÁMETRO 9.5 mm					
Consecutivo	Probeta	f_y (Kg/cm²)	ϵ_y	f_{max} (Kg/cm²)	Alargamiento en 200 mm (%)
1	42-421-1	4930	0.0025	7710	16.1
2	42-421-2	4361	0.0023	7162	14.0
3	42-421-3	4110	0.0022	6637	12.5
4	42-421-4	4410	0.0023	7060	14.0
5	42-421-5	4850	0.0024	7650	14.7
6	42-422-1	4339	0.0023	7344	15.0
7	42-422-2	4830	0.0025	7610	15.9
8	42-422-3	4680	0.0024	6980	11.5
9	42-422-4	4950	0.0025	7740	15.2
10	42-422-5	4300	0.0022	7390	14.0
11	42-423-1	4089	0.0021	6924	13.0
12	42-423-2	4670	0.0024	6777	11.0
13	42-423-3	4451	0.0024	7020	15.0
14	42-423-4	4739	0.0025	6961	11.5
15	42-423-5	4100	0.0022	6592	12.5
16	42-424-1	4339	0.0023	7387	16.0
17	42-424-2	4900	0.0025	7690	14.5
18	42-424-3	4590	0.0023	7042	13.0
19	42-424-4	4330	0.0022	7323	13.0
20	42-424-5	4950	0.0025	7740	13.7
Promedio		4546	0.0024	7237	13.8
C.V.		0.065	0.057	0.052	0.111

Nota: 1 MPa = 10.19 kgf/cm²

Tabla 2.10: Resultados de ensayos a tensión de alambión Liso, de grado 23.

ALAMBION LISO GRADO 23, DIÁMETRO 6.3 mm					
Consecutivo	Probeta	fy (Kg/cm²)	ε_y	fmax (Kg/cm²)	Alargamiento en 200 mm (%)
1	23-421-1	2707	0.0014	4775	22.4
2	23-421-2	2712	0.0015	4800	21.3
3	23-421-3	2645	0.0015	4827	21.7
4	23-421-4	2844	0.0014	4813	20.8
5	23-421-5	2838	0.0013	4819	22.1
6	23-421-6	2549	0.0014	4792	22.6
7	23-422-1	2809	0.0014	4785	21.8
8	23-422-2	2423	0.0015	4733	23.0
9	23-422-3	3677	0.0016	6242	20.4
10	23-422-4	3451	0.0015	6076	22.0
11	23-422-5	3677	0.0014	6222	23.3
12	23-422-6	2340	0.0015	3894	23.8
13	23-423-1	2228	0.0016	3783	23.9
14	23-423-2	2153	0.0013	3852	23.6
15	23-423-3	2015	0.0014	3852	24.4
16	23-423-4	2317	0.0015	3862	23.8
17	23-423-5	2258	0.0015	3906	24.2
18	23-423-6	2257	0.0012	3994	25.1
19	23-423-7	2965	0.0015	5094	21.7
20	23-423-8	2218	0.0014	3933	24.6
21	23-423-9	2340	0.0015	4091	24.5
22	23-424-1	2385	0.0015	4035	24.6
23	23-424-2	2323	0.0014	4019	25.0
24	23-424-3	2214	0.0013	4055	23.7
25	23-424-4	2356	0.0014	4042	24.0
26	23-424-5	2310	0.0015	4133	23.1
27	23-424-6	2316	0.0015	4077	21.5
28	23-424-7	2276	0.0015	4145	22.9
29	23-424-8	2255	0.0014	4055	22.8
30	23-424-9	2388	0.0014	3994	20.6
Promedio		2542	0.0014	4457	23.0
C.V.		0.168	0.070	0.158	0.058

Nota: 1 MPa = 10.19 kgf/cm²

Tabla 2.11: Resultados de ensayos a tensión de varillas corrugadas laminadas en frío, de grado 60.

VARILLA CORRUGADA LAMINADA EN FRÍO GRADO 60, DIÁMETRO 6 mm					
Consecutivo	Probeta	fy (Kg/cm²)	ε_y	fmax (Kg/cm²)	Alargamiento en 10 diam (%)
1	60-601-1	7090	0.0060	7160	8.7
2	60-601-2	7060	0.0052	7930	8.6
3	60-601-3	7810	0.0068	8850	8.5
4	60-601-4	7690	0.0054	8410	*
5	60-601-5	6420	0.0062	7210	8.0
6	60-601-6	6649	0.0060	6975	6.9
7	60-602-1	7540	0.0060	8100	9.0
8	60-602-2	7280	0.0055	7300	8.3
9	60-602-3	7550	0.0060	8010	8.1
10	60-602-4	7219	0.0054	7290	8.0
11	60-602-5	7280	0.0042	8550	8.5
12	60-602-6	7990	0.0057	8710	10.6
13	60-603-1	7115	0.0054	7183	7.5
14	60-603-2	7880	0.0072	8850	6.4
15	60-603-3	7550	0.0058	7920	8.6
16	60-603-4	7920	0.0059	8660	8.0
17	60-603-5	7240	0.0058	7280	7.9
18	60-603-6	7460	0.0069	8170	7.8
19	60-604-1	8030	0.0072	8980	8.5
20	60-604-2	7043	0.0057	7110	7.1
21	60-604-3	7090	0.0063	7960	9.2
22	60-604-4	7134	0.0055	7495	7.6
23	60-604-5	7610	0.0055	8380	8.9
24	60-604-6	8004	0.0059	8080	8.4
Promedio		7402	0.0059	7940	8.2
C.V.		0.057	0.113	0.081	0.089

Nota: 1 MPa = 10.19 kgf/cm²

Tabla 2.12: Resultados de ensayos a tensión de alambre liso trefilado en frío, de grado 50.

ALAMBRE LISO TREFILADO EN FRIO GRADO 50, DIÁMETRO 4.1 mm					
Consecutivo	Probeta	fy (Kg/cm²)	ε_y	fmax (Kg/cm²)	Alargamiento en 10 diam (%)
1	50-601-1	7110	0.0055	7320	4.9
2	50-601-2	7330	0.0065	7430	6.0
3	50-601-3	7350	0.0037	7450	5.8
4	50-602-1	7366	0.0053	7587	6.4
5	50-602-2	6932	0.0060	7209	5.3
6	50-602-3	6814	0.0050	7223	6.9
7	50-603-1	7126	0.0044	7269	7.1
8	50-603-2	7046	0.0042	7680	7.9
9	50-604-1	5361	0.0048	6004	6.6
10	50-604-2	6734	0.0056	7407	6.2
Promedio		6917	0.0051	7258	6.3
C.V.		0.085	0.167	0.064	0.139

Nota: 1 MPa = 10.19 kgf/cm²

CURRÍCULUM VITAE

Nombre: Ing. Leticia Gallegos Montalvo.

Lugar y fecha de nacimiento: 23 de Junio de 1977, en Cd. Victoria, Tamaulipas.

Sexo: Femenino. **Estado civil:** Casada.

Licenciatura: Ingeniería Civil, con especialidad en construcción, en el Instituto Tecnológico de Cd. Victoria, en Cd. Victoria, Tamps. (1994-1999).

Posgrado: Maestría en Ciencias, con especialidad en estructuras, en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, en San Nicolás de los Garza, N.L. (2001-2003), Título en trámite.

Asistencia a Seminarios: Seminario Regional de Edificaciones de Mampostería (Octubre, 2003), en Centro Cultural Universitario Morelia, en Morelia, Michoacán.

Tercer Simposio Nacional de Edificaciones de Mampostería y Vivienda, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C. (Febrero, 2004), en Puebla, Puebla.

Exposición impartida en Seminario: “Estudio Experimental de Muros de Mampostería Confinada de Bloques de Concreto: Caracterización de la Respuesta”. Seminario de Investigación, Semana de Ingeniería Civil (Mayo, 2007), en Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, en San Nicolás de los Garza, Nuevo León.

Experiencia Laboral: Cálculo y/o realización de planos estructurales de edificios de 1 a 3 niveles, en algunos municipios del estado de Tamaulipas, en acero y concreto tales como: Capillas del Recuerdo: Edificio de concreto de 800m² ubicado en San Fernando, Tamaulipas. Edificio de concreto de 1500m² ubicado en Blvd. José López Portillo, Cd. Victoria, Tamps. Refuerzo de Edificio de 3 niveles para SNTE de 2000m², ubicado en la Col. Del Maestro, Cd. Victoria, Tamps. Bodega de concreto de 3 niveles de 500m², ubicada en Prolongación Carrera

Torres, Cd. Victoria, Tamps. Bodega de concreto y acero de 1000m², ubicada en Libramiento de Tránsito Pesado Lic. Emilio Portes Gil, Cd. Victoria, Tamps. Edificios de acero de 7000m² para Centro de Especialidades para el Magisterio de Cd. Victoria, Tamps.

Revisión y refuerzo estructural de edificios de 1 y 2 niveles, tales como casas habitación, locales comerciales, oficinas, entre otras.

Ing. Leticia Gallegos Montalvo.

Teléfonos:

Oficina: 01(834)3167224

Celular: 045(834)1440192

Correo electrónico: leticiagallegosm@hotmail.com

