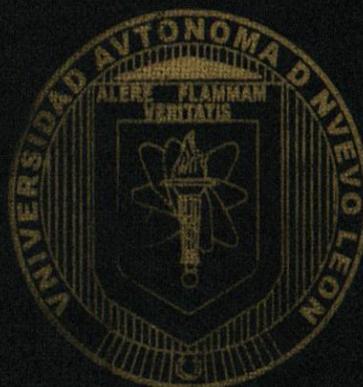


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Facultad de Ingeniería Civil



**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE MUROS DE
MAMPOSTERÍA CONFINADA DE BLOQUES DE CONCRETO SOMETIDOS
A CARGAS LATERALES CÍCLICAS REVERSIBLES. CARACTERIZACIÓN DE
LA RESPUESTA Y MODELACIÓN ANALÍTICA**

TESIS QUE PRESENTA

José María Zárate Caballero

**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

Z3

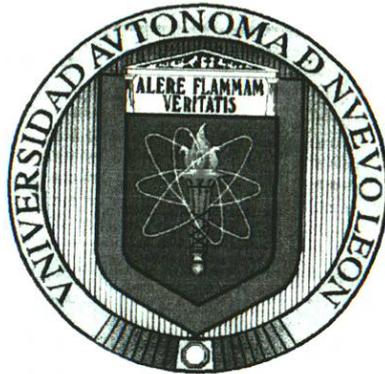
2008

c.1



1090020074

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Civil



T
TA440
23
2008
C-1

*ESTUDIO EXPERIMENTAL 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

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

PRESENTA EL

Ing. José María Zárate Caballero

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 el **Ing. José María Zárate Caballero**, 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. Caracterización de la Respuesta y Modelación Analítica”**

En tal virtud, puede atenderse la solicitud de examen de grado del Ing. Zárate, 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. José María Zárate Caballero



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Por este conducto se **APRUEBA** la tesis “**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA DE BLOQUES DE CONCRETO SOMETIDOS A CARGAS LATERALES CÍCLICAS REVERSIBLES. CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA Y MODELACIÓN ANALÍTICA**” que presenta el Ing. **José María Zarate Caballero**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Estructural, lo anterior después de haber leído, evaluado y constatado los cambios sugeridos de la tesis.

Se extiende la presente para los fines que al interesado convengan.

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

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ
Subdirector de Estudios de Posgrado e 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. CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA Y MODELACIÓN ANALÍTICA" que presenta el Ing. **José María Zarate Caballero**, 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 GONZALEZ ALCORTA
Jefe del Departamento de Estructuras
Evaluador de Tesis de Maestría



UANL



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA
DE BLOQUES DE CONCRETO SOMETIDOS A CARGAS LATERALES
CÍCLICAS REVERSIBLES. CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA Y
MODELACIÓN ANALÍTICA”**

Aprobación de la Tesis:

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ
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





UANL



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

COMPROBANTE DE CORRECCIÓN

Tesista: JOSÉ MARÍA ZÁRATE CABALLERO

Tema de la tesis: ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA DE BLOQUES DE CONCRETO SOMETIDOS A CARGAS LATERALES CÍCLICAS REVERSIBLES: CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA Y MODELACIÓN ANALÍTICA.

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 8 de SEPTIEMBRE de 2008



ING. LÁZARO VARGAS GUERRA

Director del Departamento de Escolar y de Archivo
UANL

PRESENTE.-

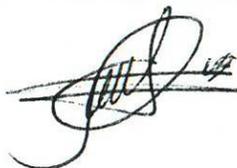
Por este conducto me permito comunicarle que el Ing. José María Zárate Caballero, pasante de la **Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Estructural**, ha solicitado su examen de grado, para lo cual ha cubierto con la totalidad de los requisitos académicos y administrativos que exige el 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

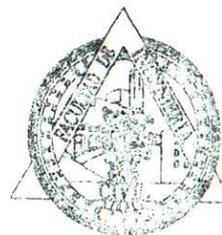
"ALERE FLAMMAM VERITATIS"

Cd. Universitaria a 24 de Noviembre del 2008



Dr. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación



SUB DIRECCIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

C.c.p. Archivo.



RESUMEN

José María Zárate Caballero

Fecha de graduación: julio 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: CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA Y MODELACIÓN ANALÍTICA.*

Número de páginas: 101

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Estructural.

Area de Estudio: Ingeniería Estructural.

Propósito y Método del Estudio: La mampostería confinada es uno de los sistemas constructivos más utilizados en el mundo. El estudio de su comportamiento ante cargas cíclicas es de vital importancia, ya que permite predecir su respuesta ante este tipo de solicitaciones. En este estudio se caracterizaron las respuestas asociadas al comportamiento cíclico y la incursión en el rango inelástico de los muros de mampostería confinada, de bloques huecos de concreto. Se utilizaron como refuerzo para los elementos confinantes, en 4 especímenes, varillas grado 42, con estribos de alambón liso de grado 28, y en otros 4 especímenes, armazones electrosoldadas. También se estudió el efecto de concentrar los estribos en las esquinas de los elementos confinantes. Además, se calibró un modelo analítico para reproducir de manera teórica las respuestas obtenidas experimentalmente.

Contribuciones y conclusiones: después de analizar los resultados se puede concluir que no existen diferencias significativas en el comportamiento de la mampostería confinada de bloques huecos de concreto, sujeta a cargas laterales cíclicas reversibles, reforzando los elementos confinantes con el sistema tradicional o utilizando armazones electrosoldadas. Asimismo, se pudo concluir que no existen diferencias significativas en las respuestas al concentrar estribos en las esquinas de los elementos confinantes. Por último, se encontró que el modelo analítico calibrado reproduce adecuadamente las respuestas obtenidas del experimento.

FIRMA DEL ASESOR: _____

Ing. José María Zárate Caballero



CONTENIDO

CONTENIDO	vi
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Definición de mampostería.	
1.2 Importancia de la mampostería.	
1.3 Características de las estructuras de mampostería.	
1.4 Justificación.	
1.5 Objetivos.	
1.6 Estructura de la tesis.	
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES.	6
2.1 Ensayo experimental de referencia.	
2.1.1 Diseño del experimento.	
2.1.2 Propiedades de los materiales.	
2.1.3 Características de los especímenes.	
2.1.4 Procedimiento de prueba de los especímenes.	
2.1.5 Evolución del daño.	
2.1.6 Comportamiento histerético observado.	
2.1.7 Comportamiento del acero de refuerzo.	
2.2 Modelos analíticos de referencia.	
2.2.1 Modelo de Meli.	
2.2.2 Modelo de Astroza, Moroni y Navarrete.	
2.2.3 Modelo de Flores.	
2.2.4 Modelo de Tomazevic y Lutman.	
2.2.5 Modelo de Ruiz y Miranda.	
CAPÍTULO III. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	47
3.1 Respuestas histeréticas.	
3.1.1 Resistencia.	
3.1.2 Rigidez.	
3.1.3 Disipación de energía.	
3.1.4 Ductilidad.	
3.1.5 Procesamiento estadístico.	
3.2 Modelación Analítica.	
3.2.1 Justificación de la modelación analítica.	
3.2.2 Modelo analítico seleccionado.	
3.2.3 Envolvente global.	



- 3.2.4 Comparación de la respuesta analítica con la experimental.
- 3.2.5 Validación estadística.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSION ----- 61

- 4.1 Respuestas histeréticas.
 - 4.1.1 Resistencia.
 - 4.1.2 Rigidez.
 - 4.1.3 Disipación de energía.
 - 4.1.4 Ductilidad.
 - 4.1.5 Procesamiento estadístico.

- 4.2 Modelación Analítica.
 - 4.2.1 Envolvente global.
 - 4.2.2 Comparación de respuesta analítica con experimental.
 - 4.2.3 Validación estadística.

CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES ----- 94

BIBLIOGRAFÍA ----- 98

**LISTA DE FIGURAS.****Capítulo II**

- Figura F2.1: Armado de los muros: 421, 422, 423 y 424.*
- Figura F2.2: Armado de los muros: 601, 602, 603 y 604.*
- Figura F2.3: Historia nominal de cargas y de distorsiones.*
- Figura F2.4: Historia real de cargas aplicadas en los muros: 421, 422, 423 y 424.*
- Figura F2.5: Historia real de cargas aplicadas en los muros: 601, 602, 603 y 604.*
- Figura F2.6: Historia real de distorsiones aplicadas en los muros: 421, 422, 423 y 424.*
- Figura F2.7: Historia real de distorsiones aplicadas en los muros: 601, 602, 603 y 604.*
- Figura F2.8: Evolución del deterioro en el espécimen 421.*
- Figura F2.9: Evolución del deterioro en el espécimen 423.*
- Figura F2.10: Evolución del deterioro en el espécimen 601.*
- Figura F2.11: Evolución del deterioro en el espécimen 603.*
- Figura F2.12: Curvas histeréticas carga lateral-distorsión. Muros: 421, 422, 423 y 424.*
- Figura F2.13: Curvas histeréticas carga lateral-distorsión. Muros: 601, 602, 603 y 604.*
- Figura F2.14: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 422.*
- Figura F2.15: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 602.*
- Figura F2.16: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 424.*
- Figura F2.17: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 604.*
- Figura F2.18: Modelo trilineal para cargas monótonas en los muros de mampostería (Meli, 1979).*
- Figura F2.19: Modelo trilineal para cargas cíclicas en los muros de mampostería (Meli, 1979).*
- Figura F2.20: Modelo histerético para los muros de mampostería confinada (Bazán, 1980 adaptado de Meli, 1979).*
- Figura F2.21: Modelo histerético para los muros de mampostería confinada (Astroza, Moroni y Navarrete, 1991).*
- Figura F2.22: Envolvente trilineal con degradación de resistencia (Flores, 1995).*



Figura F2.23: Envoltentes normalizadas y rigideces ascendentes y descendentes de semiciclos positivos y negativos de muros de mampostería confinada (Flores, 1995).

Figura F2.24: Ajuste de rigideces ascendentes y descendentes de semiciclos positivos y negativos de los muros de mampostería confinada (Flores, 1995).

Figura F2.25: Envoltente trilineal (Tomazevic y Lutman, 1996).

Figura F2.26: Definición de las reglas de comportamiento histerético (Tomazavic y Lutman, 1996).

Figura F2.27: Modelo de los tres parámetros (Park, Reinhorn y Kunnath, 1987) y valores propuestos para muros de mampostería (Ruiz y Miranda, 2003).

Capítulo III

Figura F3.1: Cálculo del amortiguamiento viscoso equivalente (Alcocer, Zepeda y Ojeda, 1997).

Figura F3.2: Criterios para el cálculo de la capacidad de deformación (Park, 1989).

Figura F3.3: Envoltente global propuesta.

Capítulo IV

Figura F4.1: Envoltentes de respuesta histerética carga lateral-distorsión.

Figura F4.2: Degradación de la rigidez de ciclo.

Figura F4.3: Degradación de la rigidez equivalente.

Figura F4.4: Energía disipada acumulada.

Figura F4.5: Energía disipada equivalente.

Figura F4.6: Comparativas de amortiguamiento viscoso equivalente.

Figura F4.7: Superposición de envoltentes experimentales con la propuesta.

Figura F4.8: Ajuste de las rigideces experimentales de las ramas ascendentes y descendentes.

Figura F4.9: Comparación de las curvas histeréticas experimentales y calculadas con el



modelo analítico. Muros: 421, 422, 423 y 424.

Figura F4.10: Comparación de las curvas histeréticas experimentales y calculadas con el modelo analítico. Muros: 601, 602, 603 y 604.

Figura F4.11: Comparación de historias de carga experimentales y calculadas con el modelo analítico. Muros: 421, 422, 423 y 424.

Figura F4.12: Comparación de historias de carga experimentales y calculadas con el modelo analítico. Muros: 601, 602, 603 y 604.

Figura F4.13: Comparación de degradación de rigidez de ciclo experimental y calculada con el modelo analítico. Muros: 421, 422, 423 y 424.

Figura F4.14: Comparación de la degradación de rigidez de ciclo experimental y calculada con el modelo analítico. Muros: 601, 602, 603 y 604.

Figura F4.15: Comparación de la energía disipada acumulada experimental y calculada con el modelo analítico. Muros: 421, 422, 423 y 424.

Figura F4.16: Comparación de la energía disipada acumulada experimental y calculada con el modelo analítico. Muros: 601, 602, 603 y 604.

LISTA DE TABLAS.

Capítulo II

Tabla T2.1: Resumen de los resultados de ensayos monótonos a tensión del acero de refuerzo.

Tabla T2.2: Resumen de los resultados de los ensayos en mampostería, concreto y mortero.

Tabla T2.3: Características del primer agrietamiento.

Tabla T2.3: Valores propuestos para los parámetros que definen los modelos histeréticos Trilineales, a partir de resultados experimentales. (Bazán, 1980, adaptado de Meli, 1979).

Tabla T2.4: Coeficientes del modelo de Flores, para muros de mampostería confinada (Flores, 1995).

**Capítulo IV**

- Tabla T4.1: Características de la respuesta.*
- Tabla T4.2: Degradación de la resistencia en ramas positivas y negativas.*
- Tabla T4.3: Comparación de la rigidez experimental del primer ciclo con rigidez elástica teórica.*
- Tabla T4.4: Rigidez secante de las envolventes, al primer agrietamiento.*
- Tabla T4.5: Degradación de la rigidez equivalente.*
- Tabla T4.6: Energía disipada acumulada.*
- Tabla T4.7: Energía disipada equivalente.*
- Tabla T4.8: Amortiguamiento viscoso equivalente.*
- Tabla T4.9: Capacidad de deformación. Rama positiva.*
- Tabla T4.10: Capacidad de deformación. Rama negativa.*
- Tabla T4.11: Resumen de las variables de respuesta experimentales.*
- Tabla T4.12: Resultados del procesamiento estadístico de las respuestas experimentales en el factor X1: tipo de armado longitudinal.*
- Tabla T4.13: Resultados del procesamiento estadístico de las respuestas experimentales en el factor X2: distribución de cercos o estribos.*
- Tabla T4.16: Coeficiente de la determinación múltiple del modelo analítico.*
- Tabla T4.17: Comparación de respuestas experimentales y predichas analíticamente.*



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN.

1.1 Definición de mampostería.

Se le llama mampostería a una agrupación de piezas de origen pétreo, naturales o artificiales, unidas con un mortero como aglutinante. En la actualidad, el elemento estructural preponderante en una vivienda es el muro, elaborado con piezas artificiales prismáticas, utilizándose en las siguientes modalidades:

- a) **mampostería simple**; sin ningún tipo de refuerzo.
- b) **mampostería confinada**; el confinamiento se hace con elementos pequeños de concreto reforzado, generalmente del ancho del muro, los cuales rodean tableros sensiblemente cuadrados.
- c) **mampostería reforzada interiormente**; el refuerzo se distribuye uniformemente en la dirección horizontal colocándolo dentro de las celdas de las piezas; y en la dirección vertical, colocándolo dentro de las boquillas.

1.2 Importancia de la mampostería

La mampostería ha sido utilizada por la humanidad desde tiempos prehistóricos, para formar refugios, ya que las rocas, que son la base de este sistema, se encuentran en casi cualquier lugar y su uso se ha ido desarrollando y perfeccionando a lo largo de los años hasta llegar a nuestros tiempos.

En la actualidad, la mampostería es uno de los materiales más usados en el mundo; pues se usa en toda clase de edificaciones, principalmente en las viviendas unifamiliares y multifamiliares, e



incluso en suntuosas residencias. Además, las edificaciones hechas con mampostería resultan económicas, ya que los muros sirven tanto para dividir los espacios, como para resistir las fuerzas horizontales y verticales a las que estará sujeta la estructura.

El estudio de estas estructuras es de gran relevancia ya que la estabilidad y seguridad de una gran cantidad de edificaciones depende del comportamiento de este importante sistema constructivo.

1.3 Características de las estructuras de mampostería.

Las estructuras de mampostería son generalmente muy rígidas y frágiles, por ello resultan especialmente sensibles a los sismos. Se ha verificado experimentalmente, sin embargo, que con refuerzo interior y el confinamiento adecuado, este tipo de estructuras es capaz de soportar deformaciones importantes con un nivel aceptable de daño.

La mampostería se usa tanto como elemento principal de transmisión de cargas verticales y horizontales como para divisiones; de igual manera se usa como diafragma para aumentar la resistencia ante fuerzas horizontales, tanto en edificios estructurados con marcos rígidos de concreto armado o acero estructural.

En general, en una edificación unifamiliar o multifamiliar, debido al proyecto arquitectónico, se tiene una concentración de muros suficiente, que proporciona una buena capacidad del conjunto para resistir las fuerzas, tanto horizontales como verticales; por lo tanto, bien aplicado, es un sistema adecuado para el tipo de edificaciones antes mencionadas.

1.4 Justificación.

La mampostería es un sistema que se ha investigado ampliamente en el mundo, pero aún existen muchas variables a considerar que no han sido suficientemente estudiadas, y por ello es importante continuar la experimentación sobre este tema, ya que la mampostería está constantemente sujeta a sollicitaciones de carácter cíclico y/o estático, por tales razones es



importante poder predecir su comportamiento, en la medida de lo posible bajo dichas sollicitaciones.

Siendo específico, no se ha estudiado el comportamiento de la mampostería de bloques huecos de concreto, confinada con pequeños elementos de concreto armado reforzados con armazones electro-soldadas, (armadas con alambres longitudinales grado 60 y estribos de alambre liso de grado 50) en zonas susceptibles a fuerzas sísmicas.

Cabe mencionar que se ha estudiado el comportamiento de mampostería confinada reforzada con armazones electro soldadas utilizando acero de alta resistencia de grado 50, pero utilizando tabique recocido, además, aplicando solamente cargas laterales, no verticales (*Hernández y Guzmán, 1987; Hernández, 1991*), recalcando así que no se han estudiado las condiciones mencionadas en el párrafo anterior.

Otra variable importante a considerar, es el nivel de eficiencia que se tiene al concentrar estribos en las esquinas de los elementos confinantes, en tableros de bloques huecos de concreto, ya que no se tiene información específica del beneficio que produce esta práctica, aunque se acepta, en general, que el efecto es favorable.

Este trabajo es la segunda fase de un proyecto de investigación experimental desarrollado en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León referente al comportamiento de la mampostería confinada de bloques huecos de concreto ante cargas laterales cíclicas reversibles. (*Treviño, 2007*).

La primera fase de la investigación (*Gallegos, 2008*), trata el comportamiento general de los especímenes. En dicha etapa se probaron ocho especímenes en total, divididos en dos grupos de cuatro muros cada uno, a escala 1 a 1, cuadrados de 2.5m de lado. Los elementos confinantes del primer grupo fueron reforzados longitudinalmente con acero de grado 42, y transversalmente con acero de grado 23. Los del segundo grupo fueron reforzados longitudinalmente con acero de



grado 60, y transversalmente con acero de grado 50. En el capítulo II de esta tesis se especifica detalladamente la configuración de dicho refuerzo.

En esta primera fase se obtuvieron las respuestas asociadas con el comportamiento general de los especímenes como son:

- a) El comportamiento histerético.
- b) La evolución del daño.
- c) La expansión.
- d) La curvatura.
- e) La deformación angular.

Además de los puntos antes mencionados, se estudió también el comportamiento del acero de refuerzo.

Por lo antes mencionado, resulta evidente que es necesario llevar a cabo la caracterización de las respuestas que están asociadas con el comportamiento cíclico del sistema.

1.5 Objetivos.

En la presente tesis, se utilizaron los resultados obtenidos en la primera fase de la investigación, caracterizando la respuesta ante cargas laterales cíclicas reversibles de mampostería confinada, con bloques huecos de concreto. Dentro de esta caracterización se revisaron los parámetros siguientes.

- La resistencia.
- La energía disipada acumulada.
- La energía disipada equivalente.
- La rigidez de ciclo.
- La rigidez equivalente.



- La degradación de la resistencia.
- La degradación de la rigidez.
- El amortiguamiento viscoso.
- La capacidad de deformación ó ductilidad.

Los parámetros antes referidos son indicadores de la degradación de la estructura después de haber estado sujeta a sollicitaciones cíclicas y la incursión del sistema en el rango inelástico. Se realizó una evaluación estadística, para conocer la incidencia del acero de refuerzo y la concentración de los estribos en las respuestas antes mencionadas.

Se calibró también un modelo analítico existente (*Flores, 1995*), con la finalidad de reproducir el comportamiento de los especímenes ensayados.

También se realizó una evaluación estadística que permite comprobar el nivel de confianza de los resultados obtenidos en la modelación analítica.

1.6 Estructura de la tesis

En esta tesis se presenta un resumen general de la misma, luego, el capítulo I denominado introducción. En el capítulo II se explican los antecedentes que generaron el desarrollo de este trabajo; en el capítulo III se explica la metodología para la evaluación de las respuestas; en el capítulo IV se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología descrita en el capítulo III y, finalmente, se presentan las conclusiones generales.



CAPÍTULO II

ANTECEDENTES.

2.1 Ensayo experimental de referencia.

Como ya se ha mencionado, este trabajo es la segunda fase de un proyecto experimental que estudia el comportamiento de la mampostería confinada de bloques huecos de concreto, sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles (*Gallegos, 2008*), realizado en el Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León. En este capítulo se describirá el desarrollo de la primera fase de esta investigación.

Esta recopilación tiene la finalidad de sentar las bases para el desarrollo de una segunda fase del trabajo y dar un panorama general de los resultados obtenidos en la primera fase.

2.1.1 Diseño del experimento.

Para contar con validez estadística en el planteamiento de trabajo, se diseñó un experimento en plan factorial, para dos variables, en dos niveles, replicándose completo. Las dos variables o factores experimentales —de carácter cualitativo— consideradas, son: 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.

Al factor “X1” se le consideró en dos niveles, también de carácter cualitativo: a) un armado de tipo “tradicional” (-1) con varillas corrugadas de acero laminadas en caliente, de grado 42, con una área mínima, según la normatividad vigente, y b) un armado de tipo “electro-soldado” (+1) con varillas de acero laminadas en frío, de grado 60, de diámetro igual al del producto que se comercializa actualmente en el mercado mexicano. Por lo que respecta al factor “X2”, los dos niveles cualitativos seleccionados son: a) unos cercos o estribos uniformemente repartidos (-1) en

toda la altura de los castillos confinantes; y b) unos cercos concentrados (+1), en las regiones próximas a las esquinas, dentro de una longitud no menor que tres veces la dimensión del castillo.

2.1.2 Propiedades de los materiales.

Mampostería.- Las piezas de la mampostería procedieron de un lote seleccionado aleatoriamente, proveniente de uno de los fabricantes de mayor calidad en la ciudad de Monterrey, Nuevo León, México. 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. De los ensayos de las piezas; que se realizaron a una edad de 30 días y a la temperatura ambiente del laboratorio, se obtuvieron los siguientes resultados:

El cociente Área neta/Área bruta fue de 0.55. La resistencia media $\overline{f_p}$ obtenida, fue de 93.23 kg/cm² (9.14Mpa), con un coeficiente de variación c_p de 9.8%. El esfuerzo de diseño f_p^* , resultó de 74.93 kg/cm² (7.35Mpa). Por otra parte, si se toma el valor mínimo de 0.20 para el coeficiente de variación, estipulado en las referidas normas (*ONNCCE, 2005*) (*GDF, 2004*), para tomar en cuenta la dispersión de esta propiedad en obra, el esfuerzo de diseño f_p^* resultó ser de 62.15 kg/cm² (6.1Mpa).

La resistencia y el módulo de elasticidad de la mampostería a la compresión, se determinaron mediante el ensayo de 9 pilas, sujetas a una carga monotónica. La media $\overline{f_m}$ obtenida fue de 53.47 kg/cm² (5.24Mpa), con un coeficiente de variación c_m de 15.4%. El esfuerzo de diseño f_m^* resultó de 38.61 kg/cm² (3.79Mpa), tomando la resistencia media y el coeficiente de variación obtenidos de los ensayos. El módulo de elasticidad promedio E_m , resultó de 40 333 kg/cm² (3955Mpa), con un coeficiente de variación de 27.4%.



La resistencia a la tensión diagonal y el módulo de elasticidad al cortante o módulo de rigidez, se determinaron mediante la prueba de nueve “muretes”, sometidos a una carga de compresión, aplicada monotónicamente, a lo largo de una de sus diagonales.

La resistencia media $\overline{v_m}$ obtenida fue de 4.31 kg/cm^2 (0.42 Mpa), con un coeficiente de variación c_v de 18.1%. El esfuerzo de diseño v_m^* , calculado según la Norma para Diseño de Estructuras de Mampostería (GDF, 2004), 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). Ahora bien, si se toma el valor mínimo de 0.20 estipulado (GDF, 2004) para el coeficiente de variación, el cual toma en cuenta la dispersión de esta propiedad en obra, el esfuerzo de diseño resultó ser de 2.87 kg/cm^2 (0.28 Mpa). El módulo de rigidez promedio, G_m , resultó de $19\,782 \text{ kg/cm}^2$ (1940 Mpa), con un coeficiente de variación de 24.3%.

Concreto y mortero. El concreto para el colado de los elementos confinantes fue elaborado en el laboratorio del Instituto de Ingeniería Civil, con una dosificación por peso, para una resistencia nominal f'_c de 200 kg/cm^2 (19.6 Mpa). La resistencia media a la compresión $\overline{f_c}$ a los 28 días, obtenida de los ensayos de una serie de tres cilindros de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, por cada muro, fue de 235 kg/cm^2 (23.0 Mpa), con un coeficiente de variación de 3.3%.

El mortero para unir las piezas fue del tipo I, también elaborado en el laboratorio, utilizando cemento Pórtland tipo CPC-30R. La relación volumétrica cemento: arena fue de 1:3, sin especificar la cantidad de agua para fabricarlo; sin embargo, el agua añadida a cada revoltura sí fue medida, habiendo resultado un promedio de 27 litros por cada bulto de 50 kg de cemento. La resistencia media a la compresión $\overline{f_j}$ obtenida de los ensayos de dos series de tres cubos de 5 cm de arista, por cada muro, fue de 231 kg/cm^2 (22.7 Mpa), con un coeficiente de variación del 3.1%.

Acero de refuerzo. El comportamiento del acero de refuerzo ante cargas monótonas se determinó mediante ensayos a tensión; que se aplicaron a probetas de 60 cm de longitud, obtenidas de un muestreo aleatorio, que fue efectuado durante la construcción de los modelos. En total, se

extrajeron 50 probetas, de los muros: 421, 422, 423 y 424; y 34 probetas, de los muros: 601, 602, 603 y 604.

Debido a las limitaciones del equipo disponible y de los instrumentos de medición para realizar ensayos cíclicos al acero de refuerzo, sólo fue posible determinar experimentalmente: a) el punto de fluencia para los aceros laminados en caliente, de los grados 23 y 42; b) el esfuerzo de fluencia aparente, o resistencia de fluencia, para los aceros de los grados 50 y 60; c) las deformaciones unitarias asociadas con los esfuerzos anteriores; d) el esfuerzo máximo resistido por las probetas; y e) el alargamiento a la ruptura en la longitud calibrada, estipulada en la normatividad correspondiente. Un resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de los materiales se muestra en las tablas T2.1 y T2.2

Tabla T2.1: Resumen de resultados de ensayos monótonos a tensión del acero de refuerzo.

PROPIEDADES DESIGNACION	f_y	ϵ_y	f_{max}	ALARGAMIENTO	
	[Kg/cm ²]	[%]	[Kg/cm ²]	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

Tabla T2.2: Resumen de resultados de ensayos mampostería, concreto y mortero.

Propiedad	valor	Propiedad	Valor
\bar{f}_p	93.23 kg/cm ² (9.14Mpa)	\bar{v}_m	4.31 kg/cm ² (0.42Mpa)
f_p^*	74.93 kg/cm ² (7.35Mpa)	v_m^*	2.96 kg/cm ² (0.29Mpa)
\bar{f}_m	53.47 kg/cm ² (5.24Mpa)	Gm	19 782 kg/cm ² (1940Mpa)
f_m^*	38.61 kg/cm ² (3.79Mpa)	\bar{f}_c	235 kg/cm ² (23.0Mpa)
E_m	40 333 kg/cm ² (3955Mpa)	\bar{f}_j	231 kg/cm ² (22.7Mpa)

2.1.3 Características de los especímenes.

Se fabricaron 8 especímenes en escala 1 a 1, cuyas dimensiones generales nominales fueron: 2.50 m de ancho, por 2.45 m de altura, por 15 cm de espesor. La altura de los especímenes se fijó de acuerdo con el valor típico de altura libre de entrepiso, en edificaciones de vivienda multifamiliar.

Las piezas que se utilizaron fueron de tres celdas, con dimensiones nominales de 40, por 15, por 20 cm. Las dimensiones de las dalas y los castillos confinantes fue de 15 por 15 cm, y fueron colados directamente contra la mampostería.

El armado de las dalas y los castillos para los especímenes reforzados con acero convencional, consistió en armazones habilitadas en el laboratorio, con cuatro varillas corrugadas en dirección longitudinal, de grado 42 ($f_y = 4\,200\text{ kg/cm}^2$, 412Mpa), de 9.5 mm (3/8") de diámetro; y estribos o cercos de alambón liso, de grado 23 ($f_y = 2\,300\text{ kg/cm}^2$, 229Mpa), de 6.3 mm (1/4") de diámetro, espaciados a cada 200 mm, para el caso de distribución uniforme. Estos modelos se marcaron como muros 421 y 422. Para el caso de distribución concentrada, se intercalaron estribos adicionales en los extremos de los castillos, de tal forma que quedaran estribos a cada 100 mm, en una longitud de 600 mm, a partir de las esquinas de los tableros. Estos modelos se nombraron como muros 423 y 424.

Para el caso de los especímenes reforzados con aceros laminados en frío, el armado consistió en armazones electrosoldadas prefabricadas, formadas por cuatro varillas corrugadas, en dirección longitudinal, de grado 60 ($f_y = 6\,000\text{ kg/cm}^2$, 588Mpa), de 6.0 mm de diámetro; y estribos o cercos de alambre liso, de grado 50 ($f_y = 5\,000\text{ kg/cm}^2$, 490Mpa), de 4.1 mm (calibre 8) de diámetro, espaciados a cada 158 mm, para el caso de distribución uniforme. Estos especímenes se identificaron con los números 601 y 602. Para el caso de distribución concentrada, se intercalaron estribos adicionales en los extremos de los castillos, de tal forma que quedaran estribos a cada 79 mm, en una longitud de 474 mm, a partir de las esquinas de los tableros. En este caso, los estribos adicionales se habilitaron y colocaron en el laboratorio, y fueron de alambre corrugado de grado

60, de 3.97 mm (5/32") de diámetro. Estos últimos modelos se nombraron como 603 y 604. En las figuras F2.1 y F2.2, se muestra cómo se armaron los especímenes.

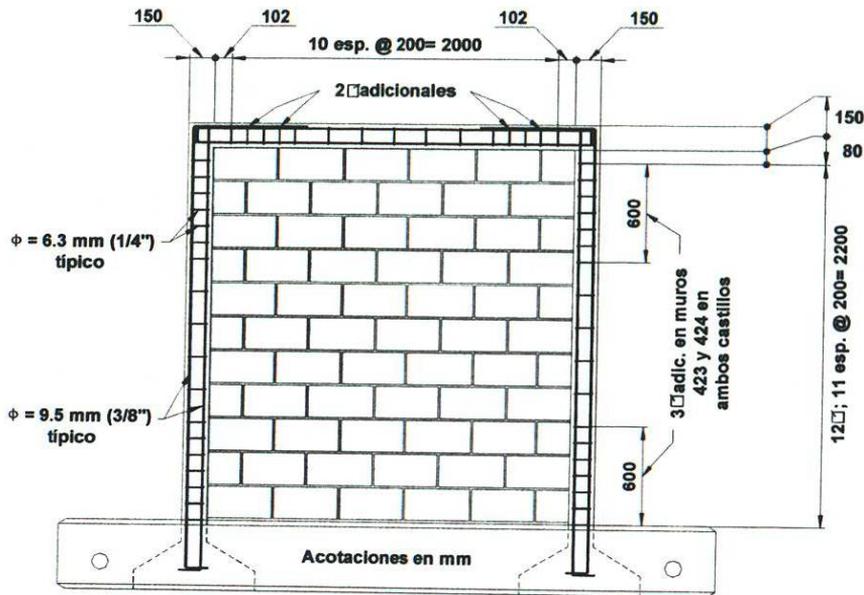


Figura F2.1: Armado de los muros: 421, 422, 423 y 424.

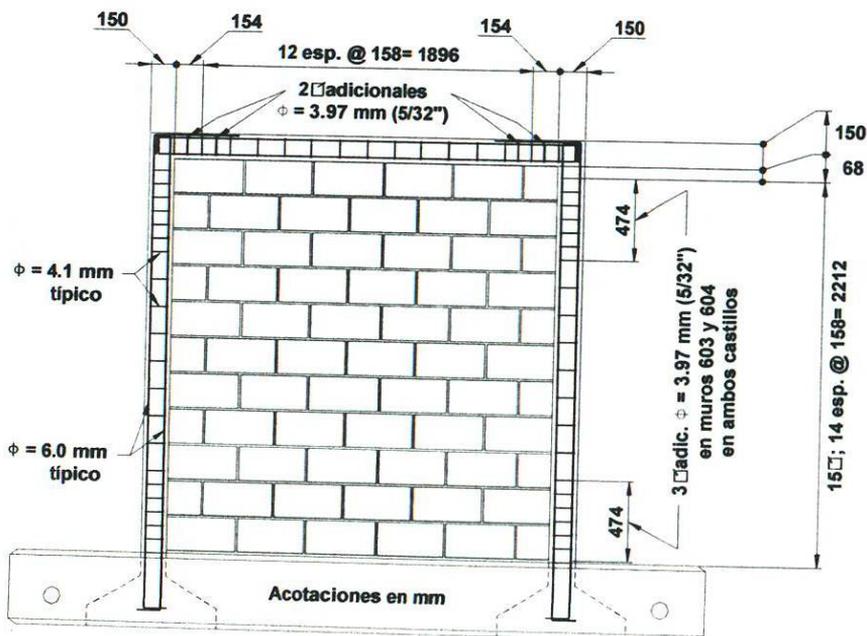


Figura F2.2: Armado de los muros: 601, 602, 603 y 604.

2.1.4 Procedimiento de prueba.

Se realizaron ensayos destructivos, llevando a los especímenes hasta el agotamiento de su capacidad de carga. Para su ensayo, los muros se colocaron en la losa de reacción, orientándolos en la dirección oriente-poniente. Las sollicitaciones verticales se simularon mediante una carga que fue aplicada monotónicamente, en cuatro etapas iguales, hasta alcanzar un máximo de 20 t, que indujeron en el muro un esfuerzo promedio de 5.5 kg/cm^2 , el cual se mantuvo constante durante toda la prueba. Este nivel de esfuerzo corresponde aproximadamente al que se tiene en los muros de planta baja, de una edificación típica de vivienda de cuatro a cinco niveles.

Una vez alcanzado el nivel de esfuerzo vertical de 5.5 kg/cm^2 (0.539 Mpa), los modelos se sometieron a la acción de cargas laterales cíclicas reversibles, de modo cuasi-estático. El control de las pruebas se dividió en dos etapas. La primera etapa fue controlada por carga, y la segunda etapa fue controlada por distorsión. Los semiciclos se consideraron positivos cuando el gato del lado oriente empujaba. Para poder comparar los resultados de los especímenes se trató de aplicar la misma historia de cargas y distorsiones a los ocho. En la figura F2.3 se muestra la historia nominal de las cargas y las distorsiones.

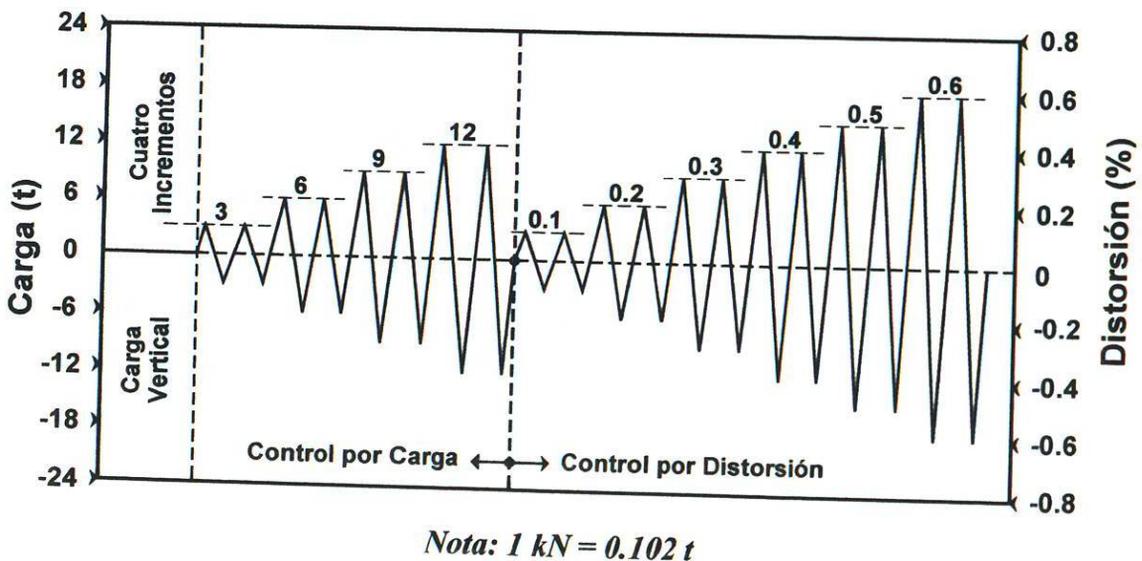


Figura F2.3: Historia nominal de cargas y de distorsiones.



Como se puede observar, en la primera etapa se aplicaron pares de ciclos, correspondientes aproximadamente a incrementos sucesivos del 25% de la carga de agrietamiento estimada. Esta primera etapa —controlada por carga—, terminó cuando se registró el primer agrietamiento inclinado o al alcanzar una distorsión del 0.1%. La segunda etapa inició a partir de ese momento. Inmediatamente después se aplicó otro ciclo de igual distorsión.

Después de lo mencionado en el párrafo anterior, se aplicaron pares de ciclos a distorsiones crecientes, con incrementos sucesivos de 0.1%. La prueba se suspendió después de que el espécimen sufrió una degradación de resistencia, con respecto a la máxima alcanzada durante el ensayo: del 20% al menos.

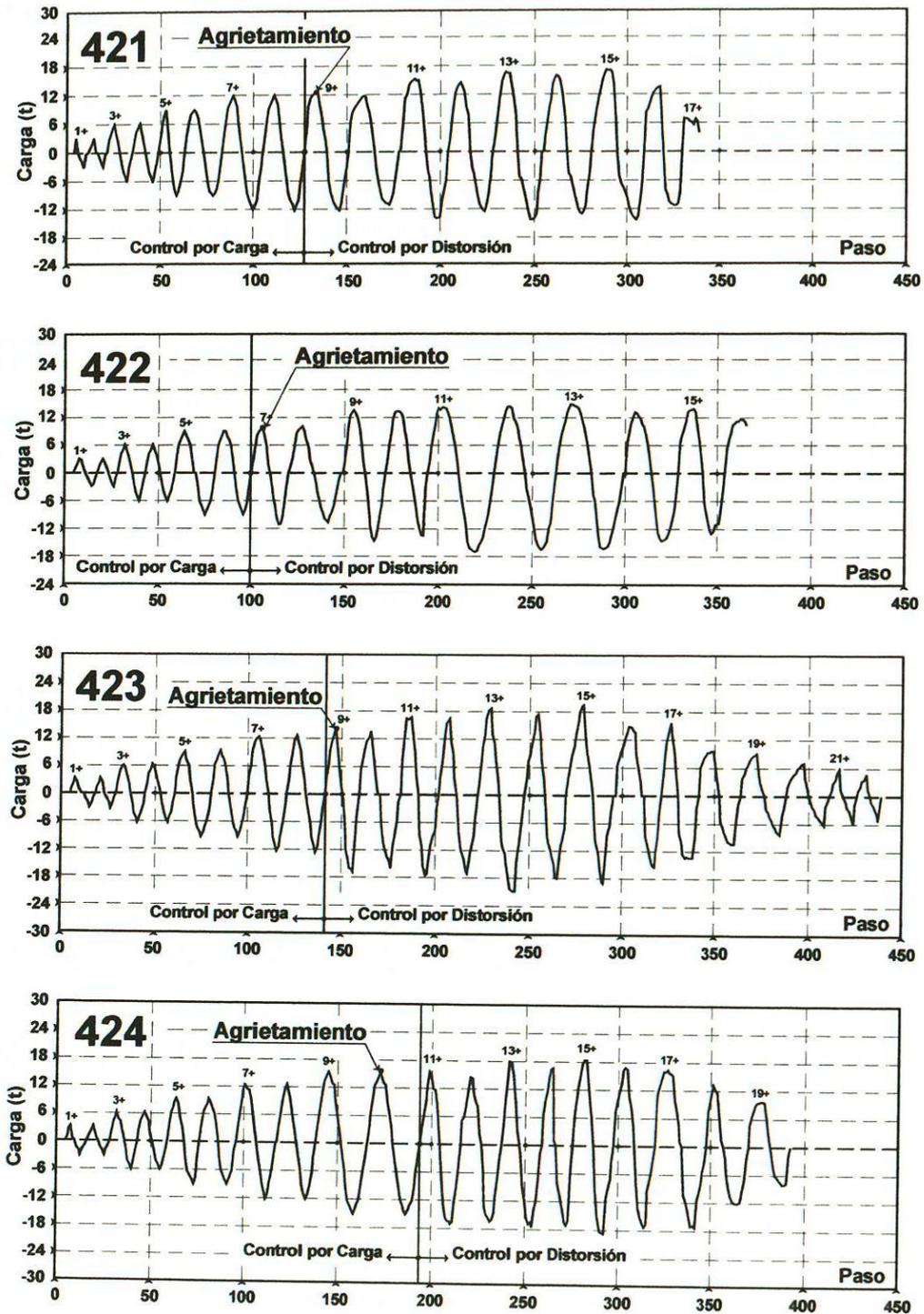
En las figuras F2.4 a F2.7 se presentan las historias de carga y de distorsión de los 8 especímenes ensayados.

2.1.5 Evolución del daño.

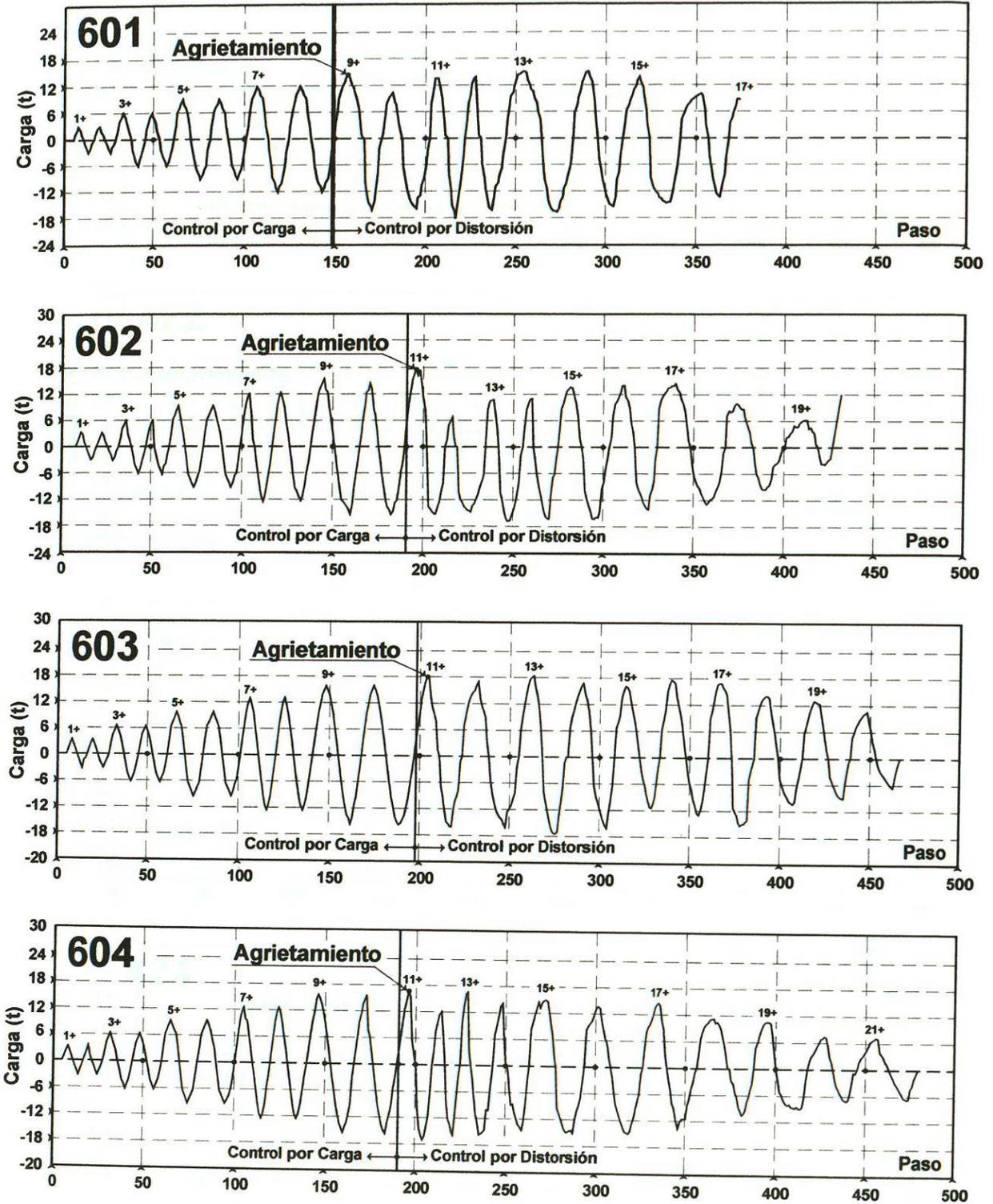
En general, el daño que sufrieron todos los especímenes a lo largo de la prueba fue similar. A continuación se resumirán los acontecimientos importantes que caracterizaron el deterioro de las muestras.

En todos los muros se manifestó un patrón de daño en forma de cruz (X), claramente definido por dos grietas, a lo largo de las diagonales del tablero, con una inclinación de 45°, aproximadamente.

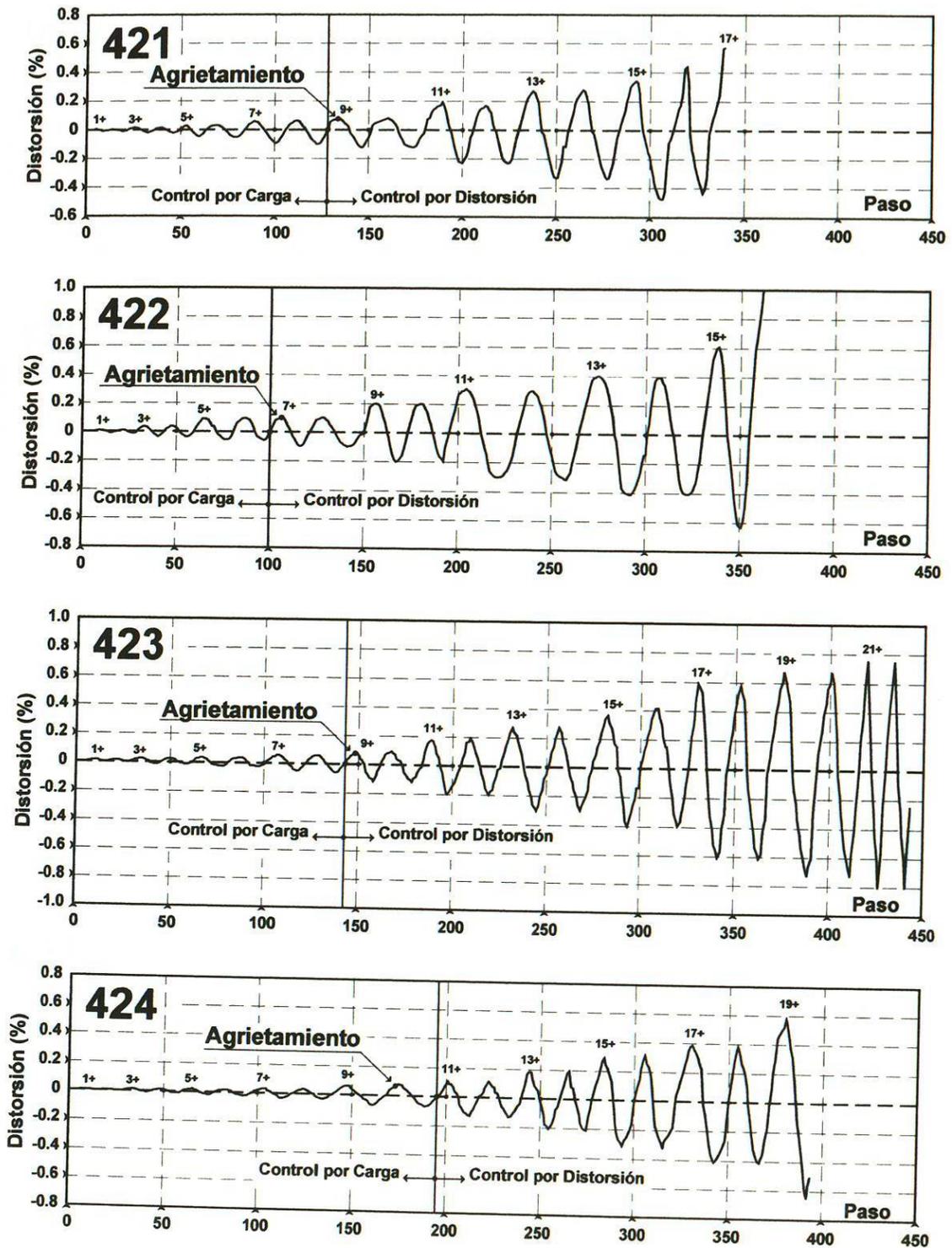
La distribución del agrietamiento fue muy parecida en ambos lados de los especímenes. Antes del agrietamiento inclinado se presentaron pequeñas fisuras horizontales por flexión en los castillos, principalmente en el tercio inferior de su altura.



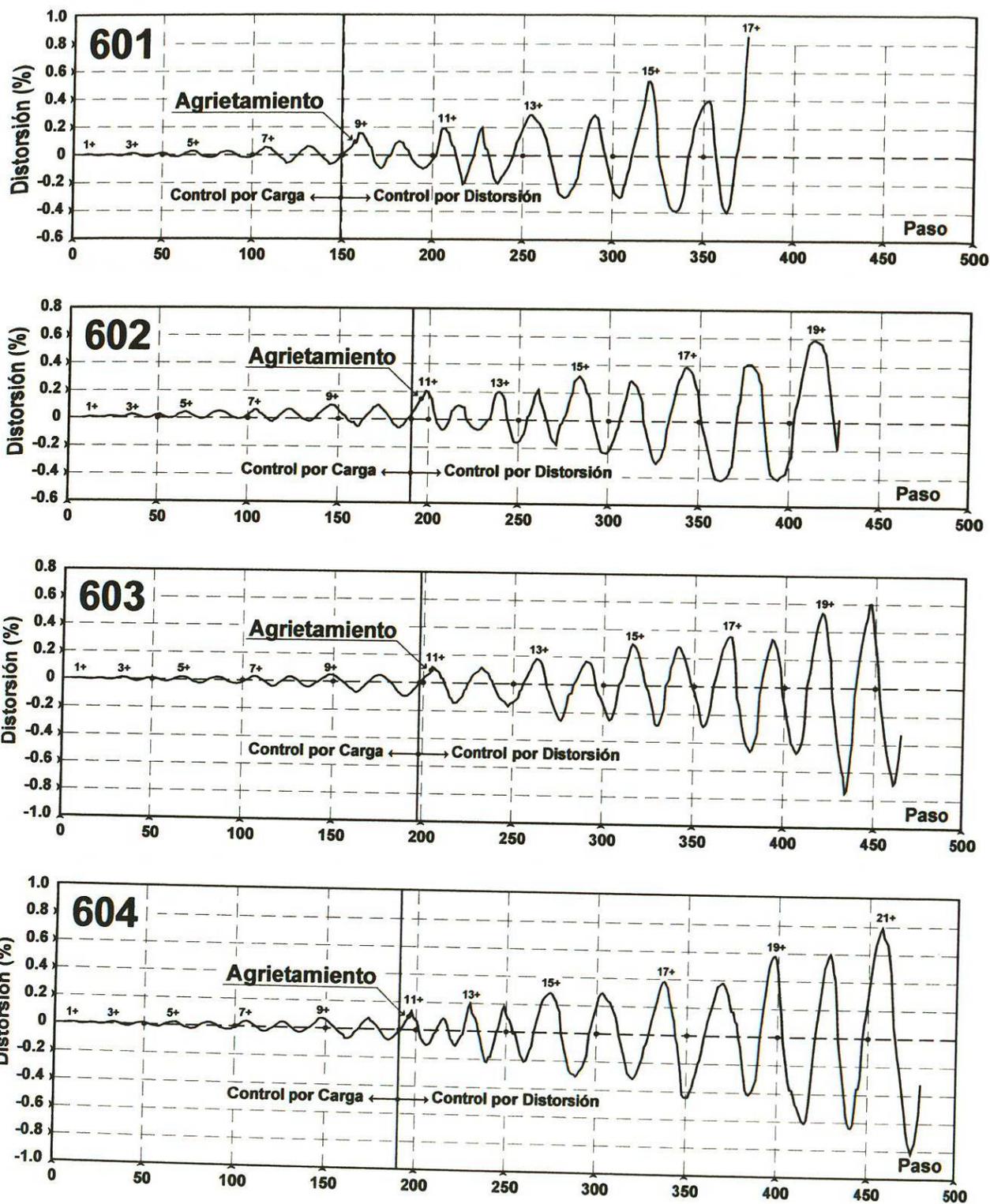
*Figura F2.4: Historia real de cargas aplicadas.
Muros: 421, 422, 423 y 424.*



*Figura F2.5: Historia real de cargas aplicadas.
Muros: 601, 602, 603 y 604.*



*Figura F2.6: Historia real de distorsiones aplicadas.
Muros: 421, 422, 423 y 424.*



*Figura F2.7: Historia real de distorsiones aplicadas.
Muros: 601, 602, 603 y 604.*



El primer agrietamiento inclinado ocurrió, en todos los muros, a una distorsión cercana al 0.1%, y se produjo en forma escalonada, a lo largo de las juntas de mortero de pega de las piezas. En la tabla T2.3, se presentan los ciclos en los que ocurrió el primer agrietamiento inclinado, en ambas direcciones de carga, la magnitud de la fuerza y esfuerzo cortante correspondientes, así como la distorsión asociada.

El daño en los ciclos posteriores a los primeros agrietamientos inclinados, hasta la aplicación del ciclo al 0.4% de distorsión y su repetición, se caracterizó por:

- a) La acentuación y el aumento progresivo de la longitud, la cantidad y la anchura de las grietas, a lo largo de las juntas de mortero.
- b) La penetración incipiente de algunas grietas a través de las piezas, fracturando levemente las paredes de las mismas.
- c) La aparición de nuevas grietas horizontales por flexión en los castillos, a lo largo de las tres cuartas partes inferiores de su altura.
- d) La formación completa del patrón en forma de cruz (X), a distorsiones próximas al 0.2%, y la aparición de nuevas grietas en las juntas y atravesando las piezas, principalmente dentro de los sectores triangulares oriente y poniente.
- e) El aplastamiento y desprendimiento de la paredes de las piezas, en áreas relativamente pequeñas, lo cual comenzó después de alcanzar la resistencia, en sitios localizados principalmente a lo largo de las diagonales del tablero. Esto sucedió a distorsiones cercanas al 0.3%.
- f) El crecimiento paulatino de las áreas de aplastamiento y desprendimiento de las paredes de las piezas, que ocurrió en los ocho especímenes, durante el par de ciclos a distorsión de 0.4%; acompañado por degradaciones de resistencia superiores al 20% y

g) La penetración incipiente de las grietas diagonales, en algunas esquinas de los castillos.

Tabla T2.3: 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 las figuras F2.8 a F2.11 se muestran, como ejemplo, los dibujos esquemáticos de la evolución del daño de los muros 421, 423, 601 y 603.

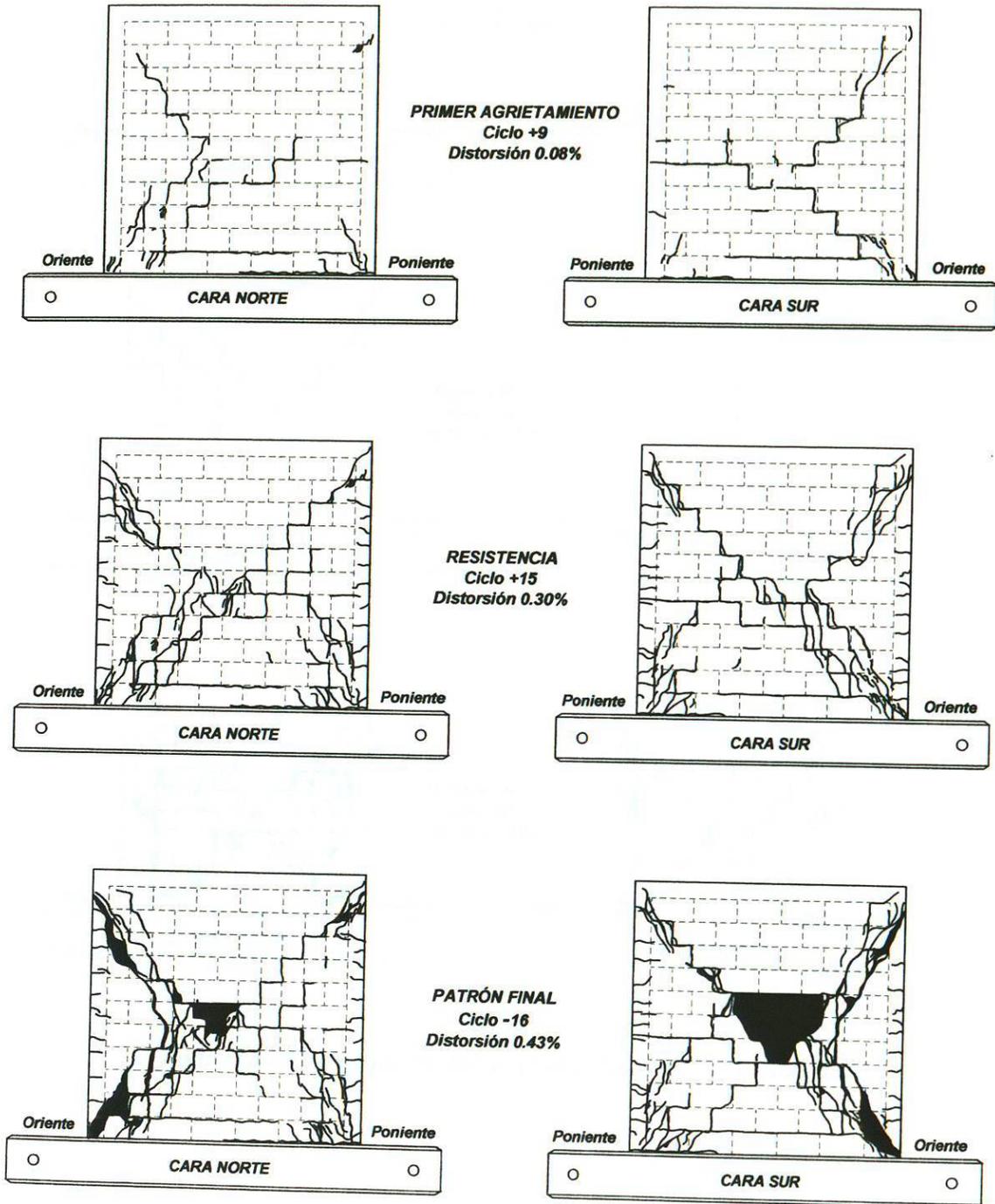


Figura F2.8: Evolución del deterioro en el espécimen 421.

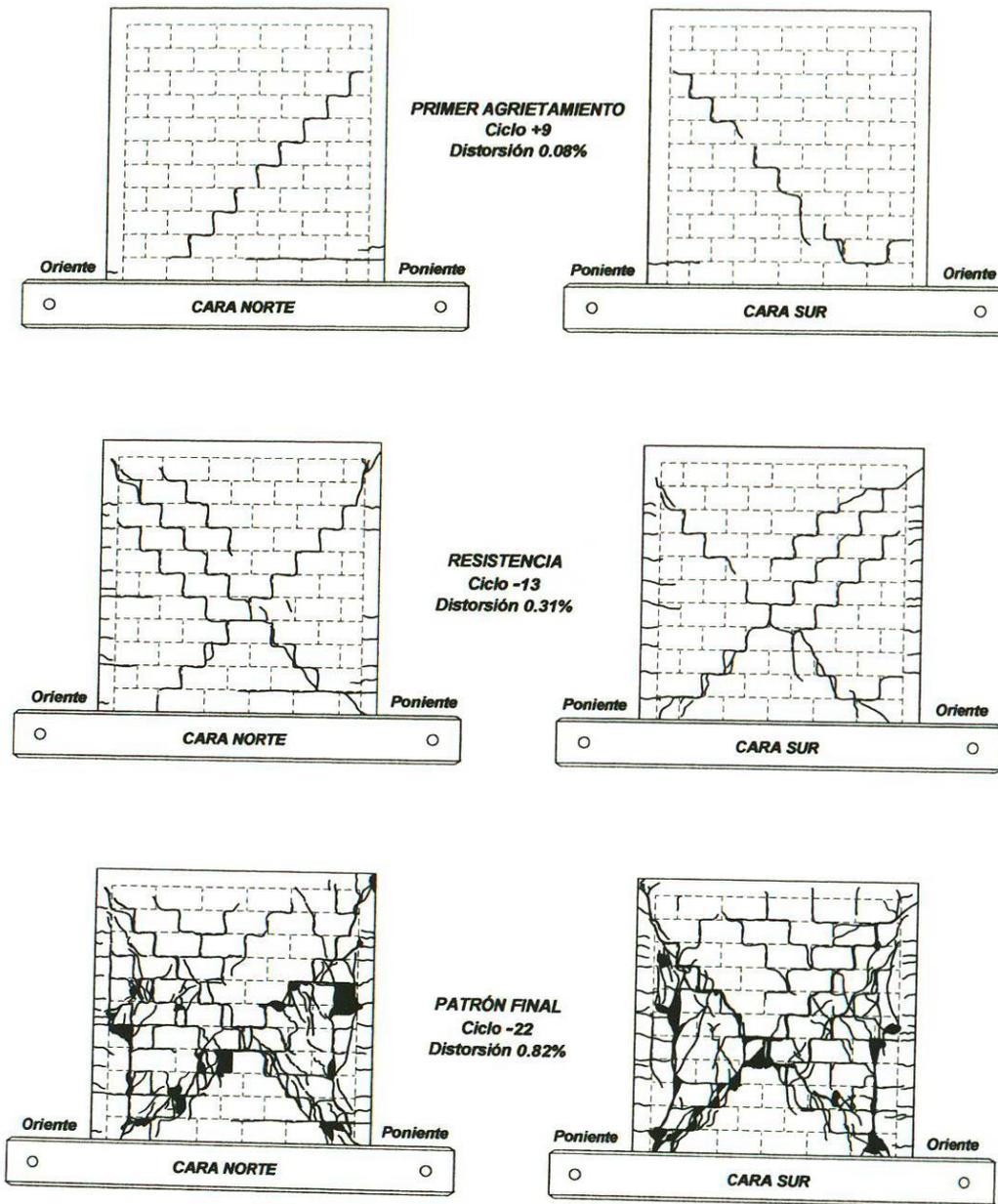


Figura F2.9: Evolución del deterioro en el espécimen 423.

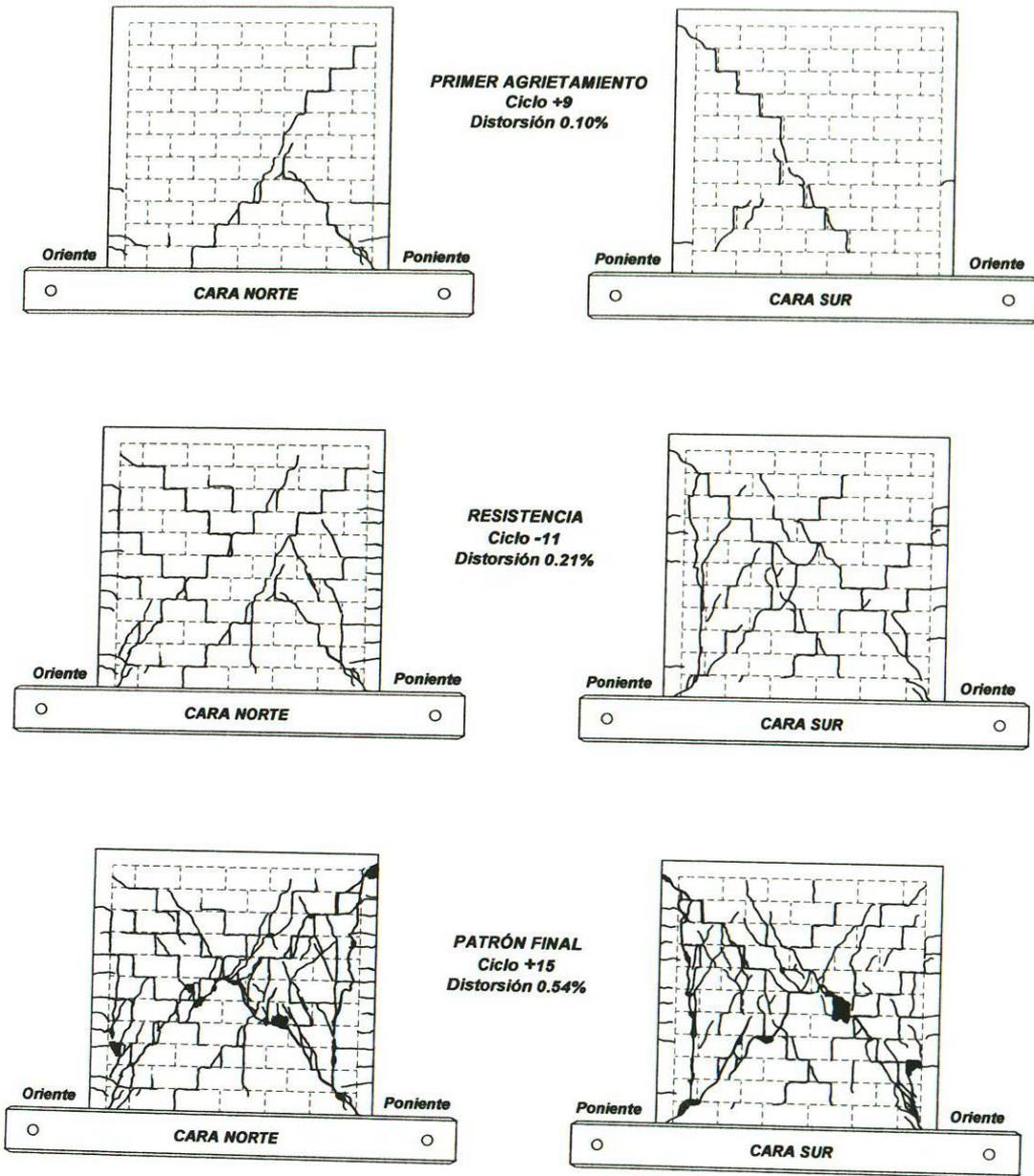


Figura F2.10: Evolución del deterioro en el espécimen 601.

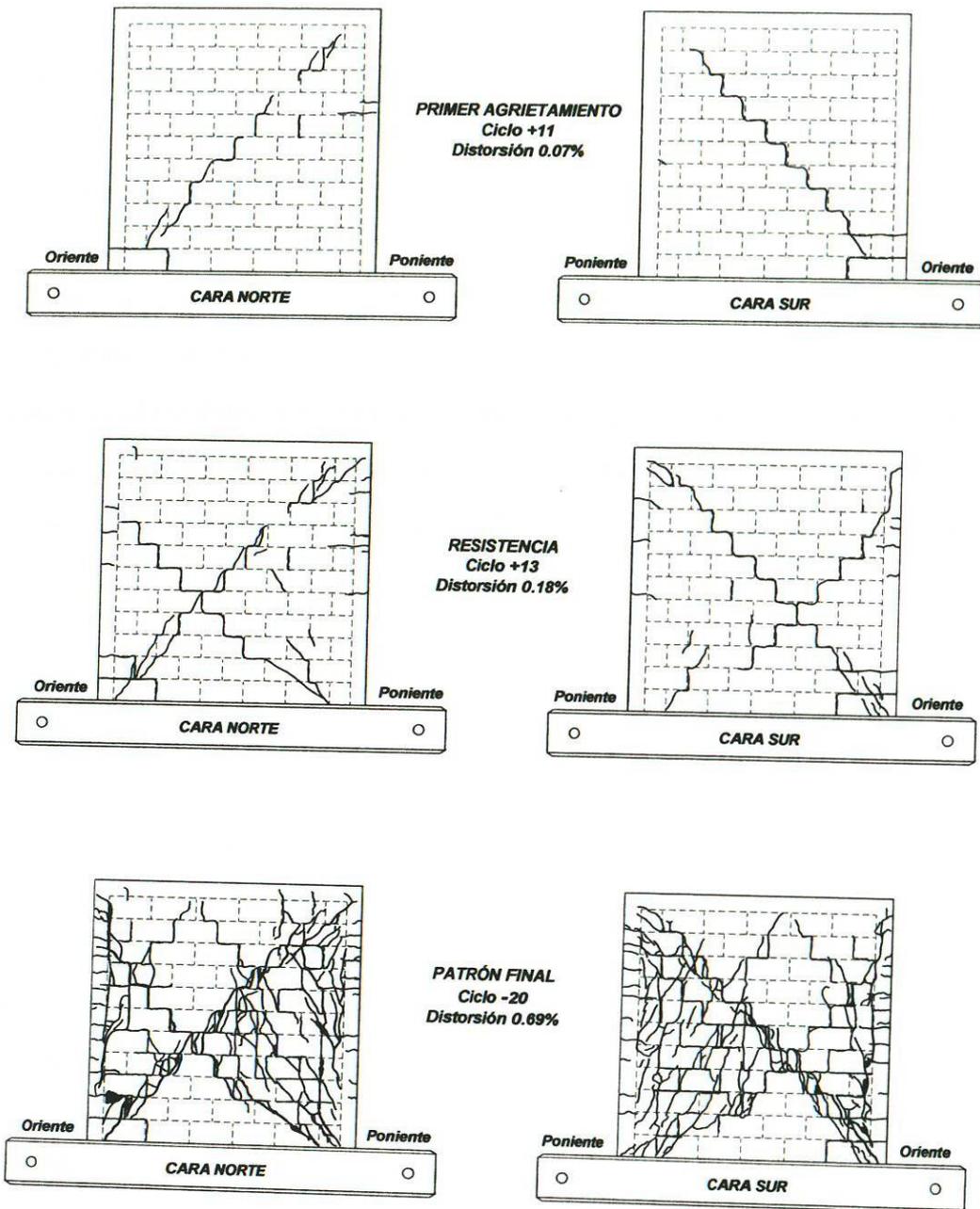


Figura F2.11: Evolución del deterioro en el espécimen 603.

2.1.6 Comportamiento histerético observado.

Las curvas de carga lateral-distorsión, para los ocho modelos, se incluyen en las figuras F2.12 y F2.13. El eje de las abscisas representa la distorsión neta sufrida por el espécimen, la cual se calculó descontando las traslaciones de cuerpo rígido a la distorsión total medida. En el eje de las ordenadas se indican la fuerza, y el esfuerzo cortante calculado; dividiendo la carga lateral aplicada, entre la sección transversal bruta del muro. En las gráficas se señalan los siguientes detalles importantes: a) los puntos en los que se registró el primer agrietamiento inclinado; b) la resistencia, o fuerza cortante máxima; c) los picos de algunos ciclos impares; y d) la resistencia teórica $V_{NTCM}^* = 11.3 \text{ t}$ (111kN), asociada con la falla por tensión diagonal, establecida en las Normas Técnicas Complementarias para Estructuras de Mampostería del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (GDF, 2004).

La forma de los lazos histeréticos es congruente con los resultados de otras investigaciones sobre la mampostería confinada (*Flores y Alcocer, 1998; Alcocer y Meli, 1995, entre otros*). En general, se puede decir que la respuesta fue simétrica, tanto en los ciclos elásticos como en los inelásticos, lo cual puede apreciarse al comparar los semiciclos positivos con los negativos. Antes del primer agrietamiento inclinado, el comportamiento se aproxima al de un sistema elástico-lineal. Sin embargo, desde los primeros ciclos de carga se apreció una disminución, lenta pero progresiva, de la rigidez inicial, la cual es atribuible al agrietamiento horizontal de los castillos por flexión así como al reacomodo de las piezas.

En general, después del primer agrietamiento inclinado, las fuerzas cortantes soportadas por los muros continuaron incrementándose hasta alcanzar su valor máximo, haciendo evidente la “reserva de resistencia”, conseguida gracias al confinamiento proporcionado por los castillos y las dalas. Sin embargo, hay una excepción que cabe mencionar, el caso del muro 602, en el cual coincidieron el primer agrietamiento y la resistencia en el ciclo +11, a una distorsión de 0.15%. En promedio, la resistencia de todos los muros fue de 17.7 t (174kN), lo cual significó una reserva de resistencia promedio del 24%.

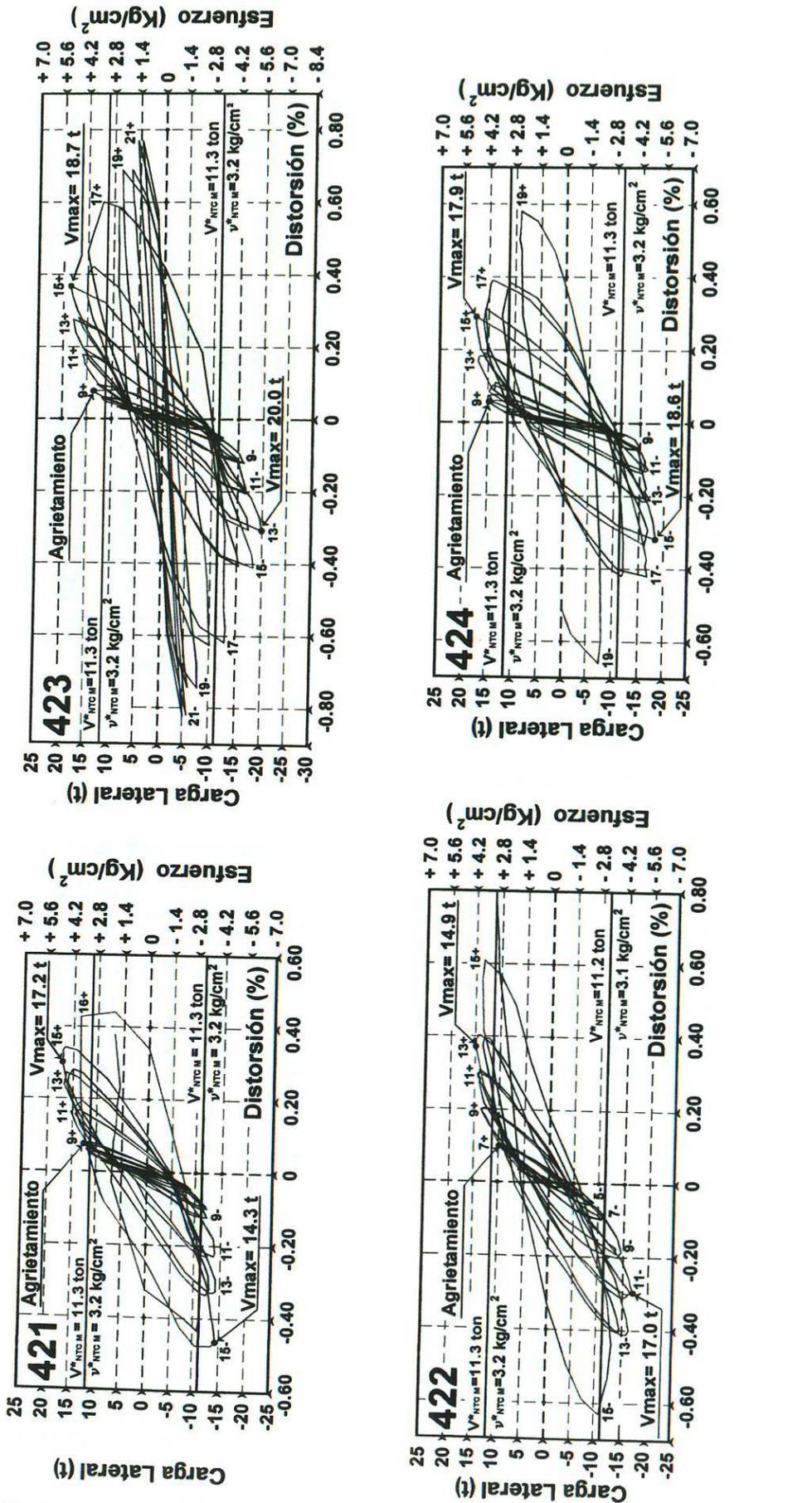


Figura F2.12: Curvas histeréticas carga lateral-distorsión. Muros: 421, 422, 423 y 424.

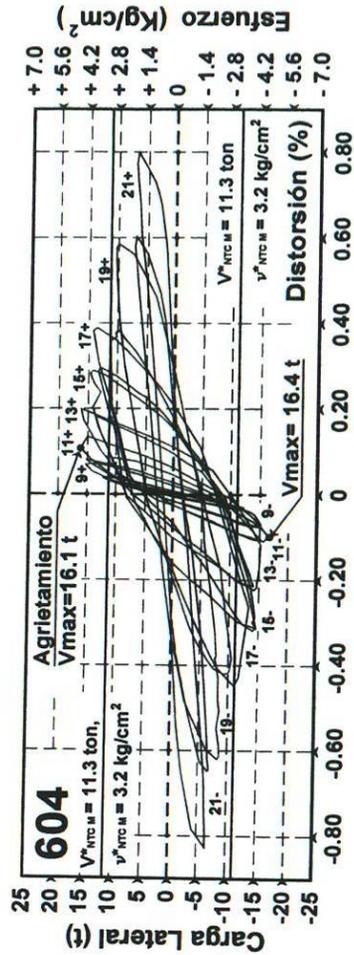
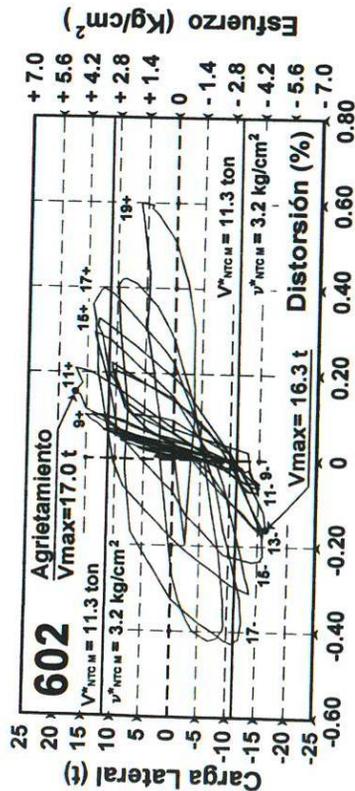
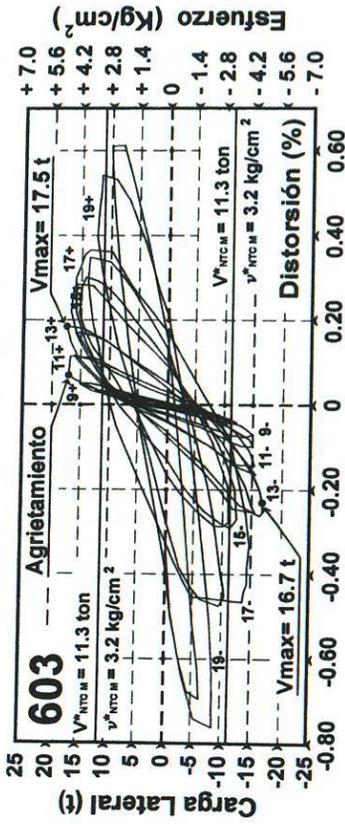
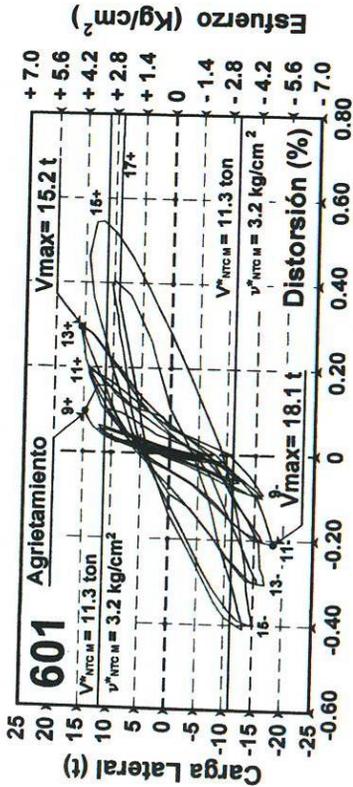


Figura F2.13: Curvas histeréticas carga lateral-distorsión. Muros: 601, 602, 603 y 604.



Asimismo, después del primer agrietamiento inclinado, se apreció una incursión clara en la no linealidad, con histéresis significativa y se observó un gran aumento de la tasa de degradación de la rigidez (inducido durante el proceso de apertura y cierre de las grietas), se perdió notablemente la proporcionalidad entre las cargas y los desplazamientos y se inició la disipación de energía a través de los agrietamientos en las juntas, de la fricción y de la trabazón mecánica entre el mortero y la mampostería y, por último, del fisuramiento y del aplastamiento de las unidades. Los lazos no mostraron estrangulamiento alrededor del origen. El área encerrada dentro de ellos, comenzó a crecer a partir de los primeros agrietamientos inclinados, ubicando a los especímenes cada vez más dentro del régimen de comportamiento inelástico. Este patrón de comportamiento continuó hasta el final del ensayo.

Las resistencias de todos los muros, se alcanzaron, en promedio, a una distorsión del 0.23%, sin presentar un patrón definido. Después de haber alcanzado la carga lateral máxima o resistencia, comenzó la degradación de la misma, debido fundamentalmente a la desintegración de la mampostería por el aplastamiento de sus paredes. El confinamiento proporcionado por los castillos y las dalas fue principalmente lo que mantuvo la estabilidad del sistema y controló la evolución del daño en los especímenes, después de ocurrir el agrietamiento diagonal.

2.1.7 Comportamiento del acero de refuerzo.

Del estudio de los registros y de las gráficas se dedujo con claridad que los niveles de deformación, tanto en el refuerzo longitudinal como en el transversal, no alcanzaron a llegar a la deformación de fluencia; por lo que ambos refuerzos exhibieron un comportamiento elástico durante todo el desarrollo de los ensayos. Para el caso de los estribos, los niveles de deformación fueron aún menores que los del acero longitudinal; esto indica que prácticamente no fueron solicitados. Aún cuando los niveles de deformación unitaria se mantuvieron en general bajos, se apreció claramente un incremento gradual de éstos conforme aumentaban los niveles de distorsión en el ensayo. En las figuras, de la F2.14 a la F2.17 se presentan ejemplos de la respuesta histerética de los deformímetros instalados en los muros: 422, 602, 424 y 604.

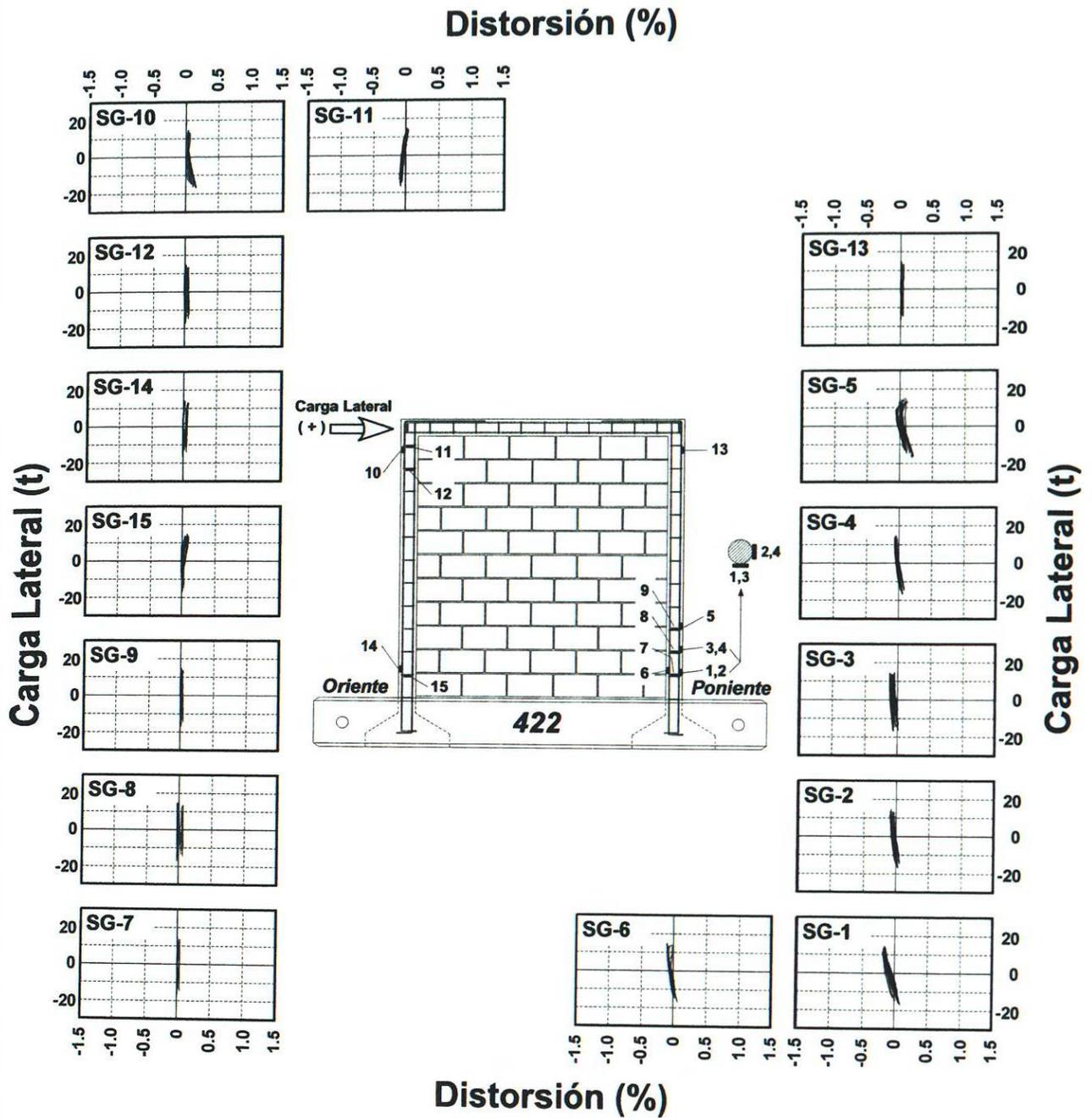


Figura F2.14: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 422.

Distorsión (%)

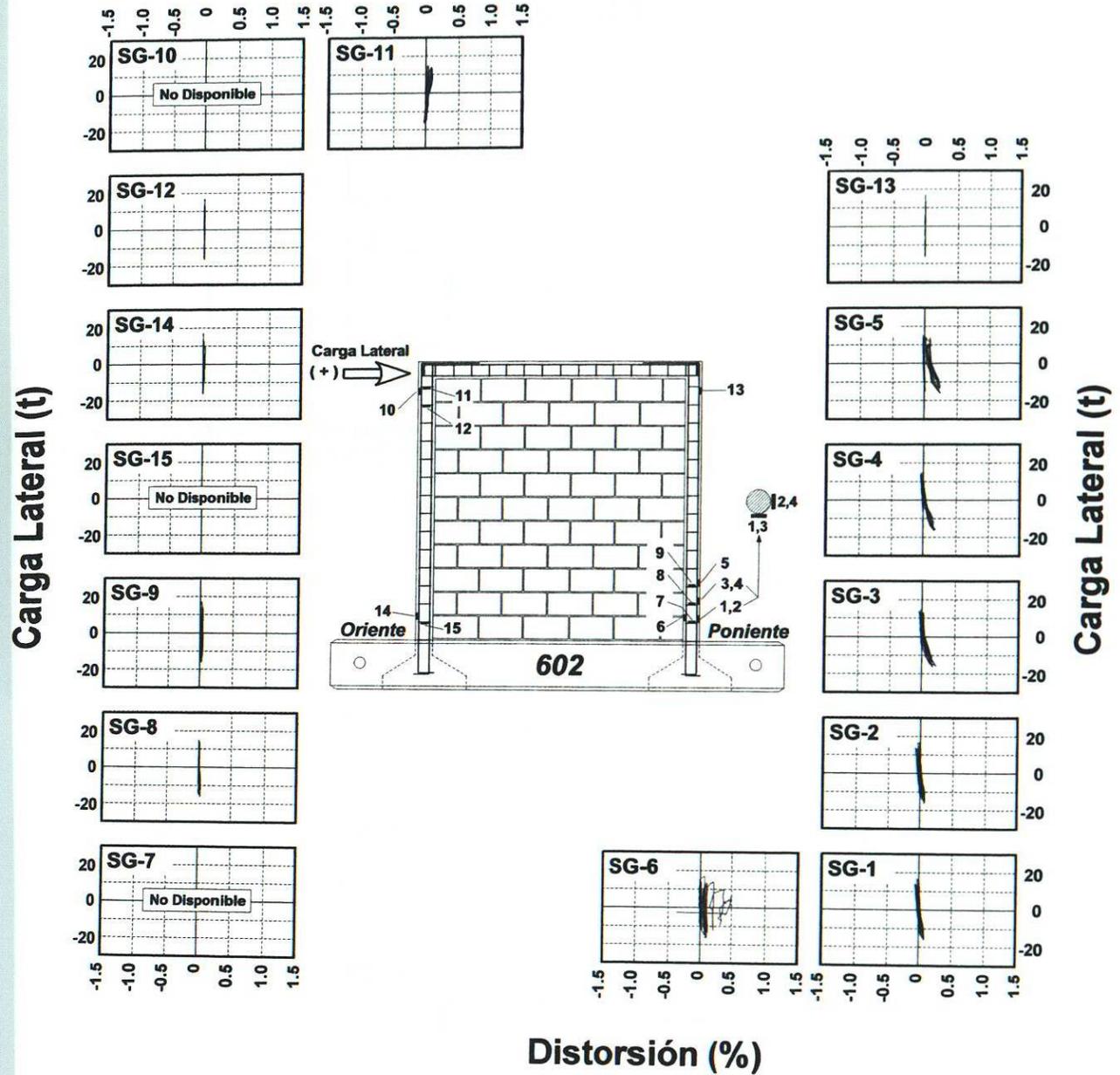


Figura F2.15: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 602.

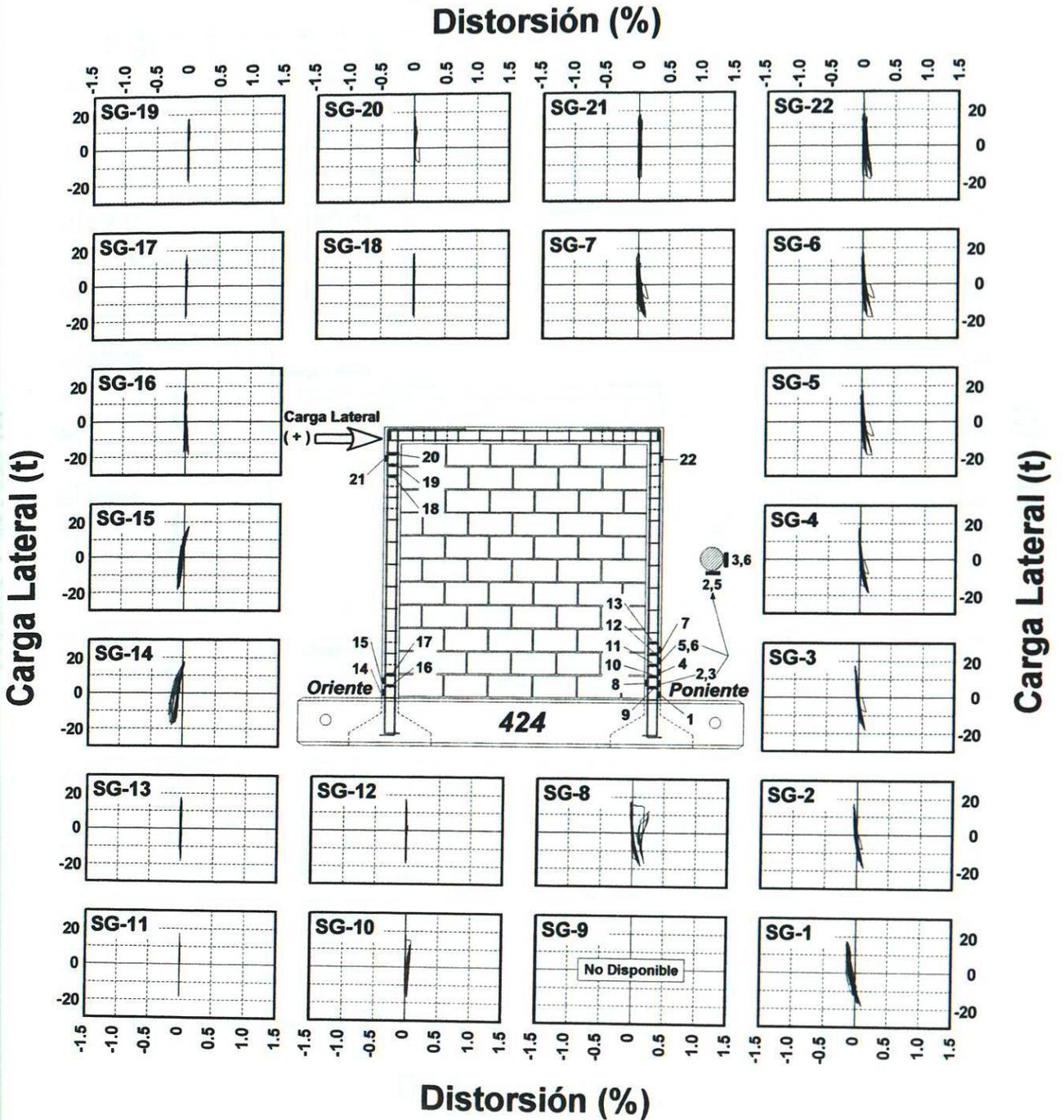


Figura F2.16: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 424.

Distorsión (%)

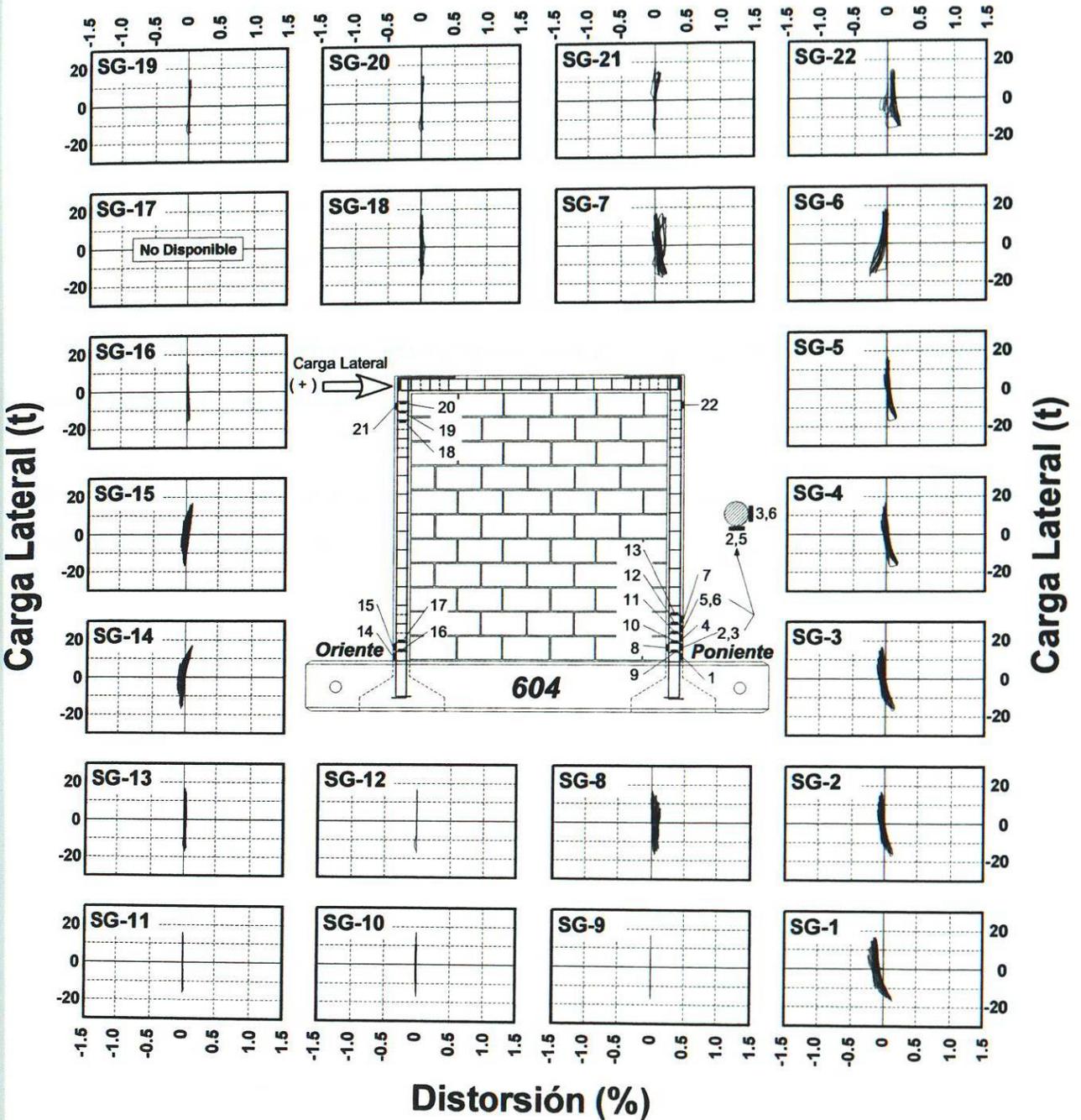


Figura F2.17: Respuesta histerética de los deformímetros del muro 604.

2.2 Modelos analíticos de referencia.

2.2.1 Modelo de Meli.

Con base en los resultados de las investigaciones realizadas en los pasados años sesenta y setenta, en la Universidad Nacional Autónoma de México, sobre muros aislados ensayados en voladizo y a compresión diagonal, (*Meli, 1979*) se propuso para las cargas monótonas un comportamiento idealizado por una relación trilineal: carga lateral–distorsión, en la cual el primer tramo describe el comportamiento hasta el agrietamiento inclinado; el segundo tramo —de menor rigidez— corresponde a la zona entre el agrietamiento inclinado y la carga máxima y, finalmente, un tercer tramo horizontal, hasta la falla.

Esta relación trilineal se define con cinco parámetros, de los cuales, la carga de agrietamiento y la rigidez inicial pueden predecirse teóricamente; mientras que los otros tres parámetros, que definen el comportamiento post–agrietamiento, se obtienen a partir de datos experimentales, en función del tipo de estructuración y del tipo de carga. Ver figura F2.18.

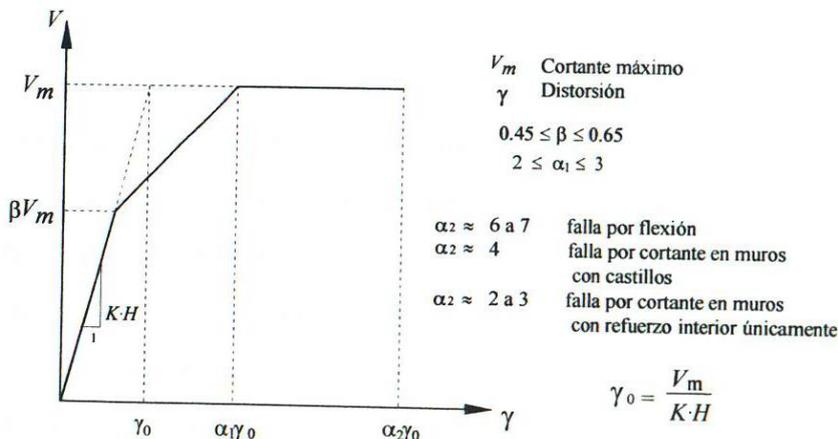


Figura F2.18: Modelo trilineal para cargas monótonas en muros de mampostería (Meli, 1979).



Para calcular la rigidez inicial, (*Meli, 1979*) considera apropiado el uso de fórmulas simples de resistencia de materiales; considerando tanto las deformaciones por cortante como las deformaciones por flexión y obteniendo los módulos de elasticidad y de rigidez a partir del ensayo de pilas y muretes, respectivamente. Para calcular el momento de inercia se considera la sección intacta, sin agrietamiento. De esta forma, Meli propuso usar:

$$\Delta = \frac{VH}{AG} + \frac{VH^3}{3EI} \quad (\text{E2.1})$$

$$K = \frac{V}{\Delta} \quad (\text{E2.2})$$

En las ecuaciones anteriores:

- K*: es la rigidez inicial del muro;
- V*: es la fuerza cortante aplicada en la parte superior del muro;
- Δ : es el desplazamiento horizontal medido en la parte superior del muro;
- H*: es la altura del muro;
- A*: es el área del muro;
- I*: es el momento de inercia de la sección transformada;
- E*: es el módulo de elasticidad; y
- G*: es el módulo de rigidez o de cortante.

Para representar el comportamiento ante cargas cíclicas, *Meli (1979)* definió cuatro parámetros adicionales, que configuran lazos histeréticos formados también por tramos rectos. Acepta que el comportamiento es elástico, sin deterioro, hasta la carga de agrietamiento; y que entre ésta y la carga máxima se presentan ligeros deterioros de rigidez y de resistencia, que crecen apreciablemente para desplazamientos más grandes, conformando lazos histeréticos diferentes para el tramo entre la carga de agrietamiento y la máxima, y para distorsiones que exceden esta última. Ver figura F2.19. De acuerdo con los resultados experimentales, se considera que todo el deterioro se produce en el segundo ciclo, para cada nivel de distorsión.

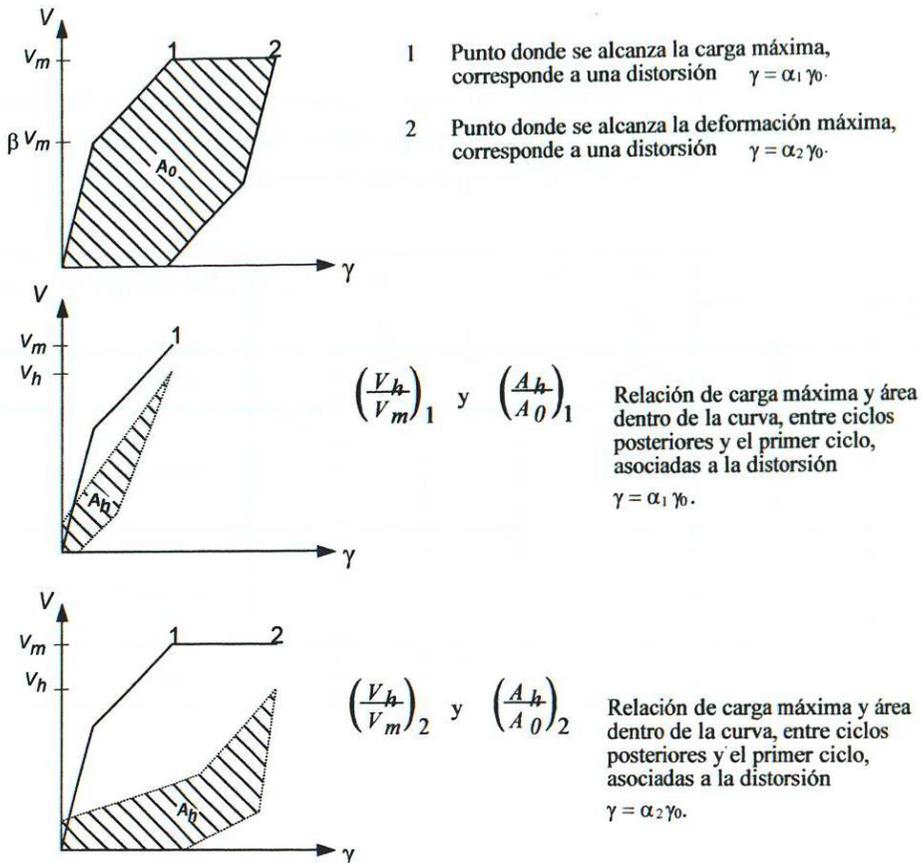


Figura F2.19: Modelo trilineal para cargas cíclicas en muros de mampostería (Meli, 1979).

Estas características se precisan mediante las relaciones V_h/V_m y A_h/A_0 entre las cargas máximas en un ciclo histérico deteriorado y en el ciclo inicial y entre las áreas encerradas por los lazos histéricos deteriorado e inicial, respectivamente. Los valores de ambas relaciones, para la distorsión asociada a la carga máxima y para la distorsión última, constituyen los cuatro parámetros adicionales que definen el modelo histérico. **Bazán (1980)** presenta un compendio de valores — adaptado de **Meli (1979)**— de los parámetros citados, obtenidos experimentalmente para cuatro casos de estructuración y modos de falla. Ver tabla T2.3

Tabla T2.3: Valores propuestos para los parámetros que definen los modelos histeréticos trilineales a partir de resultados experimentales. (Bazán, 1980, adaptado de Meli, 1979)

Carga Vertical	Tipo de falla	β	$\frac{\alpha_1}{\beta}$	$\frac{\alpha_2}{\beta}$	Ω^*	$\frac{K_L}{K_O}$	Vh/Vm		Ah/Am	
							1	2	1	2
si \pm no	flexión	0.6	2.5	10.0	4.0	0.67	1	0.9	0.85	0.7
si - no no	flexión	0.6	2.5	7	2.8	0.67	1	0.8	0.8	0.5
si - no si	cortante	0.6	3	6	2	0.56	0.9	0.7	0.7	0.4
si - no	cortante	0.6	3	4.5	1.5	0.56	0.8	0.4	0.4	0.15

Por otra parte, *Meli (1979)* señala que los lazos histeréticos propuestos pueden construirse como la suma de curvas simples, representativas de modelos elastoplásticos con distintos grados de deterioro de resistencia y rigidez. *Bazán (1980)* comparó los valores experimentales de los parámetros que definen los lazos histeréticos con los obtenidos combinando modelos elastoplásticos simples, y concluyó que estos últimos reproducen, en forma aceptable, todos los parámetros deducidos experimentalmente. En la figura F2.20 se presentan las gráficas de comportamiento histerético del tercer caso estudiado por Bazán, correspondiente a muros de piezas huecas confinados por castillos y dalas.

cortante. El modelo propuesto se caracteriza por una envolvente trilineal y lazos histeréticos con rigidez degradante, tal como se muestra en la figura F2.21. Los parámetros que definen la envolvente son seis:

- V_1 : carga lateral a la cual se produce el primer cambio significativo de rigidez, producto de la formación de las primeras grietas de corte,
- V_2 : carga lateral máxima,
- K_e : rigidez elástica inicial,
- γ_0 : distorsión de “fluencia” de un sistema elasto-plástico equivalente, de rigidez efectiva K_e y carga lateral V_2 ; $\gamma_0 = V_2/K_e h$,
- γ_2 : distorsión para la cual el muro alcanza la carga lateral máxima V_2 ,
- γ_3 : distorsión máxima disponible, correspondiente a una reducción de 20% de su capacidad resistente.

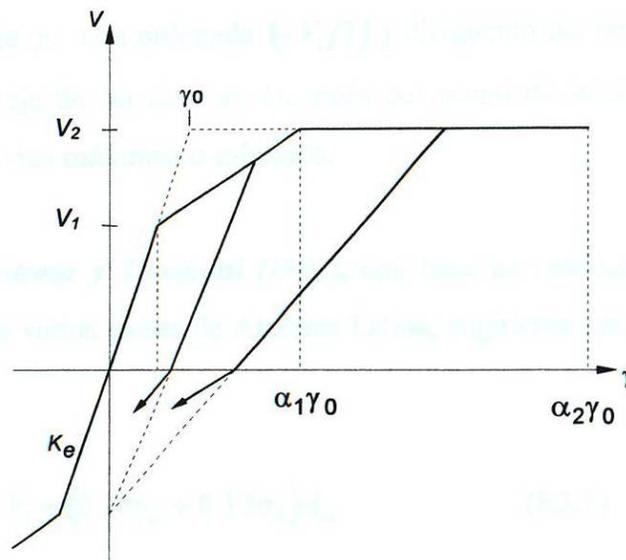


Figura F2.21: Modelo histerético para muros de mampostería confinada.
(Astroza, Moroni y Navarrete, 1991).

El parámetro K_e es aproximadamente igual a un tercio de la rigidez tangente obtenida de los primeros ciclos experimentales, a distorsiones pequeñas, y puede calcularse como $K_e = G_m A_e / 3h$, donde $A_e = A_m + 2\eta_g A_c$ y $\eta_g = G_c / G_m$. Las variables G_m y G_c se refieren al



módulo de rigidez de la mampostería y del concreto respectivamente; A_m y A_c al área de la mampostería y de los castillos confinantes; y h a la altura del muro.

Las cargas laterales V_1 y V_2 dependen del esfuerzo vertical aplicado σ_0 , y de la resistencia a cortante de la mampostería v_m , y pueden estimarse con las ecuaciones siguientes:

$$V_1 = (0.23v_m + 0.12\sigma_0)A_m \leq 0.35A_mv_m \quad (\text{E2.3})$$

$$V_2 = (0.45v_m + 0.30\sigma_0)A_m \quad (\text{E2.4})$$

Para γ_2 y γ_3 se sugieren valores de $3\gamma_0$ y $10\gamma_0$ respectivamente, que fueron los que mejor se ajustaron a los resultados experimentales. La degradación de rigidez se introduce estableciendo un punto común sobre el eje y , con ordenada $(-V_1/2)$ y dirigiendo las ramas de descarga hacia ese punto, hasta cruzar el eje de las abscisas. Después del punto de intersección, las líneas se dirigen hacia los puntos previos máximos o mínimos.

Posteriormente, *Moroni, Astroza y Tavonatti (1994)*, con base en resultados de investigaciones experimentales realizadas en varios países de América Latina, sugirieron las siguientes expresiones para estimar V_1 y V_2 :

$$V_1 = (0.19v_m + 0.12\sigma_0)A_m \quad (\text{E2.5})$$

$$V_2 = (0.37v_m + 0.43\sigma_0)A_m \quad (\text{E2.6})$$

Por otra parte, para piezas industrializadas de arcilla propusieron tomar $\gamma_2 = 5\gamma_0$ y $\gamma_3 = 14\gamma_0$, mientras que para piezas de arcilla de fabricación artesanal recomendaron considerar $\gamma_2 = 6\gamma_0$ y $\gamma_3 = 19\gamma_0$.

2.2.3 Modelo de Flores.

Basándose en las investigaciones realizadas en el Centro Nacional de Prevención de Desastres de México, durante la primera mitad de la década de los años noventa, *Flores (1995)* propuso un modelo histerético cuya envolvente es trilineal, pero a diferencia de los dos anteriores, el tercer tramo considera degradación de resistencia.

El modelo fue calibrado con los resultados de ensayos ante carga lateral cuasi-estática, de muros de mampostería confinada de unidades de arcilla de fabricación artesanal, a escala natural, de uno y dos pisos, aislados o formando un conjunto acoplado por losas y dadas, con y sin refuerzo horizontal ahogado en las juntas. Durante los ensayos, los muros estuvieron sometidos a un esfuerzo vertical constante de 5 kg/cm^2 . (*Alcocer, Sánchez y Meli, 1993; Alcocer, Sánchez, Vázquez y Díaz, 1994; Alcocer, Meli, Sánchez y Flores, 1994; Álvarez y Alcocer, 1994; Díaz y Vázquez, 1995*).

En este modelo, la envolvente trilineal queda definida por seis parámetros; a saber: la carga lateral a la cual se produce el primer agrietamiento inclinado, la carga lateral máxima o resistencia, la carga lateral última y sus distorsiones asociadas $(V_1, V_2, V_3, \gamma_0, \gamma_1, \gamma_2)$, como se muestra en la figura F2.22. Las envolventes obtenidas experimentalmente fueron normalizadas con respecto a la resistencia a cargas laterales, calculada de acuerdo con la normatividad mexicana vigente. Para obtener la curva de mejor ajuste, las rigideces de las ramas ascendentes y descendentes de los lazos histeréticos experimentales fueron normalizadas con respecto a la rigidez inicial.

Las rigideces experimentales se obtuvieron como la pendiente de la secante, trazada desde el punto con carga cero del semiciclo anterior, hasta el pico de carga en el siguiente semiciclo. La rigidez inicial se obtuvo como la pendiente de la secante trazada a partir del origen, hasta el punto en el que la pendiente de la envolvente experimental cambia significativamente. En la figura F2.23 se incluye una gráfica que muestra las curvas envolventes de los ciclos positivos y negativos correspondientes a especímenes sin refuerzo horizontal, y otra en la que se grafican los

puntos correspondientes a las rigideces normalizadas contra la distorsión máxima alcanzada en el semiciclo anterior, para las ramas ascendentes o de carga, de los especímenes sin refuerzo horizontal.

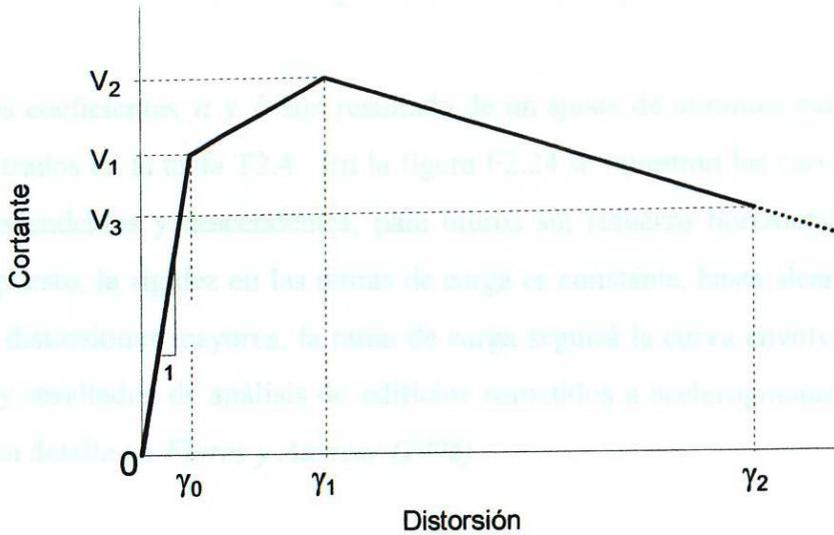


Figura F2.22: Envolvente trilineal con degradación de resistencia (Flores, 1995).

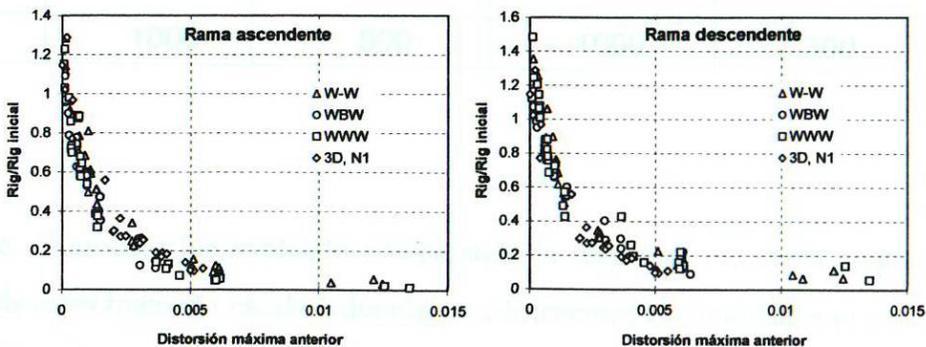
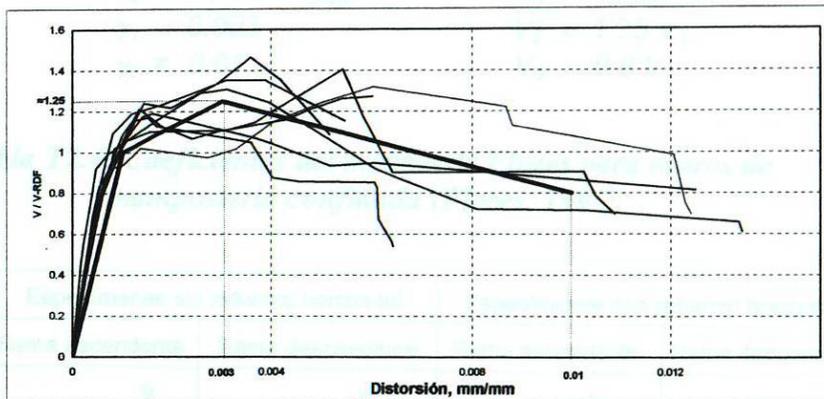


Figura F2.23: Envolventes normalizadas y rigideces ascendentes y descendentes de semiciclos positivos y negativos de muros de mampostería confinada (Flores, 1995).

Las rigideces ascendentes o descendentes —carga o descarga— siguen la ecuación:

$$R_{asc,desc.} = R_{inicial} \left[a(\gamma_{max})^4 + b(\gamma_{max}) + 1 \right]^1 \quad (E2.7)$$

en la que los coeficientes a y b son resultado de un ajuste de mínimos cuadrados y adoptan los valores mostrados en la tabla T2.4. En la figura F2.24 se muestran las curvas correspondientes a las ramas ascendentes y descendentes, para muros sin refuerzo horizontal. De acuerdo con el modelo propuesto, la rigidez en las ramas de carga es constante, hasta alcanzar la envolvente. Si se imponen distorsiones mayores, la rama de carga seguirá la curva envolvente. Los criterios de calibración y resultados de análisis de edificios sometidos a acelerogramas de sismos reales, se describen con detalle en *Flores y Alcocer (1996)*.

$$R_{asc, desc} = R_{inicial} / [a (\gamma_{m\acute{a}x})^4 + b \gamma_{m\acute{a}x} + 1]$$

$$\gamma_0 = V_1 / H \cdot R_{inicial}$$

$$\gamma_1 = 0.003$$

$$\gamma_2 = 0.01$$

$$V_1 = V_{R, RDF}$$

$$V_2 \approx 1.25 V_1$$

$$V_3 = 0.8 V_1$$

Tabla T2.4: Coeficientes del modelo de Flores para muros de mampostería confinada (Flores, 1995).

Parámetro	Especímenes sin refuerzo horizontal		Especímenes con refuerzo horizontal	
	Rama ascendente	Rama descendente	Rama ascendente	Rama descendente
a	1×10^9	1×10^8	1×10^8	1×10^7
b	1000	600	1000	300

Recientemente, el modelo fue evaluado comparando la respuesta calculada contra la respuesta experimental de especímenes a escala reducida, de edificaciones de uno y tres pisos, sometidos en mesa vibradora a sismos reales y artificiales en el CENAPRED, representativos de los que ocurren en la costa mexicana del Pacífico. En general, los resultados mostraron una buena

concordancia en el cortante basal. En cuanto a las distorsiones, se observaron algunas diferencias que sugieren la necesidad de mejorar la modelación no lineal de sistemas complejos de mampostería confinada, con énfasis en el efecto de la velocidad de aplicación de las cargas en la degradación de rigidez (*Alcocer, Arias y Flores, 2004*).

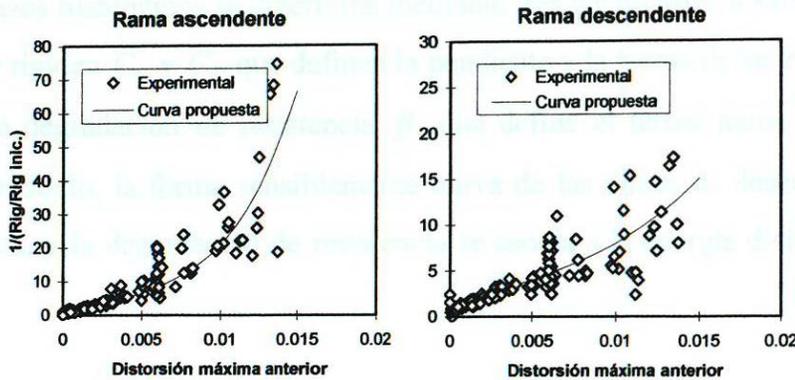


Figura F2.24: Ajuste de rigideces ascendentes y descendentes de semiciclos positivos y negativos de muros de mampostería confinada (Flores, 1995).

2.2.4 Modelo de Tomazevic y Lutman

Tomazevic y Lutman (1996) desarrollaron un modelo, tomando como base el propuesto por *Park, Reinhorn y Kunnath (1987, citados por Tomazevic y Lutman, 1996)*, conocido en la bibliografía como el “*modelo de los tres parámetros*”, para reproducir la respuesta histerética de 32 muros de mampostería reforzada interiormente, ensayados en el Instituto Nacional de Edificaciones e Ingeniería Civil de Ljubljana, Eslovenia (*Tomazevic, Lutman y Petkovic, 1996*). El modelo de Park y colaboradores, que fue calibrado originalmente para representar el comportamiento histerético de estructuras de concreto reforzado, utiliza tres parámetros que controlan la degradación de la resistencia, de la rigidez, y el adelgazamiento de los lazos histeréticos cerca del origen. Tomazevic y Lutman adaptaron los parámetros de acuerdo con los resultados obtenidos en sus ensayos.

La envolvente de los lazos histeréticos es trilineal y se determina por tres pares de valores de distorsión y carga lateral $(d_{cr}, H_{cr}; d_{H_{max}}, H_{max}; d_u, H_{d_u})$; que definen el primer agrietamiento, la máxima carga lateral o resistencia; y la carga lateral asociada al máximo desplazamiento alcanzado durante el ensayo, respectivamente. Ver figura F2.25.

La forma de los lazos histeréticos se determina mediante tres parámetros; a saber: los parámetros de degradación de rigidez C_K y C_F que definen la pendiente y la forma de las ramas de descarga; y el parámetro de degradación de resistencia β , que define el tercer tramo de la envolvente trilineal. En este modelo, la forma sensiblemente curva de las ramas de descarga se representa mediante dos rectas, y la degradación de resistencia se asocia a la energía disipada en los ciclos histeréticos.

Las reglas que definen el comportamiento histerético se muestran en la figura F2.26. El segmento 1 de la rama de carga O-1-A-2-B describe el comportamiento elástico con rigidez inicial K_e en las direcciones de carga positiva y negativa. Cuando el modelo es demandado por una resistencia o una distorsión mayores que las correspondientes al punto A, o punto del primer agrietamiento (d_{cr}, H_{cr}) , se adopta la pendiente del segundo tramo de la envolvente, hasta que las fuerzas externas que actúan sobre el sistema cambian el sentido de la deformación en el punto B.

El parámetro C_K define la rigidez de la rama de descarga B-3-C y el parámetro C_F establece la ordenada del punto C. La trayectoria del segmento C-4-D se dirige hacia el punto D o punto del primer agrietamiento en sentido negativo $(-d_{cr}, -H_{cr})$, a partir del cual el segmento 5 coincide con la envolvente, de manera semejante al segmento 2.

Los lazos histeréticos continúan en la forma descrita, mientras la distorsión no alcance el valor asociado con la carga lateral máxima $d_{H_{max}}$ y se incurse en el tramo de la envolvente con degradación de resistencia.

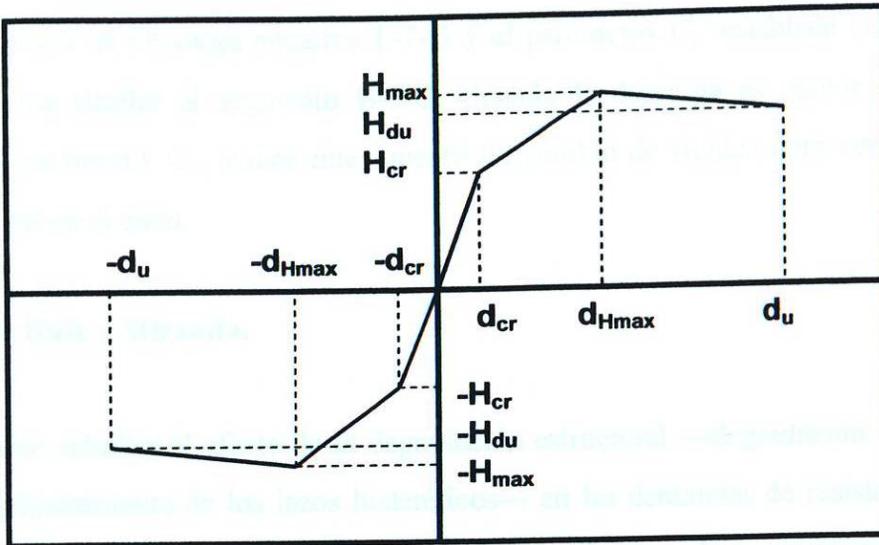


Figura F2.25: Envolvente trilineal.
(Tomazevic y Lutman, 1996).

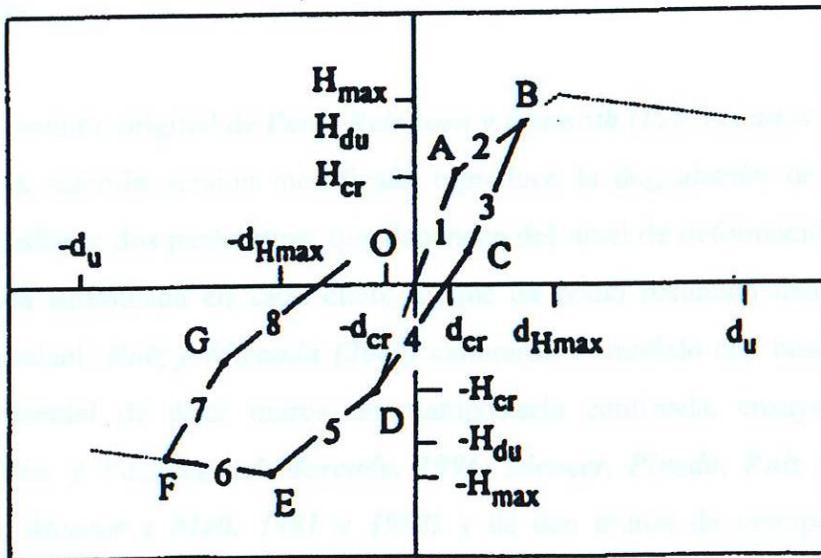


Figura F2.26: Definición de las reglas de comportamiento histerético.
(Tomazavic y Lutman, 1996).

El parámetro β se integra en la respuesta cuando se ingresa a la etapa de degradación de resistencia. En esta etapa, el segmento 6 sigue la trayectoria del último tramo de la envolvente hasta que cambie nuevamente el sentido de la deformación en el punto F. El parámetro C_K define

la rigidez de la rama de descarga negativa F-7-G y el parámetro C_F establece la ordenada del punto G, en forma similar al segmento B-3-C. Cuando la descarga es mayor que el límite impuesto por el parámetro C_F , existe nuevamente un cambio de rigidez para continuar con el segmento 8 que cierra el ciclo.

2.2.5 Modelo de Ruiz y Miranda.

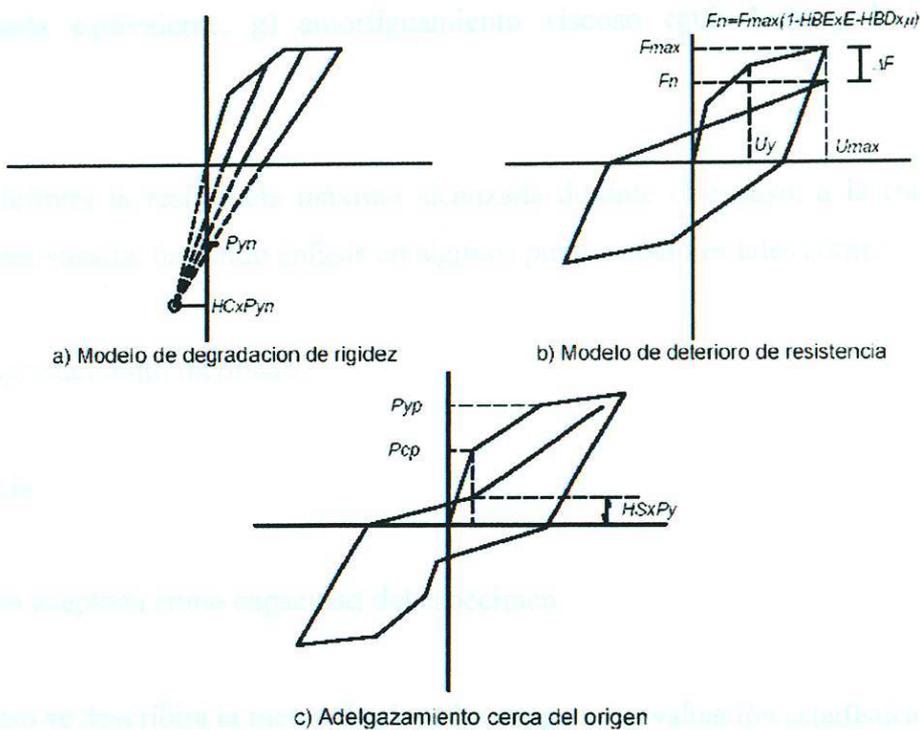
Con el objetivo de estudiar el efecto de la degradación estructural —degradación de rigidez, de resistencia y adelgazamiento de los lazos histeréticos— en las demandas de resistencia lateral y en los factores de reducción de resistencia por ductilidad o factores de comportamiento sísmico, de estructuras cimentadas sobre terreno firme, **Ruiz y Miranda (2003)** utilizaron la versión del “*modelo de los tres parámetros*” que fue modificada por **Cheok, Stone y Kunnath (1998)**, para representar la respuesta histerética de sistemas de marcos de concreto prefabricado, con conexiones híbridas.

A diferencia de la versión original de **Park, Reinhorn y Kunnath (1987, citados por Tomazevic y Lutman, 1996)**, la referida versión modificada reproduce la degradación de resistencia ante cargas laterales mediante dos parámetros, que dependen del nivel de deformación inelástica y de la energía disipada acumulada en cada ciclo; lo que da como resultado una degradación de resistencia más gradual. **Ruiz y Miranda (2003)** calibraron el modelo con base en la respuesta histerética experimental de doce muros de mampostería confinada, ensayados en México (**Aguilar, Meli, Díaz y Vázquez del Mercado, 1996; Alcocer, Pineda, Ruiz y Zepeda, 1996; Sánchez, Flores, Alcocer y Meli, 1991 y 1992**) y de dos muros de mampostería reforzada interiormente, ensayados en Eslovenia (**Tomazevic, Lutman y Petkovic, 1996**).

Los doce especímenes de mampostería confinada ensayados en México fueron construidos con ladrillos de barro rojo recocido de fabricación artesanal; de los cuales, cuatro fueron reforzados horizontalmente con alambres laminados en frío embebidos en las juntas de mortero, y cuatro fueron recubiertos con aplanados de mortero reforzado con malla electrosoldada. Los dos especímenes ensayados en Eslovenia fueron construidos con unidades huecas de bloque de

concreto, y se reforzaron interiormente con varillas verticales colocadas dentro de las celdas extremas que se rellenaron con mortero, y con varillas horizontales ahogadas en las juntas.

En la figura F2.27 se muestra el efecto de cada uno de los parámetros, así como los valores de dichos parámetros, que fueron elegidos para reproducir la respuesta de los catorce muros empleados para calibrar el modelo, y “no intentan representar, en general, el posible comportamiento de estructuras de mampostería construidas con piezas provenientes de diferentes partes del país” (Ruiz y Miranda, 2003).



Tipo de mampostería	Parámetros del modelo analítico.			
	HC	HBD	HBE	HS
Mampostería confinada	3.5	0.060	0.060	0.015
Mampostería con refuerzo interior	3.0	0.025	0.025	0.015
Mampostería con refuerzo exterior	2.4	0.040	0.040	0.030

Figura F2.27: Modelo de los tres parámetros (Park, Reinhorn y Kunnath, 1987) y valores propuestos para muros de mampostería (Ruiz y Miranda, 2003).



CAPÍTULO III

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

En este capítulo explicaremos la metodología empleada para obtener las respuestas asociadas con el comportamiento cíclico y con la incursión en el rango inelástico de la mampostería confinada; Las respuestas antes definidas son: a) rigidez de ciclo, b) rigidez equivalente, c) degradación de la rigidez de ciclo, d) degradación de la rigidez equivalente e) energía disipada acumulada, f) energía disipada equivalente, g) amortiguamiento viscoso equivalente y h) capacidad de deformación.

También se definirá la resistencia máxima alcanzada durante el ensayo, a la cual llamaremos simplemente resistencia, haciendo énfasis en algunos puntos notables tales como:

- a) primer agrietamiento inclinado.

- b) resistencia

- c) distorsión aceptada como capacidad del espécimen.

De igual manera se describirá la metodología utilizada para la evaluación estadística aplicada para la validación de las respuestas.



3.1 Respuestas histeréticas.

3.1.1 Resistencia.

Como ya se mencionó antes, se define como resistencia a la carga horizontal máxima soportada por el espécimen durante la evolución de la prueba, dichos valores de resistencia experimental se compararon con los obtenidos al utilizar las fórmulas de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de México (*GDF, 2004b*).

Envolvente. Las envolventes fueron generadas a partir de los lazos histeréticos, éstas se generaron tanto para los semiciclos positivos como para los semiciclos negativos. Para su trazo, se unieron los puntos de máximo cortante de los semiciclos impares, procurando que la línea que define la envolvente no cortase en ninguna parte los lazos. En las envolventes se marcan los puntos correspondientes al primer agrietamiento inclinado y a la resistencia. También se indicó con una línea horizontal el valor de la resistencia teórica calculada según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de México (*GDF, 2004b*).

Degradación de resistencia. Ésta se obtiene comparando la carga máxima alcanzada en la prueba, con la carga asociada a la réplica del semiciclo del 0.4% de distorsión. Se eligió este valor porque fue la distorsión máxima alcanzada por todos los muros; sin embargo, cabe mencionar que la mayoría de los muros llegaron más allá de este valor.

La distorsión última se definió como la asociada con una degradación de resistencia del 15%, (*Park y Paulay, 1994*) en las envolventes. Se tomó este criterio con la intención de que el espécimen aún tenga cierto valor de capacidad de carga. Para degradaciones mayores no tendría sentido utilizar el elemento, ya que la capacidad del mismo para soportar cargas laterales sería muy baja.

3.1.2 Rigidez.

Se definirá la rigidez de dos formas, la primera es la rigidez de ciclo, la cual esta asociada con un ciclo completo (carga en una dirección, descarga, carga en la otra dirección y descarga.), y la segunda es la rigidez equivalente, la cual esta asociada con un semiciclo (carga en una dirección y descarga.); por tanto, esta segunda se divide en positiva y negativa, según el sentido de aplicación de la carga. La rigidez depende básicamente de la geometría del elemento, así como del material utilizado. En nuestro caso, sería de los materiales utilizados. La rigidez inicial de los muros de mampostería confinada, se calcula usualmente por medio de un análisis elástico. También se presentarán resultados de la rigidez secante, asociada con el primer agrietamiento.

Rigidez elástica. La rigidez elástica teórica de los especímenes, se calculó con la siguiente expresión de la mecánica de materiales, que considera tanto la contribución de las deformaciones por flexión, como las deformaciones por cortante; a la deformación total de un elemento vertical en voladizo, empotrado en su base, y con una carga concentrada aplicada en dirección horizontal en su extremo superior, lo cual corresponde con el tipo de ensayo utilizado para los muros:

$$K_{teórica} = \frac{1}{\frac{h^3}{3EI} + F \frac{h}{AG}} \quad (E3.1)$$

- donde:
- $K_{teórica}$ es la rigidez elástica teórica;
 - E es el módulo de elasticidad del material constitutivo del espécimen;
 - G es el módulo de elasticidad al cortante o módulo de rigidez;
 - A es el área total de la sección transversal;
 - I es el momento de inercia de la sección transversal en dirección de la deformación, con respecto al eje centroidal;
 - h es la altura del espécimen; y,
 - F es el factor de forma de la sección.

Debido a la diversidad de materiales utilizados en los muros el momento de inercia I , y el área A , que aparecen en la ecuación 3.1 se determinaron utilizando la sección transformada a concreto equivalente, o bien, a mampostería equivalente.

Rigidez de ciclo. Para el cálculo de estas rigideces se evaluó la pendiente de la recta que une los puntos de máxima distorsión de un lazo completo, en un extremo de la recta la distorsión máxima del semiciclo positivo y en el otro la distorsión máxima del semiciclo negativo. Lo antes mencionado se puede expresar de la siguiente manera.

$$k_{ciclo} = \frac{V^+ + |V^-|}{R^+ + |R^-|} \quad (E3.2)$$

donde: k_{ciclo} es la rigidez de ciclo, o pico a pico;
 V^+ es la fuerza lateral asociada a la máxima distorsión del semiciclo positivo;
 V^- es la fuerza lateral asociada a la máxima distorsión del semiciclo negativo;
 R^+ es la distorsión máxima del semiciclo positivo; y
 R^- es la distorsión máxima del semiciclo negativo.

La rigidez de ciclo es una rigidez angular, y se expresa en $\frac{t}{cm/cm}$ $\left(\frac{kN}{cm/cm} \right)$ si se utiliza la ecuación 3.2 para calcularla. Las abscisas de las gráficas muestran la distorsión promedio de cada par de semiciclos consecutivos, y las ordenadas muestran la rigidez pico a pico de los ciclos impares de los ocho muros ensayados.

Rigidez equivalente. Otro parámetro que se estudiará es la rigidez equivalente, la cual está asociada a semiciclos, no a ciclos completos. Esta rigidez se calcula determinando la pendiente de una recta que une el inicio del semiciclo (carga horizontal igual a cero), con el punto de máxima distorsión de ese semiciclo. Por tanto, se tienen rigideces tanto para los semiciclos positivos como para los negativos.

3.1.3 Disipación de Energía.

La energía disipada se define como el área dentro del diagrama de la carga lateral-desplazamiento y su valor está asociado con la forma de dicho diagrama. Este parámetro permite conocer la eficiencia en cuanto a disipación de energía se refiere. En general, se requiere que los sistemas disipen energía durante un evento sísmico.

Energía disipada. La energía disipada se obtiene calculando el área contenida dentro de los lazos histeréticos del diagrama de la carga lateral-desplazamiento. La energía disipada aumenta conforme aumenta la distorsión, debido a que los lazos histeréticos crecen; lo cual se atribuye a que la estructura entra en el rango inelástico y sufre de deformaciones permanentes, dichas deformaciones permanentes son producto del agrietamiento, en general, tanto de las piezas y el mortero, como de los elementos confinantes.

La energía disipada acumulada es la suma de las energías individuales disipadas en cada lazo histerético conforme se desarrolla la prueba.

Energía disipada equivalente. La energía disipada equivalente es una cantidad adimensional, que compara la capacidad de disipación de energía del sistema real, con la de un sistema elasto-plástico perfecto. Se define como el cociente de la energía disipada del espécimen, sometido a deformaciones laterales cíclicas reversibles, y de la energía disipada "ideal". Se evalúa como el área contenida por la curva histerética del ciclo para el cual se calcula, dividida entre el área circunscrita por los paralelogramos definidos por la rigidez del primer ciclo, y por la carga máxima del referido ciclo para el cual se calcula la energía disipada equivalente (*GDF, 2004b*).

Amortiguamiento viscoso equivalente. Este parámetro nos permite efectuar el análisis dinámico de sistemas inelásticos en una forma simplificada. La simplificación consiste en sustituir un sistema inelástico por un sistema elástico con un amortiguador viscoso que, al alcanzar el mismo nivel de deformación que la estructura original, es capaz de disipar la misma cantidad de energía.

El amortiguamiento viscoso depende linealmente de la velocidad de aplicación de las cargas; y se utiliza para tomar en cuenta, en forma simplificada, el fenómeno de disipación de energía.

Para calcular este parámetro se divide el valor de de la energía disipada por el sistema real entre el valor de la energía disipada por el sistema equivalente. En la figura F3.1 se explica gráficamente el cálculo de este parámetro.

Lo que se observa en la figura F2.6, se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$\xi_{equiv} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sum_{inicia}^{máx} \left[\frac{(V_1 + V_2) - (V_3 + V_4)}{2} \right] (\Delta_2 - \Delta_1)}{\frac{1}{2} (V_{máx}) (\Delta_{máx})} \quad (E3.3)$$

donde:

- ξ_{equiv} es el amortiguamiento viscoso equivalente, para un semiciclo.
- $V_1, V_2, V_3,$ y V_4 son las cargas laterales, asociadas a los desplazamientos Δ_1 y Δ_2 .
- $V_{máx}$ es la carga lateral máxima del semiciclo.
- $\Delta_{máx}$ es el desplazamiento máximo del semiciclo.

3.1.4 Ductilidad. La ductilidad es un parámetro de gran importancia para las estructuras sujetas a fuerzas sísmicas. Este parámetro representa la capacidad de deformación que tiene un sistema que incursiona en el rango inelástico, manteniendo cierto nivel de resistencia. Matemáticamente, la ductilidad se define como la relación entre la deformación última y la deformación de fluencia.

En el presente caso, la distorsión última se fijó como la asociada a un 15% de degradación de la resistencia en la envolvente general de cada muro. La distorsión de fluencia se calculó de dos formas: para la primer forma se utilizó el criterio de Park (*Park, 1989, citado por Pineda, 1996; Paulay y Prietsley, 1992*), en el cual la rigidez inicial secante se define con una recta que une el origen, con un punto en el inicio de la envolvente asociado al 63.75% de la degradación de la resistencia, esta recta se proyecta hasta alcanzar la línea horizontal al 15% de la degradación de la resistencia, donde se intersectan estas líneas se define la distorsión de fluencia.

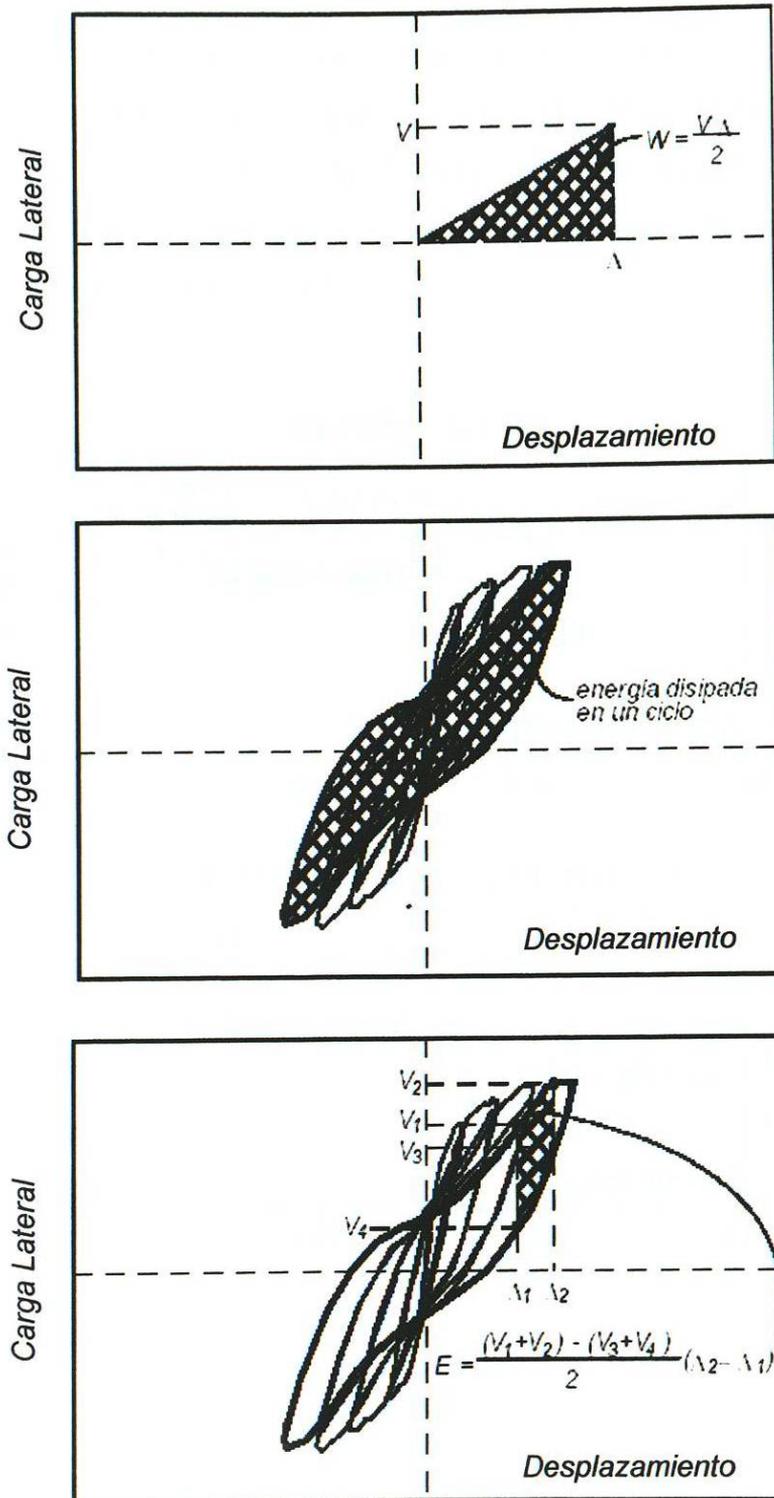


Figura F3.1: Cálculo del Amortiguamiento Viscoso Equivalente (Alcocer, Zepeda y Ojeda, 1997).

El segundo criterio consistió en una igualación de áreas. En este segundo enfoque, primero se fijaron la rigidez secante inicial y la distorsión última, siguiendo las reglas explicadas en el párrafo anterior; posteriormente, se ajustó la ordenada de la recta horizontal del sistema elastoplástico hasta igualar el área bajo la envolvente real con el área bajo la envolvente elastoplástica idealizada. En la figura F3.2 se muestra gráficamente el procedimiento que se siguió para ambos criterios en el muro 421.

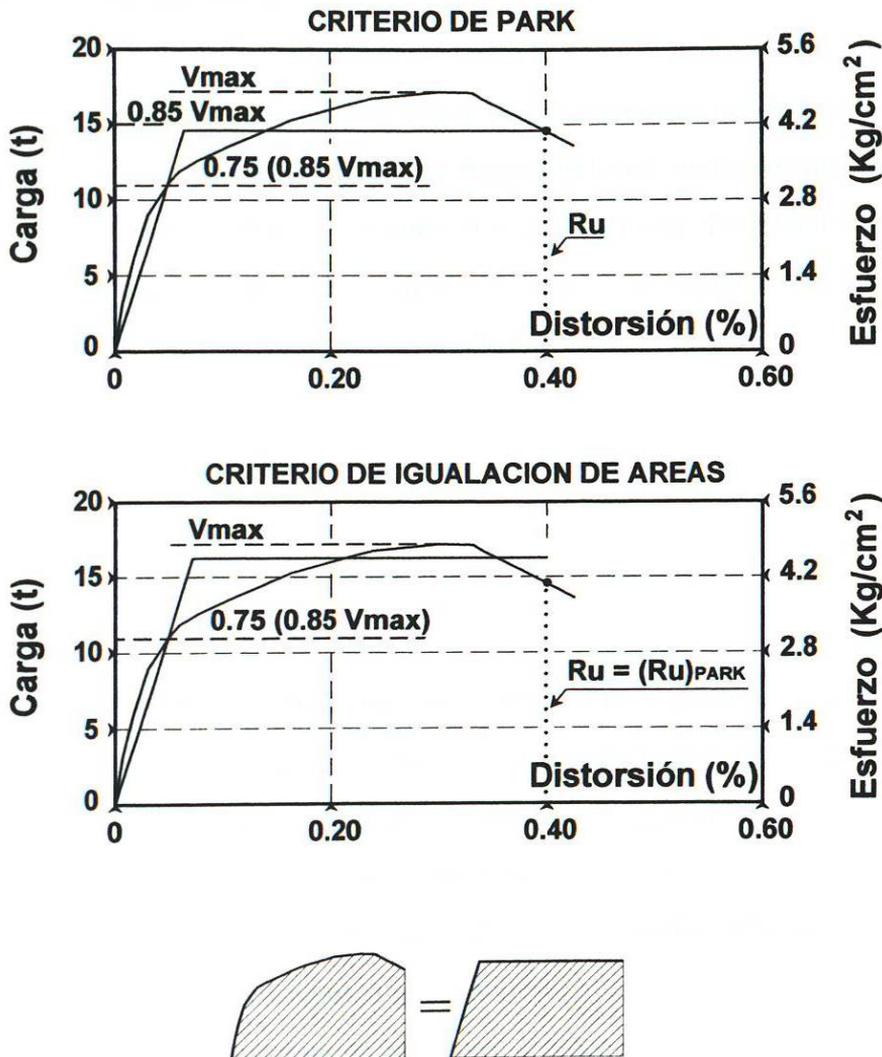


Figura F3.2: Criterios para el cálculo de la capacidad de deformación (Park, 1989).



3.1.5 Procesamiento estadístico. El procesamiento estadístico de los resultados del experimento consistió, primeramente, en:

- a) La obtención de la matriz con las respuestas obtenidas, sus valores medios, la varianza de cada ensayo y la varianza total; y
- b) La comprobación de la homogeneidad de la varianza, según el criterio de Cochran (*Walpole, Myers y Myers, 1999*).

Posteriormente y con el propósito de determinar la influencia que tienen los dos factores en las respuestas estudiadas, se ajustó un modelo de regresión lineal múltiple para cada una de ellas, incluyendo el efecto de la interacción entre los dos factores. Finalmente, se comprobó la significación de los coeficientes de la ecuación de regresión, según la prueba “t” de Student. El modelo utilizado es del tipo (*Montgomery, 2002; López, 1988*):

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 \quad (\text{E3.4})$$

3.2 Modelación analítica.

3.2.1 Justificación de la modelación analítica. La representación matemática del comportamiento de un elemento o de un sistema estructural, de tal forma que al someterlo a un estado de carga en forma numérica se obtenga una respuesta equivalente a la de la estructura real, es de gran utilidad e importancia; tanto para fines de investigación como en la práctica profesional de la ingeniería estructural, en virtud de que: a) posibilita la simulación matemática de ensayos, que resultarían muy costosos o técnicamente imposibles de realizar en el laboratorio y; b) permite someter a una estructura en proyecto, a todos los estados de carga que se juzguen necesarios para su dimensionamiento. No obstante lo anterior, sólo se ha llevado a cabo un número limitado de investigaciones encaminadas al desarrollo de modelos analíticos,



representativos del comportamiento histerético carga lateral–distorsión de muros de mampostería confinada (*Alcocer, 1997*).

Los resultados de la evaluación estadística de las respuestas indican que las variables consideradas en el ensayo no son significativas, por lo tanto se puede justificar el uso de un solo modelo para representar el comportamiento de todos los muros de esta investigación.

3.2.2 Modelo analítico seleccionado.

De los modelos analíticos que se presentaron en el capítulo II de esta tesis, se escogió el modelo de Flores, debido a que ha probado su eficiencia en otras investigaciones. Recientemente fue comprobada su bondad al reproducir satisfactoriamente la respuesta de edificaciones de uno y tres pisos, mediante ensayos en una mesa vibradora de especímenes, a escala reducida, sometidos a sismos reales y artificiales (*Alcocer, Arias y Flores, 2004*).

Para validar estadísticamente su representatividad, se utilizaron tres criterios, al comparar las respuestas experimentales con las obtenidas a partir del modelo analítico; a saber: a) la forma de los lazos histeréticos; b) la degradación de rigidez; y c) la capacidad de disipación de energía.

Respecto a la forma de los lazos histeréticos, se compararon directamente las historias de carga experimental y calculada, puesto que para el modelo se tomó como dato de entrada la misma historia de distorsiones aplicadas experimentalmente. Para comparar la degradación de rigidez se utilizó la rigidez de ciclo o de pico a pico; y para comparar la capacidad de disipación de energía se utilizó la energía disipada acumulada, cuantificada como el área dentro de la curva de histéresis fuerza lateral–distorsión.

A continuación se explicará cómo se realizó la calibración del modelo de Flores con los datos obtenidos en esta investigación.

3.2.3 Envoltente global.

El modelo propuesto por *Flores (1995)* utiliza una envoltente trilineal simétrica con degradación de resistencia en el último tramo, tal como se muestra en la figura F2.22. Esta envoltente limita el desarrollo de los lazos histeréticos de la respuesta de carga lateral-distorsión.

Para aplicar este modelo, se comenzará definiendo una envoltente trilineal idealizada creada de manera que represente, de modo más aproximado posible, las envoltentes del experimento. Los puntos a obtener para la creación de la envoltente se pueden observar en la figura F3.3, a continuación se expondrá como se calcularon dichos puntos para este trabajo.

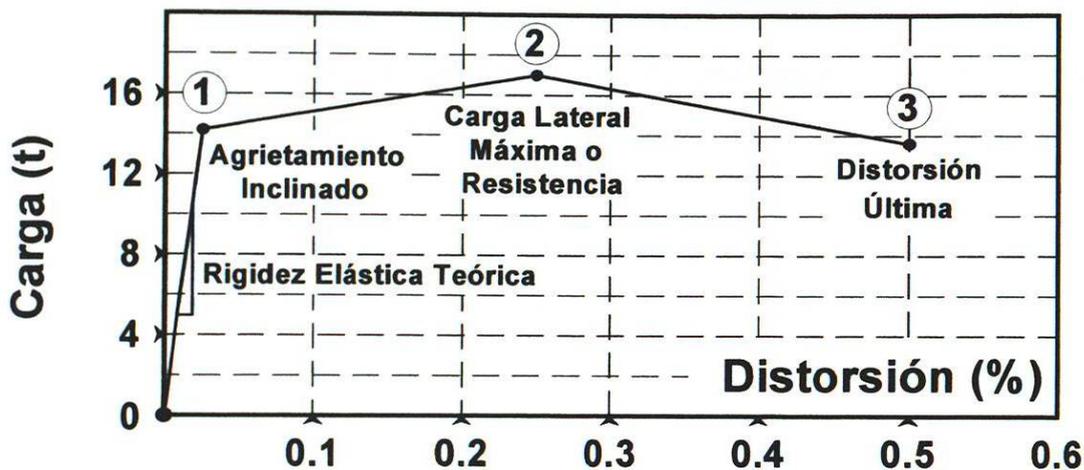


Figura F3.3: Envoltente global propuesta.

Cortante de agrietamiento.

La primera parte de la envoltente idealizada, la cual inicia en el origen y termina en el punto 1 de la figura F3.3, representa el comportamiento elástico lineal del sistema, el cual termina, de manera aproximada, cuando ocurre el primer agrietamiento inclinado. La pendiente de este tramo es la rigidez inicial y depende principalmente de la geometría del muro así como de los materiales utilizados, ya que el agrietamiento, hasta antes del punto 1, es casi nulo, sólo se presentan algunas pequeñas grietas, por flexión, en los castillos.

La coordenada en “y”, de este primer punto, se obtiene con la expresión de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal; pero incrementando de 0.30 a 0.45 el coeficiente que toma en cuenta el efecto de la carga vertical. Aplicando el criterio anterior, la fórmula queda de la siguiente manera:

$$V_{mR} = 0.5v_m^*A_T + 0.45P \leq 1.5v_m^*A_T \quad (\text{E3.5})$$

Haciendo este cambio, la ecuación representa, de la mejor manera, el cortante del agrietamiento inclinado promedio de los 8 especímenes de la presente investigación. Con esta modificación, la fórmula coincide esencialmente con la que fue propuesta recientemente, con objeto de construir funciones de vulnerabilidad para diversos tipos de edificaciones urbanas en México, ante perturbaciones sísmicas y eólicas (*INSTITUTO, 2004*).

Para el cálculo de la abscisa se divide del valor de V_{mR} sobre la rigidez inicial calculada según la ecuación 3.1, tomando un factor de forma igual a 1, luego se divide entre la altura del muro, ya que en el eje de las abscisas se indica la distorsión. Lo antes mencionado se puede expresar de la siguiente manera:

$$\gamma_0 = \frac{V_{mR}}{(K_{inicial})(H)} \quad (\text{E3.6})$$

Cortante máximo o resistencia.

El punto 2 de la envolvente de la figura F3.3 es el valor de carga lateral máxima alcanzada, o resistencia del espécimen. Después del agrietamiento diagonal; la resistencia proviene de la fricción y trabazón mecánica entre las superficies en contacto de las grietas, de la resistencia a cortante del concreto de los castillos y, finalmente, de la acción de pasador de cortante del acero de refuerzo longitudinal de los castillos.

Distorsión última.

El punto 3 de la envolvente de la figura F3.3 corresponde a la distorsión última. Para determinar la ordenada correspondiente a este punto, primero se fijará una degradación de resistencia del 20%, con respecto al cortante definido para el punto 1. A partir de este planteamiento y extrapolando valores se obtiene la distorsión asociada a dicha degradación.

Ajuste de la ley histerética.

Según el modelo de *Flores (1995)*, para reproducir el comportamiento histerético de la carga lateral-distorsión, se inicia el lazo con una línea recta que tiene la pendiente de la rigidez ascendente en el punto en el que empezó el lazo (cierto nivel de distorsión), si la distorsión se sigue incrementando, dicha línea choca con la envolvente trilineal propuesta y sigue su contorno, cuando decrece la distorsión, la línea sigue una trayectoria recta hacia abajo, con pendiente igual a la rigidez de la descarga en ese punto dado. Para el caso de ciclos que lleguen a distorsiones menores que las máximas alcanzadas con anterioridad, el modelo mantiene la misma distorsión, con lo que se obtienen ciclos estables; es decir, sin degradación de rigidez.

Rigidez de las ramas ascendentes y descendentes. La ecuación propuesta por *Flores (1995)*, para la calcular la rigidez ascendente y descendente utilizada para el modelo histerético se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{k}{k_0} = \frac{1}{1 + \alpha R_{\%}^4 + \beta R_{\%}} \quad (\text{E3.7})$$

donde: k es la rigidez de las ramas ascendentes y descendentes, de los lazos histeréticos;

k_0 es la rigidez inicial de la envolvente;

R es la distorsión expresada en (%); y



α , β son coeficientes, que deben determinarse en el proceso de calibración.

3.2.4 Comparación de la respuesta analítica con la experimental.

Para la aplicación del modelo se introdujeron al programa los datos de la envolvente trilineal idealizada, los coeficientes de ajuste de las curvas y, finalmente, los datos de las historias experimentales de distorsión de los 8 especímenes ensayados. Una vez hecho lo anterior, el programa genera los datos para graficar el comportamiento histerético carga lateral-distorsión, así como las historias de carga.

3.2.5 Validación estadística.

Para comprobar la eficiencia de la aplicación del modelo respecto a la forma de los lazos histeréticos, se comparó punto por punto la historia de cargas experimental con la obtenida analíticamente, en cada uno de los muros, calculándose el *coeficiente de determinación múltiple* R^2 del modelo, expresado en porcentaje (*Walpole, Myers y Myers, 1999*).



CAPÍTULO IV

RESULTADOS.

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología descrita en el capítulo anterior, tanto para las respuestas asociadas con el comportamiento histerético como para la modelación analítica.

4.1 Respuestas histeréticas.

4.1.1 Resistencia.

Envolvente. En la figura F4.1 se presentan las envolventes generadas a partir de los lazos histeréticos, éstas se generaron tanto para los semiciclos positivos como para los semiciclos negativos.

En estas envolventes es posible detectar claramente que se observan tres etapas: una primer etapa en la que el comportamiento es sensiblemente lineal, y que termina al ocurrir el primer agrietamiento inclinado; después se presenta una segunda etapa, en la cual se pierde el comportamiento sensiblemente lineal y la carga horizontal resistente aumenta hasta llegar a su punto máximo; finalmente, se presenta una tercer etapa, la que se caracteriza por un decremento en la carga horizontal resistente, hasta llegar a la última distorsión, alcanzada durante la prueba.

En la primer etapa observada, el comportamiento no es exactamente elástico lineal; aún desde el inicio de la pruebas se presenta cierta histéresis, esto se puede atribuir al reacomodo de las piezas, así como a los agrietamientos horizontales por flexión ocurridos en los castillos; sin embargo, el comportamiento es similar a un comportamiento elástico lineal. Cuando ocurre el agrietamiento inclinado, se detecta claramente un cambio brusco en la pendiente de la envolvente; aquí es donde termina esta primera etapa y empieza la segunda.

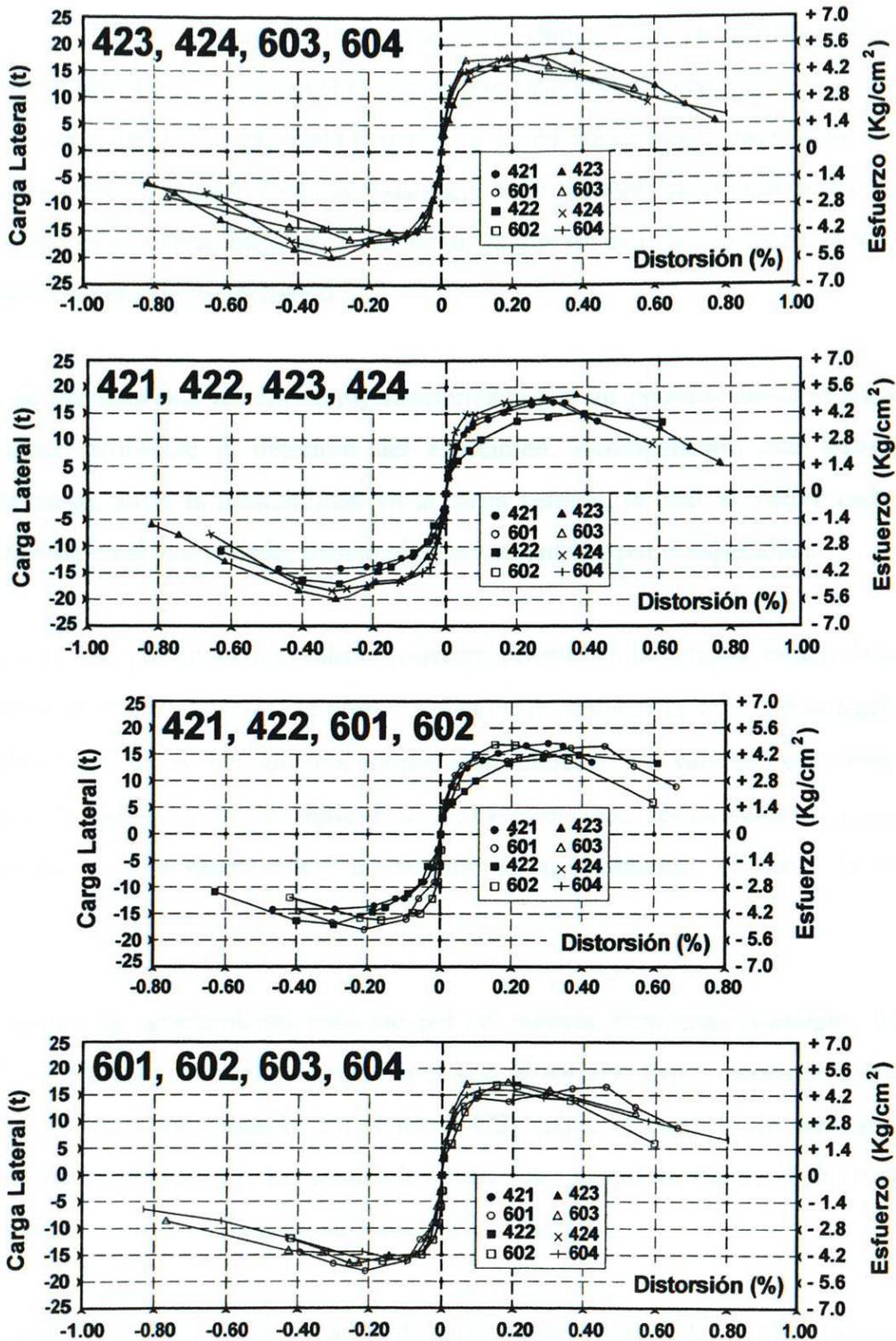


Figura F4.1: Envolventes de respuesta histerética carga lateral-distorsión.



La segunda etapa, como ya se mencionó previamente, empieza con el agrietamiento inclinado, este cambio en la forma de la envolvente es claramente atribuible a dicho evento. En esta etapa se incrementa la capacidad de carga, hasta llegar a un punto máximo. Al incremento de la carga desde el agrietamiento inclinado hasta la resistencia se le llamará “reserva de resistencia”. Esta reserva de resistencia es atribuible al confinamiento; ya que sin éste, la mampostería se colapsaría al suceder dicho agrietamiento inclinado.

Finalmente, se presenta una tercera etapa caracterizada por un decremento de la capacidad de carga horizontal, atribuible al deterioro del espécimen. Acompañando este decremento de capacidad de carga, viene la inestabilidad en la carga vertical, la cual se vuelve cada vez más difícil de mantener en el valor fijado, debido al deterioro sufrido por el espécimen.

En la tabla T4.1, se presentan los valores correspondientes a las etapas características de la respuesta, descritas arriba. Además, se presenta el valor de resistencia V_{NTCM}^* , (**Gallegos, 08**). En la misma tabla T4.1; se ha incluido una comparación entre: a) los valores experimentales y el valor teórico de la fuerza cortante de agrietamiento; b) las distorsiones asociadas a la resistencia y al agrietamiento; y c) la resistencia y el cortante de agrietamiento; es decir, la reserva de resistencia

El cortante teórico de agrietamiento predicho por las normas mexicanas (**Gallegos, 08**) fue de 11.3t (117kN). En todos los muros, excepto en el 422, el cortante experimental de agrietamiento fue mayor que el antes mencionado. En el muro 422, aunque el cortante de agrietamiento fue menor que el teórico, el promedio los semiciclos positivos y negativos fue de 10.7t (105kN), 0.6t (5.88kN) por abajo del teórico (aproximadamente 5% menor).

También se observa que las fuerzas cortantes de agrietamiento registradas durante los ensayos, en los semiciclos positivos y negativos de los ocho muros, fueron en promedio de 14.2 t (139kN); es decir, un 27% mayores que la obtenida, aplicando la referida expresión. Asimismo, en promedio, la resistencia de todos los muros fue de 17.7 (174kN) t, lo cual significó una reserva de



resistencia promedio del 24%. Las resistencias de los muros se alcanzaron en niveles de distorsión que no mostraron un patrón definido. La distorsión promedio, asociada a la resistencia de todos los muros, fue del 0.23%.

Tabla T4.1: Características de la respuesta.

Características de la Respuesta						
Muro	Cortante de Agrietamiento (t)			V agr. Prom	Resistencia Vmáx (t)	Reserva de Resistencia
	Positivo	Negativo	Promedio	V teórico		
421	12.6	13.9	13.3	1.18	17.2	1.29
422	9.8	11.6	10.7	0.95	17.0	1.59
423	13.6	16.2	14.9	1.32	20.0	1.34
424	15.1	16.3	15.7	1.39	18.6	1.18
601	14.4	15.5	15.0	1.33	18.1	1.21
602	17.0	14.0	15.5	1.37	17.0	1.10
603	17.1	11.5	14.3	1.27	17.5	1.22
604	16.1	12.9	14.5	1.28	16.4	1.13
42ED	11.2	12.8	12.0	1.07	17.1	1.42
42EC	14.4	16.3	15.3	1.36	19.3	1.26
60ED	15.7	14.8	15.3	1.35	17.6	1.15
60EC	16.6	12.2	14.4	1.28	17.0	1.18
Promedios	14.5	14.0	14.2	1.27	17.7	1.24
Cortante de Agrietamiento Teórico NTCM Para los Ocho Muros = 11.3 t						

Características de la Respuesta					
Muro	Distorsión al Agrietamiento (R/000)			Distorsión a la Resistencia (R/000)	Dist. A la Resistencia Dist. al Agrietamiento Prom.
	Positivo	Negativo	Promedio		
421	0.752	1.269	1.010	3.06	3.03
422	1.000	1.005	1.002	2.97	2.96
423	0.776	1.200	0.988	3.06	3.10
424	0.744	1.020	0.882	3.15	3.57
601	0.971	0.815	0.893	2.10	2.35
602	1.540	0.666	1.103	1.54	1.40
603	0.698	0.960	0.829	1.85	2.23
604	1.070	0.742	0.906	0.98	1.08
42ED	0.876	1.137	1.006	3.015	3.00
42EC	0.760	1.110	0.935	3.105	3.32
60ED	1.256	0.741	0.998	1.820	1.82
60EC	0.884	0.851	0.868	1.415	1.63
Promedios	0.944	0.960	0.952	2.339	2.46

Nota: 1 kN = 0.102 t

Degradación de resistencia. En la tabla T4.2 se presentan los datos referentes a la degradación de la resistencia. El promedio global de degradación de la resistencia, para ambos semiciclos, a la repetición del ciclo al 0.4% de distorsión, fue del 27.8%. La distorsión última promedio para las ramas positivas de las envolventes es de 0.45, y para las ramas negativas es de 0.41. La distorsión última promedio global es de 0.43.

Tabla T4.2: Degradación de resistencia en ramas positivas y negativas.

DEGRADACIÓN DE RESISTENCIA						
MURO	Cortante Máximo Positivo (t)	Cortante Máximo Negativo (t)	Cortante Positivo Repetición 0.4% (t)	Cortante Negativo Repetición 0.4% (t)	Degradación Positiva	Degradación Negativa
421	17.2	14.3	13.6	11.3	21%	21%
422	14.9	17.0	13.2	14.5	12%	15%
423	18.7	20.0	15.1	15.4	19%	23%
424	17.9	18.6	12.8	12.1	29%	35%
601	15.2	18.1	10.0	13.3	34%	27%
602	17.0	16.3	9.8	9.4	42%	42%
603	17.5	16.7	14.0	10.4	20%	38%
604	16.1	16.4	11.1	10.6	31%	36%
PROMEDIOS						
42ED	16.06	15.66	13.40	12.90	17%	18%
42EC	18.28	19.29	13.94	13.76	24%	29%
60ED	16.12	17.23	9.91	11.35	38%	35%
60EC	16.78	16.55	12.53	10.47	25%	37%

Nota: 1 kN = 0.102 t

4.1.2 Rigidez.

Si en la ecuación 3.1 se sustituyen los valores indicados y si se considera un factor de forma igual a la unidad, como sugiere *Meli (1979)*; la rigidez elástica teórica resulta ser de 218 t/cm (2,138k N/cm), para los especímenes reforzados con acero de grado 42, y de 210 t/cm (2,059 kN/cm) para los reforzados con acero de grado 60. Si se calcula el factor de forma para la sección transformada a mampostería equivalente, se obtiene un valor de 1.69. Al considerar este valor en la expresión 3.1, la rigidez elástica teórica resulta ser de 163 t/cm (1,599 kN/cm), para los especímenes reforzados con acero de grado 42, y de 157 t/cm (1,540 kN/cm) para los reforzados con acero de grado 60.

En la tabla T4.3 se presenta una comparación de la rigidez teórica, calculada como se definió previamente, utilizando un factor de forma de 1, con la rigidez experimental del primer ciclo de cada uno de los 8 especímenes ensayados. Se observa, en general, que las diferencias entre los valores teóricos y los experimentales son mínimas, de manera que el uso de ecuación descrita con un factor de forma de 1 es apropiada para predecir la rigidez inicial del sistema.

Tabla T4.3: Comparación de la rigidez experimental del primer ciclo con rigidez elástica teórica (Ec. 3.1: $F = 1.0$).

Relación de Rigidez Teórica con Rigidez Experimental				
MURO	Rigidez Experimental Primer Ciclo		Rigidez Teórica	Rig. Exp.
	t (cm/cm)	t/cm	t/cm	Rig. Teórica
421	428.0	175.4	218	0.80
422	294.4	120.7	218	0.55
423	487.0	199.6	218	0.92
424	580.2	237.8	218	1.09
601	525.8	215.5	210	1.03
602	525.8	215.5	210	1.03
603	709.0	290.6	210	1.38
604	470.2	192.7	210	0.92
Promedios	502.5	206.0		0.97

Nota: 1 kN = 0.102 t

En la tabla T4.4 se presenta las rigideces secantes asociadas al agrietamiento inclinado, tanto para semiciclos positivos como para semiciclos negativos. También se presentan las rigideces al primer agrietamiento inclinado, para su cálculo no se utilizó el promedio directo de las rigideces individuales en las ramas positivas y negativas, se calculó dividiendo los el promedio de los cortantes al agrietamiento entre el promedio de las distorsiones asociadas con dicho cortante.

Rigidez de ciclo. En la figura F4.2 se presentan las gráficas de la rigidez pico a pico de los 8 muros. Como puede apreciarse, las curvas de degradación de la rigidez de los ocho especímenes son muy semejantes, de forma aproximadamente parabólica.

Tabla T4.4: Rigidez secante de las envolventes, al primer agrietamiento.

MURO	Rigidez al Primer Agrietamiento		Vagr / Ragr	
	Rama Positiva	Rama Negativa	Promedio	
	t/cm	t/cm	t/cm	t (cm/cm)
421	68.7	44.9	54.0	131.8
422	40.2	47.3	43.7	106.6
423	72.0	55.4	61.8	150.8
424	83.1	65.5	72.9	177.9
601	60.8	77.9	68.8	167.9
602	45.2	86.1	57.6	140.5
603	100.4	49.1	70.7	172.5
604	61.5	71.3	65.6	160.1
Promedios	66.5	62.2	61.9	151.0

Rigidez de la rama positiva: Cociente de la fuerza cortante de agrietamiento en la dirección positiva, entre la distorsión asociada.

Rigidez de la rama negativa: Cociente de la fuerza cortante de agrietamiento en la dirección negativa, entre la distorsión asociada.

Rigidez promedio: Cociente del promedio de las fuerzas cortantes de agrietamiento en las direcciones positiva y negativa, entre el promedio de las distorsiones asociadas a cada una de ellas.

Nota: 1 kN = 0.102 t

La rigidez promedio a una distorsión del 0.1% fue de $125 \frac{t}{cm/cm} \left(1.226 \frac{kN}{cm/cm} \right)$. La mayor pérdida de rigidez sucedió durante los primeros ciclos, pues al alcanzar una distorsión del 0.2% ya se había perdido aproximadamente un 85% de la rigidez inicial. A partir de este punto, el comportamiento de la degradación de la rigidez es sensiblemente lineal, hasta el final de la prueba.

En la etapa controlada por la carga, la disminución de la rigidez ocurrió debido al reacomodo de las piezas de la mampostería y al agrietamiento por flexión de los castillos. De las tablas T4.3 y T4.4 es posible decir que la rigidez secante al agrietamiento es un 70% menor que la rigidez pico a pico del primer ciclo.

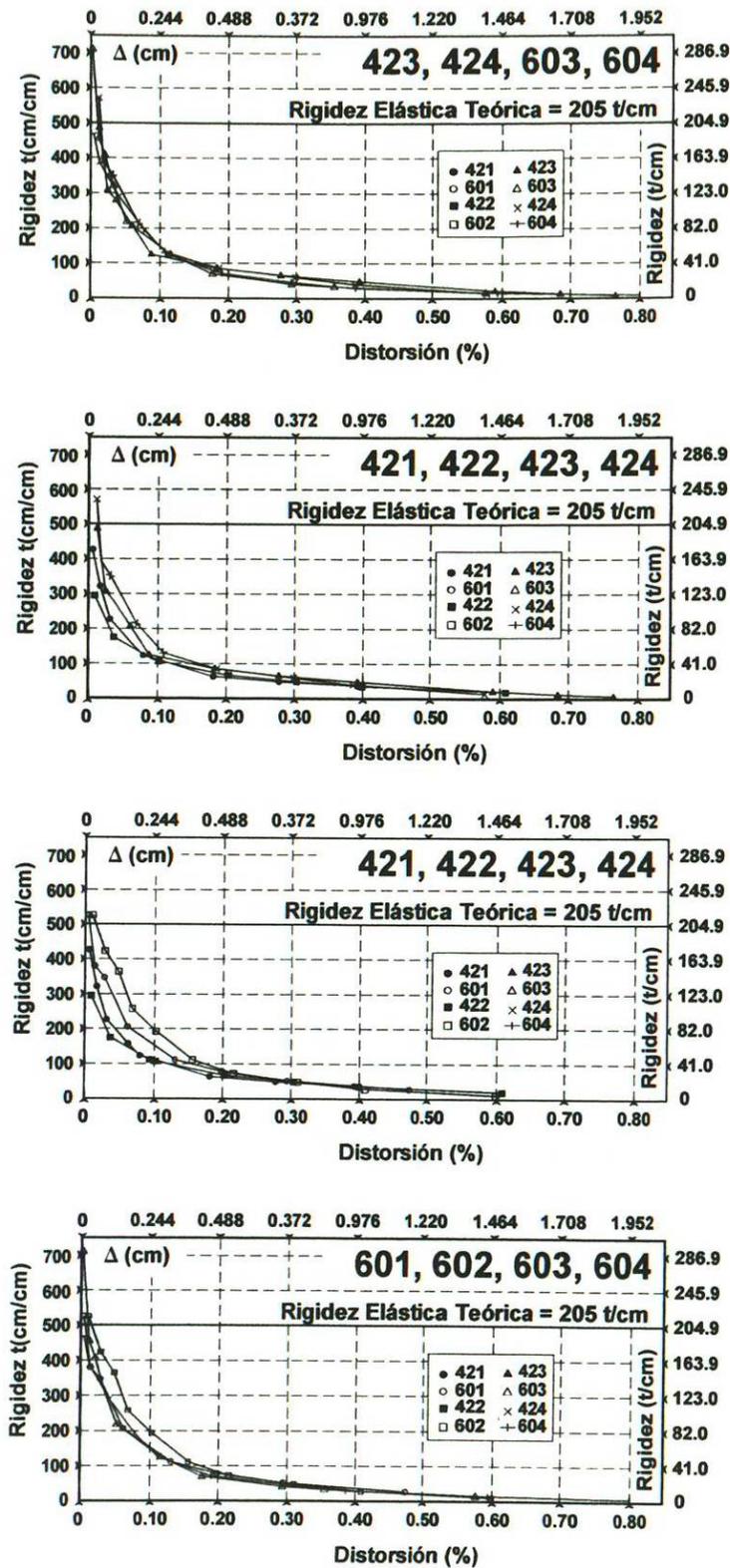


Figura F4.2: Degradación de rigidez de ciclo.

En la etapa controlada por la distorsión, en los pares de ciclos, el segundo tuvo una menor rigidez, pico a pico, que el primero. Esto es atribuible al deterioro sufrido por el muro en el primer ciclo de ese par, el cual es producto de un aumento en la cantidad de grietas, así como en el tamaño de las mismas. Aún así, el comportamiento de los ciclos impares fue muy similar a los de los ciclos pares.

Rigidez equivalente. En la figura F4.3 se muestran algunas gráficas comparativas de las rigideces equivalentes contra la distorsión, tanto para los semiciclos positivos como para los semiciclos negativos. Las distorsiones y las rigideces para generar estas graficas se calcularon utilizando el promedio de los valores de un par de ciclos consecutivos, ya sea con misma carga o con misma distorsión (ciclo y réplica).

El comportamiento de la rigidez equivalente es muy similar al comportamiento de la rigidez pico a pico, donde la tendencia de degradación es muy parecida. En la tabla T4.5 se muestran los valores de la degradación de rigidez equivalente para cada espécimen, y para cada par de muros idénticos.

Tabla T4.5: Degradación de rigidez equivalente.

MURO	RIGIDEZ EQUIVALENTE PRIMER CICLO t (cm/cm)		RIGIDEZ EQUIVALENTE A LA REPETICIÓN DE 0.4% DISTORSIÓN t (cm/cm)		DEGRADACIÓN DE RIGIDEZ EQUIVALENTE A LA REPETICIÓN DE 0.4% DISTORSIÓN (%)	
	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
421	467	311	10	16	97.9	94.9
422	350	177	23	32	93.4	81.9
423	232	305	25	29	89.2	90.5
424	624	641	19	18	97.0	97.2
601	601	362	19	24	96.8	93.4
602	325	581	11	10	96.6	98.3
603	463	241	19	16	95.9	93.4
604	438	258	17	16	96.1	93.8
42ED	408	244	16.5	24.0	95.7	88.4
42EC	428	473	22.0	23.5	93.1	93.9
60ED	463	471	15.0	17.0	96.7	95.9
60EC	450	249	18.0	16.0	96.0	93.6

Nota: 1 kN = 0.102 t

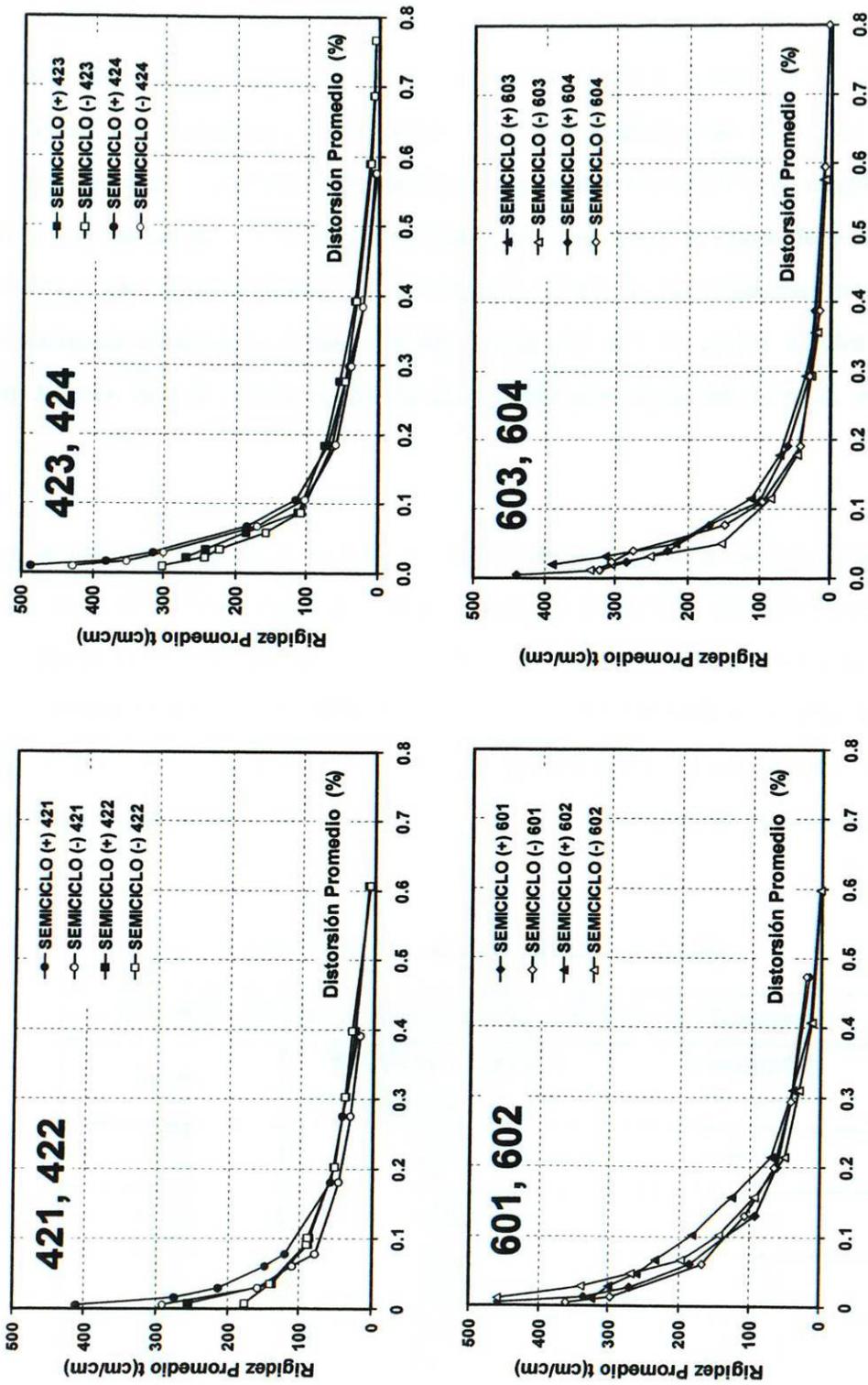


Figura F4.3: Degradación de rigidez equivalente.

4.1.3 Disipación de energía.

Energía disipada. En la figura F4.4 se presentan comparaciones de la energía disipada acumulada entre los especímenes ensayados. En estas gráficas, en el eje de las abscisas se muestran los valores de la distorsión promedio de los semiciclos positivos y negativos de pares de ciclos con la misma carga o la misma distorsión. (misma carga en etapa de control por carga y misma distorsión en etapa de control por distorsión). El eje de las ordenadas muestra el valor de la energía disipada acumulada hasta el primer ciclo del par de ciclos iguales. Las curvas se obtuvieron de los valores promediados de muros idénticos (con las mismas características de refuerzo).

Así mismo, se presenta la tabla T4.6 con los valores numéricos de la energía disipada acumulada al 0.45% de distorsión. La energía disipada acumulada desarrolla una tendencia parabólica. El incremento paulatino en la disipación de energía de cada lazo se atribuyó directamente a la aparición de agrietamiento en los tableros, a la fricción desarrollada a lo largo de las grietas, al corrimiento relativo de los bloques de concreto, al aplastamiento de las paredes de las unidades y a la penetración de las grietas en los castillos; todo ello, acompañado de incursiones al régimen inelástico.

Tabla T4.6: Energía disipada acumulada.

Energía Disipada Acumulada, a 0.45% de Distorsión		
MURO	ENERGÍA DISIPADA ACUMULADA (t · cm)	PROMEDIO (t · cm)
421	67.24	61.79
422	56.34	
423	74.40	84.90
424	95.39	
601	72.68	74.33
602	75.97	
603	75.35	80.74
604	86.12	

Nota: 1 kN = 0.102 t

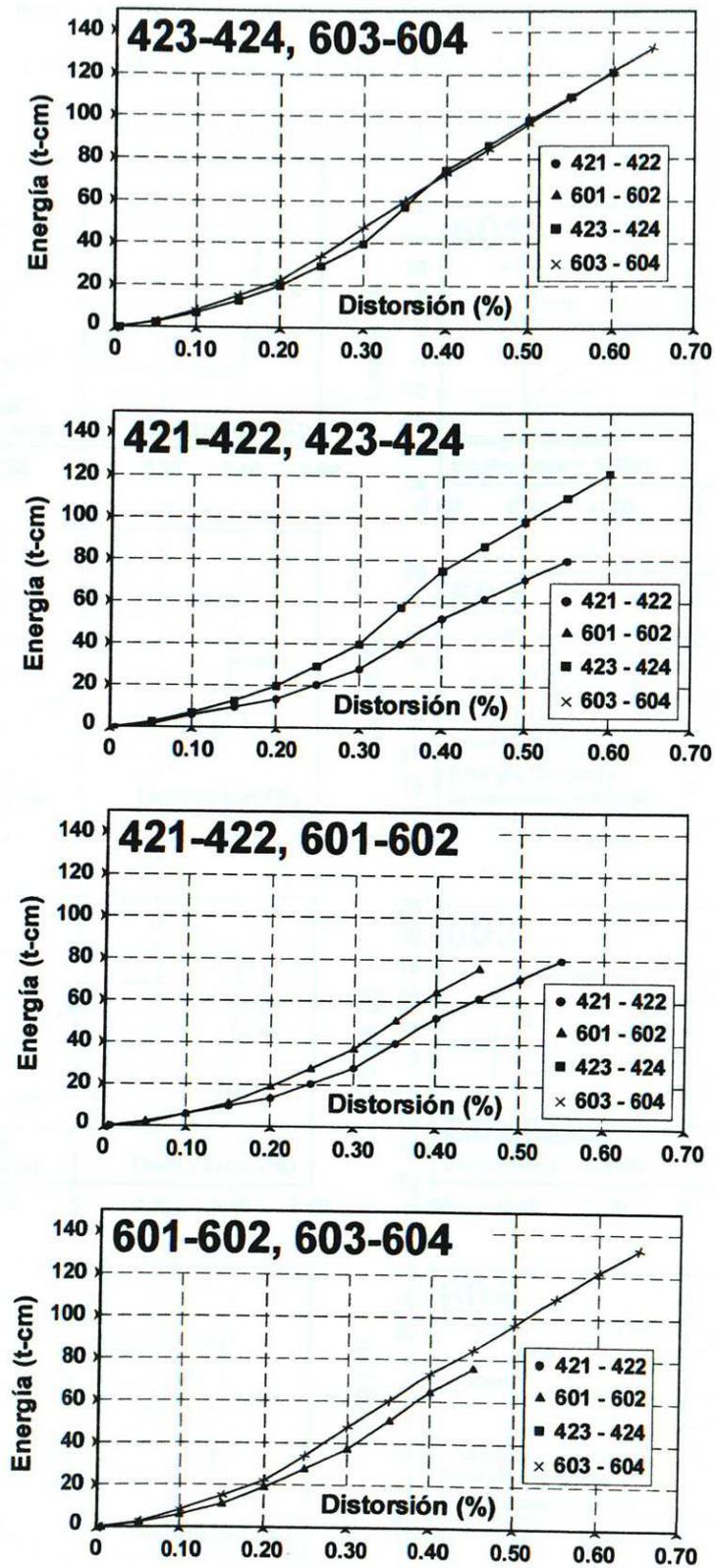


Figura F4.4: Energía disipada acumulada.

Energía disipada equivalente. Los valores de este parámetro, calculados en la réplica del ciclo del 0.4% de distorsión, se presentan en la tabla T4.7. Además, en la figura F4.5 se presentan las gráficas utilizadas para el cálculo de dicha energía en cada muro.

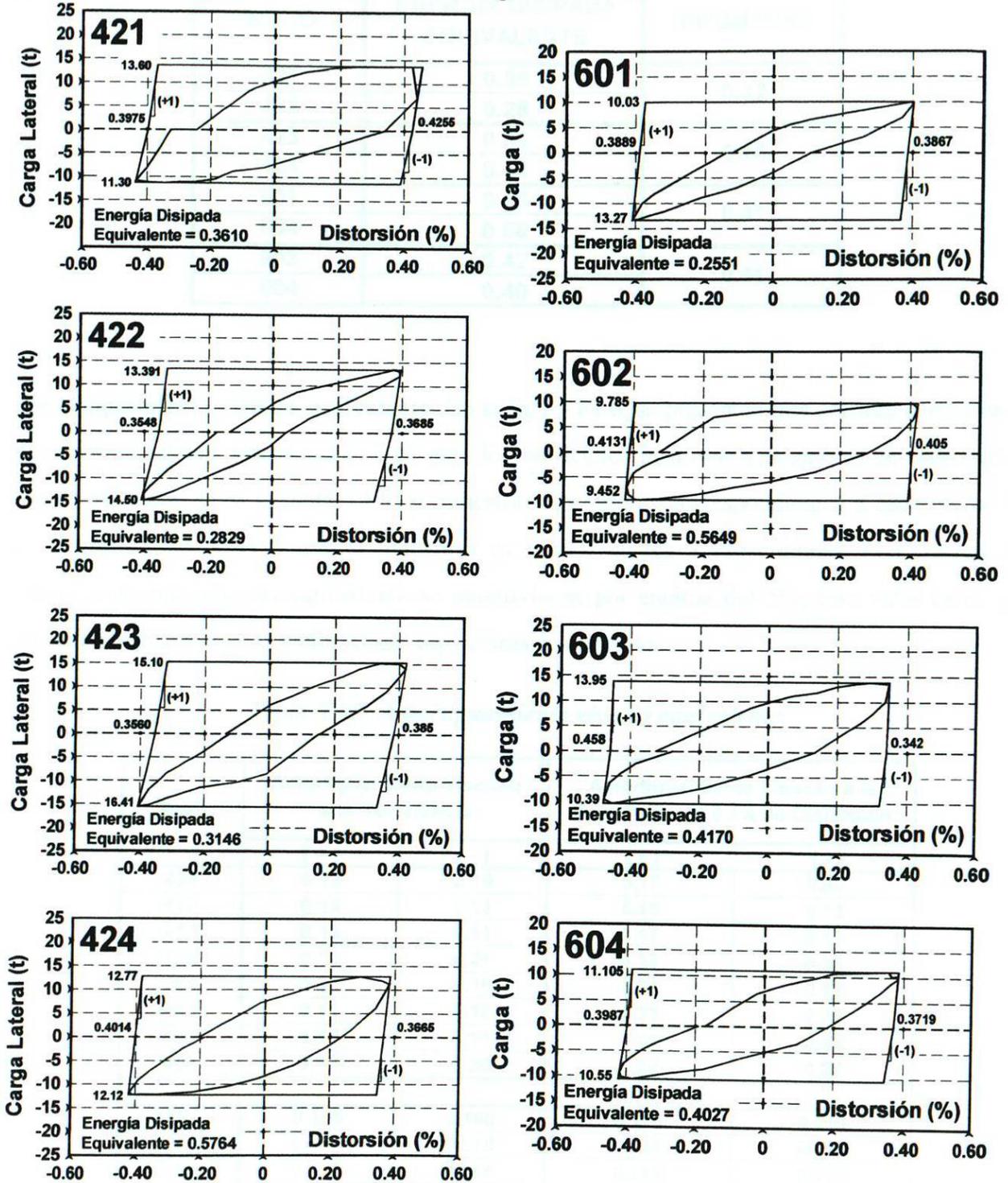


Figura F4.5: Energía disipada equivalente.

Tabla T4.7: Energía disipada equivalente.

Energía Disipada Equivalente		
MURO	ENERGÍA DISIPADA EQUIVALENTE	PROMEDIO
421	0.36	0.32
422	0.28	
423	0.31	0.45
424	0.58	
601	0.26	0.41
602	0.56	
603	0.42	0.41
604	0.40	

Amortiguamiento viscoso equivalente. En la figura F4.6, se presentan tres gráficas comparando el amortiguamiento viscoso calculado para los semiciclos positivos y negativos de cada par de muros idénticos, y en la tabla T4.8, se muestran los valores correspondientes a cada muro. En estas gráficas se observa que la tendencia es similar en los 8 especímenes. Los valores del amortiguamiento viscoso equivalente se mantuvieron por encima del 5%, este valor es el que normalmente se usa en el análisis para estructuras de concreto.

Tabla T4.8: Amortiguamiento viscoso equivalente.

Muro	Amortiguamiento Viscoso a la Resistencia		Amortiguamiento Viscoso a la Repetición de 0.4% de Distorsión	
	(+)	(-)	(+)	(-)
421	0.19	0.19	0.17	0.30
422	0.14	0.13	0.18	0.12
423	0.13	0.13	0.17	0.17
424	0.18	0.21	0.28	0.28
601	0.12	0.15	0.21	0.27
602	0.11	0.18	0.22	0.29
603	0.15	0.14	0.24	0.24
604	0.16	0.20	0.22	0.27
42ED	0.165	0.160	0.175	0.210
42EC	0.155	0.170	0.225	0.225
60ED	0.115	0.165	0.215	0.280
60EC	0.155	0.170	0.230	0.255

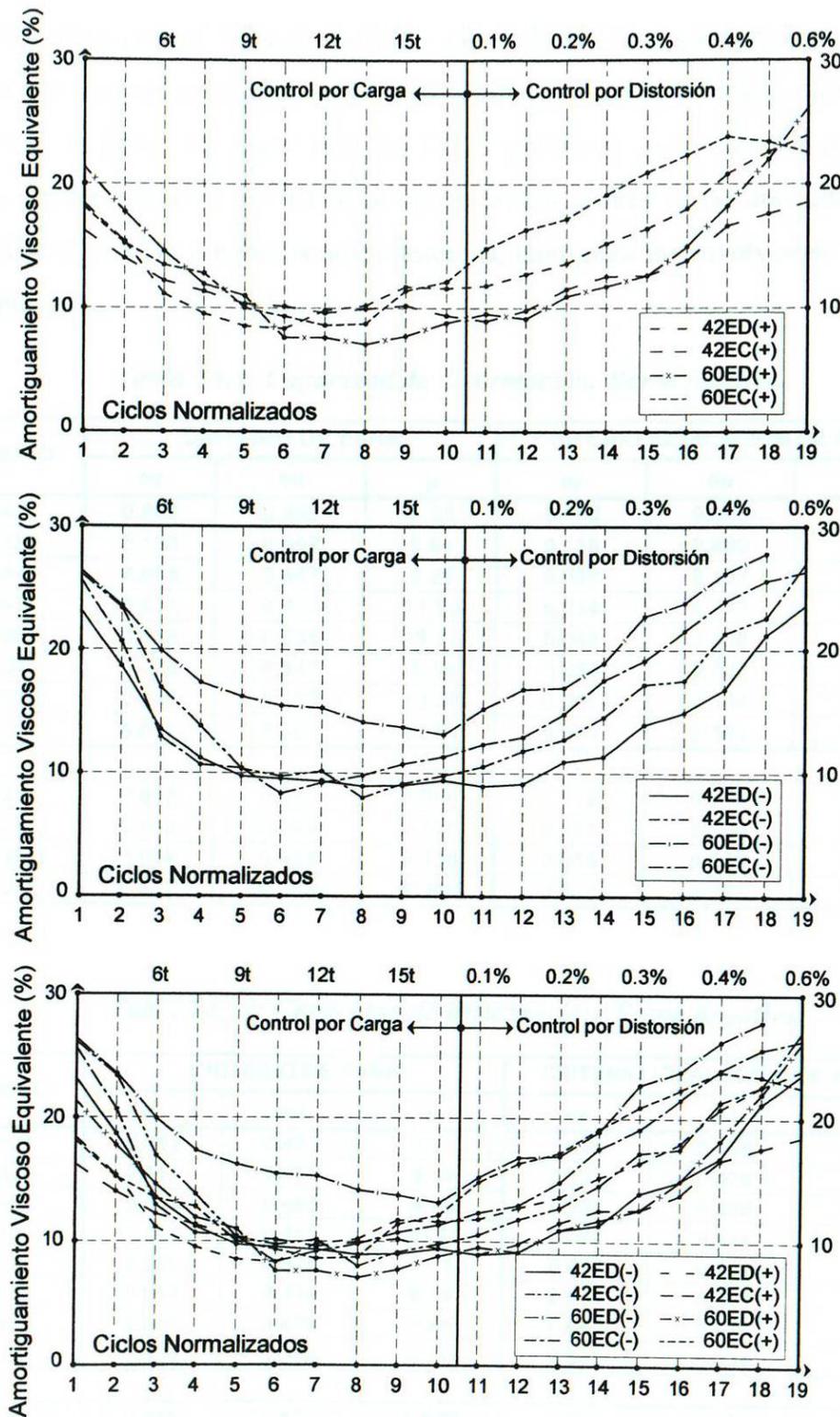


Figura F4.6: Comparativas de amortiguamiento viscoso equivalente.

4.1.4 Ductilidad. En general, los valores de la capacidad de deformación obtenidos con el criterio de igualación de energías resultaron, en promedio, alrededor del 10% menores que los obtenidos con el criterio de Park; esto tanto para las ramas positivas, como para las negativas de las envolventes. En las tablas T4.9 y T4.10 se presentan los valores de las ductilidades calculadas para los 8 muros, con los 2 criterios antes descritos, tanto para las envolventes positivas como para las negativas.

Tabla T4.9: Capacidad de deformación. Rama positiva.

MURO	CRITERIO DE PARK			CRITERIO IGUALACION DE AREAS		
	ey	eu	μ	ey	eu	μ
421	0.063	0.400	6.31	0.068	0.400	5.87
422	0.123	0.692	5.61	0.136	0.692	5.08
423	0.075	0.467	6.26	0.080	0.467	5.82
424	0.031	0.373	11.98	0.034	0.373	10.97
601	0.039	0.538	13.77	0.044	0.538	12.35
602	0.076	0.341	4.49	0.084	0.340	4.04
603	0.036	0.380	10.59	0.041	0.380	9.35
604	0.037	0.389	10.61	0.046	0.389	8.52
Medias						
42ED	0.093	0.546	5.960	0.102	0.546	5.475
42EC	0.053	0.420	9.120	0.057	0.420	8.395
60ED	0.058	0.439	9.130	0.064	0.439	8.195
60EC	0.037	0.385	10.600	0.043	0.385	8.935

Tabla T4.10: Capacidad de deformación. Rama negativa.

MURO	CRITERIO DE PARK			CRITERIO IGUALACION DE AREAS		
	ey	eu	μ	ey	eu	μ
421	0.062	0.465	7.51	0.070	0.465	6.66
422	0.111	0.479	4.33	0.121	0.479	3.97
423	0.081	0.465	5.73	0.087	0.465	5.33
424	0.042	0.451	10.64	0.046	0.451	9.71
601	0.080	0.328	4.11	0.088	0.328	3.75
602	0.053	0.324	6.16	0.063	0.324	5.19
603	0.044	0.429	9.85	0.047	0.429	9.08
604	0.035	0.338	9.70	0.037	0.338	9.03
Medias						
42ED	0.086	0.472	5.920	0.095	0.472	5.315
42EC	0.062	0.458	8.185	0.067	0.458	7.520
60ED	0.066	0.326	5.135	0.075	0.326	4.470
60EC	0.039	0.383	9.775	0.042	0.383	9.055

4.1.5 Procesamiento Estadístico. En la tabla T4.11, se muestra un resumen de los valores de las diferentes variables de respuesta, para los ocho especímenes ensayados. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla T4.12, para el factor X1 (Tipo de Armado Longitudinal) y en la tabla T4.13 para el factor X2 (Distribución de Cercos o Estribos). Después de examinarlos, puede concluirse que, para todas las respuestas, las variables independientes consideradas; es decir, el tipo de refuerzo longitudinal y la distribución de estribos en los castillos, no son significativas, en un 95 % de confianza, lo que indica que no hay una relación fuerte entre las mismas.

Tabla T4.11: Resumen de variables de respuesta experimentales.

ESPÉ- CIMEN	DENOMI- NACIÓN	FACTOR		VARIABLES DE RESPUESTA					
		X1	X2	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
1	421	-1	-1	13.3	17.2	29	79	79	175.4
2	601	1	-1	15.0	18.1	21	66	73	215.5
3	423	-1	1	14.9	20.0	34	81	77	199.6
4	603	1	1	14.3	17.5	22	80	62	290.6
5	422	-1	-1	10.7	17.0	59	88	85	120.7
6	602	1	-1	15.5	17.0	10	58	58	215.5
7	424	-1	1	15.7	18.6	18	71	65	237.8
8	604	1	1	14.5	16.4	13	69	64	192.7
	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11	Y12	Y13	Y14	Y15
1	4.7	54.0	467	311	2.1	5.1	67.24	0.36	0.19
2	5.4	68.8	601	362	3.2	6.6	72.68	0.26	0.12
3	7.3	61.8	232	305	10.8	9.5	74.40	0.31	0.13
4	4.0	70.7	463	241	4.1	6.6	75.35	0.42	0.15
5	11.3	43.7	350	177	6.6	18.1	56.34	0.28	0.14
6	3.5	57.6	325	581	3.4	1.7	75.97	0.56	0.11
7	5.0	72.9	624	641	3.0	2.8	95.39	0.58	0.18
8	5.0	65.6	438	258	3.9	6.2	86.12	0.40	0.16
	Y16	Y17	Y18	Y19	Y20	Y21	Y22	Y23	Y24
1	0.19	0.17	0.30	6.31	5.87	7.51	6.66	3.58	3.40
2	0.15	0.21	0.27	13.77	12.35	4.11	3.75	4.11	3.89
3	0.13	0.17	0.17	6.26	5.82	5.73	5.33	3.32	3.19
4	0.14	0.24	0.24	10.59	9.35	9.85	9.08	4.41	4.17
5	0.13	0.18	0.12	5.61	5.08	4.33	3.97	2.99	2.84
6	0.18	0.22	0.29	4.49	4.04	6.16	5.19	3.11	2.87
7	0.21	0.28	0.28	11.98	10.97	10.64	9.71	4.65	4.44
8	0.20	0.22	0.27	10.61	8.52	9.70	9.03	4.39	4.07

En consecuencia, puede afirmarse que las diferencias observadas entre las respuestas no son significativas para los niveles considerados, de manera que los resultados que se obtienen al



colocar refuerzo longitudinal “convencional”, de grado 42, no son significativamente diferentes que los que se obtienen colocando armazones electro-soldadas de grado 60. De igual forma, los resultados que se obtienen con distribución uniforme de estribos en los castillos, no difieren significativamente de los obtenidos para estribos concentrados en sus extremos, al nivel de confianza considerado.

Tabla T4.12: Resultados del procesamiento estadístico de las respuestas experimentales.

Factor X1: Tipo de armado longitudinal.

VARIABLE DE RESPUESTA	HOMOGENEIDAD DE LA VARIANZA	FACTOR X1: TIPO DE ARMADO		
	G calculado	COEFICIENTE	t	p
Y1	0.8791	0.588	1.69	0.17
Y2	0.4434	-0.475	-1.81	0.15
Y3	0.6627	-9.250	-2.01	0.12
Y4	0.3306	-5.750	-2.40	0.07
Y5	0.5501	-6.125	-2.42	0.07
Y6	0.6829	22.650	1.53	0.20
Y7	0.8148	-1.300	-1.42	0.23
Y8	0.3295	3.788	1.55	0.20
Y9	0.6294	19.250	0.31	0.77
Y10	0.6303	1.000	0.02	0.99
Y11	0.7495	-0.988	-0.88	0.43
Y12	0.7099	-1.800	-0.93	0.40
Y13	0.6421	2.113	0.65	0.55
Y14	0.5303	0.014	0.27	0.80
Y15	0.4808	-0.013	-1.39	0.24
Y16	0.4414	0.001	0.08	0.94
Y17	0.9528	0.011	0.80	0.47
Y18	0.7074	0.025	0.93	0.40
Y19	0.7217	1.165	0.85	0.44
Y20	0.7127	0.815	0.66	0.54
Y21	0.6271	0.201	0.26	0.81
Y22	0.6732	0.173	0.26	0.81
Y23	0.5674	0.185	0.84	0.45
Y24	0.5339	0.141	0.66	0.55



4.2 Modelación analítica.

4.2.1 Envolvente global.

Cortante de agrietamiento. Aplicando la fórmula E3.5, el valor de la ordenada de el punto 1 de la figura F3.11, el cual corresponde al cortante de agrietamiento, es 14.2 t (139 kN), este valor coincide con el promedio de los cortantes asociados con el primer agrietamiento inclinado de los 8 especímenes.

Cortante máximo o resistencia. En este proyecto, la falla del sistema se dio por aplastamiento de las piezas de mampostería y por desprendimiento de sus paredes, debido a la compresión diagonal. Esto sucedió antes de que la grieta inclinada cortara las esquinas de los castillos.

A la fecha, no se cuenta con información de cómo calcular teóricamente el valor del cortante a la resistencia, cuando se tiene el tipo de falla que ocurrió en este sistema (*Alcocer, 2005*); por tanto, se propone que este valor se tome con el criterio conservador de asignar un 20% de reserva de resistencia. Aplicando el criterio antes mencionado se obtiene un valor de 17 t (167 kN) para la coordenada en “y” del punto 2, este valor es muy parecido al promedio de los cortantes a la resistencia del experimento, para la coordenada en “x” se propone un valor fijo del 0.25% de la distorsión, valor que es cercano también al promedio de los valores de distorsión asociados con la resistencia del experimento.

Distorsión última. El cortante asociado con la distorsión última es de 13.6 t (133 kN), a partir de las tablas T4.9 y T4.10 (estos valores corresponden a un 15% de degradación de resistencia). Es posible deducir que para un 20% de degradación de la resistencia se tendría una distorsión aproximada del 0.5%.

En la figura F4.7, se presentan las envolventes experimentales de las ramas positivas y negativas de los ocho especímenes, superpuestas con la envolvente global propuesta, obtenida como se

explicó en el capítulo anterior. En esta figura se puede observar la similitud de la envolvente trilineal propuesta, con las envolventes reales obtenidas en el experimento.

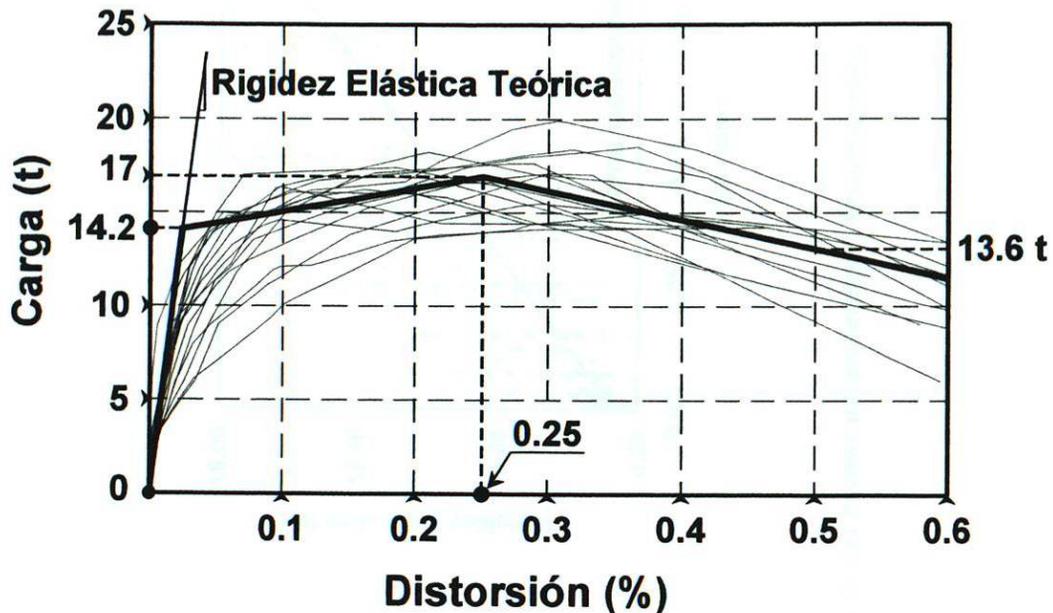


Figura F4.7: Superposición de envolventes experimentales con la propuesta.

Rigidez de las ramas ascendentes y descendentes. En las gráficas de la figura F4.8, se muestran puntos cuyas ordenadas representan el inverso de las rigideces de las ramas ascendentes y descendentes, normalizadas con respecto a la rigidez inicial y la abscisa representa la distorsión máxima alcanzada en el semiciclo anterior. En las mismas gráficas, se presentan las curvas continuas que fueron calibradas examinando las curvas histeréticas calculadas con ellas, en un proceso iterativo.

En la grafica F4.8 se observa que las curvas ajustadas se alejan un poco de los puntos al final de las mismas; sin embargo, los resultados obtenidos de la aplicación del modelo son satisfactorios.

Los valores de α y β que resultaron de este proceso iterativo son:

Para la rama ascendente: $\alpha = 160$ y $\beta = 20$

Para la rama descendente: $\alpha = 1$ y $\beta = 20$

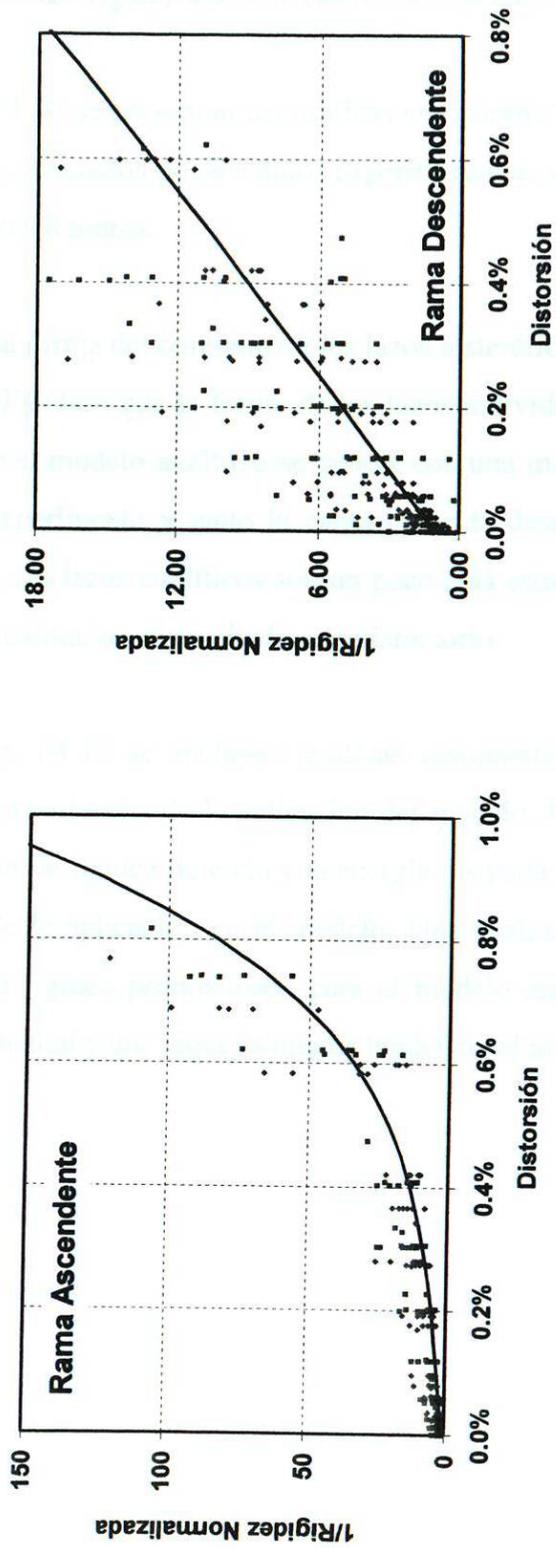


Figura F4.8: Ajuste de rigideces experimentales de las ramas ascendentes y descendentes.

4.2.2 Comparación de la respuesta analítica con la experimental.

En las figuras F4.9 y F4.10 se presentan las gráficas comparativas de los lazos histeréticos de la carga lateral-distorsión, generados por los datos experimentales, y los generados por los datos del modelo analítico, para los 8 muros.

Se puede apreciar que la forma del conjunto de los lazos histeréticos analíticos es muy similar a la de los experimentales. Es claro que la forma de los lazos individuales tiene cierta diferencia con los lazos reales, ya que el modelo analítico se genera con una menor cantidad de puntos que los obtenidos durante el experimento y tanto la carga como la descarga son líneas rectas. Por las razones antes descritas, los lazos analíticos son un poco más estrechos que los experimentales y, aún así, en un análisis cualitativo, el resultado es satisfactorio.

En las figuras F4.11 y F4.12 se incluyen gráficas comparativas, de las historias de carga experimentales, con las resultantes de la aplicación del modelo. En las figuras F4.13 a F4.16, se comparan la degradación de rigidez de ciclo y la energía disipada acumulada experimentales, con las obtenidas a partir de la aplicación en el modelo. Una evaluación cualitativa de las gráficas anteriores indica que la rigidez pronosticada para el modelo analítico es del mismo orden de magnitud que la experimental y que sigue la misma tendencia al aumentar la distorsión.

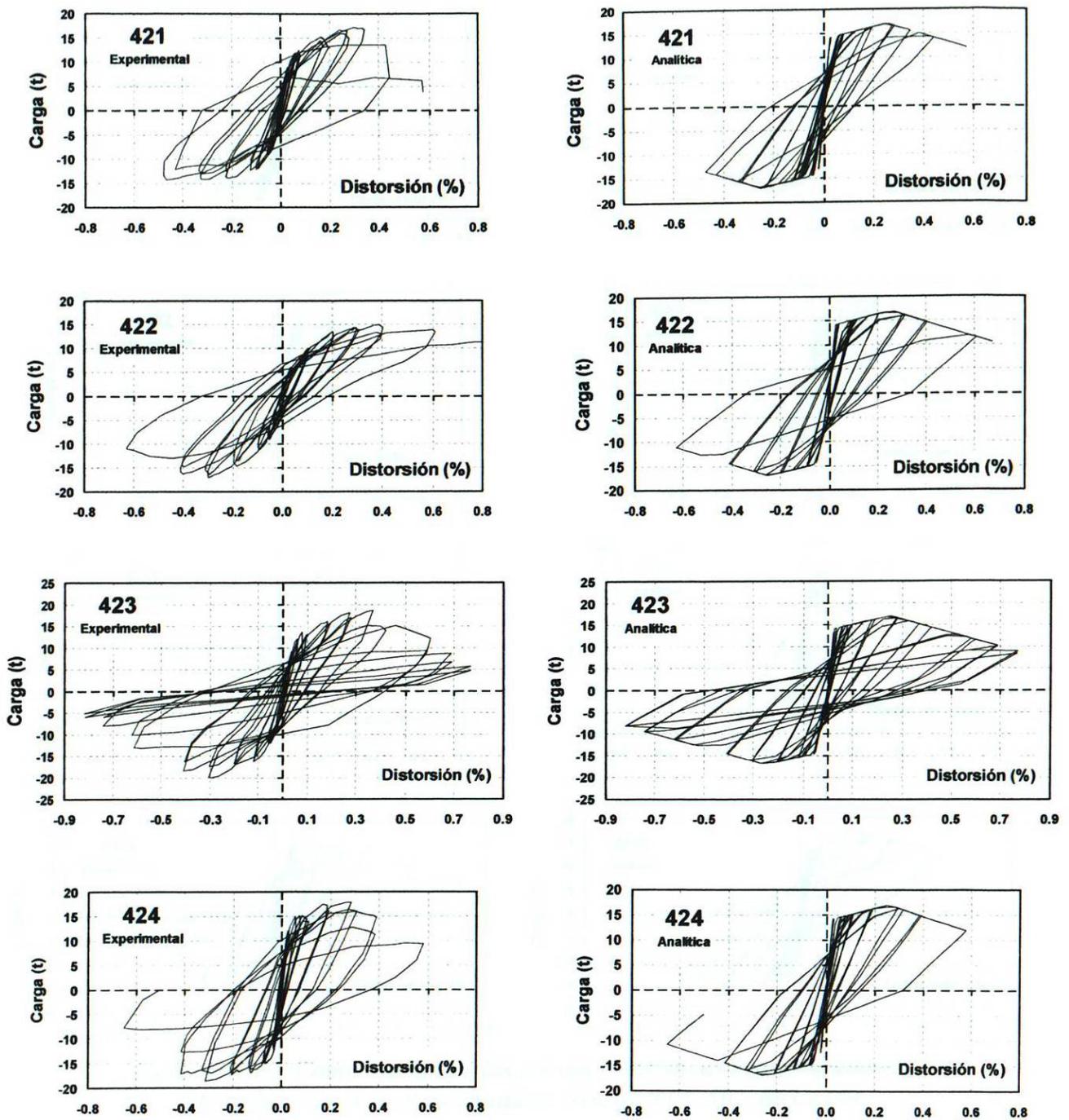


Figura F4.9: Comparación de las curvas histeréticas experimentales y calculadas con el modelo analítico. Muros: 421, 422, 423 y 424.

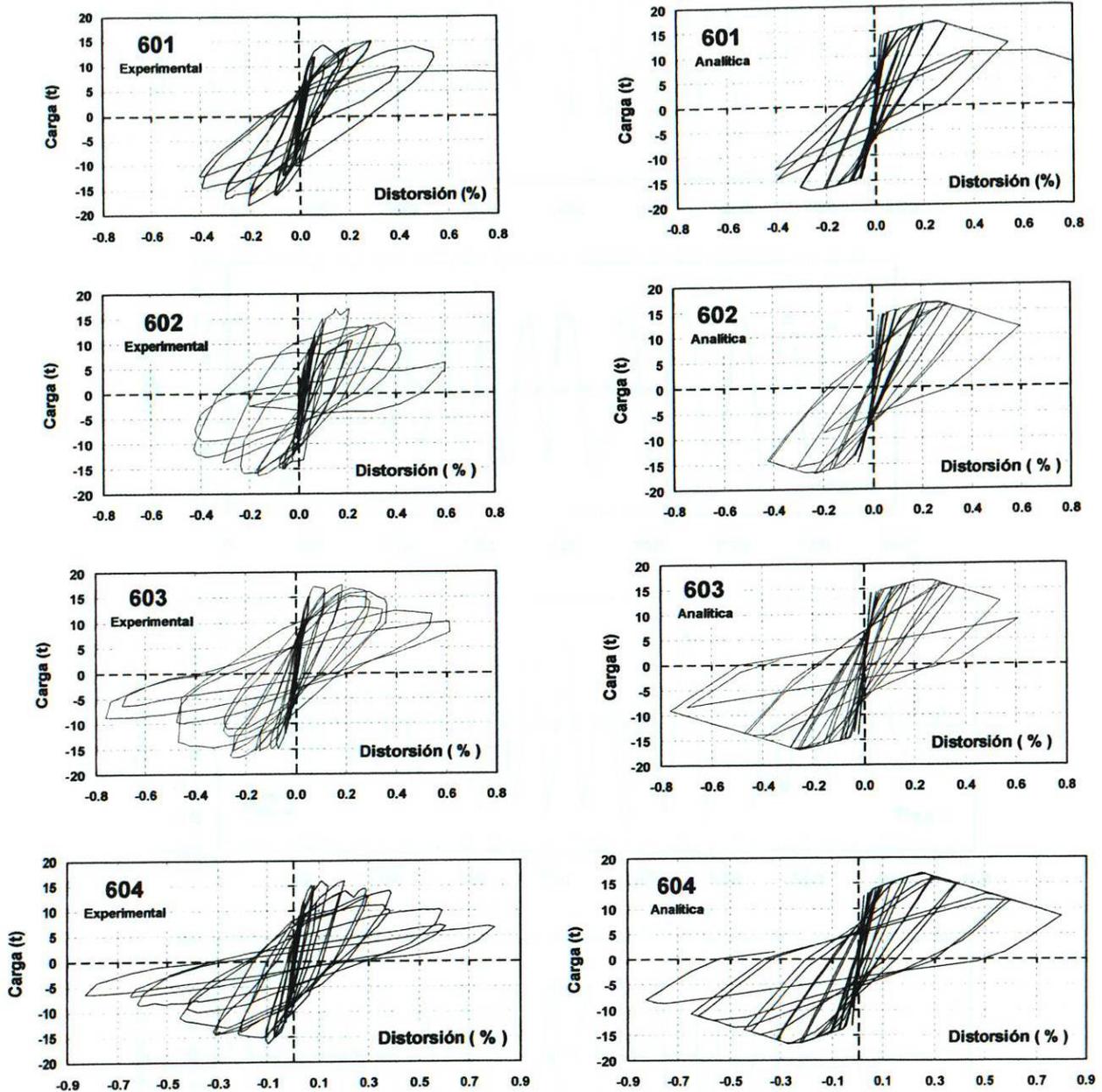


Figura F4.10: Comparación de las curvas histeréticas experimentales y calculadas con el modelo analítico. Muros: 601, 602, 603 y 604.

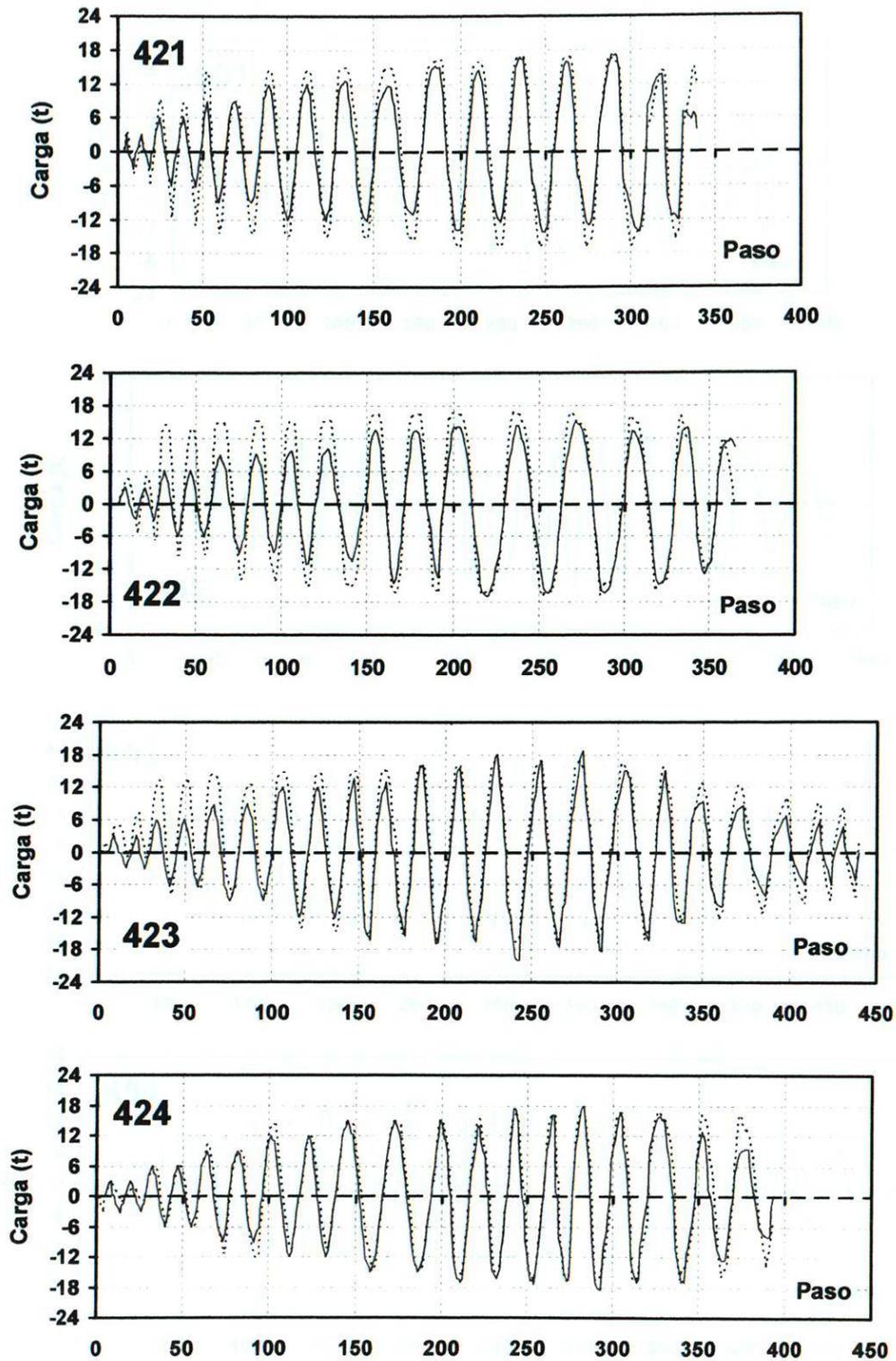


Figura F4.11: Comparación de las historias de carga experimentales y calculadas con el modelo analítico. Muros: 421, 422, 423 y 424.

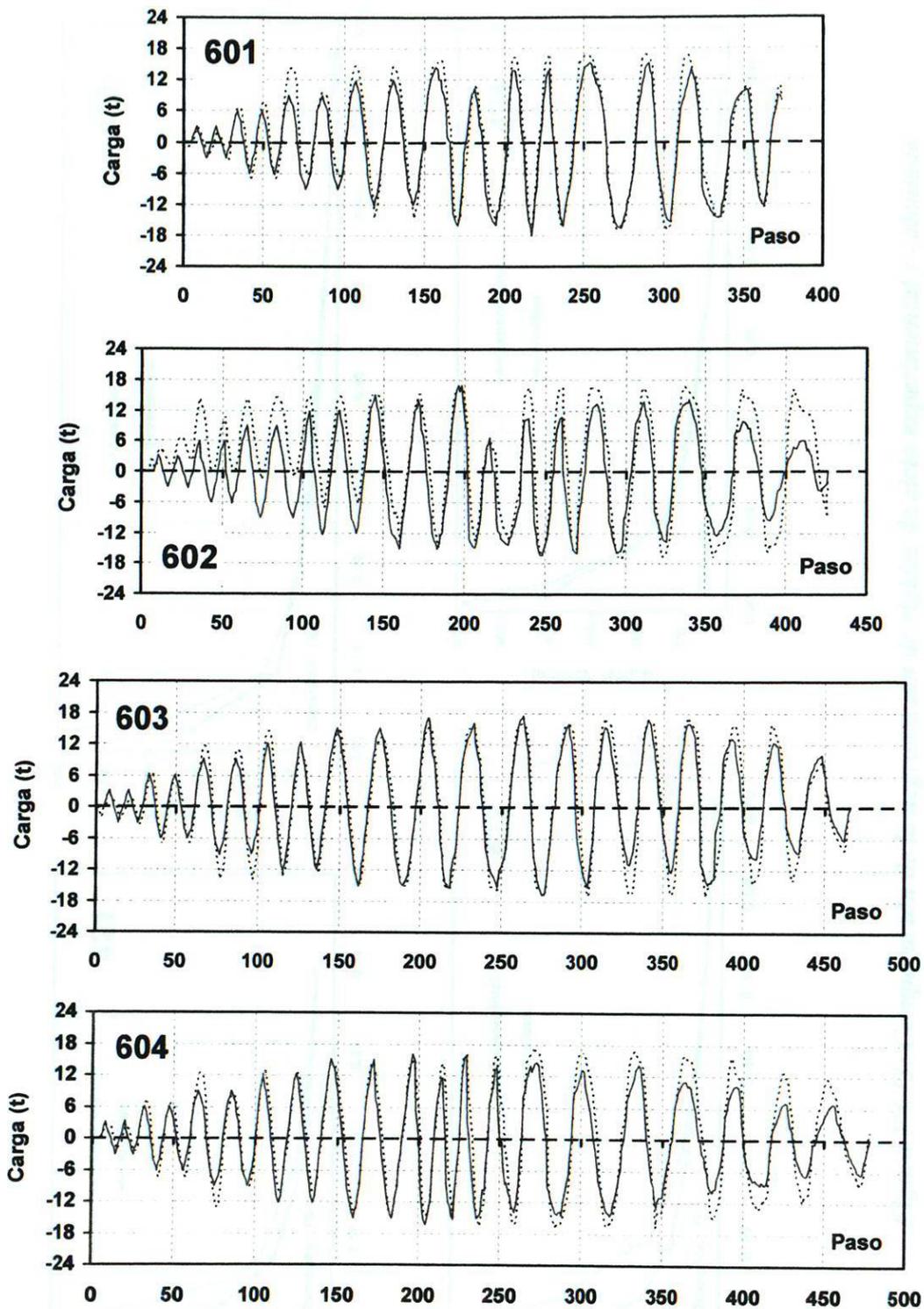


Figura F4.12: Comparación de las historias de carga experimentales y calculadas con el modelo analítico. Muros: 601, 602, 603 y 604.

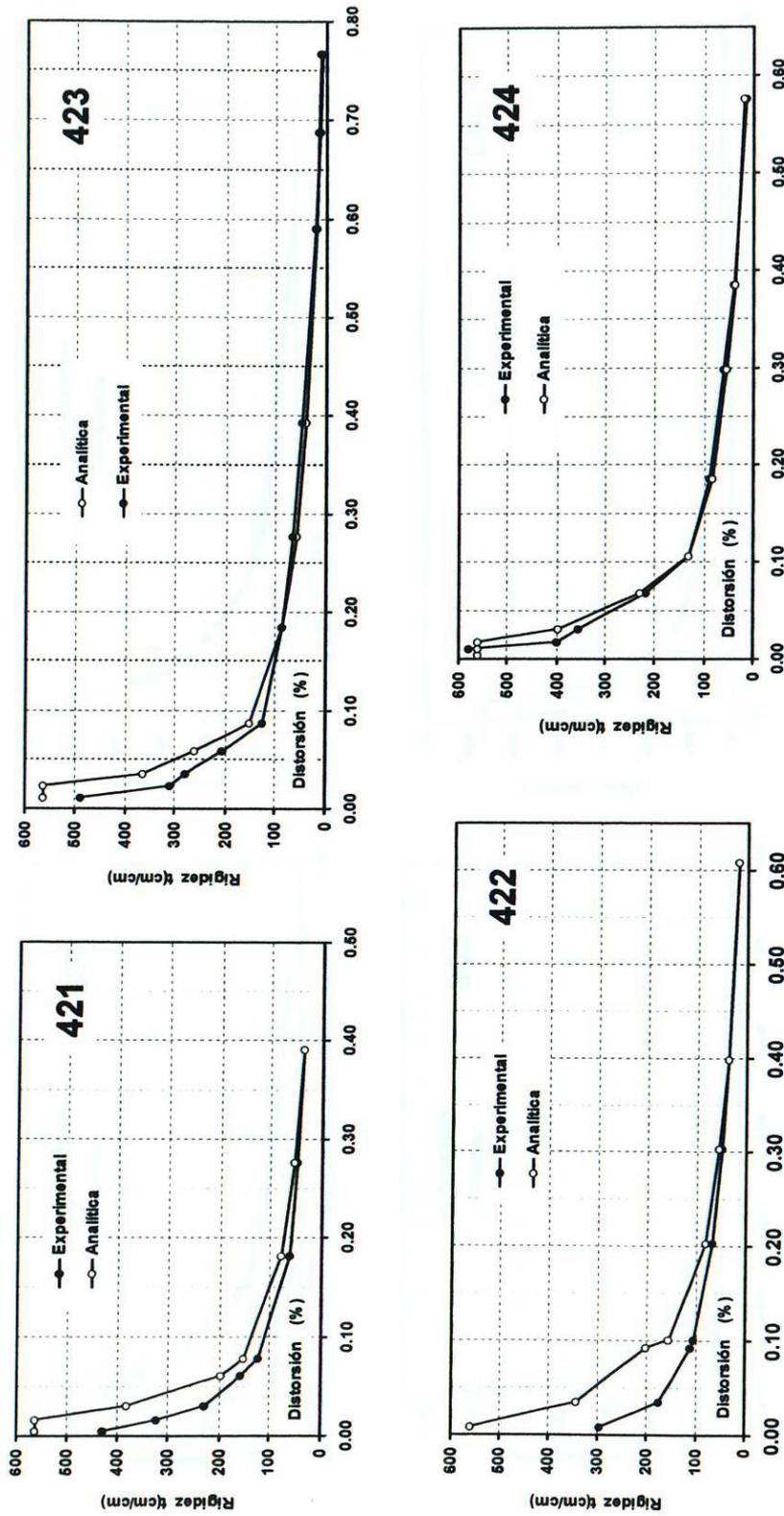


Figura F4.13: Comparación de la degradación de rigidez de ciclo experimental y calculada con el modelo analítico. Muros: 421, 422, 423 y 424.

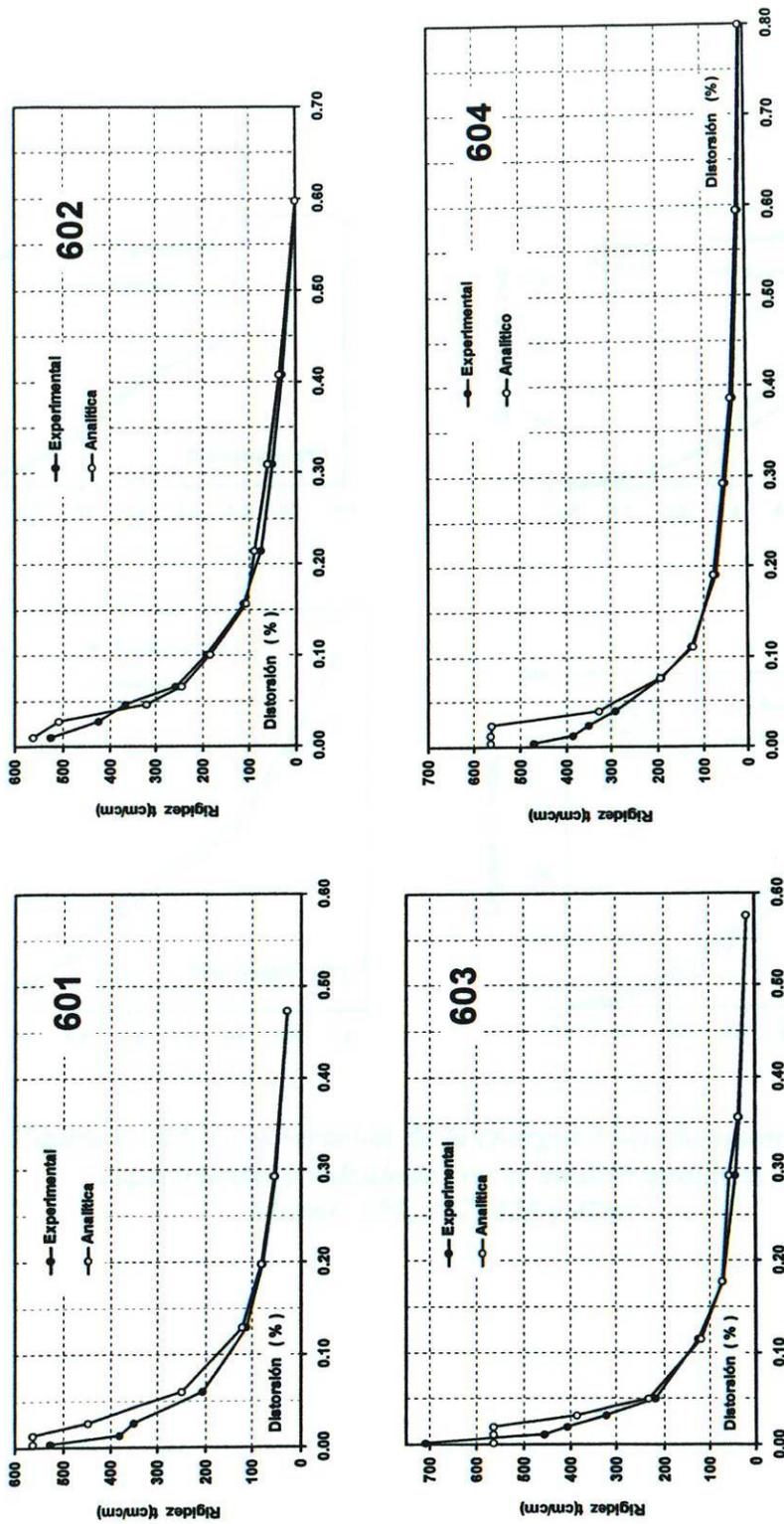


Figura F4.14: Comparación de la degradación de rigidez de ciclo experimental y calculada con el modelo analítico. Muros: 601, 602, 603 y 604.

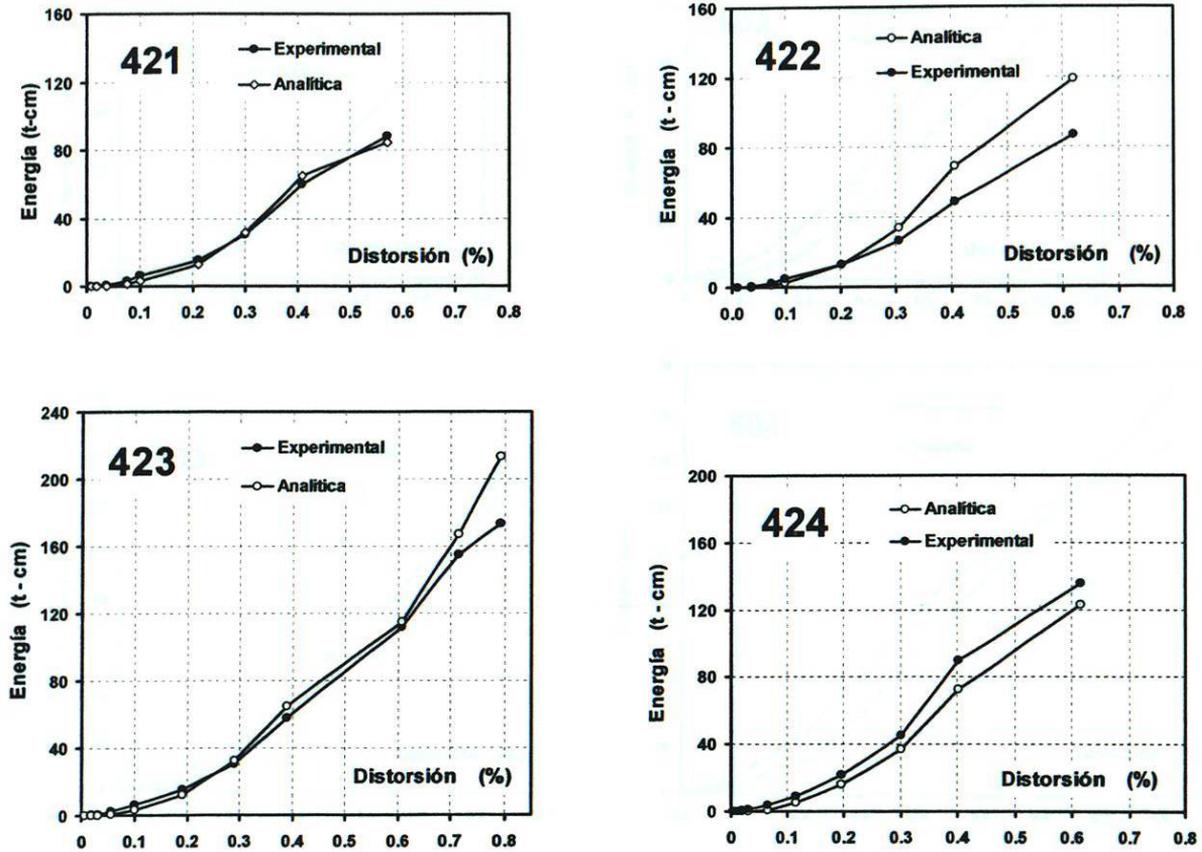


Figura F4.15: Comparación de la energía disipada acumulada experimental y calculada con el modelo analítico. Muros: 421, 422, 423 y 424.

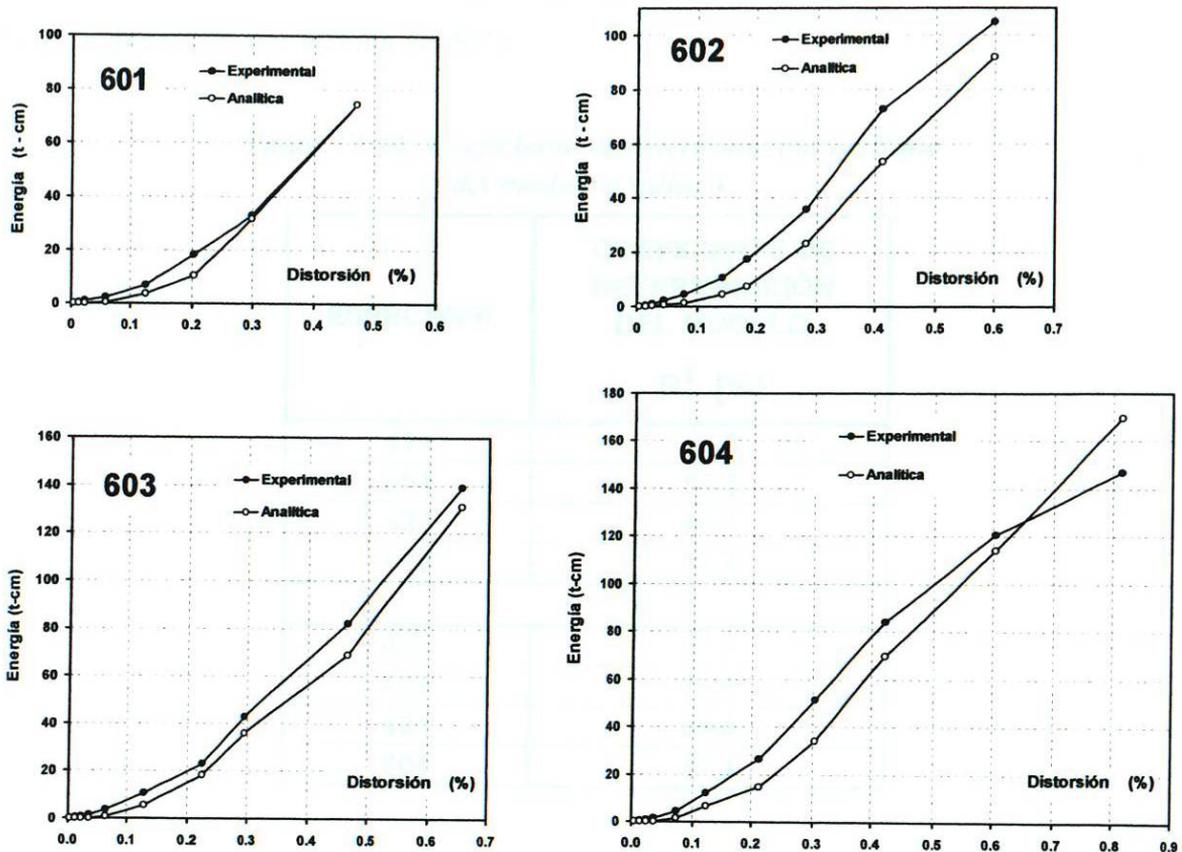


Figura F4.16: Comparación de la energía disipada acumulada experimental y calculada con el modelo analítico.
Muros: 601, 602, 603 y 604.

4.2.3 Validación estadística.

Los resultados obtenidos de este proceso se presentan a continuación en la tabla T4.16. Aquí se observa que los valores de R^2 son relativamente altos y están, en cuatro casos, por encima del 90% y, en tres casos, por encima del 86%.

Tabla T4.16: Coeficiente de determinación múltiple del modelo analítico.

ESPÉCIMEN	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN DEL MODELO R^2 [%]
421	86.8
601	94.2
423	90.3
603	92.7
422	87.7
602	76.5
424	94.6
604	87.2

El coeficiente de determinación del muro 602, del 76.5%, puede explicarse por la respuesta atípica registrada en este espécimen, en los ciclos iniciales y finales de la prueba. Los rasgos distintivos que evidencian esta respuesta atípica, los cuales pueden apreciarse al examinar las historias de carga y de distorsión aplicadas y las curvas de la respuesta histerética de la carga lateral–distorsión, son: a) falta de correspondencia entre la dirección alternante de las cargas aplicadas y las distorsiones registradas, que se mantuvieron positivas a lo largo de los primeros seis ciclos; b) una rama descendente de la envolvente de la respuesta de la carga lateral–distorsión con pendiente negativa más pronunciada que el resto de los especímenes; y c) un lazo histerético peculiarmente irregular, en el último ciclo de la prueba, que el modelo analítico no pudo reproducir.

Por otra parte, con la intención de evaluar la adecuación entre las respuestas predichas y las experimentales, se realizó la comparación entre los valores obtenidos para las respuestas de la energía disipada acumulada y la rigidez de ciclo residual, a la repetición del ciclo del 0.4% de distorsión. En la tabla T4.17, se presentan los valores para cada muro.

Tabla T4.17: Comparación de las respuestas experimentales y predichas analíticamente.

ESPÉCIMEN	ENERGÍA DISIPADA ACUMULADA		RIGIDEZ PICO A PICO RESIDUAL A LA REPETICIÓN DEL CICLO DE 0.4%	
	EXPERIMENTAL	ANALÍTICA	EXPERIMENTAL	ANALÍTICA
421	67.2	69.8	4.7	5.8
601	72.7	69.5	5.4	5.1
423	74.4	77.9	7.3	6.3
603	75.4	65.9	4.0	6.3
422	56.3	78.5	11.3	6.5
602	76.0	61.3	3.5	6.1
424	95.4	83.6	5.0	6.6
604	86.1	77.2	5.0	6.5

Del análisis de los resultados obtenidos en la comparación anterior, se puede decir que; para la energía disipada acumulada, el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias se extiende desde -8.0527 hasta $+13.0027$, mientras que para la degradación de rigidez de ciclo se extiende desde -2.4729 hasta $+1.7229$. Dado que ambos intervalos contienen el valor 0.0, se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas entre ambas medias, para un nivel de confianza del 95%.

En ambas respuestas se llega al mismo resultado, mediante la prueba *t de Student*, en las cuales los valores de *p* para las hipótesis alternativas son mayores que 0.05, lo cual es indicativo, igualmente, de que no existen diferencias estadísticamente significativas entre esas medias.

Los resultados antes mencionados permiten llegar a la conclusión de que el modelo es confiable y que posee un alto grado de repetitividad para el caso particular estudiado.



CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES.

Conclusiones generales.

1. El desarrollo de las pruebas en los 8 especímenes ensayados en la primera fase del experimento (*Gallegos, 2008*) cumple los requisitos establecidos en el apéndice normativo de las normas técnicas complementarias para estructuras de mampostería del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal. (GDF, 2004b)
2. Las dimensiones de los especímenes y la carga vertical aplicada simulan adecuadamente las condiciones aproximadas que tendría un tablero de planta baja de un edificio para vivienda de aproximadamente 4 ó 5 niveles.
3. En las envolventes se observaron claramente 3 etapas: la primera con un comportamiento sensiblemente lineal, hasta llegar al agrietamiento (alrededor de 0.1% de distorsión); la segunda, con una pérdida de la linealidad y un incremento de la fuerza horizontal resistida, hasta llegar a la resistencia (en promedio 17 t, 167 kN) y una tercera etapa en la que se observa la degradación de la resistencia, hasta llegar al final de la prueba, donde el muro es ya inestable.
4. El esfuerzo cortante medio de agrietamiento de los especímenes fue de 3.98 kg/cm^2 y el esfuerzo predicho por las normas mexicanas fue de 3.16 kg/cm^2 . El agrietamiento ocurrió a una distorsión promedio del 0.095%. La carga lateral máxima o resistencia se alcanzó en correspondencia con un esfuerzo cortante medio de 4.95 kg/cm^2 , lo que significó una reserva de resistencia de 0.97 kg/cm^2 . La distorsión asociada a la resistencia fue del 0.23%, en promedio, sin presentar un patrón definido.



5. La degradación de resistencia de los muros a la réplica del ciclo del 0.4% de distorsión fue, en promedio, del 27.8%
6. La rigidez elástica inicial del sistema, calculada con la teoría de resistencia de materiales considerando un factor de forma "1" de 218 t/cm (2,138k N/cm) para muros con refuerzo de grado 42 y de 210 t/cm (2,059 kN/cm) para los reforzados con acero de grado 60, da resultados muy similares a los de la rigidez pico a pico experimental, del primer ciclo de carga, la cual es, en promedio, de 206 t/cm (2020 N/cm).
7. Analizando la información de la evaluación estadística de las respuestas estudiadas, es posible concluir que no existen diferencias significativas, en un 95% de confianza, en las respuestas de los muros de mampostería confinada de bloques huecos de concreto, al utilizar refuerzo convencional en los elementos confinantes (acero de grado 42 en varillas longitudinales y alambcón liso de grado 23 en los estribos), comparado con las respuestas donde se utilizó refuerzo con armazones electro-soldadas.
8. También se puede concluir, que no existen diferencias significativas en las respuestas de los especímenes, en un 95% de confianza, al concentrar los estribos en las esquinas de los elementos confinantes.
9. Se puede decir que es adecuado utilizar las armazones electro soldadas como refuerzo de los elementos confinantes de la mampostería, con los materiales utilizados en la elaboración de los especímenes ensayados, en regiones sujetas a eventos sísmicos, dado que se presenta un comportamiento al menos igual al que se tendría utilizando el sistema de refuerzo convencional de grado 42.
10. La mampostería confinada tiene buenos niveles de disipación de energía. Este valor aumenta al alcanzarse la distorsión del 0.2%; aunque cabe mencionar que, al llegar a valores altos de disipación de energía, el muro sufre agrietamientos considerables.



11. Los 3 valores de los puntos representativos de cada cambio de dirección de la envolvente idealizada: punto 1, 14.2 t (139 kN), punto 2, 17 t (167 kN) y punto 3 13.6 t (133 kN), son congruentes con los valores asociados con dichos puntos en el experimento: cortante de agrietamiento promedio 14.2 t (139 kN), cortante a la resistencia promedio 17.7 t (173.5 kN) y cortante al 0.5% de distorsión promedio, aproximadamente 13t (127.4 kN).
12. El modelo analítico propuesto por *Flores (1995)* calibrado con la información obtenida en esta investigación, representa satisfactoriamente el comportamiento de los especímenes ensayados. Esto se comprobó, tanto haciendo una comparación cualitativa de los resultados obtenidos en el experimento contra los obtenidos en la modelación analítica, como comprobando estadísticamente las respuestas, según el modelo propuesto y resultó que no hay diferencias significativas, en un 95% de nivel de confianza.

Recomendaciones.

1. Realizar más investigaciones acerca del comportamiento de la mampostería confinada de bloques huecos de concreto en condiciones de carga diferentes a las aplicadas en este experimento, así como con diferentes propiedades de lo materiales.
2. Estudiar más a fondo el comportamiento de la mampostería confinada de bloques huecos de concreto reforzada con armazones electro-soldadas, con otras propiedades de las piezas, así como diferentes propiedades del mortero, ya que en esta investigación se afirma que dichas armazones se pueden utilizar en zonas sísmicas, pero sólo para las condiciones particulares consideradas en esta investigación.
3. Se recomienda realizar otros ensayos de modelos, a escala real o escala reducida, en mesa vibradora simulando sismos reales, con las características de los especímenes utilizados en esta investigación.



4. Se recomienda realizar una modelación analítica más detallada, mejorando el modelo propuesto por **Flores (1995)**, considerando una envolvente idealizada tetralineal en vez de trilineal. También se puede mejorar la respuesta del modelo, considerando una línea quebrada con 2 rigideces ascendentes y 2 descendentes, para la creación de cada lazo histerético, con el objetivo de lograr una representación más aproximada a la forma del lazo real.
5. Se recomienda realizar algunos ejemplos de aplicación práctica, aplicando la información obtenida en este experimento, en algún programa que considere la no linealidad en el comportamiento de los materiales.



BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, G., Meli, R., Díaz, R., & Vázquez del Mercado, R. (1996). Influence of Horizontal Reinforcement on the Behaviour of Confined Masonry Walls. *Memorias. 11ª Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, artículo 1380.* Acapulco, México.

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

Alcocer, S. (2005). *Comunicación personal.* Dr. Ing. Sergio Manuel Alcocer Martínez de Castro. Director. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Edificio Fernando Hiriart, 2º Piso. Circuito Escolar. Ciudad Universitaria. 04510, México.

Alcocer, S., Arias, J., & Flores, L. (2004). Some Developments on Performance-Based Seismic Design of Masonry Structures. *Memorias. Taller Internacional Sobre Diseño Sísmico Basado en Desempeño.* Bled, Eslovenia.

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

Alcocer, S., Pineda J., Ruiz, J., & Zepeda, J. (1996). Retrofitting of confined masonry walls with welded wire mesh. *Memorias. 11ª Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, artículo 1471.* Acapulco, México.

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.



- Álvarez, 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.
- Astroza, M., Moroni, M., & Navarrete, R. (1991).** Análisis No Lineal de Edificios de Albañilería Confinada. *Memorias. XXV JSEE, Vol. IV*, Brasil.
- Bazán, E. (1980).** *Muros de Mampostería ante Cargas Laterales. Estudios Analíticos.* Tesis Doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cheok, G.S., Stone, W.C., & Kunnath, S.K. (1998).** Seismic Response of Precast Concrete Frames with Hybrid Connections". *Structural Journal*. Estados Unidos: American Concrete Institute, Vol. 95, No. 5, pp. 527-539.
- Díaz, R., & Vázquez del Mercado, R. (1995).** *Respuesta Sísmica de Muros de Mampostería Confinada Reforzados Horizontalmente.* Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, 215 pp.
- Diez, J. (1987).** *Estudio Experimental de Muros de Albañilería Sometidos a Carga Lateral Alternada.* Tesis de Licenciatura. Universidad de Chile.
- Flores, L., & Alcocer, S. (1996).** Calculated Response of Confined Masonry Structures. *Memorias. 11ª Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, artículo 1830.* Acapulco, 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., (1995).** *Estudio Analítico de Estructuras de Mampostería Confinada.* Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. 106 pp.
- Gallegos, L (2008).** *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 de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolás de los Garza, Nuevo León.
- 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., & 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.
- Herrera, E. (1991).** *Efectos de la Carga Vertical en el Comportamiento de Muros de Albañilería Reforzada Sometidos a Carga Lateral Alternada.* Tesis de Licenciatura. Universidad de Chile.
- INSTITUTO (2004).** *Análisis de Vulnerabilidad y Riesgo de Construcciones Urbanas Ante Perturbaciones Sísmicas y Eólicas.* Informe Interno s/n. No publicado. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- López, R. (1988).** *Diseño Estadístico de Experimentos.* La Habana, Cuba; Editorial Científico Técnico, Ministerio de Cultura.
- 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.
- Montgomery, D. (2002).** *Diseño y Análisis de Experimentos.* México; Limusa. Traducción de la Segunda Edición en Inglés de la Obra: Design and Analysis of Experiments.
- Moroni, M., Astroza, M., & Tavonatti, S. (1994).** Nonlinear Models for Shear Failure in Confined Masonry Walls. *The Masonry Society Journal*, 12 (2): 72-77.
- Navarrete, R. (1991).** *Modelo No Lineal de Muros de Albañilería Confinada con Pilares y Cadenas de Hormigón Armado.* Tesis de Licenciatura. Universidad de Chile.
- 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. (1989).** Evaluation of Ductility of Structures and Structural Assemblages from Laboratory Testing. *Bulletin of The New Zeland National Society for Earthquake Engineering.* Vol. 22, No. 3, Septiembre de 1989.
- Paulay, T., & Priestley, M.J.N. (1992).** *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings.* Nueva York, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
- Park, R., & Paulay, T. (1994).** *Estructuras de Concreto Reforzado.* México: Limusa.



- Pineda, J. (1996).** *Comportamiento ante cargas laterales de muros de mampostería confinada reforzados con malla electrosoldada.* Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, 171 pp.
- Ruiz, J., & Miranda, E. (2003).** Evaluación de los Factores de Reducción de Resistencia por Ductilidad para Estructuras de Mampostería Cimentadas en Terreno Firme. *Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, No. 69*, pp. 1-23.
- Sánchez, T., Flores, L., Alcocer, S., & Meli, R. (1991).** *Respuesta Sísmica de Muros de Mampostería Confinada con Diferentes Grados de Acoplamiento a Flexión.* Informe ES/02/91. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México.
- Sánchez, T., Flores, L., Alcocer, S., & Meli, R. (1992).** *Respuesta Sísmica de Muros de Mampostería Confinada con Diferentes Tipos de Refuerzo Horizontal.* Informe ES/02/92. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México.
- Tomazevic, M., & Lutman, M. (1996).** Seismic Behavior of Masonry Walls: Modeling of Hysteretic Rules. *Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 9, Septiembre*, pp. 1048-1054
- 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 (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.
- Walpole, R., Myers, R., & Myers, S. (1999).** *Probabilidad y Estadística para Ingenieros.* México; Prentice-Hall Hispanoamericana. Traducción de la sexta edición, en inglés, de la obra: Probability and Statistics for Engineers and Scientists.



CURRÍCULUM VITAE

Nombre: Ing. José María Zárate Caballero

Fecha y Lugar de Nacimiento: 12 de Septiembre de 1978 en Cd. Victoria, Tamaulipas

Sexo: Masculino **Estado Civil:** Casado

Licenciatura: Ingeniería Civil, Especialidad en Infraestructura Municipal (1996-2001), en Instituto Tecnológico de Cd. Victoria, en Cd. Victoria, Tamaulipas.

Maestrías: Maestría en Ciencias, Especialidad en Estructuras (2001-2003), en Instituto de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, en San Nicolás de los Garza, Nuevo León. (Con fecha próxima de Exámen de Grado).

Cursando actualmente la Maestría en Diseño Arquitectónico en Universidad La Salle Victoria, Cd. Victoria, Tamaulipas.

Otros Cursos: Inglés, en Instituto Iberoamericano de Idiomas, en Cd. Victoria, Tamaulipas.
Diplomado en Automatización de Edificios, en Universidad La Salle Victoria, en Cd. Victoria, Tamaulipas.

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 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.

Cálculo para Refuerzo de Edificio de 3 niveles para SNTE de 2000m², ubicado en la Col. Del Maestro, Cd. Victoria, Tamps.

Cálculo Bodega de concreto de 3 niveles de 500m², ubicada en Prolongación Carrera Torres, Cd. Victoria, Tamps.

Cálculo Bodega de concreto y acero de 1000m², ubicada en Libramiento de Tránsito Pesado Lic. Emilio Portes Gil, Cd. Victoria, Tamps.

Cálculo Edificios de acero de 7000m² para Centro de Especialidades para el Magisterio de Cd. Victoria, Tamps.

Escuela de Fútbol de 2 Has. para Equipo Cruz Azul, San Fernando, Tamps.

Edificio de concreto y acero de 3 niveles de 2400m², ubicado en calle Hermanos Vázquez Gómez y Carrera Torres, Cd. Victoria, Tamps.

Además de cálculo, proyecto y remodelación de varios edificios de 1 y dos niveles (casas habitación, bodegas, locales) en diferentes municipios del Estado de Tamaulipas.

Ing. José María Zárate Caballero.

Teléfonos:

Oficina: 01(834)3167224

Celular: 045(834)1382503

Correo electrónico: jose_m_z_c@hotmail.com

