



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA

**SIMULACIÓN ANALÍTICA DEL COMPORTAMIENTO DE
MUROS DIAFRAGMA DE MAMPOSTERÍA CON ABERTURAS
ANTE CARGA LATERAL**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
**MAESTRO EN INGENIERÍA
(ESTRUCTURAS)**

PRESENTA

JUAN JOSÉ GERARDO LARIOS ROBLES GIL

DIRIGIDA POR

Dr. A. GUSTAVO AYALA MILIÁN

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO
2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALI
DE LA BIBLIOTECA

Dedicatoria

A mis abuelos,
Carmen y Jorge A.†,
María Guadalupe† y Leonardo†,
A quienes debo los padres que tengo.

A mis padres,
María del Carmen y Juan José,
A quienes debo todo,
que con su amor, ejemplo, apoyo y sacrificios,
han construido en mí,
quien soy.

A mis hermanos,
Jorge Luis L. y José Carlos A.,
Mis compañeros de aventuras,
motivadores incansables,
y mis más admirados ejemplos.

A mi esposa,
Teresa de Jesús,
Quien complementa mi vida,
y llena de gozos cada día.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Juan José Gerardo Larios Robles Gil
FECHA: 21 Mayo 2004
FIRMA: [Firma]

Juan José Gerardo Larios Robles Gil
Ciudad Universitaria, México. 2004

Agradecimientos

Al *programa de Posgrado y al Instituto de Ingeniería* de la Universidad Nacional Autónoma de México por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo y la oportunidad que me brindaron en la continuación de mi formación profesional.

Al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* por la beca que me fue otorgada durante los dos años transcurridos en los estudios de maestría.

Al *Dr. A. Gustavo Ayala Milián*, por su valioso y sincero apoyo como director de esta tesis, por compartirme desinteresadamente sus conocimientos, confianza y paciencia.

A los profesores *Dr. Sergio M. Alcocer M., Dr. Oscar López Bátiz, M. en I. Octavio García Domínguez y Dr. Carlos Reyes Salinas*, por el tiempo dedicado a revisar esta tesis, para mejorarla y enriquecerla con sus valiosas observaciones y comentarios.

A mis *profesores*, por sus conocimientos y experiencia transmitidos cada día.

A mis *amigos*, por las vivencias compartidas y apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A mis *familiares*, por su apoyo en todos los aspectos.

Juan José Gerardo Larios Robles Gil

Ciudad Universitaria, México, 2004

Resumen

Los muros diafragma en el intradós de marcos de concreto reforzado modifican sustancialmente su desempeño y vulnerabilidad por lo que es necesario contar con herramientas que permitan modelar adecuadamente su comportamiento.

En este trabajo se presenta una revisión bibliográfica del comportamiento estructural de marcos con muros diafragma de mampostería sujetos a carga lateral. Se presentan los conceptos fundamentales del método de los elementos finitos aplicado al análisis no lineal de estructuras. Así como un estado del arte de la aplicación del método anterior al análisis de muros de mampostería.

Se presenta el análisis numérico, mediante el método de elementos finitos, de un muro de concreto reforzado de un nivel y una crujía con un muro de relleno de mampostería simple con aberturas. Este modelo toma en cuenta el comportamiento no lineal de los materiales, así como el que se presenta en el contacto entre el muro y el marco. La validez de este modelo numérico se verifica al comparar su comportamiento con el de un modelo experimental. Finalmente se propone un modelo simplificado para el análisis no lineal de marcos con muros diafragma de mampostería.



Índices

<u>Introducción</u>	1
<u>Comportamiento Estructural de Marcos con Muros Diafragma de Mampostería</u>	4
2.1 Antecedentes.	5
2.2 Características de la mampostería.	7
2.3 Comportamiento ante carga lateral de sistemas simples marco-muro.	9
2.4 Mecanismos de falla.	13
2.5 Efecto de las aberturas en sistemas marco-muro.	14
<u>Modelo No-Lineal de Elementos Finitos</u>	17
3.1 Antecedentes.	18
3.2 Modelo de Elementos Finitos para un Sistema Simple de Marco-Muro.	18
3.2.1 Modelo Experimental.	19
3.2.2 Modelo Numérico.	21
3.2.3 Calibración del Modelo Numérico.	27
<u>Modelos Analíticos Simplificados</u>	31
4.1 Modelos existentes.	32
4.2 Modelo propuesto.	37
<u>Efecto de las Aberturas en el Comportamiento del Sistema</u>	41
5.1 Descripción de los modelos propuestos.	42
5.2 Efecto de las aberturas.	43
5.2.1 Muro sin aberturas.	44
5.2.2 Muros con abertura tipo ventana.	48
5.2.3 Muros con abertura tipo puerta.	60
5.3 Incorporación del efecto de las aberturas en el modelo simplificado.	71
<u>Modelo de Análisis No-Lineal de Sistemas Marco-Muro con Aberturas</u>	73
6.1 Descripción del método de análisis.	74
6.2 Aplicación del modelo a un sistema marco-muro con aberturas.	74
6.3 Presentación de resultados.	76
<u>Conclusiones</u>	79
<u>Referencias</u>	82

Comportamiento Estructural de Marcos con Muros Diafragma de Mampostería

Fig. 2.1 Efecto de junta.	8
Fig. 2.2 Mecanismos de tensión diagonal y esfuerzos tangenciales en las juntas.	9
Fig. 2.3 Sistema simple marco-muro.	10
Fig. 2.4 Esquema de deformación del sistema simple marco-muro.	11
Fig. 2.5 Gráfica idealizada carga-distorsión característica de sistemas marco-muro.	12
Fig. 2.6 Mecanismos de falla propuestos por Mehrabi <i>et al.</i> (1994)	14

Modelo No-Lineal de Elementos Finitos

Fig. 3.1 Características del modelo experimental.	19
Fig. 3.2 Dispositivo de aplicación de carga (Flores <i>et al</i> 1999).	20
Fig. 3.3 Envolvente carga horizontal – distorsión (Flores <i>et al.</i> 1999).	21
Fig. 3.4 Nivel de refinamiento de los modelos de elementos finitos para mampostería.	22
Fig. 3.5 Geometría de la malla de elementos finitos.	23
Fig. 3.6 Modelo de comportamiento para la mampostería y el concreto.	25
Fig. 3.7 Criterio de falla de Coulomb.	26
Fig. 3.8 Comparación de los resultados numérico y experimental.	30

Modelos Analíticos Simplificados

Fig. 4.1 Modelo de diagonal equivalente.	32
Fig. 4.2 Anchos de la diagonal sugeridos por Žarnić y Tomažević (1988).	33
Fig. 4.3 Modelos de múltiples diagonales.	34
Fig. 4.4 Modelo de diagonales equivalentes de Chrysostomou (1991).	35
Fig. 4.5 Comportamiento del elemento propuesto por Mosalam <i>et al.</i> (1996).	35
Fig. 4.6 Modelo trilineal de Tomažević y Lutman (1996).	36
Fig. 4.7 Modelo trilineal carga lateral-distorsión del muro.	37
Fig. 4.8 Comparación de resultado experimental y modelo analítico del muro estudiado.	39
Fig. 4.9 Esquema de deformación axial.	40
Fig. 4.10 Envolvente de las propiedades axiales de la diagonal equivalente.	40

Efecto de las Aberturas en el Comportamiento del Sistema

Fig. 5.1 Casos característicos de aberturas.	43
Fig. 5.2 Casos típicos de confinamiento en aberturas.	44
Fig. 5.3 Efectos locales en el muro sin abertura.	46
Fig. 5.4 Elementos mecánicos para la distorsión de agrietamiento (kg, cm).	47
Fig. 5.5 Casos estudiados de abertura tipo ventana.	48
Fig. 5.6 Efecto del tamaño de la abertura tipo ventana en la degradación de rigidez secante.	49
Fig. 5.7 Aportación del muro con abertura tipo ventana a la resistencia lateral.	50
Fig. 5.8 Efectos locales en el muro con 4% de abertura.	52
Fig. 5.9 Efectos locales en el muro con 16% de abertura.	53
Fig. 5.10 Efectos locales en el muro con 36% de abertura.	54
Fig. 5.11 Efectos locales en el muro con 64% de abertura.	55
Fig. 5.12 Diagramas de elementos mecánicos en el marco ($\gamma = 0.0002$).	56
Fig. 5.13 Diagramas de elementos mecánicos en el marco ($\gamma = 0.006$).	57
Fig. 5.14 Diagramas de elementos mecánicos normalizados ($\gamma = 0.0002$).	58
Fig. 5.15 Diagramas de elementos mecánicos normalizados ($\gamma = 0.006$).	59
Fig. 5.16 Casos estudiados de aberturas tipo puerta.	60
Fig. 5.17 Efecto del tamaño de la abertura tipo puerta en la degradación de rigidez secante.	61
Fig. 5.18 Aportación del muro con abertura tipo puerta a la resistencia lateral.	62
Fig. 5.19 Efectos locales en el muro con 16% de abertura.	63
Fig. 5.20 Efectos locales en el muro con 24% de abertura.	64
Fig. 5.21 Efectos locales en el muro con 48% de abertura.	65
Fig. 5.22 Efectos locales en el muro con 64% de abertura.	66
Fig. 5.23 Diagramas de elementos mecánicos ($\gamma = 0.0002$).	67
Fig. 5.24 Diagramas de elementos mecánicos ($\gamma = 0.006$).	68
Fig. 5.25 Diagramas de elementos mecánicos normalizados ($\gamma = 0.0002$).	69
Fig. 5.26 Diagramas de elementos mecánicos normalizados ($\gamma = 0.006$).	70
Fig. 5.27 Modelo trilineal de muros con aberturas.	72
Fig. 5.28 Factores para el caso de ventana centrada.	72

Modelo de Análisis No-Lineal de Sistemas Marco-Muro con Aberturas

Fig. 6.1 Sistema estructural y modelo de análisis	75
Fig. 6.2 Comparación del comportamiento estimado con los modelos de elemento finito y el simplificado.	76
Fig. 6.3 Comparación de elementos mecánicos con los modelos de elementos finitos y el simplificado.	77
Fig. 6.4 Comparación de elementos mecánicos con los modelos de elementos finitos y el simplificado.	78

Comportamiento Estructural de Marcos con Muros Diafragma de Mampostería

Tabla 2.1 Distorsiones asociadas a distintos niveles de carga.	12
--	----

Modelo No-Lineal de Elementos Finitos

Tabla 3.1 Resultado de los ensayos de compresión simple de pilas de mampostería (Flores <i>et al.</i> 1999).	28
Tabla 3.2 Parámetros utilizados en el modelo numérico.	30

Modelo de Análisis No-Lineal de Sistemas Marco-Muro con Aberturas

Tabla 6.1 Valores de la curva de carga-desplazamiento lateral del muro sin aberturas.	75
Tabla 6.2 Valores de la curva de carga-desplazamiento lateral del muro con 16% de abertura.	75



Capítulos

Capítulo 1

Introducción

La mampostería es uno de los materiales de construcción más antiguos y más frecuentemente utilizados en la historia de la humanidad. Este material ha sido empleado en una gran variedad de formas a lo largo de la historia en la construcción de edificios tanto públicos como residenciales por sus características térmicas, acústicas, estéticas, económicas, etc. que lo hacen atractivo para edificación de baja y mediana altura.

Con la evolución de los procedimientos y la tecnología de la construcción han surgido varias modalidades con el uso de la mampostería, entre las que se encuentran: la *mampostería simple*, actualmente tendiendo a desaparecer con fines ingenieriles, pero cuya investigación resulta de interés para la conservación del patrimonio cultural; la *mampostería confinada*, usada comúnmente en nuestro país y en algunos países latinoamericanos y del sur de Europa; la *mampostería reforzada y/o presforzada*, utilizada en países desarrollados; y los *muros diafragma o de relleno* construidos en las crujeas de marcos de concreto reforzado o de acero de edificios de mediana altura.

Los muros diafragma se encuentran frecuentemente en divisiones interiores y exteriores de estructuras con marcos de acero o concreto reforzado especialmente en zonas donde aún es un material de construcción relativamente económico. Estos muros son tratados comúnmente como elementos arquitectónicos, y su presencia es despreciada en los modelos de análisis estructural que se utilizan en la práctica ingenieril. Sin embargo, incluso aquellos muros considerados como no estructurales pueden interactuar con el marco que lo rodea cuando la estructura está sujeta a cargas laterales como las inducidas por movimientos sísmicos o viento; el despreciar tal interacción puede o no ser benéfica para el desempeño de la estructura ya que la presencia de estos muros produce un notable incremento en la rigidez lateral, disminución del periodo natural de vibración, variación en la magnitud y distribución de los elementos mecánicos obtenidos en ausencia de muros; en general, una modificación en la respuesta del edificio. Por si esto fuera poco, la presencia de aberturas (ventanas y/o puertas) en los muros, modifican el comportamiento del panel y vuelve aún más complicado su análisis. Estos efectos en *marcos con muros diafragma* (sistema marco-muro) han sido estudiados experimentalmente en las últimas cuatro décadas por diversos autores.

Las tendencias actuales de diseño sísmico de estructuras demandan, por parte del diseñador, un conocimiento más detallado del comportamiento de la estructura desde el inicio hasta niveles altos de deformación lateral

incursionando en la no-linealidad, por lo que existe la necesidad de contar con una cantidad mayor de resultados experimentales; que para estructuras que contienen muros de mampostería difícilmente podrán obtenerse dado el alto costo involucrado en este tipo de estudios. Un camino alternativo para la solución de este problema ha sido el desarrollo de procedimientos analíticos que permitan simular estos experimentos, entre los que se pueden mencionar los métodos de diagonales equivalentes, y modelos de elementos finitos.

El presente trabajo surge como parte de la investigación analítica que se desarrolla dentro del grupo de mecánica numérica del Instituto de Ingeniería y cuyos antecedentes han sido desarrollados y presentados en la segunda mitad de la década pasada en tres trabajos previos: Cerón (1997), estudió el comportamiento elástico lineal de sistemas muro-marco con aberturas sujetos a carga lateral, así como la distribución de los elementos mecánicos en viga y columnas; Orduña (1999), elaboró un modelo de elementos finitos con comportamiento no lineal de sistemas marco-muro y presentó las bases para el desarrollo de un modelo tridiagonal equivalente para el análisis de marcos con diafragma; Araujo (2000), desarrolló un estudio paramétrico de sistemas marco-muro y compara los resultados obtenidos mediante el *método de los elementos finitos* (FEM) y el modelo simplificado propuesto.

El objetivo de este trabajo es una aplicación práctica a partir de los modelos de elementos finitos; esto es, proponer un modelo de muro diafragma de mampostería, simplificado pero realista, útil en el análisis no lineal de sistemas marco-muro con aberturas. Se busca que este modelo sea capaz de reproducir el comportamiento global de la estructura ante cargas laterales. Para lograr esto, se elaboró un modelo no lineal de elementos finitos de un marco de concreto reforzado con un muro diafragma de mampostería sin aberturas; se calibró el modelo con resultados experimentales obtenidos previamente por otros autores; Inicialmente, con base en la información obtenida del análisis, se propusieron las bases para desarrollar un modelo simplificado de análisis.

En el segundo capítulo de este trabajo se establece un marco de referencia, para lo que se inicia con una breve descripción del conocimiento existente del comportamiento ante carga lateral en su plano de sistemas marco-muro, las características mecánicas de los elementos constituyentes, los mecanismos de falla conocidos y los estudios previos del efecto de las aberturas. En el tercer capítulo se establecen las bases del modelado mediante el método de los elementos finitos y se desarrolla el modelo numérico de un sistema marco-muro probado experimentalmente. En el cuarto capítulo se presentan algunos modelos que permiten efectuar análisis simplificados de sistemas marco-muro y se propone un modelo de diagonal equivalente con comportamiento no lineal. El quinto capítulo, propone los estudios paramétricos requeridos para generalizar el modelo simplificado propuesto y los resultados obtenidos para los casos estudiados en este trabajo. Así como la inclusión del efecto de las aberturas en el modelo simplificado. En el sexto capítulo, se ejemplifica la

metodología propuesta en este trabajo para incluir el efecto de las aberturas en el modelo simplificado. Finalmente, en el séptimo capítulo se presentan algunas conclusiones y recomendaciones que pudiesen ser de utilidad para trabajos futuros.

Capítulo 2

Comportamiento Estructural de Marcos con Muros Diafragma de Mampostería

La mampostería ha sido, por sus características térmicas, acústicas, estéticas, y económicas, uno de los materiales de construcción más utilizados en la historia de la humanidad. Sin embargo, a pesar de su antigüedad, el conocimiento que se tiene de su comportamiento es aún escaso, ya que existen diferentes tipos y modalidades, en los cuales intervienen un gran número de variables, muchas de las cuales presentan una gran dispersión, como las propiedades de los materiales, la calidad de la mano de obra, adherencia entre mortero y piezas, entre otras.

En décadas recientes, en regiones de alta sismicidad donde la mampostería es todavía un material de bajo costo, se ha aprovechado como relleno de marcos estructurales incrementando la resistencia y rigidez lateral del sistema; sin embargo, cotidianamente los muros no se incluyen en los análisis ya que vuelve muy onerosa su modelación, y/o porque se considere que el no incluirlos conduce a diseños por el lado de la seguridad, lo cual no es necesariamente cierto.

En la ingeniería suele considerarse que la resistencia ante cargas laterales de estructuras con muros es predominantemente dependiente de la resistencia de cada uno de los elementos que la conforman. Consecuentemente, es de interés estudiar el comportamiento de un sistema simple marco-muro para comprender el comportamiento de edificios con muros diafragma sujetos a carga lateral.

Este capítulo pretende introducir al lector en el contexto del conocimiento existente que sirve de plataforma para definir un nicho de oportunidad en la investigación. Por ello se comienza con un resumen cronológico del trabajo desarrollado en las últimas cinco décadas. Posteriormente, y como resultado de la información recopilada de dichos trabajos, se comentan brevemente las características de la mampostería y sus componentes, describiendo el comportamiento experimental observado en sistemas simples marco-muro sujetos a carga lateral monótona creciente a partir de lo cual se define la curva característica de comportamiento y los posibles mecanismos de falla en el sistema marco-muro. Finalmente, para concluir el capítulo se comentan algunos resultados de trabajos existentes de sistemas marco-muro con aberturas.

2.1 Antecedentes.

El efecto de la presencia de muros de mampostería en sistemas estructurales a base de marcos se ha vuelto materia de investigación en las últimas cinco décadas, debido a que en un gran número de edificaciones a base de marcos se colocan muros en el intradós; ya sea perimetralmente para salvaguardar el área o en el interior para delimitar espacios. En la práctica cotidiana de los despachos de cálculo, estos muros son despreciados en el análisis y diseño estructural, bajo la creencia de que su presencia provee un frente adicional de resistencia en caso de perturbaciones debidas a movimientos sísmicos o la acción del viento; lo cual, no es necesariamente cierto, ya que, la naturaleza de los materiales de estos muros les confiere un comportamiento relativamente frágil una vez que se ha alcanzado su resistencia, lo que puede llevar a irregularidades en resistencia y rigidez de la estructura que conduzcan a comportamientos desfavorables como la formación de un entrepiso flexible o torsiones de planta. Más aun, al no incluirse en el análisis estructural, la contribución a la resistencia y rigidez en la realidad, implica que el edificio es una estructura cuya seguridad no corresponde a la del modelo utilizado para su diseño, lo que puede invalidar el análisis e incluso, el diseño y detallado de los elementos estructurales de los marcos.

Al parecer por la información documental recabada, desde las primeras investigaciones de estructuras con muros diafragma, era reconocida la dificultad y alto costo de realizar pruebas a escala natural para entender el comportamiento de estos sistemas debido al gran número de variables que intervienen en su comportamiento; como se puede inferir de los primeros estudios realizados. Así, Benjamin y Williams (1958), concluyen de pruebas a escala natural y reducida, la posibilidad de estudiar mediante modelos a escala el comportamiento de muros a cortante de mampostería, solos y con marcos de concreto reforzado o acero confinándolos, argumentando que los errores inducidos por causa de la escala son insignificantes comparados con las variaciones inherentes a la fabricación de los elementos y proceso constructivo del sistema. A partir de ese trabajo establecen la posibilidad de predecir el comportamiento de sistemas marco-muro mediante el conocimiento de características mecánicas de los materiales, y señalan los beneficios del confinamiento en la resistencia lateral. Por otro lado, la práctica ingenieril demandaba el desarrollo de métodos que permitiesen modelar el comportamiento de sistemas estructurales marco-muro para su análisis y diseño sismorresistente, como se puede entrever de los trabajos de Stafford-Smith (1962,1966) en la década de los sesenta. A partir de pruebas experimentales y modelos analíticos de diferencias finitas, Stafford-Smith, desarrolló un modelo simplificado de diagonal equivalente que permite estimar la rigidez lateral en el intervalo lineal de sistemas marco-muro.

En las últimas cuatro décadas, han sido varios los investigadores, en diversos países, los que han intentado descifrar el comportamiento de estos sistemas estructurales. Con esta finalidad, se han estudiado,

experimental y analíticamente las propiedades de los materiales, mecanismos de falla, efecto de la carga cíclica, aberturas, contacto y rigidez relativa marco/muro, entre otras que intervienen en el fenómeno.

Fiorato *et al.* (1970), realizaron una serie de pruebas en marcos de concreto reforzado con acero no dúctil y rellenos con mampostería, construidos a 1/8 de escala, los cuales se sometieron a cargas laterales, monótonas y cíclicas. A partir de estas pruebas determinan la existencia del efecto de columna corta en el mecanismo de falla.

Klingner y Bertero (1976), y posteriormente Broken y Bertero (1983) realizaron pruebas en marcos de concreto reforzado con muros de concreto, reforzados en las direcciones vertical y horizontal. Estos modelos en configuraciones de tres niveles y construidos a 1/3 de escala se probaron ante carga lateral monótona y cíclica. Concluyen de dichas pruebas que los paneles pueden ser efectivamente usados para incrementar la resistencia y ductilidad en el desempeño sísmico de marcos de concreto reforzado, reportando incrementos en la rigidez entre 5 y 11 veces el valor de los marcos sin muro. Señalaron el deterioro de la resistencia y rigidez lateral con los ciclos de carga reversible, y que la resistencia máxima bajo carga cíclica, es en general, menor que la obtenida para carga monótona, pero esta siempre es mayor que la del marco solo. Riddington y Stafford-Smith (1977), publican que para relaciones de aspecto con valores de altura entre ancho (H/L) menores que 0.50, la rigidez lateral de sistemas simples es prácticamente independiente de dicha relación y depende linealmente para valores de H/L mayores a 0.50.

Meli (1979), realiza un extenso estudio de las propiedades de la mampostería, y del comportamiento de muros de mampostería construidos con piezas y morteros fabricados en México, y posteriormente propuso medios para controlar el daño sísmico que pudiera provocarse en edificios que contengan muros de mampostería. Basándose en el estudio de modelos a escala, reporta significativas diferencias entre muros con bloque hueco y macizos, estableciendo límites aceptables de desplazamiento de entrepiso para cada tipo de mampostería que en la época se producían en México.

A mediados de los ochentas, Liauw y Kwan (1985), basados en pruebas de pequeños marcos de acero rellenos con paneles relativamente rígidos de concreto identificaron los mecanismos de falla caracterizados por la formación de articulaciones plásticas en vigas y columnas, que son acompañadas de aplastamiento del relleno en las esquinas en compresión. Hobbs y Samai (1985), investigaron el efecto de la rigidez de un muro diafragma respecto al del marco estructural, y concluyeron que a un relleno débil corresponde un comportamiento caracterizado por una respuesta elasto-plástica perfecta mientras que un relleno rígido provoca un comportamiento más frágil y favorece el desarrollo de la falla cortante en los miembros del marco. Moghaddam y Dowling (1987), advierten la importancia de la fuerza de fricción en la interfaz marco-muro en el comportamiento del conjunto, y estudiaron el efecto de las aberturas.

El comportamiento histerético de los muros permite definir su capacidad de disipación de energía, por lo que algunos investigadores han trabajado sobre este tema; así, Žarnic y Tomažević (1988) estudiaron modelos de muros confinados ante cargas cíclicas, algunas técnicas de reparación para muros y la respuesta de muros reparados ante nuevos eventos sísmicos. Un año después, Schmidt (1989) publicó los resultados de pruebas en marcos de concreto reforzado y muros diafragma de bloques con juntas de mortero relativamente débiles. En esas pruebas el incremento de resistencia lateral dado por el relleno no es muy significativo. Estos especímenes probados exhiben un gran número de corrimientos a lo largo de las juntas de mortero seguidos de la formación de articulaciones plásticas en los extremos superior e inferior de las secciones de columnas.

Mehrabi *et al.* (1994) realizan una serie de 14 pruebas experimentales de marcos de concreto reforzado con muros a base de bloques de concreto, a mitad de escala de una y dos crujías, sujetos a cargas cíclicas. El objetivo de estas pruebas fue evaluar la influencia de la rigidez y resistencia relativa del muro de relleno respecto al marco, en la historia de carga lateral, y crujías adyacentes rellenas en el desempeño de esos marcos. A partir de sus trabajos concluyen que los modelos cargados de forma monótona reportaron resistencias del orden del 10 al 17 por ciento mayores que los modelos cargados de forma cíclica.

Mosalam *et al.* (1996) estudiaron el comportamiento de especímenes a escala. De la revisión que hacen de la literatura al respecto citan las conclusiones de varios investigadores, los cuales fueron previamente definidos. También se apunta que los marcos con muros aumentan hasta 20 veces su rigidez y cerca de cinco veces su resistencia para distorsiones de entrepiso del 1.5 por ciento.

2.2 Características de la mampostería.

La mampostería desde un punto de vista ingenieril (macroscópico), es un material heterogéneo formado por piezas prismáticas (tabiques o bloques) dispuestas en hiladas, unidas entre sí por un mortero. La naturaleza y orientación de estas piezas define la ortotropía en el comportamiento de los muros de mampostería, al generar planos de debilidad en las uniones de las hiladas. Cada uno de estos materiales componentes exhibe, a partir de un cierto nivel de carga, un marcado comportamiento no lineal. Este comportamiento no lineal se hereda al conjunto, manifestándose principalmente como agrietamiento, deslizamiento y aplastamiento.

Se han llevado a cabo un considerable número de trabajos experimentales y analíticos para estudiar las propiedades mecánicas de la mampostería en su conjunto y los mecanismos resistentes básicos de conjuntos pequeños de piezas unidas. Estos mecanismos resistentes básicos son: Compresión axial, tensión diagonal, y los esfuerzos tangenciales en las juntas.

Compresión axial. Las piezas y el mortero tienen en general propiedades mecánicas distintas por lo que al ser sometidos a esfuerzos de compresión axial se presenta el “efecto de junta” estudiado por Hilsdorf, Fig. 2.1. Este efecto se presenta por la compatibilidad de deformaciones transversales, y consiste en términos generales en un aumento de la resistencia del material más deformable (mortero) por el efecto de confinamiento triaxial, respecto a la que tendría si se pudiera deformar libremente, mientras que disminuye la del material más rígido (piezas) debido a las tensiones transversales. Se deduce de este fenómeno que los esfuerzos transversales inducidos en los dos materiales dependen directamente de la diferencia entre los módulos elásticos, relación de Poisson y el espesor de la junta. La falla podrá presentarse por aplastamiento de las piezas debido a los esfuerzos de compresión axial, pero también podrá presentarse por agrietamiento vertical producido por las deformaciones transversales que pueden verse incrementadas en las piezas por el efecto de junta, cuando este agrietamiento es excesivo se produce la inestabilidad del elemento de mampostería. El aplastamiento del mortero, no ocasiona en general, la falla del elemento ya que por estar colocado en capas delgadas es retenido por las piezas y no provoca la inestabilidad del conjunto.

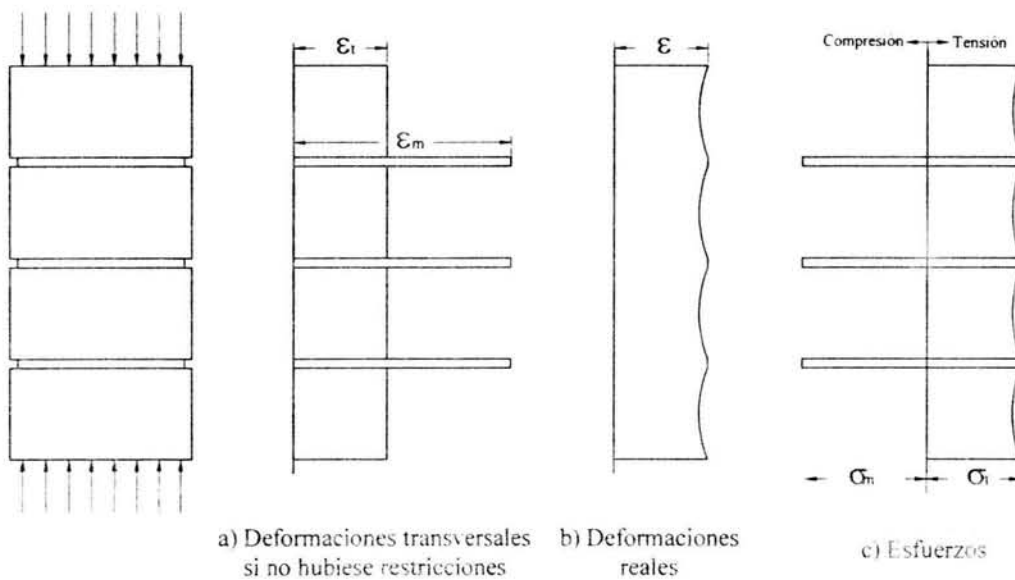


Fig. 2.1 Efecto de junta.

Tensión diagonal. La falla por tensión diagonal se reconoce porque la grieta que produce, atraviesa indistintamente las piezas y el mortero con una trayectoria aproximadamente recta, la grieta se forma del centro de la muestra hacia los extremos. Tanto la distribución como los valores de los esfuerzos principales de tensión varían con la relación entre módulos de elasticidad de los materiales. Considerando que la falla por tensión diagonal ocurre cuando las piezas son de baja resistencia y tienen buena adherencia y fricción con el

mortero, y que de lo contrario la falla es debido a los esfuerzos tangenciales en las juntas, puede considerarse que interesan principalmente los casos en que la relación de módulos de elasticidad de la pieza y el mortero es menor o igual a uno, para los cuales la distribución real de esfuerzos no es muy diferente a la que se obtiene considerando el material homogéneo, Fig. 2.2 a).

Esfuerzos tangenciales en las juntas. Para que ocurra este tipo de falla, en que se presenta un deslizamiento sobre las juntas, es necesario que se exceda la resistencia a esfuerzos tangenciales de las juntas que es proporcionada por la adherencia o cohesión, y por la fricción ocasionada por los esfuerzos normales a la junta entre mortero y piezas, Fig. 2.2 b).

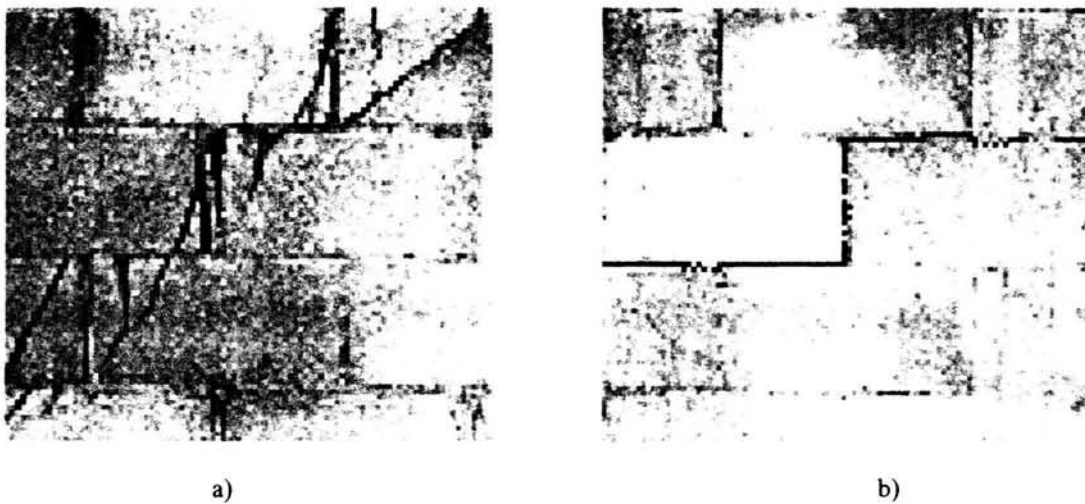


Fig. 2.2 Mecanismos de tensión diagonal y esfuerzos tangenciales en las juntas.

2.3 Comportamiento ante carga lateral de sistemas simples marco-muro.

Desde inicios del siglo veinte en algunas áreas sísmicas se han utilizado marcos de concreto reforzado rellenos en su interior con muros de mampostería en la construcción de edificios de mediana y baja altura para proveer resistencia a la flexión y cortante. En la práctica se acostumbra la construcción primeramente del marco de concreto reforzado (ó acero) y después de los muros de mampostería para rellenar el intradós del marco. Se reconocen dos filosofías constructivas: aquella en la que se pretende intencionalmente aislar el muro y aquella en la que esta separación no es intencional. En este caso, la contracción del material de relleno, inexactitud del acabado, entre otros, usualmente resultan en una falta inicial de contacto. En el caso del aislamiento intencional en ocasiones, éste no es suficiente para todos los niveles de demanda requeridos y se genera una interacción entre marco y muro.

Por la complejidad propia del sistema estructural marco-muro, diversos autores han tomado como referencia para la descripción del comportamiento ante carga lateral en el plano, el denominado sistema simple marco-muro, mostrado esquemáticamente en la Fig.2.3.

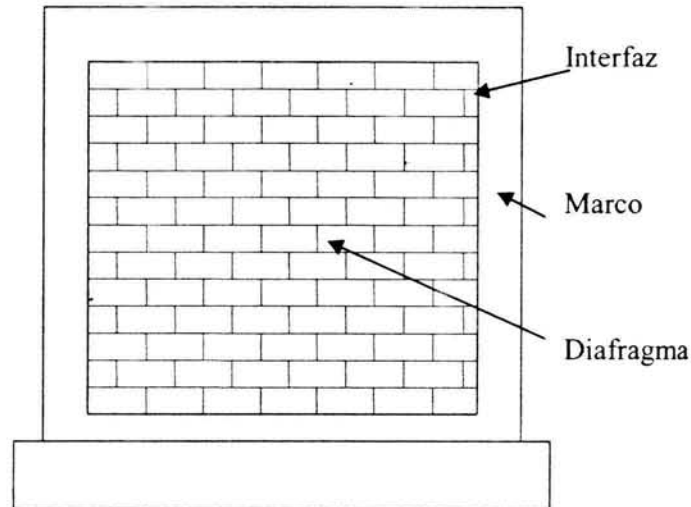


Fig. 2.3 Sistema simple marco-muro.

Los trabajos experimentales desarrollados en las últimas décadas coinciden en términos generales en la descripción del comportamiento ante carga lateral en el plano de sistemas simples marco-muro, algunos de ellos distinguen dos condiciones iniciales: la primera cuando se tiene una separación inicial entre muro y marco como consecuencia del proceso constructivo. En este caso, trabaja solamente el marco hasta que el desplazamiento es suficiente para cerrar la abertura inicial, es entonces cuando se presenta el contacto entre muro y marco en las zonas extremas de la diagonal cargada, Fig. 2.4. La extensión de dicha zona de contacto depende de la rigidez relativa entre marco y muro. La segunda condición se presenta cuando inicialmente existe contacto entre muro y marco. En este caso al aplicar la carga horizontal paralela al plano del panel, debido a la diferencia de rigidez del muro y el marco se inicia un proceso de agrietamiento o separación entre estos en las zonas de contacto sometidas a tensión que por lo regular se presentan en las esquinas que forman la diagonal ortogonal a la de la aplicación de la carga. Liaw y Kwan (1985), señalan la importancia de evaluar la magnitud de los esfuerzos cortantes que aparecen por efecto de fricción entre la superficie del marco y el muro en el comportamiento del conjunto. Moghadam y Dowling (1987), señalan a este respecto que la presencia de la separación inicial prácticamente no afecta la resistencia, aunque la carga de agrietamiento puede reducirse ligeramente.

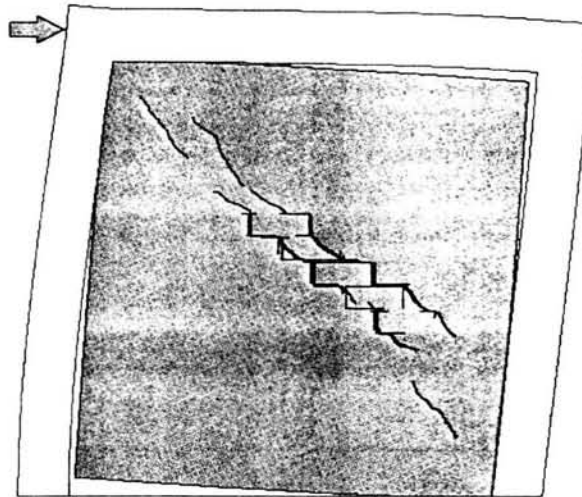


Fig. 2.4 Esquema de deformación del sistema simple marco-muro.

Comparando la rigidez lateral para estas dos condiciones, al iniciar el proceso de carga se encuentra que para la primera se tiene una alta rigidez inicial, la cual se ve disminuida al producirse la separación, mientras que para la segunda se inicia con una rigidez lateral baja correspondiente al marco solo la cual se incrementa considerablemente al entrar en contacto con el muro. Si el refuerzo longitudinal en las columnas del marco, principalmente la sometida a tensión es adecuado para evitar la falla por flexión, se aprecia una disminución en la rigidez, la cual corresponde a la formación de una grieta diagonal que une el extremo cargado con la esquina inferior opuesta. Algunos experimentalistas comentan de lo observado que dicho agrietamiento se inicia en el centro del muro y se extiende hacia los extremos de dicha diagonal.

Meli (1979), indica que las características del marco no tienen significativa influencia en el comportamiento del sistema antes de la aparición del agrietamiento inclinado, pero después son precisamente estas las que determinan la capacidad adicional del conjunto.

Al presentarse el agrietamiento en la mampostería, el muro actúa sobre el marco como un puntal de compresión que reacciona contra las uniones viga-columna del marco en la diagonal cargada, transmitiendo fuerzas cortantes adicionales a las que se presentan en el marco trabajando solo. En este nivel de carga se requiere que el refuerzo transversal sea adecuado para que el sistema sea capaz de soportar incrementos adicionales de carga. Si la columna no posee el refuerzo transversal suficiente, se produce la falla por cortante de esta con la consecuente falla del conjunto. Cuando este refuerzo es adecuado y se incrementa la carga lateral puede presentarse aplastamiento local de la mampostería en las zonas extremas de la diagonal cargada. Posteriormente se presenta una zona de fluencia prolongada hasta que falla el acero de refuerzo longitudinal de la columna en tensión o el aplastamiento de la columna en compresión.

El comportamiento descrito en los párrafos anteriores puede representarse fácilmente por la curva idealizada carga-distorsión mostrada en la Fig. 2.5. En dicha figura se indican las cuatro zonas de comportamiento características de un sistema marco-muro adecuadamente diseñado.

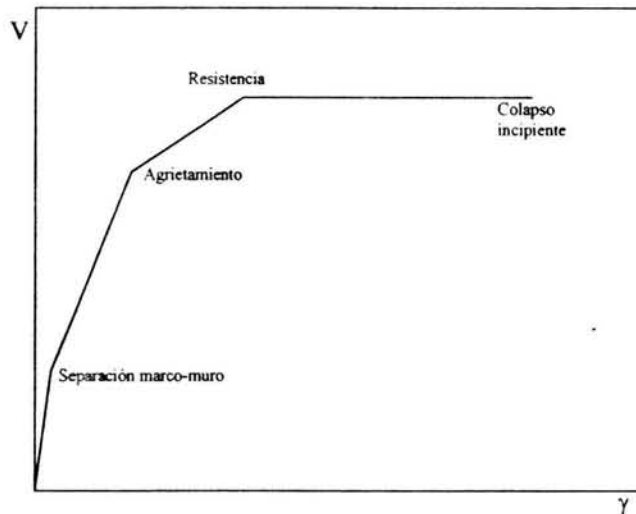


Fig. 2.5 Gráfica idealizada carga-distorsión característica de sistemas marco-muro.

A partir de resultados experimentales y analíticos diversos autores han determinado niveles de distorsión en los que ocurre el agrietamiento y la resistencia en sistemas marco-muro. En la tabla 2.1 se muestran valores establecidos por algunos autores. Así, por ejemplo, en las Normas Técnicas Complementarias de mampostería se establecen niveles de distorsión de 0.004 y 0.006 cuando se alcanza la resistencia en piezas huecas y macizas, respectivamente.

Tabla 2.1 Distorsiones asociadas a distintos niveles de carga.

Modelo	Separación	Agrietamiento	Resistencia	Modo de Falla
Polyakov (1956)	0.00003-0.0007	----	0.0012-0.0079	Varios
Esteva (1966)	0.0001-0.0006	0.0008-0.003	----	Varios
Meli (1979)	----	0.0005-0.0015	----	Varios
Flores et al. (1999)	----	0.0003	0.006	Agr. Inclinado

2.4 Mecanismos de falla.

De la revisión bibliográfica descrita al inicio de este capítulo se concluye que, de manera general, el mecanismo de falla de marcos de concreto reforzado con muros diafragma sujetos a cargas laterales depende de factores tales como la resistencia y rigidez relativas entre muro y marco, la relación de aspecto, la calidad de los materiales, el contacto entre muro y marco, entre otros. En este trabajo se presentan los mecanismos de falla presentados por Mehrabi *et al.* (1994), ya que quien esto escribe considera contiene en términos generales los mecanismos reportados por diversos autores como Meli (1979), Moghaddam y Dowling (1987), Tomažević (1999), entre otros.

Mehrabi *et al.* (1994), definen, con base en resultados experimentales de diversos autores, como posibles mecanismos de falla los presentados en la Fig. 2.6, los cuales se clasifican en cinco grupos, mostrados por columnas en la figura.

a) *Falla por flexión*, la combinación de esfuerzos de tensión y de cortante en la columna sometida a tensión, puede producir la falla de ésta, principalmente si esta es de concreto y no tiene suficiente refuerzo transversal y/o longitudinal.

b) *Agrietamiento a media altura*, cuando los paneles de mampostería son relativamente rígidos o con relaciones de aspecto altura/ancho menores a la unidad el desplazamiento lateral genera un cortante máximo a la mitad de la altura del muro y provoca una falla por deslizamiento a lo largo de la junta horizontal de mortero, ocasionando la falla por cortante en las columnas debido a la presencia del efecto de columna corta con articulaciones plásticas en la parte inferior y superior de la zona libre.

c) *Agrietamiento inclinado*, si el marco es suficientemente rígido para evitar el aplastamiento del muro (relación de rigidez marco/muro de Stafford-Smith 1966, $\lambda h < 10$), entonces ocurre agrietamiento a lo largo de la diagonal en compresión a causa de los esfuerzos principales de tensión en dirección perpendicular. Este comportamiento no implica el colapso y en muchos casos pueden alcanzar niveles de carga significativamente mayores que el correspondiente al agrietamiento.

d) *Deslizamiento de las juntas horizontales*, las partes del muro que se separan permiten que las columnas se deformen libremente, resultando en la aparición de articulaciones plásticas en las columnas en la unión entre viga y columna. En el caso de muros cuadrados, el deslizamiento es frecuentemente acompañado de agrietamiento diagonal, propagándose de la parte central del muro hacia las uniones viga columna. La disipación de energía es resultado de las articulaciones plásticas que se presentan en las columnas y de la fricción que existe entre las partes del muro.

e) *Aplastamiento de esquina*, este mecanismo se presenta en sistemas con marcos altamente flexibles, ya que los esfuerzos de compresión en la esquina cargada se concentran en una zona reducida provocando el aplastamiento de la mampostería. Conforme sea más rígido el marco, y por lo tanto, sea mayor el área en que se distribuye el esfuerzo, la zona de aplastamiento se extiende hacia el centro del muro.

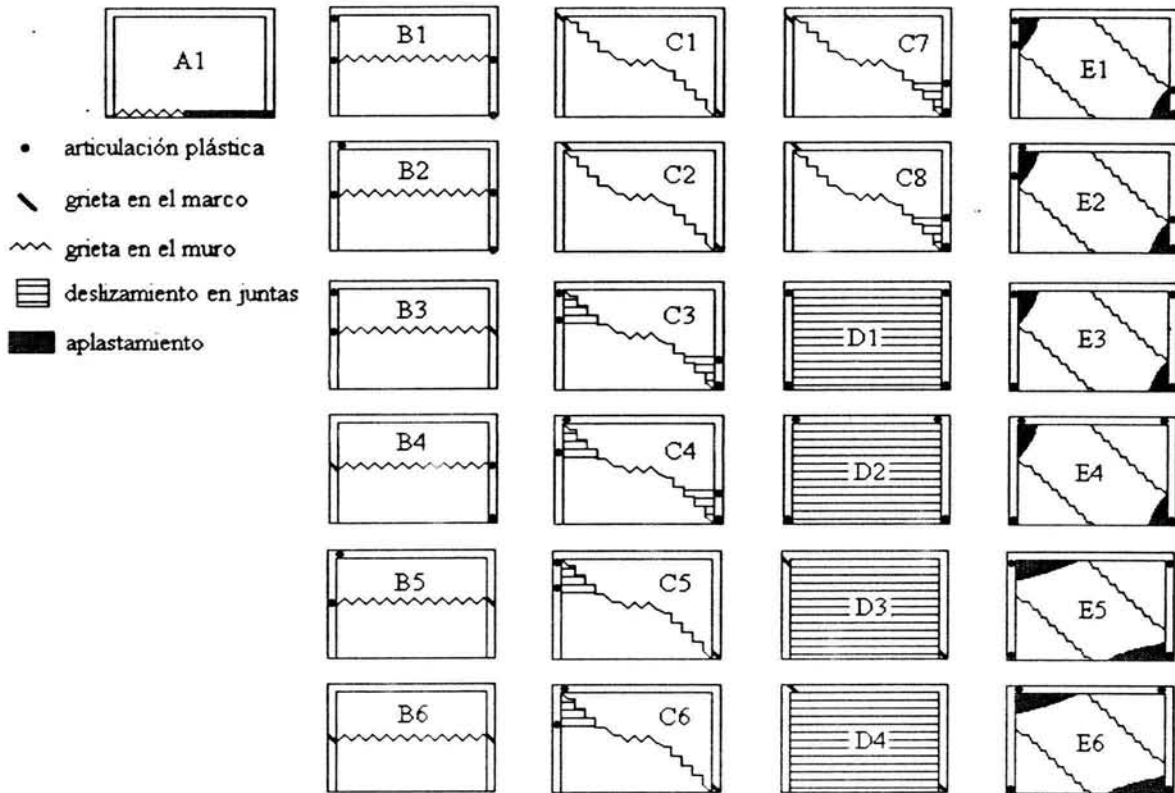


Fig. 2.6 Mecanismos de falla propuestos por Mehrabi *et al.* (1994).

2.5 Efecto de las aberturas en sistemas marco-muro.

Para que un edificio pueda ser utilizado con fines comerciales, habitacionales, recreativos, entre otros, requiere de aberturas que provean funcionalidad (iluminación, ventilación, circulación, etc.) y estética. Dichas aberturas modifican el comportamiento descrito en el apartado 2.3, como puede apreciarse en trabajos de investigación desarrollados. Desde las primeras investigaciones, diversos autores han reconocido como resultado de pruebas experimentales y modelos analíticos que dichas aberturas modifican sustancialmente la resistencia y rigidez ante carga lateral de sistemas marco-muro, así como la magnitud y distribución de esfuerzos en el muro y elementos mecánicos en el marco.

Mallick y Grag (1971) encuentran de sus investigaciones que si las aberturas se ubican cerca de los extremos de la diagonal en compresión, la rigidez lateral del conjunto puede reducirse a valores del 10 al 15 por ciento y la resistencia hasta valores del 25 por ciento. En el caso de aberturas localizadas en la zona media del muro, la reducción de rigidez lateral del conjunto puede ser del 50 al 75 por ciento de los obtenidos para el muro sin aberturas.

El comportamiento de muros de relleno con aberturas (puertas y ventanas) de diferentes medidas y con diferentes refuerzos confinantes en la abertura fue estudiado por Achyutha *et al.* (1986), mediante modelos de elementos finitos en el intervalo lineal, ellos encontraron que la rigidez lateral disminuía con el incremento en el tamaño de las aberturas, siendo más drástica la reducción cuando ocurría separación entre marco y muro. Concluyendo que para 50 por ciento de aberturas la contribución del muro a la rigidez lateral deja de ser importante.

Moghaddam y Dowling (1987), señalan la drástica reducción de la resistencia lateral para muros con una abertura centrada de dimensiones altura y ancho, $H/3$ y $L/3$ respectivamente, al 50 por ciento de la obtenida en el mismo muro sin abertura.

En México, se ha desarrollado trabajo experimental y analítico de sistemas de muros con aberturas a partir de la década pasada, con los trabajos de diversos autores entre los que se pueden mencionar, Ishibashi y Katsumata (1994), Cerón (1997), Álvarez y Alcocer (2001), entre otros.

Cerón (1997), estudia el comportamiento elástico lineal de muros diafragma con huecos sujetos a carga lateral mediante el método de los elementos finitos. En este estudio comenta que, si bien, en un muro sin aberturas los esfuerzos principales de compresión se presentan en la vecindad de la diagonal principal, y con su misma orientación, ante la presencia de aberturas en dicha diagonal, la distribución de esfuerzos adopta patrones complicados de definir. Concluye que, si bien la distribución de esfuerzos es una de las principales justificaciones de los modelos de diagonales equivalentes en muros sin aberturas, en muros con dichos modelos resultan inaplicables. Los elementos máximos de flexión ya no se presentan en los extremos, sino en los tercios centrales de las columnas, lo cual debe considerarse para la ubicación de los traslapes del acero longitudinal. En cuanto a las fuerzas cortantes, además de modificar su distribución, la presencia de muros puede incrementar su magnitud respecto a los calculados sin muros.

Álvarez y Alcocer (2001), desarrollan un extenso estudio en el que tratan el efecto de la posición y tamaño de las aberturas en la rigidez y resistencia de muros confinados mediante modelos de elementos finitos desarrollados en el programa SBETA (Cervenka y Pukl, 1995). En este trabajo se proponen recomendaciones de diseño, entre las que destacan la necesidad de colocar “castillos” en los bordes verticales de la abertura

cuando la dimensión horizontal de esta sea mayor que el 25 por ciento de la longitud del muro, y la posibilidad de despreciar el efecto de la misma cuando sean iguales o menores que el 12.5 por ciento de las respectivas dimensiones del muro.

Capítulo 3

Modelo No-Lineal de Elementos Finitos

El conocimiento actual del comportamiento estructural de sistemas marco-muro es aún escaso, sobre todo en el intervalo no-lineal, requerido para las filosofías de diseño por desempeño y resistencia última. Es por esto, que son necesarios más resultados experimentales; sin embargo, dichas pruebas demandan gran cantidad de recursos económicos, materiales y humanos lo que obliga a los investigadores a emplear métodos alternos. Sin embargo, dichos resultados se requieren para calibrar los modelos numéricos.

En las últimas décadas, gracias al desarrollo de la tecnología computacional, los investigadores han encontrado en los métodos numéricos clásicos un camino alternativo en la investigación del comportamiento de prácticamente todo tipo de estructuras. Se pueden mencionar entre otros, los *métodos de diferencias finitas* (FDM), *elementos de frontera* (BEM), y *elementos finitos* (FEM).

En el capítulo desarrollado a continuación, se pretende fundamentar el modelo analítico de elementos finitos que servirá de base para el estudio de las variables objeto de este trabajo. Para este fin, se bosquejan brevemente algunos trabajos de investigación analítica desarrollados en las últimas cuatro décadas para sistemas marco-muro y se definen los modelos de comportamiento del material utilizados para aproximar de manera aceptable el comportamiento del modelo experimental. Finalmente se presentan los resultados de la calibración de un modelo analítico con los resultados de la prueba experimental correspondiente.

3.1 Antecedentes.

El comportamiento de marcos rellenos con muros ha sido estudiado formalmente por varios autores mediante el FEM desde finales de los años sesenta. Se dice en la literatura que el método de los elementos finitos fue usado por vez primera en el análisis de sistemas marco-muro por Karamanski (1967).

Desde los primeros intentos de usar el método de elementos finitos en el análisis de sistemas marco-muro, el modelado de las condiciones de interfase ha recibido significativa atención. Mallick y Severn (1969), iniciaron el tratamiento de condiciones de interfaz para considerar la formación de separaciones, deslizamiento y fricción entre los miembros del marco y el muro de relleno. Riddington y Stafford-Smith (1978) introdujeron miembros de contacto de pequeña rigidez entre nudos en la interfaz para simular la separación. King y Pandey (1978), emplearon elementos de fricción para modelar la interfaz entre el marco y el muro.

Thiruvengadam (1985) utilizó el FEM en el análisis para evaluar las primeras frecuencias naturales y las formas modales asociadas en marcos con muros diafragma. Él comparó estos resultados con dos métodos aproximados, denominados, modelo de diagonal múltiple y la analogía del cantiliver de cortante-flexión.

Dhanasekar y Page (1986), condujeron un programa de investigación experimental donde probaron 180 modelos a media escala bajo estado biaxial de esfuerzos. Basados en sus resultados experimentales, ellos propusieron un modelo constitutivo de rellenos frágiles de mampostería que incluye propiedades elásticas, una relación inelástica esfuerzo deformación y una superficie de falla. Reflak y Fajfar (1991), generan otra interesante contribución en el uso del FEM en el análisis de sistemas marco-muro, ellos tratan a cada relleno como una subestructura y todos los grados de libertad correspondientes al relleno, con la excepción de aquellos en el contacto con el marco, fueron eliminados usando el procedimiento de condensación estática.

En México, el método de los elementos finitos ha sido utilizado para modelar sistemas marco-muro en diversos trabajos como los de Bazán (1980), Cerón (1997), Orduña (1999), Araujo (2000), entre otros.

3.2 Modelo de Elementos Finitos para un Sistema Simple de Marco-Muro.

El método del elemento finito aplicado a la mecánica estructural, es una técnica para obtener soluciones aproximadas, ya sea de una ecuación diferencial con condiciones de fronteras dadas y definida sobre un cierto dominio, o de la formulación variacional equivalente de alguno de los teoremas de trabajo y energía (Bathe 1982, Ayala 2003).

3.2.1 Modelo Experimental.

En este trabajo se utilizó como modelo para calibración, un sistema marco-muro con columnas y trabe de concreto reforzado, y diafragma de mampostería con bloque hueco de concreto vibro comprimido, Fig. 3.1. Dicho sistema fue ensayado por Flores *et al.* (1999), en septiembre de 1998, como parte de un proyecto experimental realizado en el *Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED)*, para la revisión de estructuras a raíz de los sismos de 1985, con el patrocinio de Teléfonos de México. Se seleccionó este modelo, por dos razones principales: son escasas las pruebas experimentales de sistemas marco-muro de los que se cuenta con información experimental, y al considerable aumento en la producción y uso de este tipo de bloques.

En la Fig. 3.1 se muestran las características geométricas del sistema ensayado. Las columnas de concreto son de 28 x 28 cm de lado, reforzadas con seis varillas longitudinales del número ocho, y la viga superior de 28 x 38 cm con cuatro varillas longitudinales del número ocho, el espesor del muro de mampostería es de 15 cm.

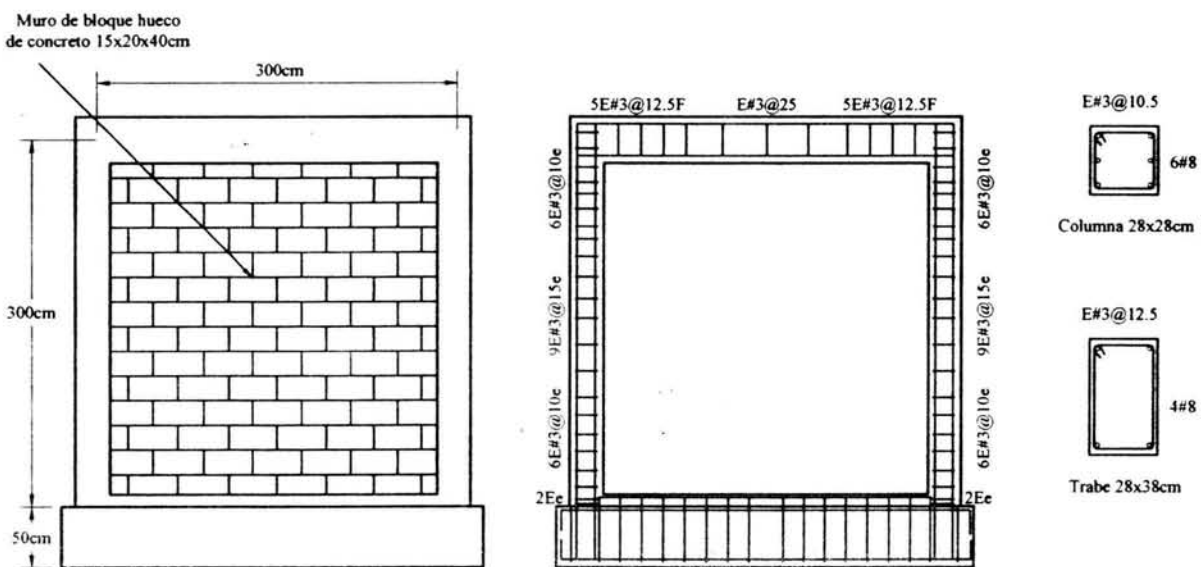


Fig. 3.1 Características del modelo experimental.

Las propiedades de los materiales reportadas por Flores *et al.* (1999) para el modelo TO, fueron: concreto con una resistencia nominal $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$. En el muro de mampostería se usó bloque hueco de concreto con resistencia promedio a la compresión en pilas $f'_m = 40 \text{ kg/cm}^2$ y con un esfuerzo cortante resistente de diseño $v^* = 3.5 \text{ kg/cm}^2$; los bloques se unieron con mortero, cuya resistencia a la compresión fue $f'_b = 75 \text{ kg/cm}^2$.

Durante la prueba, el sistema se sometió a carga horizontal cíclica produciendo incrementos de distorsión prefijados, Fig. 3.2. Dicha distorsión se estimó midiendo el desplazamiento horizontal en el centro del marco

y a la mitad del peralte de la trabe, dividido entre la altura. Para simular el efecto de la carga vertical en el marco de concreto reforzado se mantuvo una carga constante de 37 t sobre cada columna, equivalente a un esfuerzo sobre el área bruta de la columna de $0.19f_c$.

A partir de los resultados de la prueba cíclica experimental, se construyó la envolvente de carga-distorsión horizontal mostrada en la Fig. 3.3, que servirá de referencia para la calibración del modelo de elementos finitos ante carga lateral monótona.

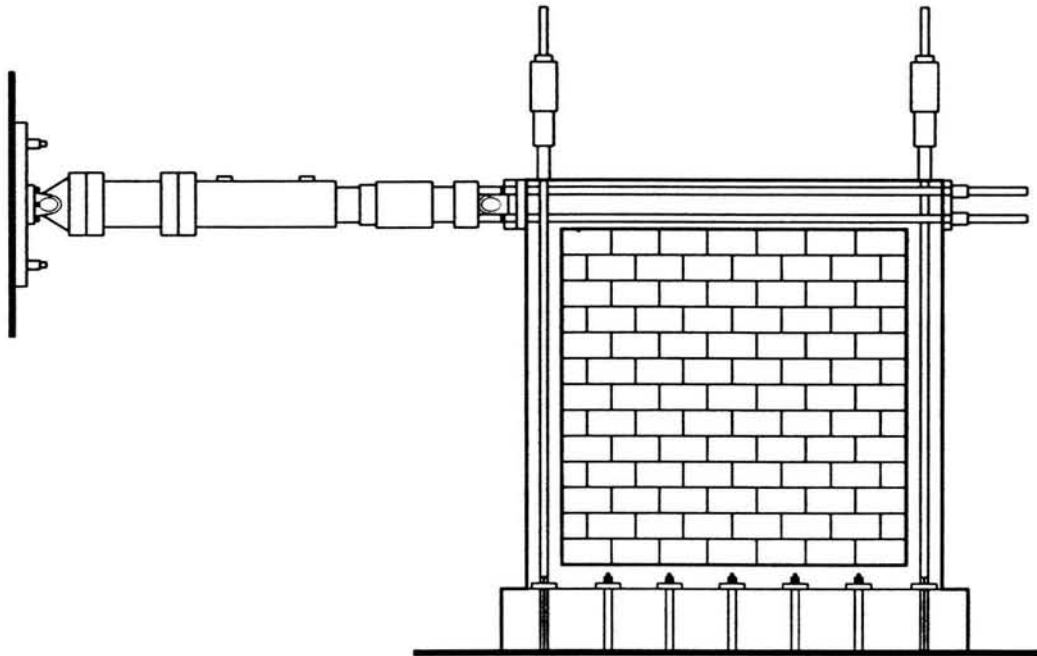


Fig. 3.2 Dispositivo de aplicación de carga (Flores *et al* 1999).

Como parte del programa experimental, una vez que se terminó de ensayar el modelo, se retiró el muro de mampostería y se aplicaron algunos ciclos de carga sobre el marco de concreto sin muro de relleno hasta alcanzar distorsiones del orden de 0.005, por lo que se extendió numéricamente la curva de comportamiento del marco hasta alcanzar la distorsión máxima permitida en las *Normas Técnicas Complementarias (NTC)* del *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF-2004)* para sistemas de marcos sin muros. Para el desarrollo numérico del marco se aceptó la formación de articulaciones plásticas sobre las columnas en los extremos de la diagonal cargada. La curva de comportamiento del muro aislado mostrada en la Fig. 3.3, se obtuvo de la diferencia entre las del sistema marco-muro y del marco aislado.

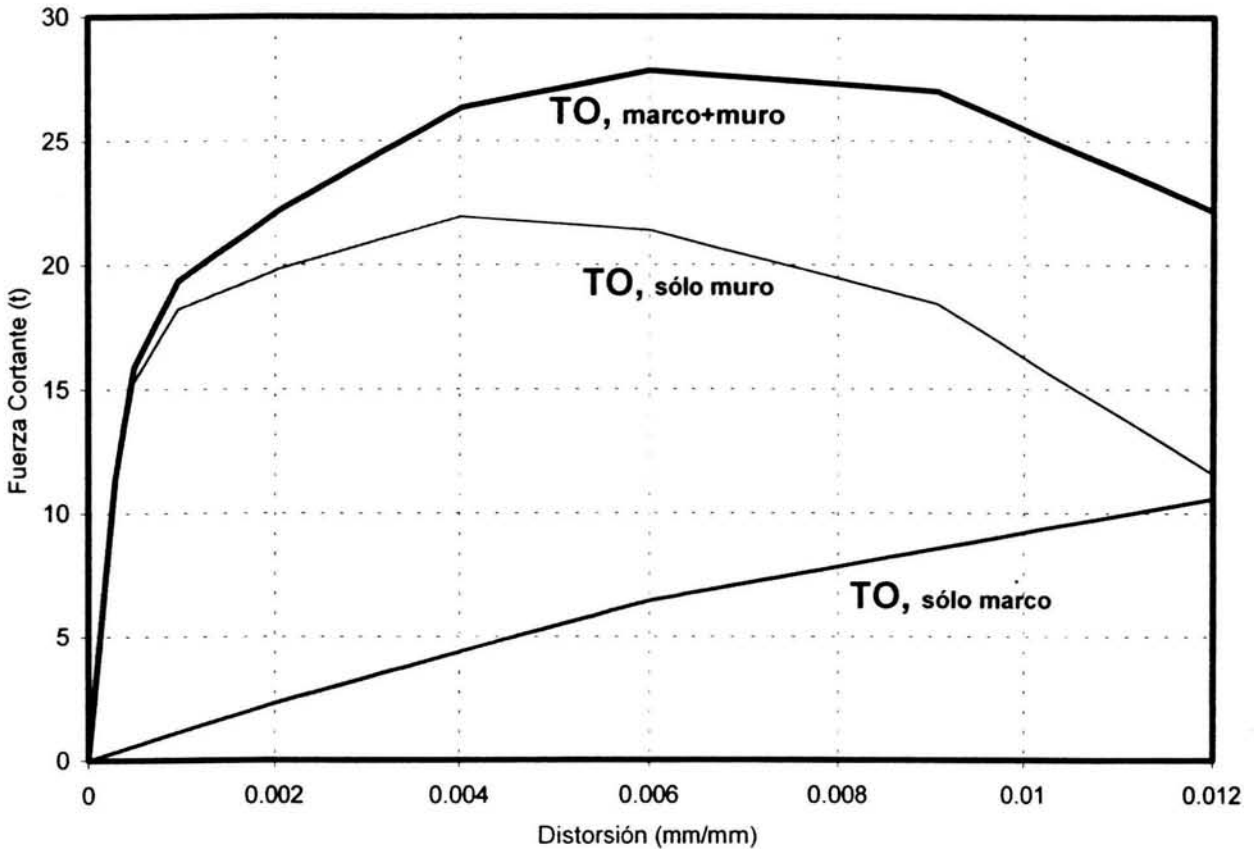


Fig. 3.3 Envolvente carga horizontal – distorsión (Flores *et al.* 1999).

Al comparar las curvas del sistema marco-muro y del muro aislado puede apreciarse una etapa inicial en la que el comportamiento del marco solo y el sistema marco-muro presentan prácticamente el mismo comportamiento; esta etapa termina al aparecer el agrietamiento en el muro, para posteriormente presentar una diferencia de comportamiento que corresponde a la contribución del marco. Esto es congruente con lo reportado por Meli (1979), quien indica que las características del marco no tienen significativa influencia en el comportamiento del sistema antes de la aparición del agrietamiento inclinado, pero después son precisamente estas las que determinan la capacidad adicional del conjunto.

3.2.2 Modelo Numérico.

Los muros de mampostería, por lo general, son elementos estructurales planos, es decir, dos dimensiones son mucho mayores que la tercera. En consecuencia, cuando únicamente interesa el estudio de acciones en el plano del muro, los esfuerzos perpendiculares resultan despreciables, siendo suficientemente aproximado el empleo de elementos en estado plano de esfuerzos.

En la actualidad, con fines de investigación, se reconoce el uso de tres niveles de refinamiento para el modelado de estructuras de mampostería mediante modelos de elementos finitos. Estos niveles son, macroscópico, microscópicos simplificado y detallado, Fig.3.4.

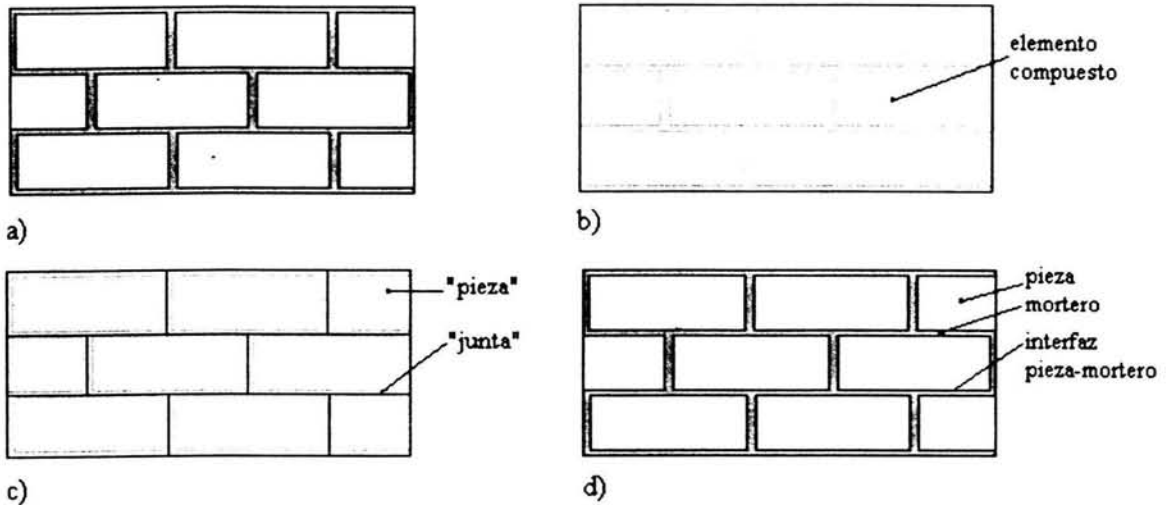


Fig. 3.4. Nivel de refinamiento de los modelos de elementos finitos para mampostería; a) mampostería; b) modelo macroscópico; c) modelo microscópico simplificado; d) modelo microscópico detallado.

En el nivel macroscópico, los muros se consideran como elementos continuos y homogéneos con modelos de comportamiento de plasticidad o mecánica de la fractura. Algunos autores recomiendan este nivel de refinamiento para el análisis de comportamiento global de sistemas a base de muros, ya que de otra manera resultaría, inclusive para fines de investigación, en un modelo demasiado complejo y difícilmente manejable. En el nivel microscópico simplificado, cada pieza de mampostería y la mitad del mortero que la rodea se modelan mediante un elemento al cual se le asignan propiedades homogéneas mediante modelos de plasticidad o agrietamiento distribuido. Estos se unen por medio de elementos de interfaz que permiten la separación de las piezas bajo un enfoque de fractura discreta. A nivel microscópico detallado, se modelan por separado las piezas y el mortero por medio de elementos continuos, mientras que el contacto de piezas y mortero se modela con elementos de interfaz. Estos últimos dos enfoques requieren de una mayor cantidad de recursos por lo que se utilizan para el estudio de pequeños conjuntos de piezas.

Es importante aclarar que cualquiera de los niveles de refinamiento utilizado para los modelos analíticos, en su etapa de validación; deben nutrirse de información apropiada de los materiales, y validarse con resultados experimentales; por lo que en muchas ocasiones, la escasa información experimental disponible influye decisivamente en la selección del nivel de refinamiento a utilizar.

Para encontrar la solución del sistema de ecuaciones implicadas en el modelo numérico propuesto; cuyas características geométricas y mecánicas se describen a continuación, se recurrió al programa de elementos finitos no lineales, NLFEM (2002), desarrollado dentro del grupo de mecánica numérica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

3.2.2.1 Modelo Geométrico.

Para este trabajo, ya que lo que interesa es un comportamiento global del sistema se optó por un modelado macroscópico de la mampostería, representada mediante 400 elementos cuadriláteros de cuatro nudos en estado plano de esfuerzos; El marco de concreto se modela mediante 224 elementos cuadriláteros de cuatro nudos en estado plano de esfuerzos. Para la integración numérica se recurrió a cuadratura gaussiana de 2×2 . Para reproducir el contacto entre el muro y sus fronteras (marco y contra trabe) se emplearon 80 elementos de interfaz de cuatro nudos; para su integración numérica se utilizó el método de Lobato, que ha demostrado mayor estabilidad numérica para estos elementos (Orduña, 1999). El acero de refuerzo tanto transversal como longitudinal se introdujo de manera discreta mediante elementos lineales de dos nudos. En la Fig. 3.5, se presentan las características geométricas de la malla utilizada en el modelo de elementos finitos.

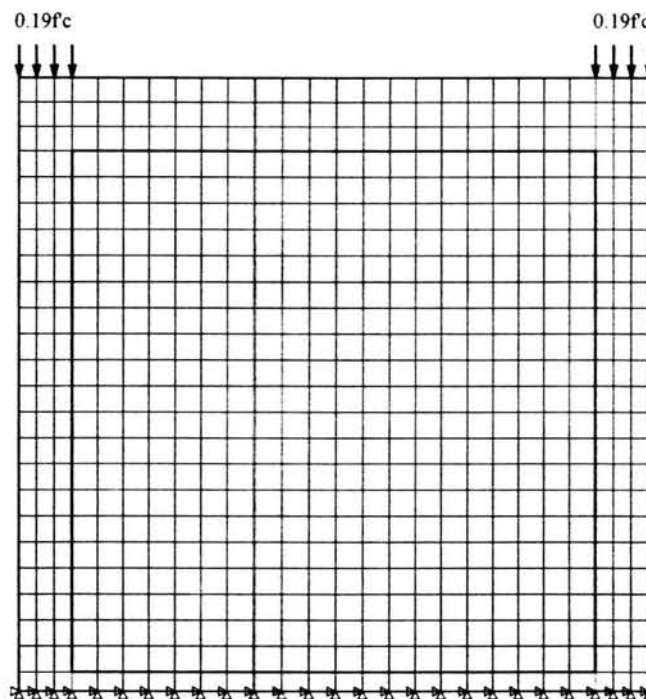


Fig. 3.5 Geometría de la malla de elementos finitos.

3.2.2.2 Modelo Mecánico.

En la actualidad, se utilizan principalmente dos enfoques para definir los modelos mecánicos de comportamiento no-lineal del material: teoría de la plasticidad y mecánica de la fractura.

Bajo el enfoque de plasticidad, se acepta la existencia de deformaciones permanentes, y que los esfuerzos dependen tanto del nivel de deformación al que se somete el material, como las historias de esfuerzos y deformaciones. Dentro del contexto de las deformaciones pequeñas, se acepta que las deformaciones se pueden descomponer en una parte elástica ϵ^e y otra plástica ϵ^p

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p \quad (3.1)$$

Una exposición más detallada de los conceptos de plasticidad, se pueden encontrar en la literatura sobre el tema, por ejemplo Mendelson (1986), y Crisfield (1991).

Por otra parte, la mecánica de la fractura estudia la formación y la propagación de grietas en cuerpos sólidos, y la influencia de estas grietas en su comportamiento mecánico. Esta rama de la mecánica ha dado origen a dos tipos de aplicaciones en el contexto de los elementos finitos: la fractura discreta, que modela a la grieta como una discontinuidad geométrica, y la fractura distribuida que considera al sólido agrietado como un continuo.

Los modelos de agrietamiento se basan en tomar a la anchura de la grieta como variable en estudio, por lo que es necesario distinguir entre la deformación producida por el agrietamiento y aquella producida por la deformación elástica del material no agrietado dentro de un elemento. El vector de deformaciones totales se descompone en una componente elástica ϵ^e y una componente por agrietamiento ϵ^{cr} :

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^{cr} \quad (3.2)$$

Esta descomposición permite, además, la combinación de modelos de agrietamiento con modelos de plasticidad de forma directa. Para mayor información sobre ésta y otras teorías de la mecánica de la fractura, se puede consultar Shah *et al.* (1995), y Rots (1988).

Sin importar cual de dichos enfoques se utilice, no debe perderse de vista que éstos no son más que una idea desarrollada para intentar reproducir el comportamiento real de los sistemas estructurales, originando que para dichos modelos se requiera la definición de parámetros de los que no se disponen valores experimentales y que en muchas ocasiones, ni siquiera se han definido pruebas índice para su determinación; por lo que

deben calibrarse las propiedades inelásticas asignadas al modelo para obtener el resultado global reportado en las pruebas experimentales.

En este trabajo el comportamiento mecánico de la mampostería y del concreto se definió mediante la combinación de un modelo de plasticidad con criterio de falla de Drucker-Prager en compresión, y un modelo de variación lineal basado en la teoría de la fractura para falla en tensión, Fig.3.6; con el modelo de ablandamiento de Hordijk *et al.* (TNO, 1996), que se ilustra en la Fig. 3.6 b), incluidos en el código NLFEM (2002), dando como resultado la función de falla en compresión mostrada en la ec. (3.3).

$$g(\sigma, \kappa) = \sqrt{\frac{1}{2} \sigma^T P \sigma + \alpha_g \pi^T \sigma} ; \quad \alpha_g = \frac{2 \sin \varphi(\kappa)}{3 - \sin \varphi(\kappa)} \quad (3.3)$$

En tensión el comportamiento es lineal hasta f_t , y a partir de aquí el ablandamiento se modela por medio de la ley de Hordijk *et al.* (TNO, 1996), con energía de fractura G_f dada. Esto se ilustra en la Fig. 3.6 b), donde se indica que el área bajo la curva de comportamiento es la energía relativa de fractura g_f ; De acuerdo con la teoría, la relación entre la energía de fractura G_f y la energía relativa de fractura g_f es,

$$G_f = g_f h \quad (3.4)$$

donde h es el ancho de banda del material, en el caso de elementos finitos, se ha demostrado que este parámetro depende de la geometría del elemento (Rots, 1988). Para cuadriláteros es común tomar a h como la raíz cuadrada del área del elemento. En la mecánica de fractura se supone que al iniciarse la formación de una grieta, la rigidez en cortante del material se reduce. Con este fin se introduce el factor de retención de cortante β , menor que la unidad y mayor que cero, que multiplica al módulo de cortante G_m .

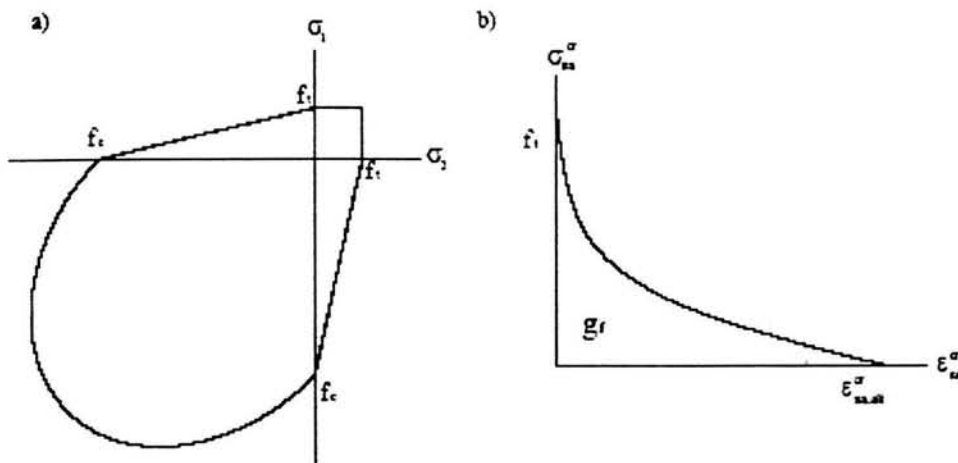


Fig. 3.6 Modelo de comportamiento para la mampostería y el concreto.

Los elementos interfaz de cuatro nudos con integración de Lobato que se utilizaron para modelar el contacto entre el muro y el resto de la estructura, tienen rigideces elásticas, normal y tangencial, dadas por

$$D_n = \frac{E_m}{t} \qquad D_t = \frac{G_m}{t} \qquad (3.5)$$

donde E_m y G_m son los módulos de Young y de cortante respectivamente, y t es el espesor de la junta que se está representando. Estas rigideces se interpretan físicamente como el valor del esfuerzo que es necesario aplicar a la interfaz para producir un desplazamiento relativo unitario. Para el comportamiento no lineal se utiliza el criterio de falla de Coulomb, con un límite en el esfuerzo de tensión, como se muestra en la Fig. 3.7. El comportamiento del elemento en dirección normal es elasto-plástico perfecto. Se utiliza retención de cortante constante, con un valor nulo de la rigidez reducida, lo que implica también comportamiento elasto-plástico perfecto. La matriz de rigideces tangente para este tipo de elementos queda expresada por,

$$\mathbf{k}_t = \frac{1}{h + k_n \tan(\phi) \tan(\psi) + k_t} \begin{bmatrix} k_n(h + k_t) & -k_n k_t \tan(\psi) \frac{t_t}{|t_t|} \\ -k_n k_t \tan(\phi) \frac{t_t}{|t_t|} & k_t(h + k_n \tan(\phi) \tan(\psi)) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

donde $h = \partial f / \partial \kappa$, k_n y k_t son las rigideces elásticas normal y tangencial respectivamente, ϕ y ψ son los ángulos de fricción y de expansión respectivamente, y t_t es el esfuerzo tangencial. Es evidente de la ec. (3.6) que si el ángulo de fricción es diferente que el de expansión, la matriz resulta ser asimétrica. En los modelos se tomó el ángulo de expansión con un valor nulo, lo cual es más realista (Lourenço, 1996).

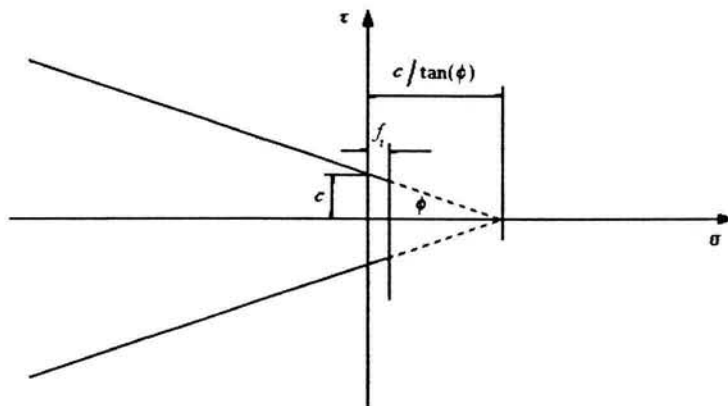


Fig. 3.7 Criterio de falla de Coulomb.

Para el acero de refuerzo se supuso un comportamiento elasto-plástico perfecto, y se consideró que existe adherencia perfecta con el concreto. Esta hipótesis es bastante razonable en marcos con muros de relleno, según los resultados que reportan Mehrabi *et al.* (1994), quienes analizan un marco de concreto reforzado con y sin relleno, y con y sin deslizamiento del acero de refuerzo. Encuentran que en el caso del marco sin relleno, el deslizamiento del refuerzo influye significativamente en la respuesta, mientras que en el marco con relleno este fenómeno no es significativo.

3.2.3 Calibración del Modelo Numérico.

Con el fin de tener control en las características del modelo mecánico se adoptó la estrategia de comenzar con un modelo simple, que permitiera conocer las fortalezas y debilidades del programa de análisis. A continuación, se añadieron sucesivamente las características que hacen complejo el análisis de estas estructuras, hasta incorporar el modelo mecánico descrito en el sub-capítulo anterior. Se comenzó con un modelo elástico-lineal, enseguida se incluyó el comportamiento no lineal de la interfaz, a continuación se incluyeron las características no lineales de la mampostería, y finalmente las del concreto y del acero de refuerzo.

Al hacer los primeros intentos de aprovechar las herramientas de análisis no lineal del programa NLFEM. La mampostería y el concreto siguen siendo elástico-lineales, mientras que en los elementos interfaz se incorporó un modelo de fractura frágil. Para las propiedades mecánicas de los materiales se tomaron como base las propiedades reportadas por Flores *et al.* (1999), y se hicieron las siguientes consideraciones:

- Para el módulo de Young de la mampostería se tomó un valor de $E_m = 28,000 \text{ kg/cm}^2$, que fue el valor medio de una serie de ensayos a compresión simple sobre ocho pilas que se realizaron como parte del proyecto experimental. Este módulo se calculó como la pendiente de la curva entre el punto de $0.4 f'_m$ y una deformación de 0.00005. En la tabla 3.1 se pueden observar los datos de las pilas, así como un resumen de los resultados de las pruebas. Para el módulo de Poisson se tomó el valor $\nu_m = 0.25$, que parece ser un valor razonable (Pande y Middleton, 1995).
- En el concreto se consideraron para el módulo de Young y la resistencia compresión los valores medios de ensayos realizados en cilindros de concreto, reportados por Flores *et al.* (1999). Estos valores fueron: $E_c = 115,220 \text{ kg/cm}^2$, y $f'_c = 235 \text{ kg/cm}^2$. El valor de la relación de Poisson para el concreto fue $\nu_c = 0.20$, que es un valor generalmente aceptado para este material (Park y Paulay, 1983).

Tabla 3.1 Resultado de los ensayos de compresión simple de pilas de mampostería (Flores *et al.* 1999).

Pila	Dimensiones, cm				Área bruta, A cm ²	Edad días	Carga (RDS) kg	Carga, kg	Esfuerzo bruto, f_m kg/cm ²	Módulo Elasticidad, E_m kg/cm ²	E_m/f_m	ϵ_m
	a	b	c	l_0								
1	14.8	39.7	60.0	40	587.2	28	19423	19250	32.78	14666	447	0.0031
2	14.8	39.7	60.0	40	587.2	29	21515	21600	36.79	15639	425	0.0030
3	14.8	39.7	60.0	40	587.2	29	19438	19550	33.30	27102	814	0.0016
4	14.8	39.7	60.0	40	587.2	30	24340	24550	41.81	35064	839	0.0014
5	14.8	39.7	60.0	40	587.2	30	23150	23460	39.95	23914	599	0.0020
6	14.8	39.7	60.0	40	587.2	30	24540	25200	42.92	28797	671	0.0020
7	14.8	39.7	60.0	40	587.2	30	26495	27100	46.15	48070	1042	0.0017
8	14.8	39.7	60.0	40	587.2	30	25400	25950	44.20	30511	690	0.0025
Promedios									39.74	27970	691	0.0021
Coeficientes de variación									0.13	0.38	0.30	0.30

- La interfaz entre marco y muro se consideró como una capa de mortero con un centímetro de espesor (t), que fue como se construyó el modelo experimental; para el cálculo del módulo de Young se utilizó la expresión recomendada por Meli (1979), $E_i = 250 f_b = 39,500 \text{ kg/cm}^2$. El valor de la resistencia del mortero (158 kg/cm^2) se tomó de los ensayos realizados sobre cubos reportados por Flores *et al.* (1999), y el valor de la relación de Poisson para el mortero fue $\nu = 0.2$, con lo que se obtuvieron los siguientes valores para las rigideces normal y tangencial de la interfaz,

$$k_n = \frac{E_i}{t} = 39,500 \text{ kg/cm}^2 / \text{cm}; \quad k_t = \frac{E_i}{2(1+\nu)t} = 16,500 \text{ kg/cm}^2 / \text{cm} \quad (3.7)$$

Uno de los mayores retos que presentó a este nivel el modelo, fue encontrar un método de solución, no ya que fuera el más adecuado, sino que permitiera por lo menos obtener alguna solución convergente y estable. Los métodos de Newton-Raphson, Newton-Raphson modificado, el de la rigidez secante, el de la rigidez constante, o la técnica del tamaño de paso óptimo, no permitieron ir más allá en el análisis que la separación de la interfaz, ya que el análisis dejaba de converger (sin importar cuantas iteraciones se hicieran no se reducía el error a una tolerancia razonable), o divergía (el error se hacía mayor con cada iteración). Por lo que se recurrió a un control por desplazamientos.

El siguiente paso fue incorporar el agrietamiento de la mampostería. Para lo que, la resistencia en tensión uniaxial se consideró igual al cinco por ciento de la resistencia en compresión, esto es, $f_t = 2.0 \text{ kg/cm}^2$, con un modelo de agrietamiento distribuido, criterio de falla con variación lineal del esfuerzo, y ablandamiento de Hordijk *et al.* (TNO, 1996) con energía de fractura de $G_R = 0.005 \text{ kg cm/cm}^2$, y un factor de retención de cortante (β) constante e igual a 0.001. Actualmente no se cuenta con información experimental suficiente para determinar los parámetros de un modelo de agrietamiento para mampostería hueca, por lo que, el valor de la energía de fractura se tomó de los análisis presentados por Lourenço (1996), mientras que para el factor

de retención de cortante se supuso dicho valor. El modelo no lineal fue muy rígido en las primeras etapas por lo que se modificó el modelo de la interfaz a uno de fricción con criterio de falla de Coulomb, intentando incorporar el fenómeno de deslizamiento y separación manifestados en el comportamiento de sistemas marco-muro en las primeras etapas de carga; para lo que se hicieron las siguientes consideraciones,

- La interfaz entre muro y marco con una cohesión $c = 1.8 \text{ kg/cm}^2$, una tangente del ángulo de fricción de 0.8; estos dos valores fueron tomados de resultados experimentales en ensayos a cortante reportados por Meli y Reyes (1971). Y un valor de la tangente del ángulo de expansión nulo, ya que para valores altos de esfuerzos confinantes y para desplazamientos tangenciales altos, este valor tiende a ser cero (Lourenço, 1996).

Con este refinamiento en el que se incluían los modelos no lineales comentados para la mampostería en tensión y la interfaz marco/muro, la curva calculada numéricamente coincide antes del agrietamiento con la experimental. Incluso, en el modelo numérico fue posible establecer la separación marco-muro para niveles de distorsión de 0.00005, que corresponde con lo reportado experimentalmente en diversos estudios; sin embargo, para la carga de agrietamiento el modelo numérico reportaba valores de resistencia del 20 por ciento mayores que los experimentales, y para distorsiones del orden de 0.006 se obtuvieron valores del orden de tres veces mayores a los experimentales. Esto motivó, se incorporara el comportamiento no lineal en compresión de la mampostería en el modelo; para este fin, se utilizó el modelo de plasticidad de Drucker-Prager disponible en el código del programa NLFEM. Se consideró una resistencia en compresión de $f'_m = 40 \text{ kg/cm}^2$, que es la resistencia media de las pruebas a compresión simple, mostrados en la tabla 3.1. De acuerdo con los resultados reportados por Lourenço (1996), se consideraron los siguientes valores: para la resistencia en tensión un valor de $f_t = 2.0 \text{ kg/cm}^2$; los valores de la energía de fractura para las propiedades de ablandamiento de la mampostería, que son propiedades del material, $G_R = 0.005 \text{ kg-cm/cm}^2$ para tensión; se utilizó un factor de retención de cortante (β) constante y con valor de 0.001.

Finalmente, se incorporó la no linealidad del concreto con un modelo mixto como el utilizado para la mampostería, y a del acero mediante un modelo elasto-plástico con los siguientes parámetros:

- El valor de la energía de fractura en tensión del concreto se estimó como $G_R = 0.005 \text{ kg-cm/cm}^2$ (Lourenço, 1996).
- En el acero se consideró para el módulo de Young y límite de fluencia los valores nominales comúnmente aceptados de $2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ y $4,200 \text{ kg/cm}^2$, respectivamente.

Con el modelo mecánico completo se realizó nuevamente el análisis estructural en dos fases. En la primera se aplicó la carga vertical en las columnas mediante diez incrementos iguales, para posteriormente deformar lateralmente el sistema mediante desplazamientos prescritos en el cabezal. A partir de este análisis se obtuvo la curva de comportamiento mostrada en la Fig. 3.8, carga lateral contra distorsión.

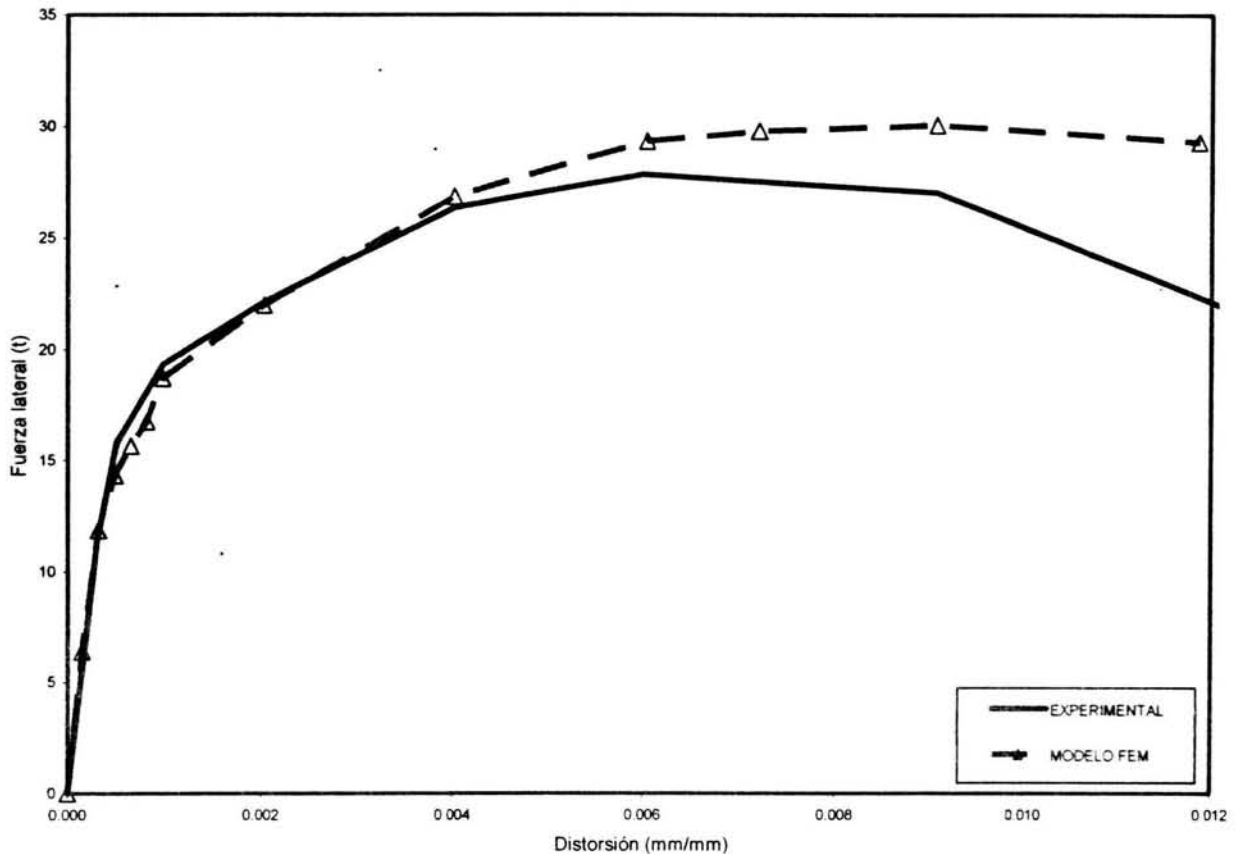


Fig. 3.8 Comparación de los resultados numérico y experimental.

Con base en los resultados del proceso de calibración se llegó a los parámetros que se resumen en la tabla 3.2 y que corresponden al modelo numérico cuya curva de comportamiento se ha graficado con la curva experimental en la Fig. 3.8. En dicha figura se puede observar que hasta la carga de agrietamiento las dos curvas son prácticamente iguales, y después existen diferencias menores al 15 por ciento hasta la carga resistente.

Tabla 3.2 Parámetros utilizados en el modelo numérico.

	E kg/cm^2	f_c kg/cm^2	f_t kg/cm^2	Gf_t $kg-cm/cm^2$	ν	c kg/cm^2	$\tan(\varnothing)$	$\tan(\psi)$
Mampostería	28,000	40	2.0	0.005	0.25	-	-	-
Concreto	115,220	250	25	0.005	0.20	-	-	-
Interfaz	35,000	-	0.0	-	0.20	1.8	0.80	0.0
Acero	2×10^6	4,200	4,200	-	-	-	-	-

Capítulo 4

Modelos Analíticos Simplificados

La práctica ingenieril requiere de soluciones prácticas y económicamente viables para el análisis y diseño de las estructuras que la sociedad requiere. El modelado de sistemas marco-muro por medio del método de los elementos finitos, actualmente demanda una cantidad de recursos tecnológicos y humanos que no se justifican, entre otras causas por las incertidumbres existentes en las propiedades mecánicas y geométricas de los elementos, convirtiéndolo inviable en tiempo y costo para la ingeniería práctica. Esta situación, ha incitado a los investigadores al desarrollo de modelos simplificados que permitan estimar aceptablemente las propiedades requeridas para el diseño estructural sismorresistente. Algunos de dichos modelos son: diagonal(es) equivalente(s), analogía de la viga, marco equivalente, sub-estructuración, asociación paralela, entre otros.

En el presente capítulo, se mencionan algunos de los modelos simplificados existentes para aproximar el comportamiento de sistemas marco-muro, para proponer un modelo simplificado de comportamiento no-lineal como base de este trabajo.

4.1 Modelos existentes.

Como se comenta en la introducción de este capítulo, los ingenieros de la práctica requieren de modelos simplistas, y de fácil aplicación. Holmes (1961), identifica dicha necesidad; tomando una idea de Polyakov (1960), propone un modelo de diagonal equivalente con las mismas propiedades mecánicas del muro, fijando un ancho equivalente w de un tercio de la longitud de la diagonal, Fig. 4.1. El uso de la diagonal equivalente resulta atractivo desde un punto de vista práctico, por lo que diversos investigadores han desarrollado propuestas que permitan calcular las propiedades de dicha diagonal.

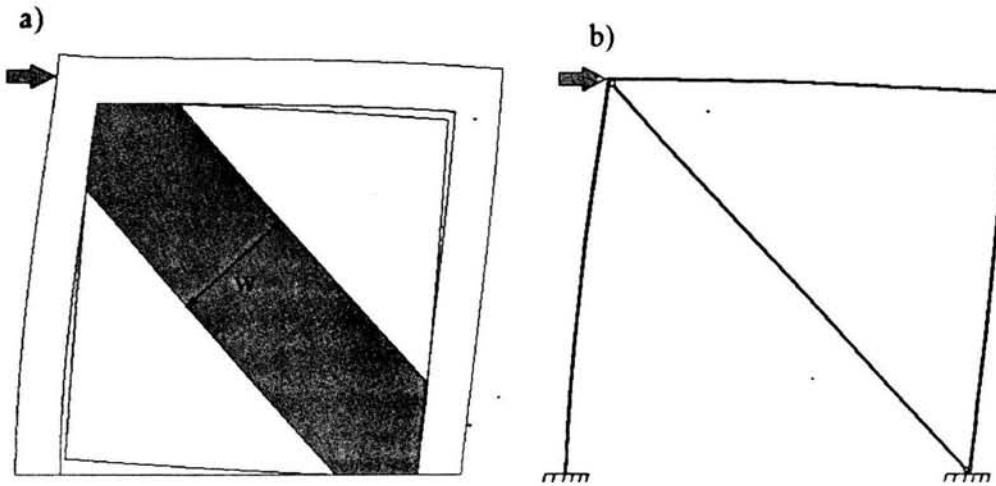


Fig. 4.1 Modelo de diagonal equivalente.

Stafford-Smith (1969), propone un parámetro adimensional λh como medida de la rigidez relativa del muro y el marco, y como un indicador del comportamiento del sistema. El factor λ queda definido con la ec. (4.1).

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E_t t \operatorname{sen}(2\theta)}{4EIh'}} \quad [L^{-1}] \quad (4.1)$$

donde h es la altura hasta el eje del marco, E_t , t , h' son el módulo de Young, espesor y altura del muro respectivamente, E e I son el módulo de Young y el momento de inercia de las columnas, y θ es el ángulo entre la horizontal y la diagonal del muro. A partir de este parámetro proponen la ec. (4.2) para estimar la longitud de contacto α entre muro y marco.

$$\alpha = \frac{\pi}{2\lambda} \quad [L] \quad (4.2)$$

Mediante una serie de curvas definen el ancho inicial de la diagonal en función del parámetro ya definido, la relación de resistencia a la de aplastamiento, y la relación de aspecto del muro.

Bazán (1980), a partir de resultados analíticos de elemento finito, basados en mamposterías mexicanas, propone otro parámetro adimensional que representa la rigidez relativa del marco en relación con la del muro, definido mediante la siguiente ec. (4.3).

$$\lambda = \frac{E_c A_c}{G_m A_m} \quad (4.3)$$

Donde, E_c y A_c son el módulo de Young y el área de la sección transversal de las columnas del marco, y G_m y A_m son el módulo de cortante y el área de una sección horizontal del muro respectivamente. En este modelo se estima el ancho de diagonal equivalente mediante la ec. (4.4), válida cuando $0.9 \leq \lambda \leq 11.0$ y $0.75 \leq h/L \leq 2.50$.

$$w = (0.35 + 0.022\lambda)h \quad [L] \quad (4.4)$$

Estos modelos y otros que se han desarrollado, adecuados para las filosofías de diseño elástico, resultan insuficientes para los criterios de diseño por desempeño, y resistencia. Cuando se desea considerar los comportamientos inelástico y no-lineal del material, se requiere conocer la relación completa carga-deformación para la mampostería.

Žarnić y Tomažević (1988), basados en resultados experimentales proponen utilizar un modelo de diagonal equivalente mostrado en la Fig. 4.2 b). En esas pruebas, el daño en la zona superior del panel de mampostería ocurre fuera de la diagonal, probablemente debido a la perturbación introducida al aplicar cargas laterales y verticales en las esquinas.

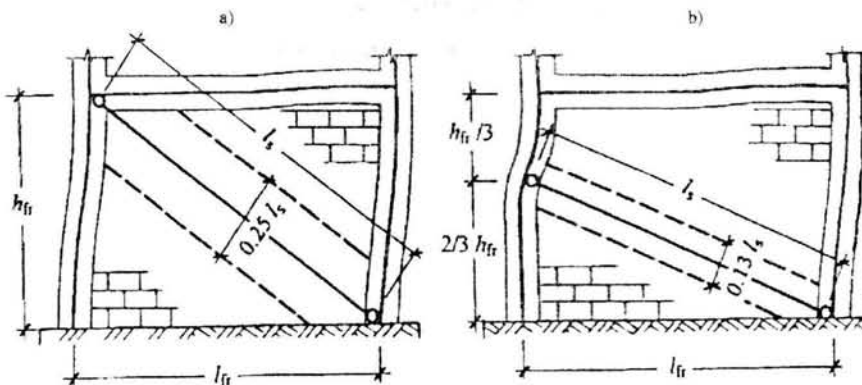


Fig. 4.2 Anchos de la diagonal sugeridos por Žarnić y Tomažević (1988).

Dicho modelo puede ser aplicado en aquellos casos donde una falla por cortante se desarrolle en la parte superior de las columnas, aunque no representa el mecanismo usualmente observado en pruebas de laboratorio para lo que propone el modelo de diagonal mostrado en la Fig. 4.2 a).

Los modelos de diagonal equivalente son simples y capaces de representar la influencia de los diafragmas de mampostería en un sentido global; sin embargo, no describen los efectos locales resultantes de la interacción entre marco y muro. Como resultado, los momentos flexionantes y fuerzas cortantes en los miembros del marco no son realistas y la localización de posibles articulaciones plásticas no puede ser adecuadamente predicha. Por estas razones, diversos autores han propuesto modelos de diagonales múltiples en su intento de mejorar la solución local. La Fig. 4.3, muestra modelos de múltiples diagonales propuestos por Schmidt (1989), Chrysostomou (1991), y Syrmakesis y Vratsanou (1986), respectivamente. Las principales ventajas de estos modelos a pesar del incremento de complejidad para su modelación, es la habilidad de representar las acciones en el marco con mejor aproximación.

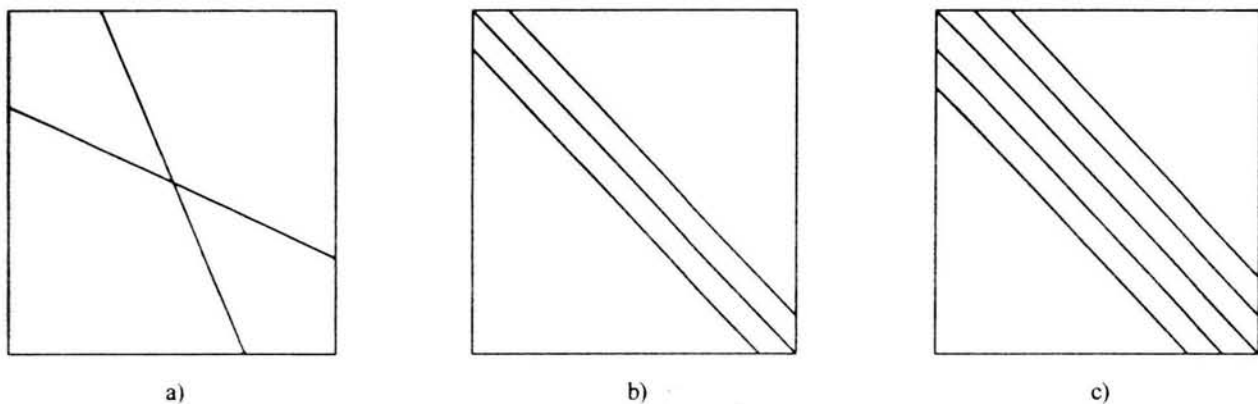


Fig. 4.3 Modelos de múltiples diagonales.

Chrysostomou, propone un modelo para idealizar muros de relleno consistente de tres diagonales paralelas en cada dirección en sustitución del muro, Fig. 4.4, capaces de trabajar únicamente en compresión. Las diagonales excéntricas se localizan en puntos donde se supone que se forman articulaciones plásticas en las trabes y columnas del marco. El comportamiento mecánico de las diagonales se modela por medio de dos funciones, una que define la envolvente de la curva carga contra desplazamiento, y la segunda que define la forma del lazo histerético.

Saneinejad y Hobbs (1995), presentaron un método para análisis y diseño de marcos de acero con rellenos de concreto o mampostería sujetos a fuerzas en el plano. El método está basado en datos generados de

experimentos previos, así como resultados de una serie de análisis no-lineales de elemento finito. Dicho método predice la resistencia y rigidez de marcos rellenos, así como, la carga de agrietamiento diagonal.

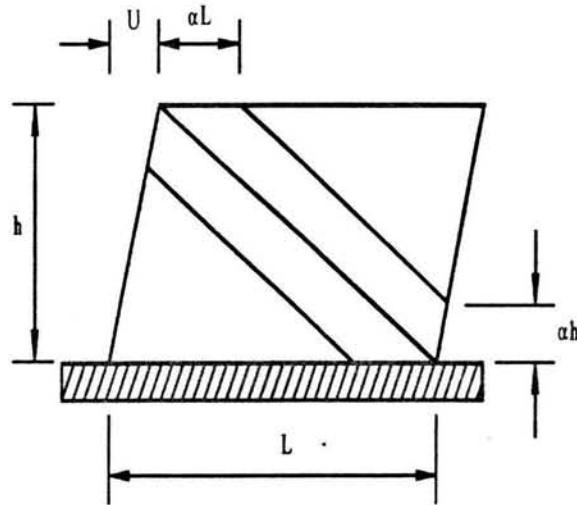


Fig. 4.4 Modelo de diagonales equivalentes de Chrysostomou (1991).

Mosalam *et al.* (1996), proponen un elemento diagonal con comportamiento no lineal, Fig. 4.5, unido al marco mediante “elementos de contacto discontinuo”, que impiden que trabaje en tensión y permiten, además, modelar una separación pequeña, g , entre el muro y el marco. Cuando el desplazamiento del marco es suficiente para cerrar esta separación, se inicia una etapa de rigidez media, que representa el aplastamiento de las rugosidades de la mampostería con un desplazamiento s , la parte final tiene una rigidez muy grande, y donde trabaja activamente el elemento diagonal. Este modelo permite reproducir el estrechamiento del lazo histerético que se observa en ensayos ante cargas cíclicas de marcos con muros diafragma.

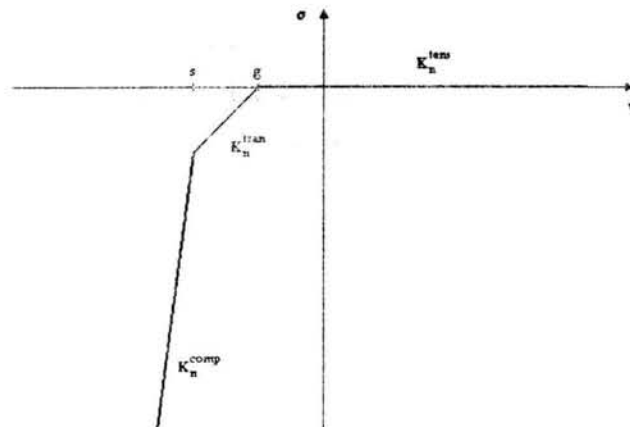


Fig. 4.5 Comportamiento del elemento propuesto por Mosalam *et al.* (1996).

Tomažević y Lutman (1996), proponen un modelo trilineal degradante para las mamposterías europeas, el cual consiste básicamente en un conjunto de reglas histeréticas que mantienen los desplazamientos y cortantes dentro de una envolvente trilineal mostrada en la Fig. 4.6. La envolvente se define con los siguientes pares de coordenadas (desplazamiento, cortante): (d_e, V_e) que corresponde al límite elástico de la mampostería, generalmente considerado como el agrietamiento inicial de ésta, (d_{max}, V_{max}) que corresponde a la resistencia máxima, y (d_u, V_u) que corresponde a la deformación última útil, determinada por algún criterio de falla.

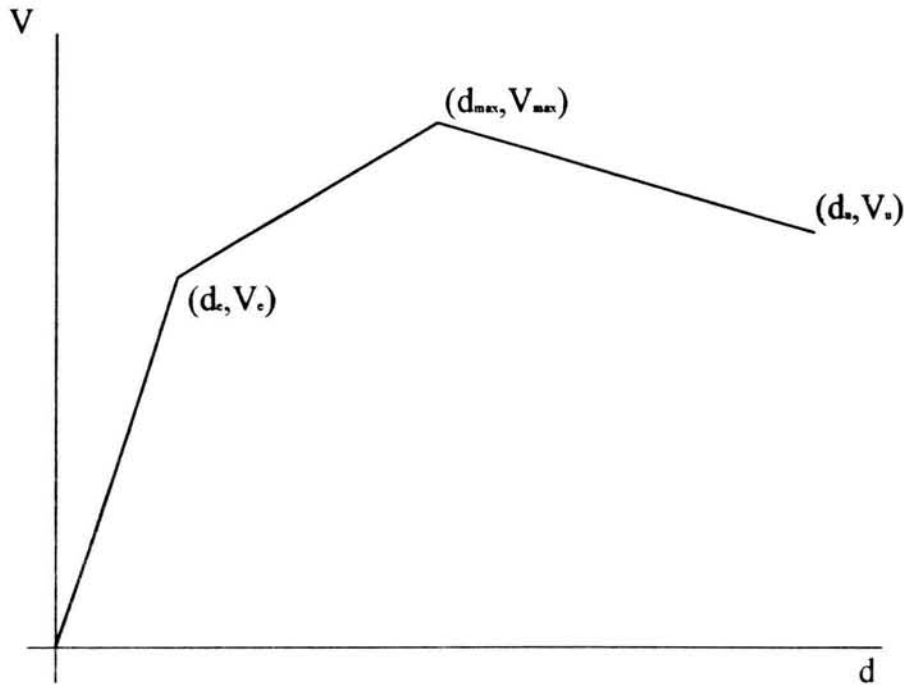


Fig. 4.6 Modelo trilineal de Tomažević y Lutman (1996).

Flores y Alcocer (1996), presentan un modelo trilineal degradante para el análisis dinámico, no lineal de mampostería confinada, utilizada para la vivienda en México. En su trabajo presentan expresiones para calcular dicha envolvente para los casos en que presenta y no refuerzo lateral obtenidas de pruebas de especímenes a escala natural.

Araujo y Ayala (2000), presentan un modelo simplificado para el análisis de marcos de concreto reforzado con muros diafragma de mampostería sin aberturas, sometidos a cargas laterales, utilizando elementos barra tanto para el marco como para el muro. Con el modelo propuesto obtienen distribuciones de elementos mecánicos para el marco de concreto que son más apegadas a la realidad, en comparación con las obtenidas a partir de modelos que utilizan una diagonal equivalente.

4.2 Modelo propuesto.

Los modelos de diagonales equivalentes en los que se incluye el efecto de la presencia de ventanas, requieren de un gran número de elementos diagonales, volviendo complejos los modelos simplificados con fines de análisis global. Es por esto, que en este trabajo se ha decidido sacrificar el efecto local, a cambio de la simplicidad del modelado mediante una sola diagonal.

En este modelo el diafragma es sustituido por una diagonal equivalente actuando únicamente en compresión unida en el extremo superior a la intersección viga-columna y en el extremo inferior al apoyo de la columna opuesta, Fig. 4.1.

Cuando se desea realizar un análisis no-lineal ya no resultan suficientes las propiedades elásticas de la diagonal, es entonces necesario conocer el comportamiento carga lateral-distorsión del muro. Este comportamiento se ha aproximado mediante una curva trilineal mostrada en la Fig. 4.7. Para trazar dicha curva es necesario definir los parámetros mostrados, para que a partir de un muro dado, sea posible establecer su curva de comportamiento.

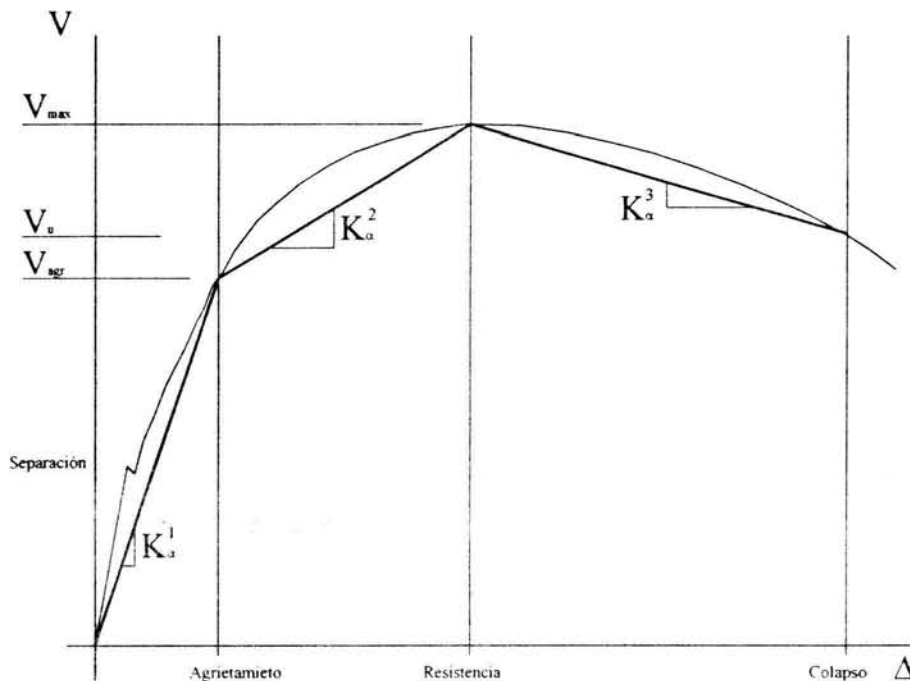


Fig. 4.7 Modelo trilineal carga lateral-distorsión del muro.

La curva real de comportamiento por simplicidad, ha sido discretizada en tres tramos de pendiente constante a los que en lo sucesivo se denominarán como pre-agrietado, post-agrietado y post-resistente cuyas pendientes se denotan en la Fig. 4.6 como K_{α}^1 , K_{α}^2 , K_{α}^3 respectivamente.

Para la construcción del modelo trilineal, existen diversas expresiones que permiten estimar la rigidez inicial de sistemas marco-muro, así en este trabajo se decidió utilizar las expresiones propuestas por Bazán (1980), comentadas en el capítulo dos. La fuerza cortante asociada a este nivel se calculó mediante la ec. (4.5), incluida en las NTC para estimar conservadoramente la resistencia al agrietamiento de muros diafragma.

$$V_{ogr} = 0.85v_m^* A_t \quad [F] \quad (4.5)$$

A partir de la rigidez y resistencia calculadas, es posible estimar con ayuda de la ec. (4.6), la distorsión a la que ocurre el agrietamiento.

$$\gamma_{ogr} = \frac{0.85v_m^* A_t}{HK^1} \quad (4.6)$$

Diversos investigadores coinciden de observaciones experimentales, en que la magnitud del cortante de agrietamiento es del orden del 50 a 60 por ciento de la resistencia del muro, de esta consideración se obtiene la ec. (4.7), para estimar la resistencia del muro.

$$V_{max} = 1.55v_m^* A_t \quad [F] \quad (4.7)$$

Considerando que dicha resistencia se presenta a la distorsión característica establecida en NTC, para muros huecos considerada como 0.004, la rigidez del segundo tramo (post-agrietado), puede estimarse mediante la ec. (4.8).

$$K^2 = \frac{0.70v_m^* A_t}{(\gamma_{max} - \gamma_{ogr})H} \quad [FL^{-1}] \quad (4.8)$$

Finalmente, para definir el tercer tramo, se decidió aceptar que el cortante último establecido en las NTC, como el 85 por ciento del cortante resistente ocurre para niveles de distorsión del doble de la que se produce cuando el muro alcanza su resistencia, con lo que es posible fijar el último punto de la envolvente y en consecuencia la rigidez del tramo post-resistente.

$$V_u = 1.20v_m^* A_t \quad [F] \quad (4.9)$$

$$K^3 = -\frac{0.35v_m^* A_t}{\gamma_{max}H} \quad [FL^{-1}] \quad (4.10)$$

Comparando la curva del muro solo, con la curva analítica calculada de la forma descrita puede observarse que el modelo trilineal propuesto reproduce aceptablemente el comportamiento experimental del muro estudiado, Fig. 4.8.

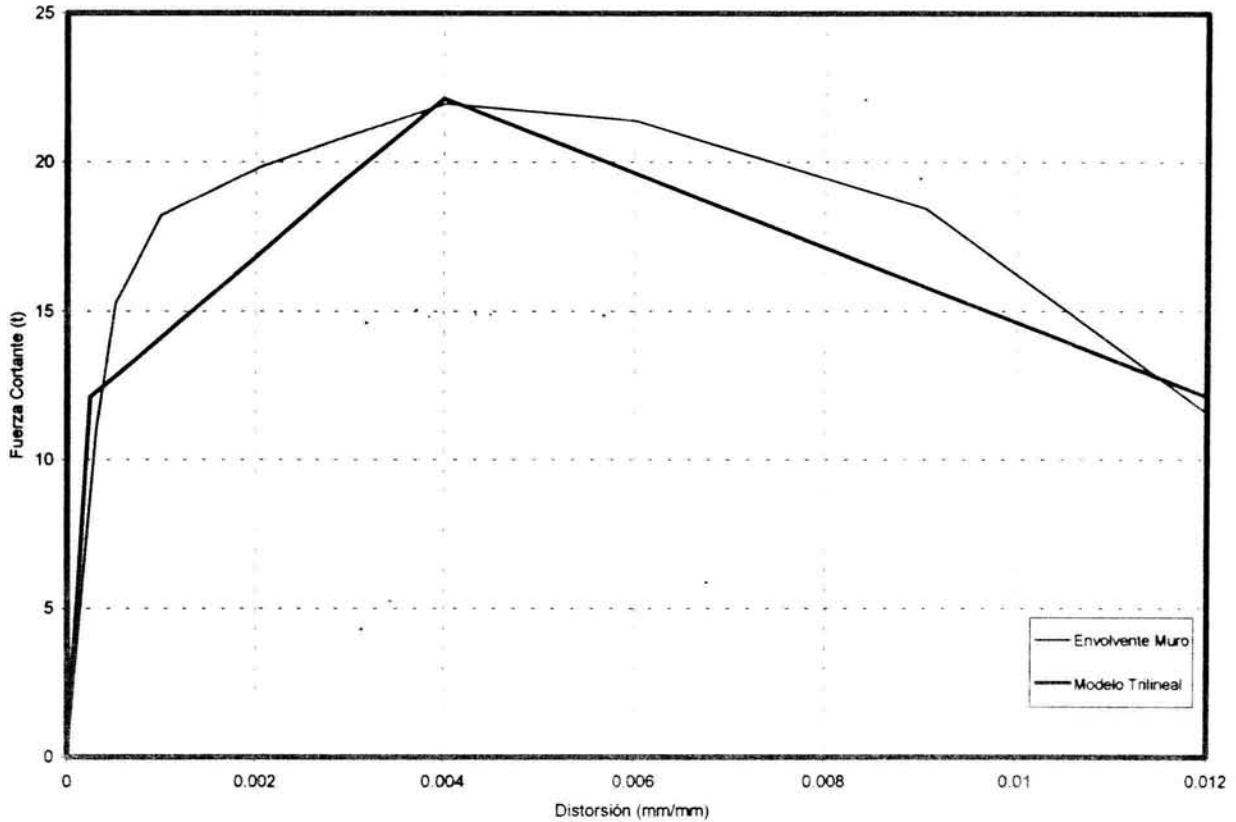


Fig. 4.8 Comparación de resultado experimental y modelo analítico del muro estudiado.

A partir de la curva carga lateral-distorsión es posible definir, con ayuda de principios geométricos básicos derivados de la Fig. 4.9, las expresiones para estimar la fuerza asociada a la deformación axial del elemento diagonal que reemplazará al muro.

$$F = \frac{V_i}{\cos \theta} \quad ; \quad \delta_d = \Delta_h \cos \theta \quad (4.11)$$

Donde, V_i es la fuerza lateral aplicada al muro para producir un desplazamiento lateral Δ_h ; θ es el ángulo que forma la diagonal del muro y la horizontal.

En la Fig. 4.10, se presenta la curva de comportamiento, fuerza-deformación axial, obtenida para el elemento diagonal que reemplazará al muro.

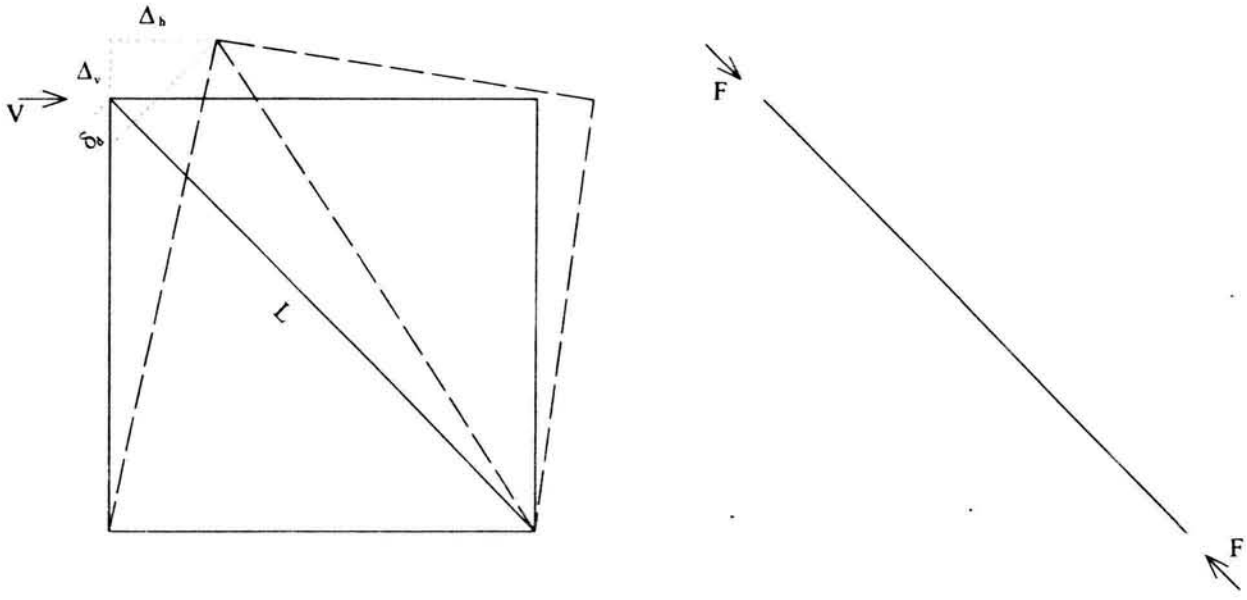


Fig. 4.9 Esquema de deformación axial.

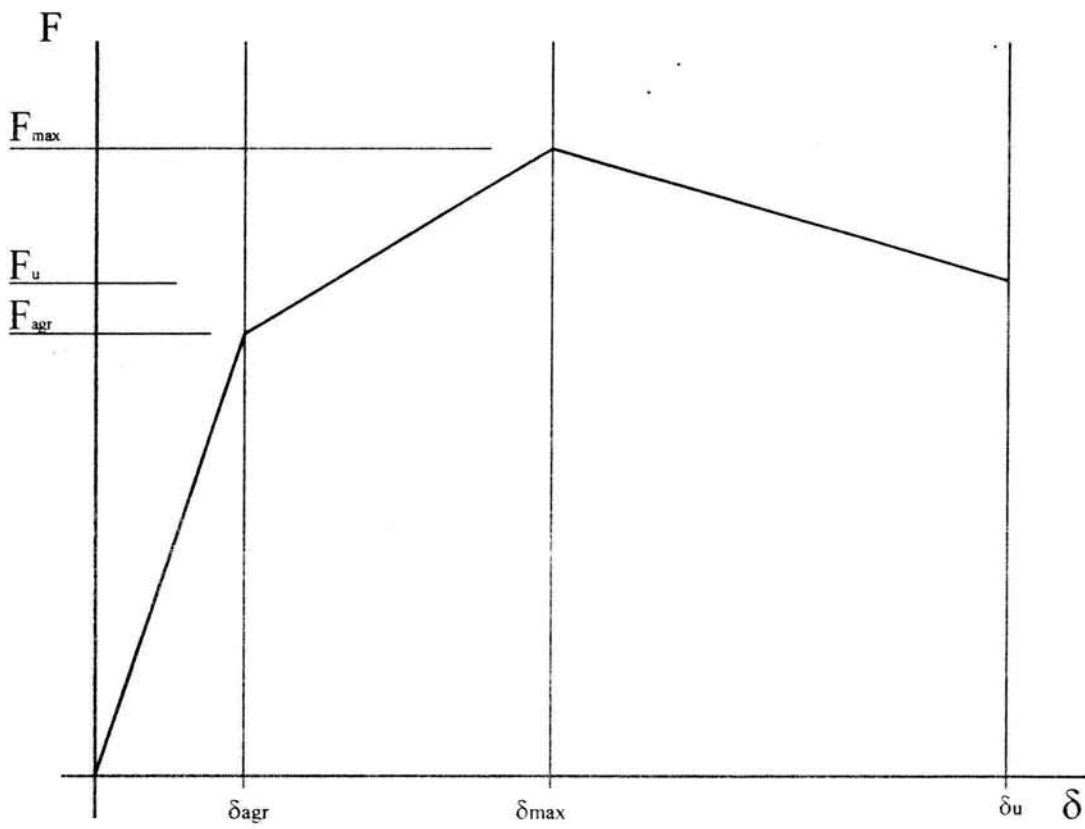


Fig. 4.10 Envolvente de las propiedades axiales de la diagonal equivalente.

Capítulo 5

Efecto de las Aberturas en el Comportamiento del Sistema

Algunos investigadores se han ocupado de estudiar el efecto de las aberturas en el comportamiento de los muros de relleno ante carga lateral. Gracias a esto, en la actualidad se conoce que las aberturas en los muros diafragma modifican la distribución de elementos mecánicos, resistencia, y rigidez.

En los capítulos precedentes se ha desarrollado y calibrado un modelo de elementos finitos que permite reproducir de manera suficientemente precisa, hasta los niveles de deformación lateral asociada a la resistencia, el comportamiento de este complejo sistema estructural, y se ha propuesto un modelo de comportamiento para la diagonal equivalente que permite efectuar análisis no-lineales de sistemas marco-muro.

En el presente capítulo, se presentan los resultados de un estudio paramétrico requerido para obtener la información necesaria para el modelo propuesto; se resumen los resultados obtenidos del análisis de modelos con aberturas centradas, para finalmente incorporar su efecto en el modelo simplificado.

5.1 Descripción de los modelos propuestos.

Para desarrollar el modelo simplificado de muros diafragma es necesario contar con un conjunto de modelos característicos de la edificación desarrollada en el país, que permitan estudiar los diferentes parámetros que intervienen en el comportamiento de sistemas marco-muro sometidos a carga lateral. Algunas de estas variables son: relaciones de rigidez marco/muro, relación de aspecto del muro, tipos, formas y posiciones de las aberturas, entre otras.

Las características antropométricas, el destino de las edificaciones y las propiedades de los materiales utilizados en estos sistemas limitan las dimensiones de las estructuras. Esto permite pensar en un conjunto de modelos comunes dentro de esta tipología estructural. Así, tenemos que considerando la estatura de los seres humanos, las altura de entrepiso no es menor de 250cm; mientras, por otro lado, en edificaciones con fines comerciales se requiere de instalaciones especiales, que frecuentemente se ocultan con falsos plafones en los entrepisos, originando la necesidad de incrementar la altura de entrepiso, para lo que se puede pensar en una altura de entrepiso hasta de 400cm. Para que los espacios sean funcionales, y económicamente viables, por lo general, la separación entre columnas no es menor de 300cm, ni mayor de 800cm. La producción comercial de piezas para mampostería establece los espesores de los muros, encontrando que sería suficiente estudiar espesores que varíen entre 10 y 20cm. En estas estructuras existentes, se ha encontrado que las dimensiones transversales de columnas y trabes varían entre los 25 y 90cm.

Las necesidades estéticas y funcionales hacen que los muros presenten aberturas con una amplia variedad de relaciones de aspecto, posición, y dimensiones. A pesar de la gran diversidad existente, es posible limitar el estudio a ciertos casos que se considera se presentan frecuentemente en la edificación y por lo tanto, necesarios de incluirse para el desarrollo del modelo simplificado. En primer término se reconoció la posibilidad de que en un mismo muro exista más de una abertura; sin embargo, este aspecto se decidió dejar fuera de un primer espectro de casos que permitieran establecer la viabilidad del modelo. Una vez establecido este alcance, se definieron, dos posiciones de las aberturas respecto al eje vertical: izquierda y centrada con la intención de estudiar el efecto de la asimetría ante carga lateral. A continuación se establecieron tres tipos de aberturas, correspondiendo el primero a aberturas ubicadas en el tercio superior del muro, las cuales pueden representar ventanas de sanitarios, o bodegas. El segundo a aberturas centradas, que representan a la mayoría de las ventanas comunes. El tercer caso se refiere a aberturas que representan puertas. En la Fig. 5.1 se muestran esquemáticamente estos casos.

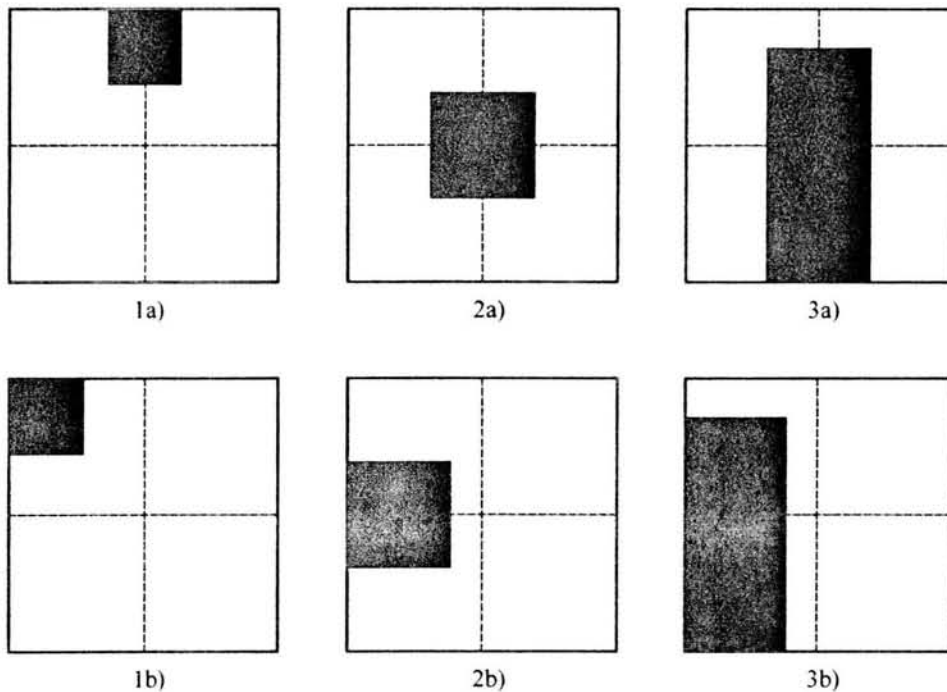


Fig. 5.1 Casos característicos de aberturas.

5.2 Efecto de las aberturas.

En este trabajo, se estudiaron únicamente modelos de sistemas marco-muro simple con relación de aspecto altura/longitud (H/L) igual a uno, y relación de rigidez relativa marco/muro de 1.97 (estimada con la expresión propuesta por Bazán, 1980), en los cuales se colocaron aberturas centradas como las mostradas en los incisos 2a) y 3a) de la Fig. 5.1. A pesar de que en la práctica es frecuente el uso de elementos de concreto confinando la abertura, ya sea como cerramientos o en todo su perímetro, Fig. 5.2; en una primera etapa se decidió no considerar la presencia de dicho confinamiento en los modelos analizados, considerando que los resultados así obtenidos resultan conservadores respecto a los obtenidos con el confinamiento, y por otro lado, sirven de patrón de comparación para los otros casos. Se definió el porcentaje de abertura, como la relación entre el área de la abertura y el área del muro diafragma.

En el análisis de cada uno de los modelos se ignoró la carga vertical sobre las columnas que presentaba el modelo experimental utilizado para la calibración, ya que se considera que en sistemas a base de marcos adecuadamente diseñados, la carga vertical es absorbida por este. A estos modelos se les sometió a carga lateral de izquierda a derecha mediante desplazamientos prefijados del cabezal que permitiesen obtener la solución numérica en cada paso. Se aceptó como solución numérica de un paso de carga, aquella cuya

tolerancia en fuerzas fuese menor a 1×10^{-2} , que coincide con lo recomendado por diversos autores como suficiente para obtener aproximaciones adecuadas (TNO, 1996).

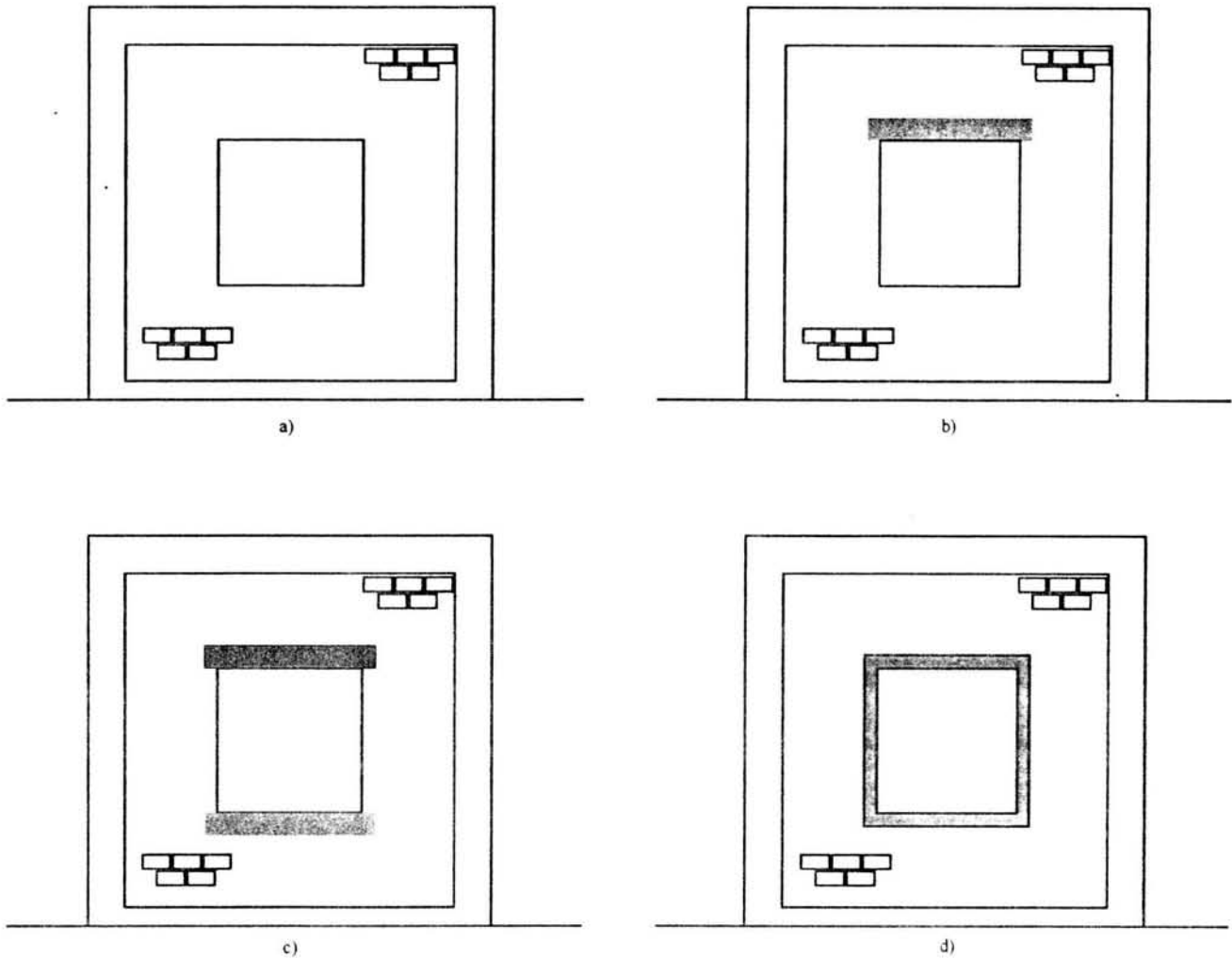


Fig. 5.2 Casos típicos de confinamiento en aberturas.

5.2.1 Muro sin aberturas.

Como primer caso se analizó el sistema marco-muro sin aberturas, el cual pudiese ser utilizado como referencia para los casos con aberturas. Durante el análisis se observó que los esfuerzos máximos se presentan alrededor de la diagonal en compresión, y que a medida que ocurre la plastificación de estos elementos, se redistribuyen los esfuerzos, de forma tal, que se transmiten en una banda cada vez más amplia. Además, la dirección de los esfuerzos principales de compresión es similar a la de la diagonal del muro. En la Fig. 5.3 se presentan gráficas donde se muestran las direcciones y magnitudes relativas de los esfuerzos

principales en dos instantes del análisis, considerados representativos. En los incisos a) y c) se muestran los esfuerzos y los patrones de deformación por agrietamiento al iniciarse el comportamiento no lineal asociado al comienzo del agrietamiento diagonal y en los incisos b) y d) cuando se alcanza la resistencia. En esta figura puede apreciarse que el agrietamiento se inicia hacia el centro del muro sobre la diagonal principal, y cuando se alcanza la resistencia del sistema, el agrietamiento se presenta en gran parte del muro, lo cual coincide con lo observado experimentalmente por diversos investigadores. En las gráficas de esfuerzos, se presentan en color azul los esfuerzos de compresión y en color rojo los de tensión.

Finalmente, en la Fig. 5.4 se presenta la distribución de elementos mecánicos en el marco. Para cada elemento mecánico la gráfica de la izquierda y derecha, corresponden a las columnas respectivas, mientras que la gráfica central a la trabe. Cada punto de las gráficas representa una sección transversal de elementos finitos, iniciando en los paños de trabe y columnas. Los valores de las fuerzas cortantes y normales se obtuvieron con base en la media de los esfuerzos calculados en los nudos de cada elemento finito de la sección transversal. El momento flexionante se obtuvo con base en la media de los productos de dichos esfuerzos por su área correspondiente y por su brazo de palanca respecto al eje del elemento estructural. En los casos del momento flexionante y fuerza normal se incluyeron las contribuciones del refuerzo longitudinal. En esta figura puede observarse que para la distorsión de 0.0002, las fuerzas cortantes y normales permanecen constantes, y el momento flexionante varía linealmente en las zonas en que el muro se separa del marco. Mientras que en las zonas de contacto los elementos mecánicos varían acorde con los esfuerzos transmitidos al marco. Estos resultados coinciden con lo esperado; de esto se considera que el modelo es apropiado para reproducir los efectos locales en el marco. Por ejemplo, en la columna izquierda, el cortante se incrementa en la parte superior debido a la transmisión de esfuerzos del muro al marco; la fuerza normal de tensión es menor en la parte superior, y se incrementa conforme se transmiten los esfuerzos tangenciales a través del contacto entre marco y muro. Interpretaciones similares se pueden hacer para los elementos mecánicos en la trabe y la columna derecha.



Fig. 5.3 Efectos locales en el muro sin abertura.

a) Distribución de esfuerzos principales para una distorsión de 0.0002; b) Distribución de esfuerzos principales para una distorsión de 0.006; c) Deformación de agrietamiento para una distorsión de 0.0002; d) Deformación de agrietamiento para una distorsión de 0.006.

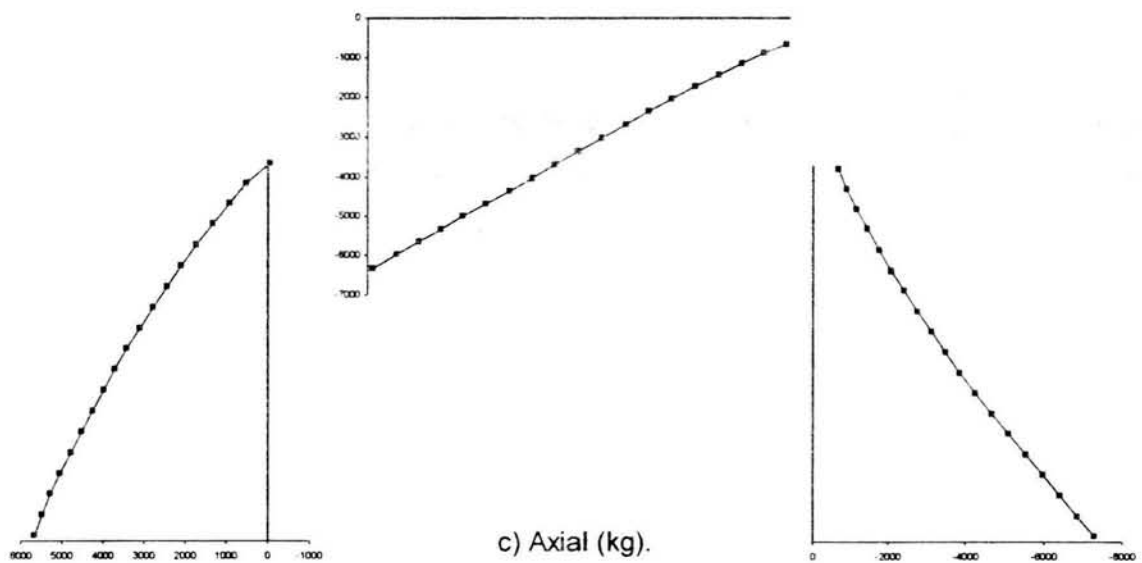
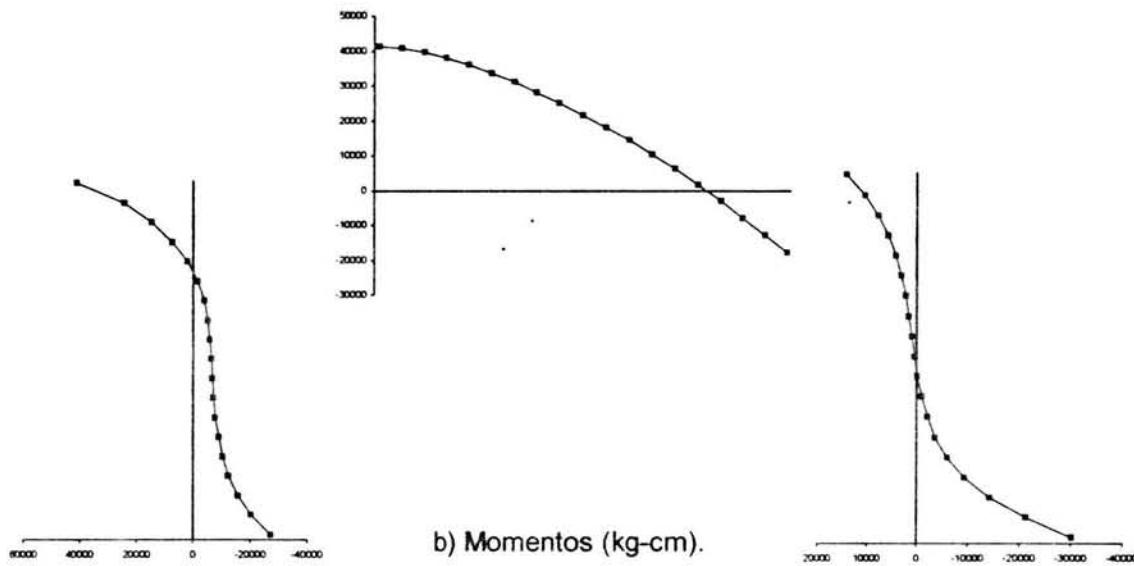
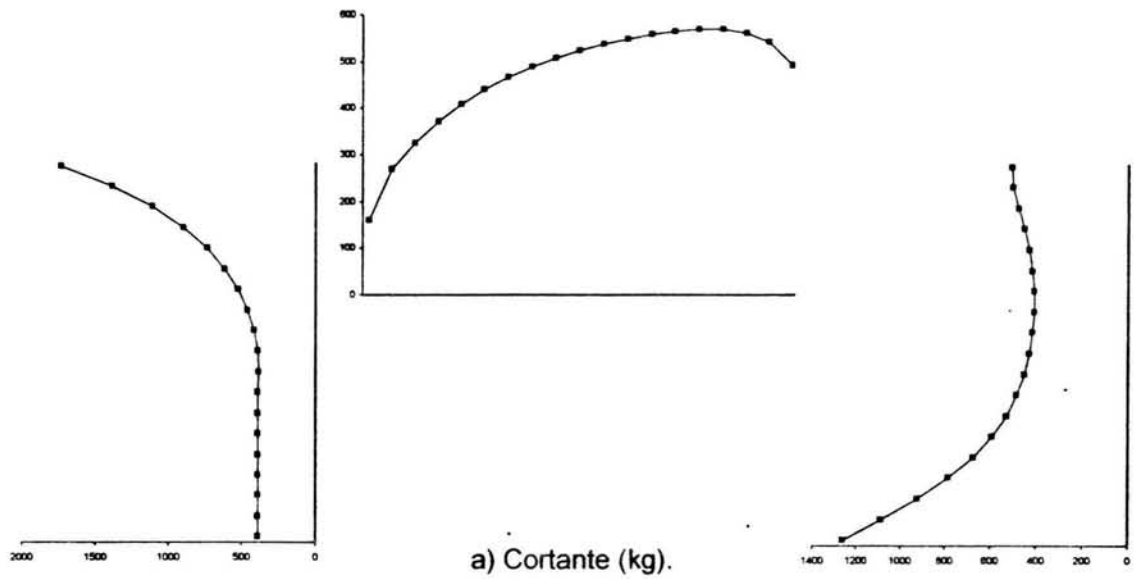


Fig. 5.4 Elementos mecánicos para la distorsión de agrietamiento.

5.2.2 Muros con abertura tipo ventana.

En cuanto al análisis de aberturas tipo ventana se definieron cinco porcentajes de abertura (4, 16, 48, 64 y 100%) mostradas en la Fig. 5.5 que se comparan con el muro sin aberturas.

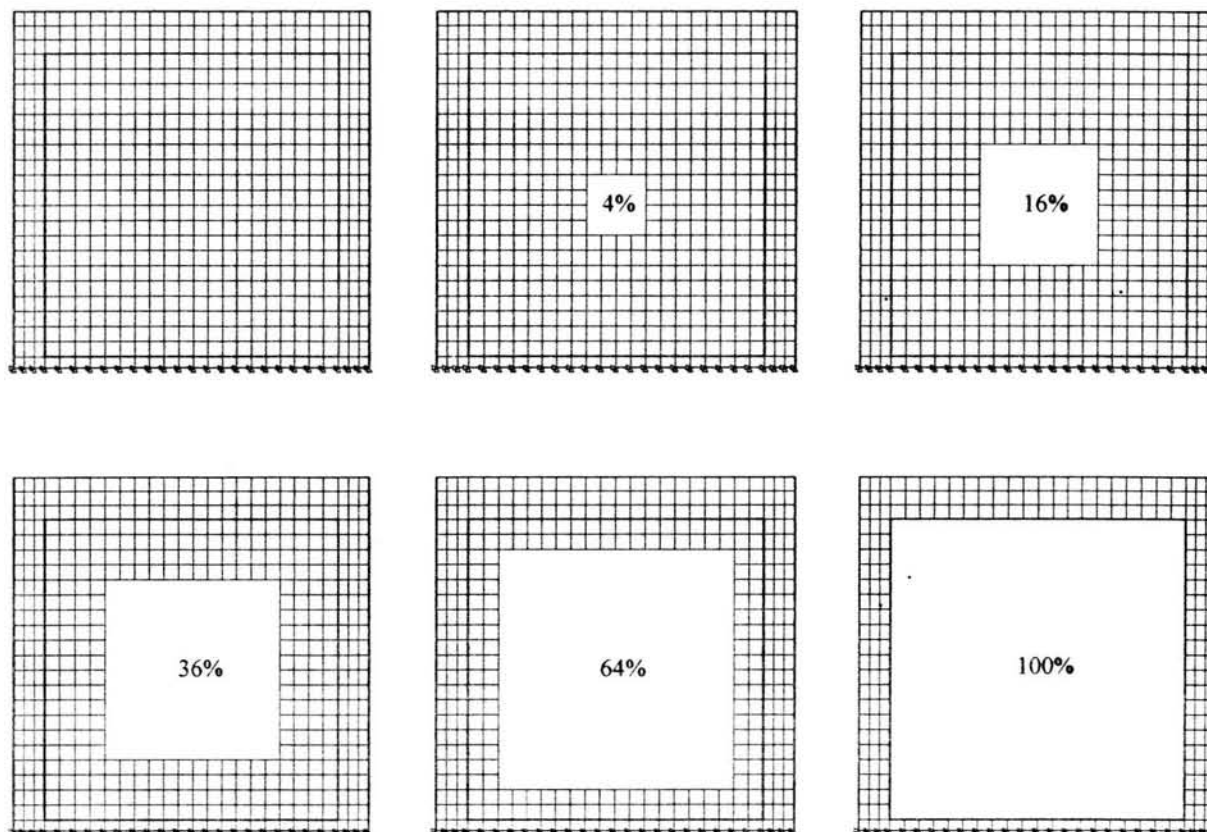


Fig. 5.5 Casos estudiados de abertura tipo ventana.

El primer parámetro estudiado, consistió en analizar la degradación en la rigidez lateral del muro con aberturas respecto a la rigidez inicial del muro sin aberturas, al incrementarse la distorsión del sistema. En la Fig. 5.6 se muestran los resultados obtenidos para los modelos estudiados. En estos análisis presentados por las gráficas, se pudo observar una etapa de rigidez constante hasta el inicio de la separación de la interfaz marco-muro al alcanzarse distorsiones del orden de 0.00005, cabe mencionar que esta zona se reduce, conforme la dimensión de la abertura aumenta; a partir de aquí, se presenta un decremento aproximadamente constante de la rigidez hasta que inicia el agrietamiento diagonal al alcanzarse distorsiones cercanas a 0.0002; seguido de una drástica reducción de rigidez debida a la aparición del agrietamiento diagonal, hasta que la mampostería alcanza la resistencia; Posterior a la resistencia máxima, la variación de la rigidez es muy pequeña. En este mismo conjunto de curvas puede apreciarse que la rigidez inicial se ve más drásticamente

reducida mientras mayor es el tamaño de la abertura, pero a la vez, la abrupta degradación presentada al iniciarse el agrietamiento diagonal es menos significativa con el aumento de la abertura debido a la menor influencia del muro en la rigidez lateral del sistema.

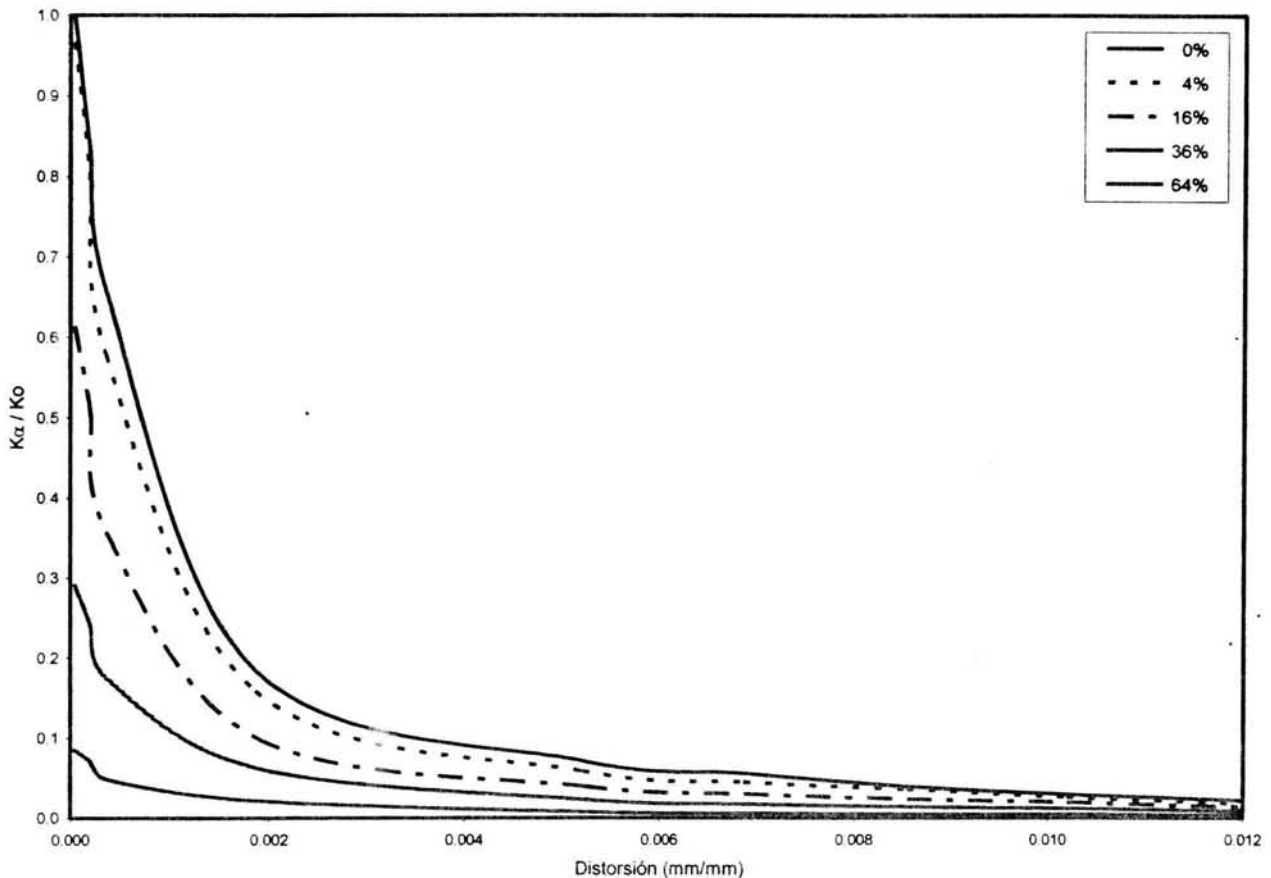


Fig. 5.6 Efecto del tamaño de la abertura tipo ventana en la degradación de rigidez secante.

Como segundo parámetro de estudio, se analizó el incremento en la fuerza introducida en el sistema por la presencia del muro, para este fin se normalizó la fuerza en el muro respecto a la del marco solo para cada nivel de distorsión. Así, en la Fig. 5.7, en el eje vertical se indica el número de veces en que el muro incrementa la fuerza en el sistema respecto a la fuerza en un marco solo para el mismo nivel de distorsión y en el horizontal la distorsión. Puede verse que para el caso del muro sin aberturas, este incrementa hasta antes del agrietamiento alrededor de 16 veces la fuerza lateral del marco solo, mientras que para aberturas del 16% este incremento se ve reducido a 10 veces. De aquí resulta evidente la importancia de incorporar la presencia de aberturas en el modelo utilizado para el análisis.

Dentro de los resultados obtenidos se pudo apreciar que la carga resistente del sistema marco-muro se presentaba cada vez a mayores distorsiones, conforme se incrementaba la abertura. Esto resulta lógico, pues

la contribución del muro a la resistencia del conjunto disminuye. Así, por ejemplo, si se piensa en el caso limite en que la abertura es del 100% se tiene la distorsión máxima del sistema alrededor del valor 0.012, lo cual es congruente con lo observado por diversos investigadores y resumido en las NTC.

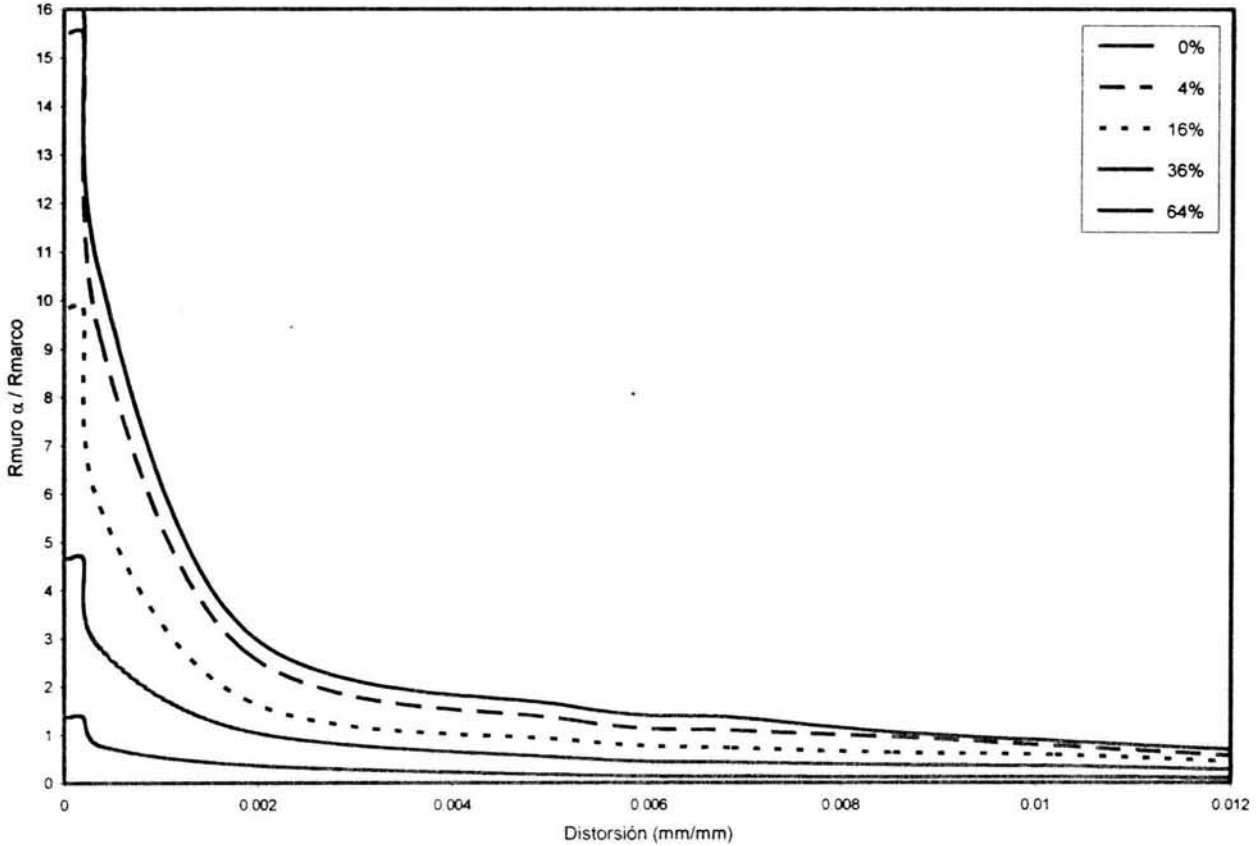


Fig. 5.7 Aportación del muro con abertura tipo ventana a la resistencia lateral.

Una vez que se contaba con información del comportamiento global del sistema, se planteó la necesidad de iniciar el estudio de los efectos locales en el muro y marco. Para este fin se integraron los esfuerzos en las secciones transversales del marco para obtener los elementos mecánicos y se graficó la distribución de esfuerzos principales en el muro diafragma.

La presencia de aberturas origina que la trayectoria de transmisión de esfuerzos en el muro, que para el caso sin aberturas era claramente concentrada sobre la diagonal cargada, se desvíe para formar una configuración de equilibrio rodeando la abertura. En las Figs. 5.8 a 5.11, puede apreciarse la distribución de esfuerzos en el muro para cada nivel de distorsión. En estas figuras es posible observar para la distorsión de agrietamiento una clara concentración de esfuerzos formando puntales de compresión excéntricos, mientras que para la

distorsión asociada a la resistencia se aprecia un ablandamiento de esfuerzos debida a la redistribución que se comentó anteriormente, y a la transición debido al cambio de trayectoria del puntal.

Los elementos mecánicos en el marco para los diferentes porcentajes de aberturas, son significativamente diferentes a los que se presentan para los casos extremos, correspondientes al marco solo y al muro sin aberturas. Este cambio en la distribución y magnitud de los elementos mecánicos puede provocar la modificación de los mecanismos de falla esperados. Por otra parte es posible que algunas de las recomendaciones constructivas que regularmente se utilizan en el proceso de diseño, como ubicación para corte de barras o traslapes de las mismas, resulten desfavorables para determinados porcentajes de abertura. Para los casos de estudio comprendidos en este grupo, fue posible obtener gráficas donde se representan los diagramas de elementos mecánicos obtenidos para el sistema sin aberturas, así como su modificación debido a la presencia de aberturas. Estas gráficas se muestran en las Figs. 5.12 y 5.13, las cuales se obtuvieron y se interpretan de manera análoga a lo expuesto para el caso de muro sin aberturas. La distribución de elementos mecánicos se modifica conforme el tamaño de la abertura se va incrementando. En la columna izquierda se observa el corrimiento de la zona de contacto hacia el centro del muro. Cabe señalar que para la columna derecha se observan patrones muy similares, aunque en este caso los efectos del contacto se observan hacia la parte inferior de la columna, como era de esperarse, ya que la distribución de esfuerzos principales tiende a rodear la abertura para unir el punto de aplicación de la carga y el extremo inferior opuesto en el sistema. Por ejemplo, para el caso de 16% de abertura, en la columna izquierda, el cortante se incrementa en la zona superior debido a la transmisión de esfuerzos sobre la abertura, seguido de una reducción del cortante para incrementarse nuevamente en la zona central por la transmisión de esfuerzos prácticamente vertical en el costado de la abertura; la fuerza normal de tensión es menor en la parte superior, y se incrementa conforme se transmiten los esfuerzos tangenciales a través del contacto entre marco y muro. Interpretaciones similares se pueden hacer para los elementos mecánicos en el resto de los casos.

En las figuras anteriores, la magnitud de la fuerza aplicada al sistema para alcanzar la distorsión prefijada es diferente para cada porcentaje de abertura, por lo que para evaluar el porcentaje de la fuerza lateral que toma el marco, se normalizaron respecto a la fuerza lateral, obteniendo los diagramas presentados en las Figs. 5.14 y 5.15. En estos diagramas puede observarse la gran variación en distribución y magnitud relativa del cortante para la distorsión de agrietamiento, mientras que, para la distorsión asociada a la resistencia, se puede observar que el cortante máximo en la columna tiende al 50% de la fuerza lateral aplicada independientemente del porcentaje de abertura.

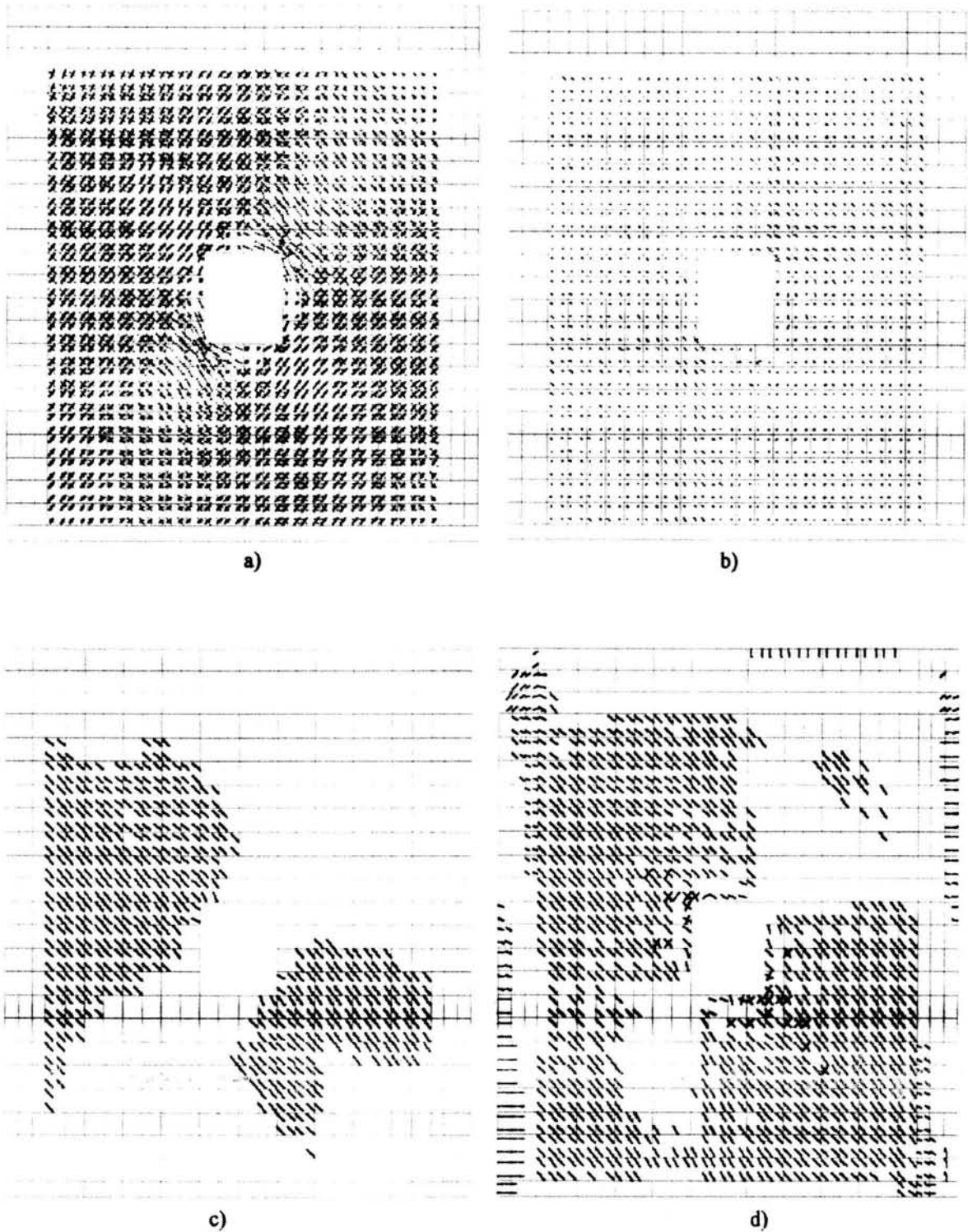


Fig. 5.8 Efectos locales en el muro con 4% de abertura.

a) Distribución de esfuerzos principales para una distorsión de 0.0002; b) Distribución de esfuerzos principales para una distorsión de 0.006; c) Deformación de agrietamiento para una distorsión de 0.0002; d) Deformación de agrietamiento para una distorsión de 0.006.

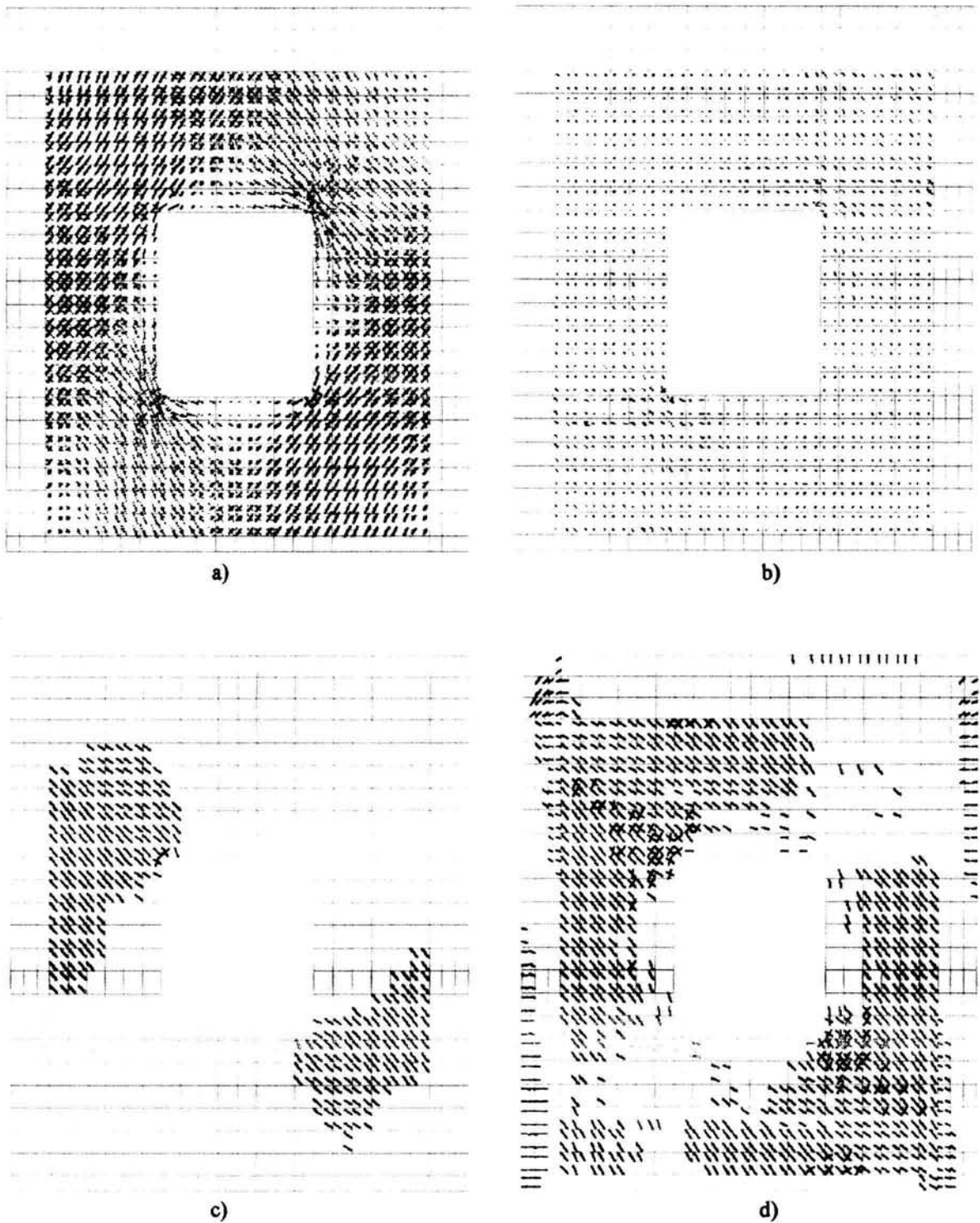


Fig. 5.9 Efectos locales en el muro con 16% de abertura.

a) Distribución de esfuerzos principales para una distorsión de 0.0002; b) Distribución de esfuerzos principales para una distorsión de 0.006; c) Deformación de agrietamiento para una distorsión de 0.0002; d) Deformación de agrietamiento para una distorsión de 0.006.

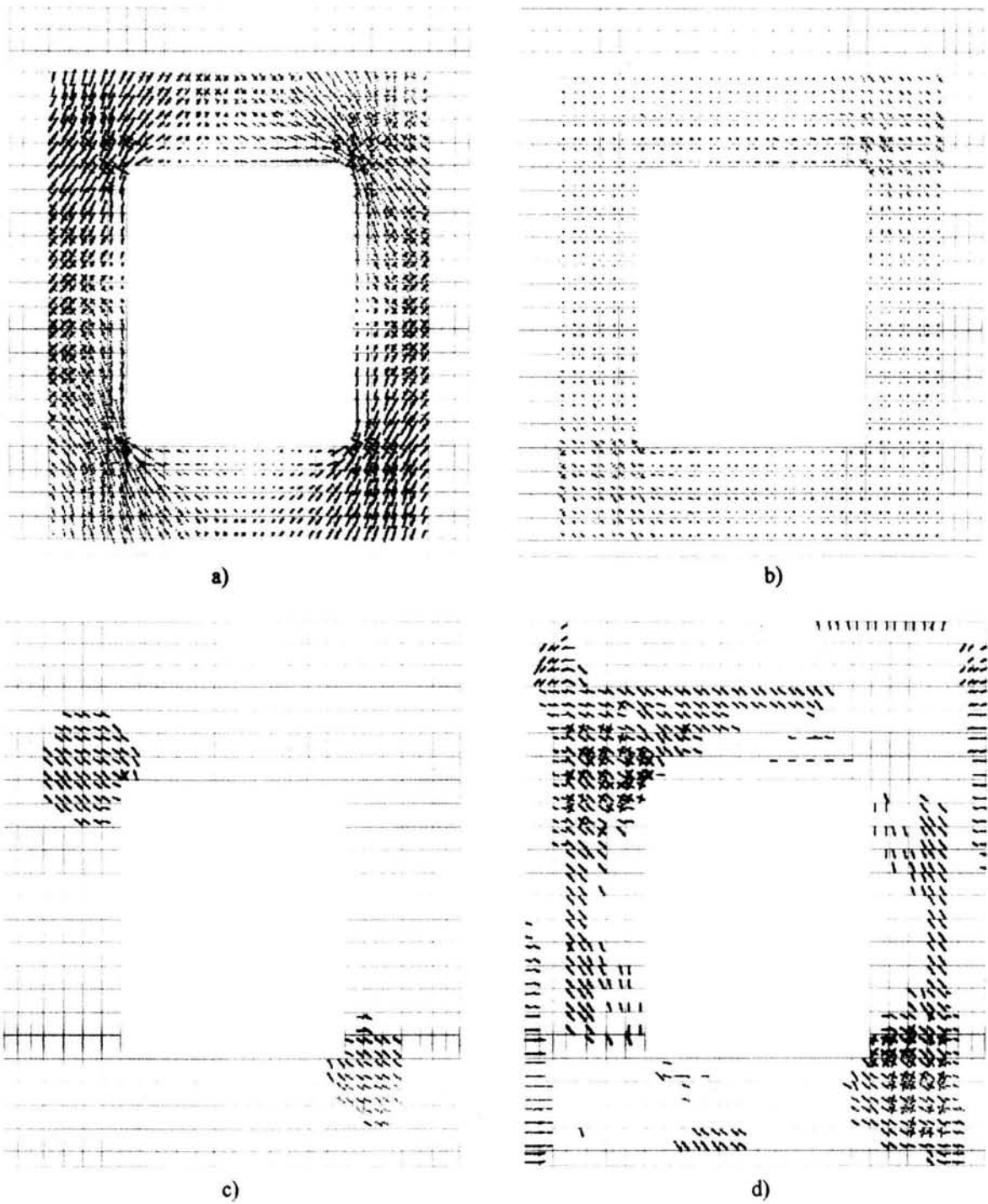


Fig. 5.10 Efectos locales en el muro con 36% de abertura.

a) Distribución de esfuerzos principales para una distorsión de 0.0002; b) Distribución de esfuerzos principales para una distorsión de 0.006; c) Deformación de agrietamiento para una distorsión de 0.0002; d) Deformación de agrietamiento para una distorsión de 0.006.

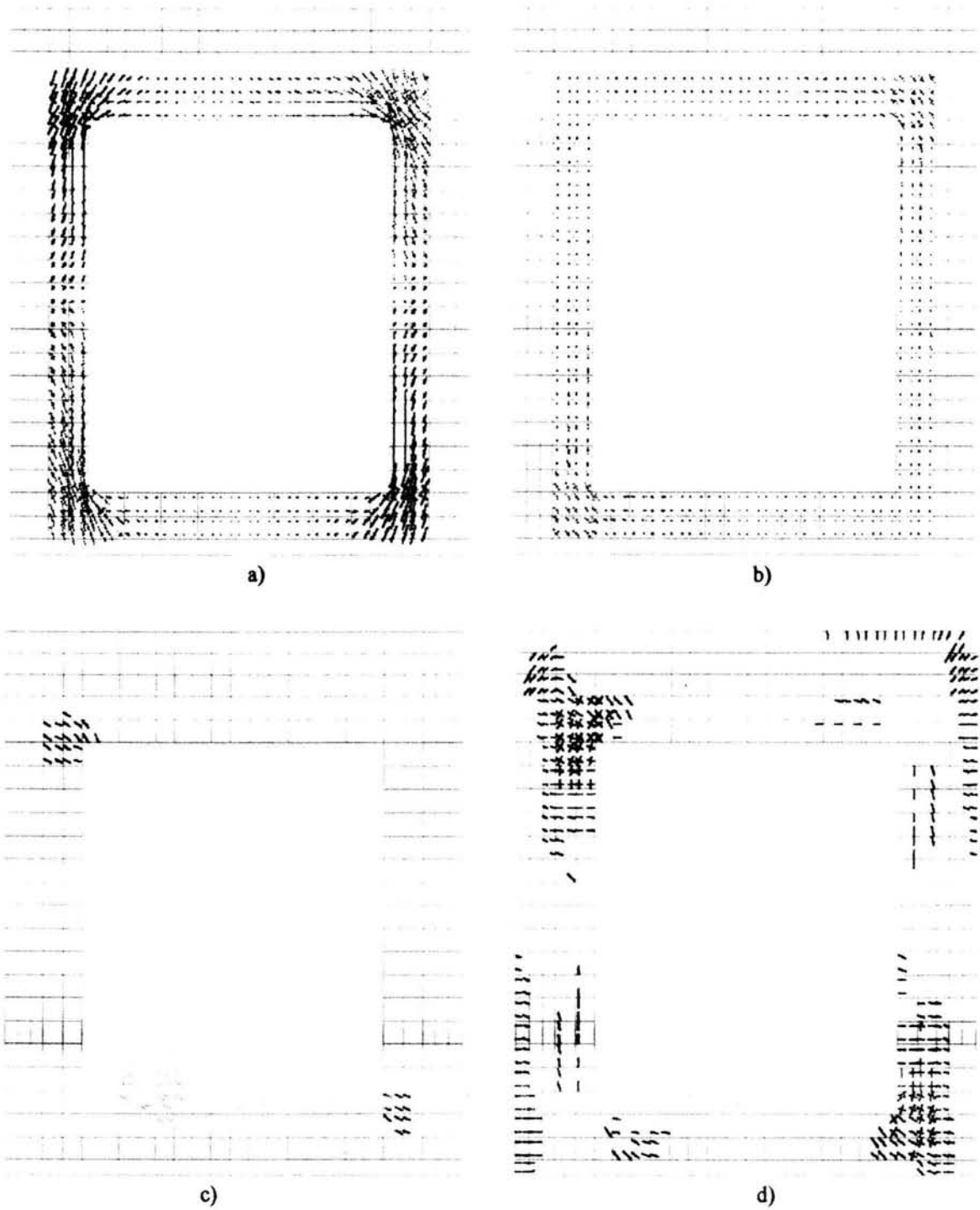


Fig. 5.11 Efectos locales en el muro con 64% de abertura.

a) Distribución de esfuerzos principales para una distorsión de 0.0002; b) Distribución de esfuerzos principales para una distorsión de 0.006; c) Deformación de agrietamiento para una distorsión de 0.0002; d) Deformación de agrietamiento para una distorsión de 0.006.

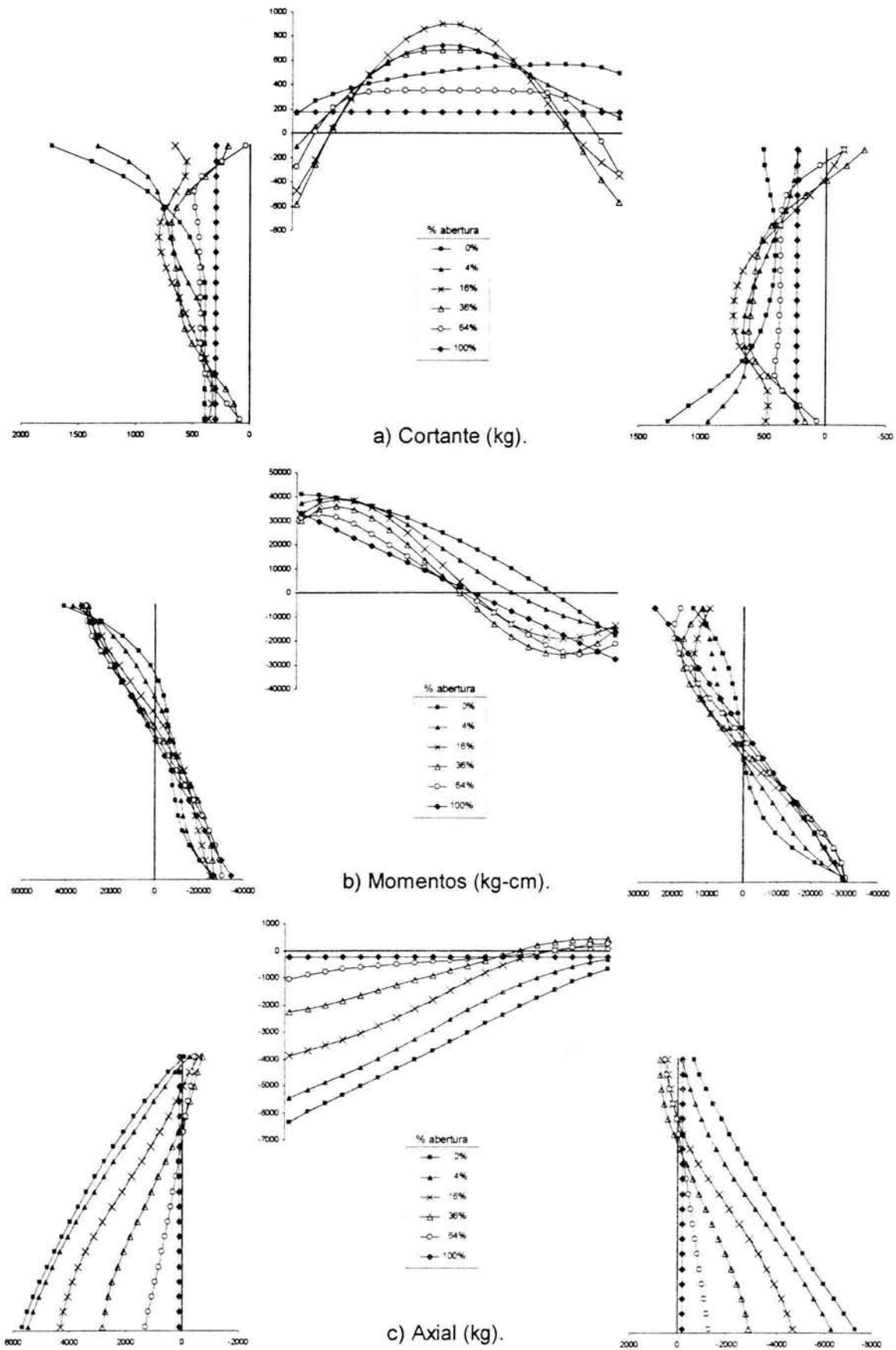


Fig. 5.12 Diagramas de elementos mecánicos en el marco ($\gamma = 0.0002$).

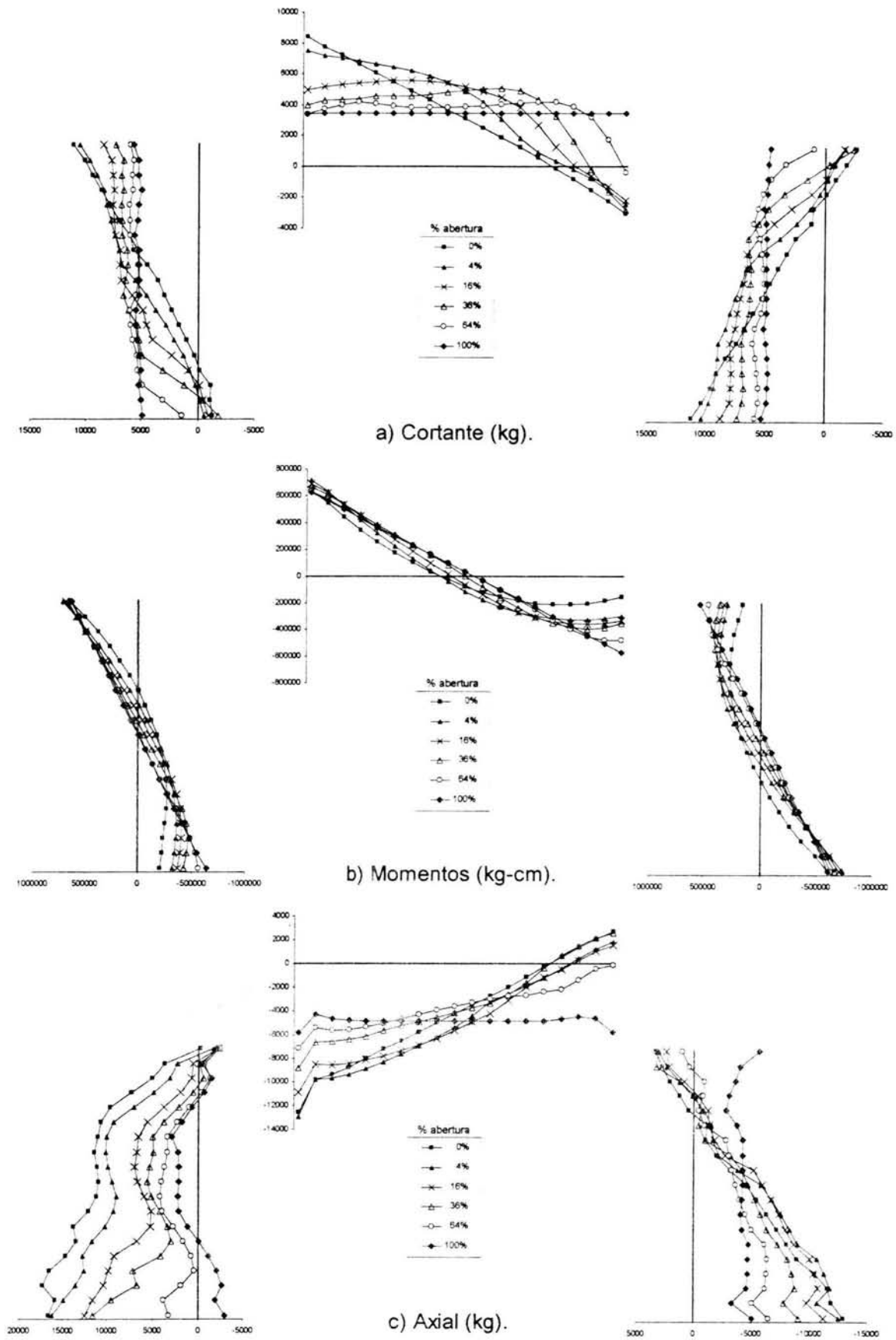


Fig. 5.13 Diagramas de elementos mecánicos en el marco ($\gamma = 0.006$).

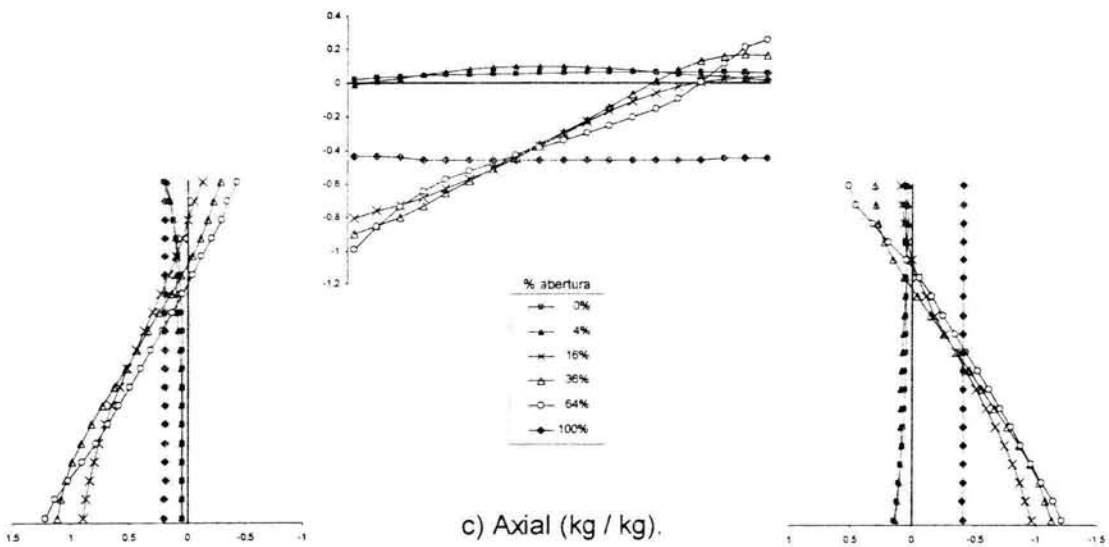
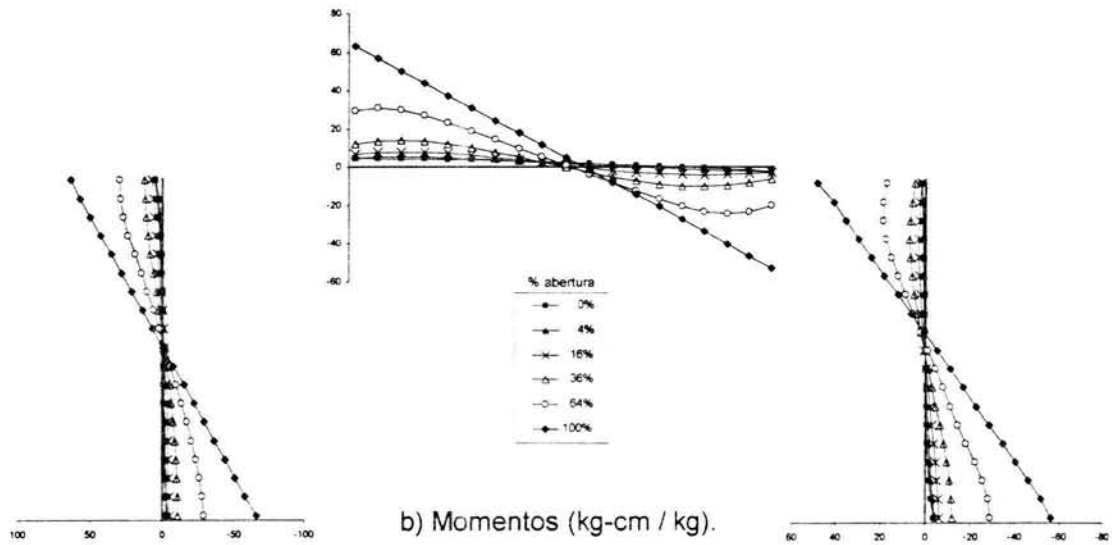
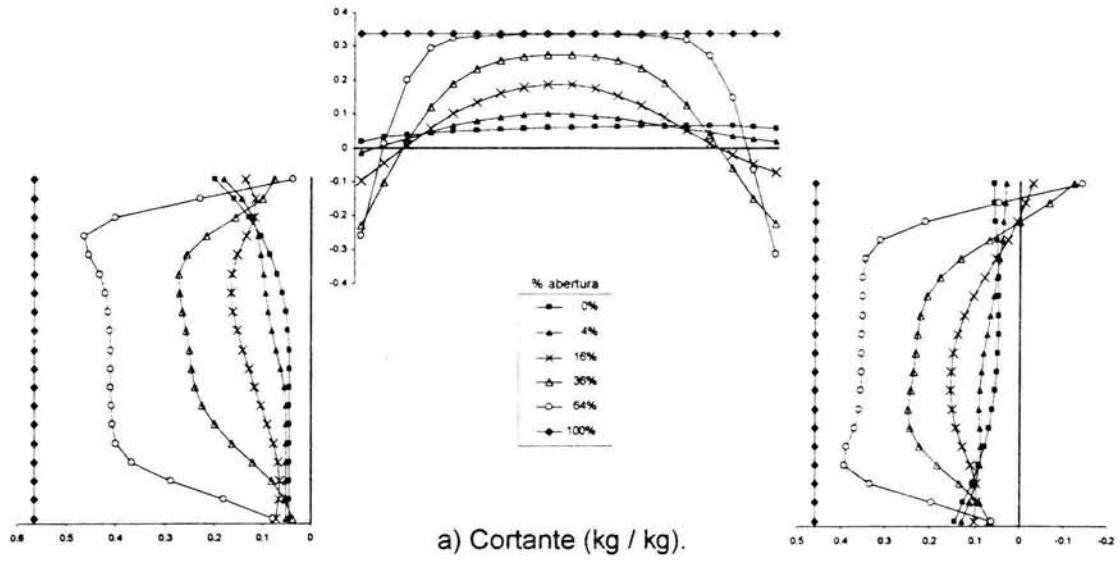


Fig. 5.14 Diagramas de elementos mecánicos normalizados ($\gamma = 0.0002$).

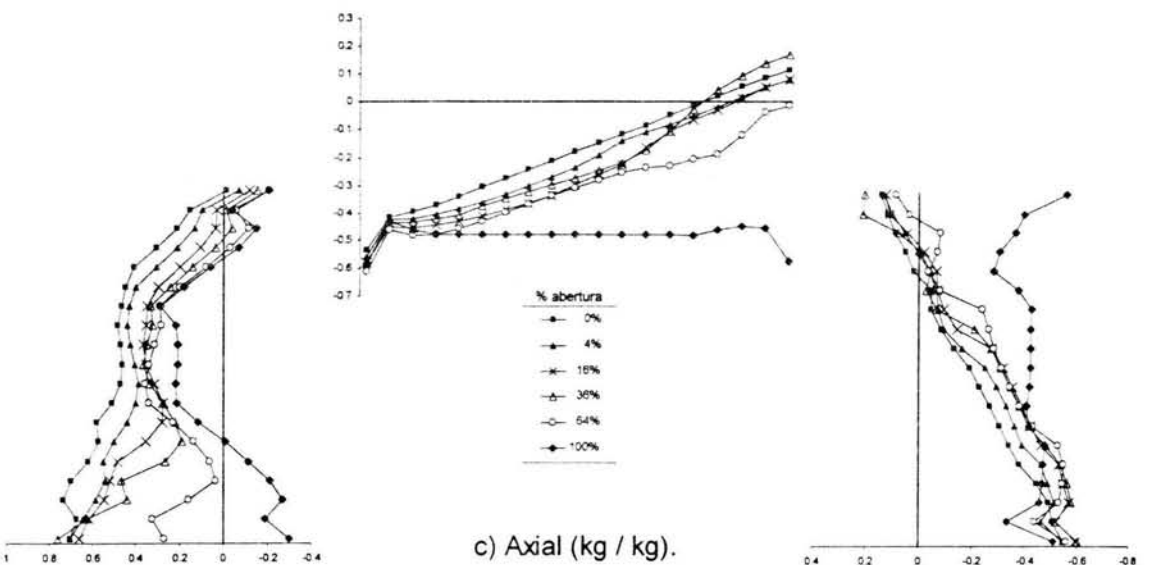
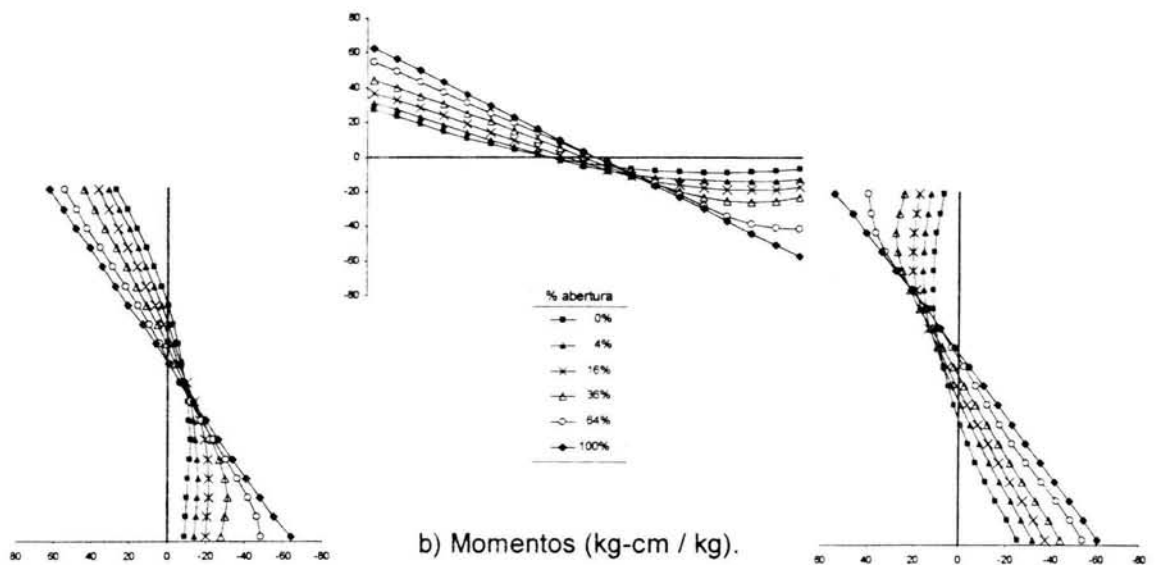
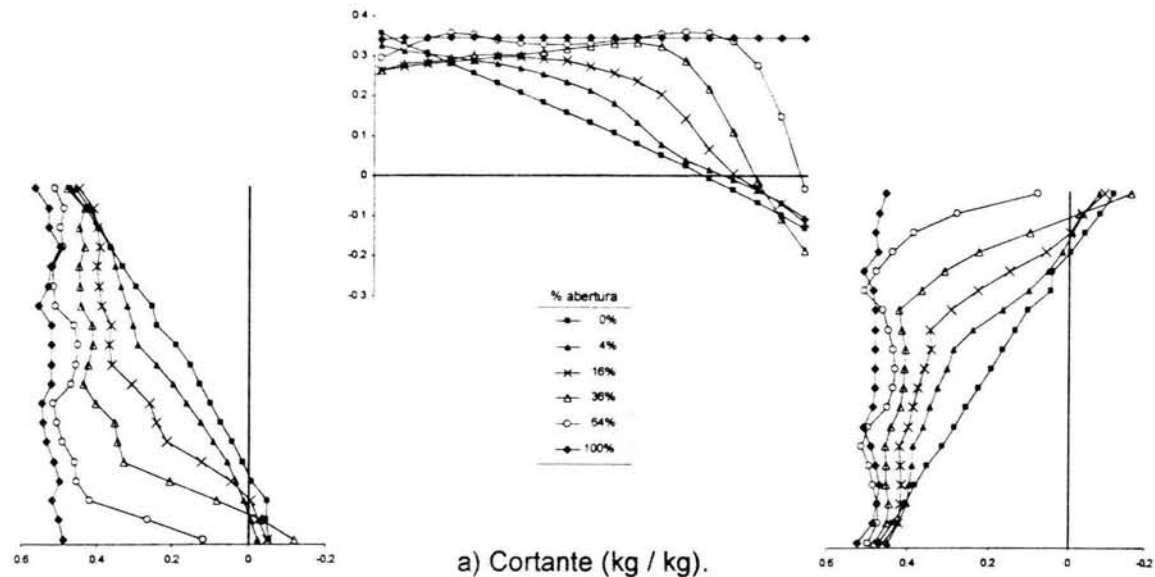


Fig. 5.15 Diagramas de elementos mecánicos normalizados ($\gamma = 0.006$).

5.2.3 Muros con abertura tipo puerta.

En cuanto al análisis de aberturas tipo puerta se definieron seis porcentajes de abertura (0, 16, 24, 48, 64 y 100%) mostradas en la Fig. 5.16.

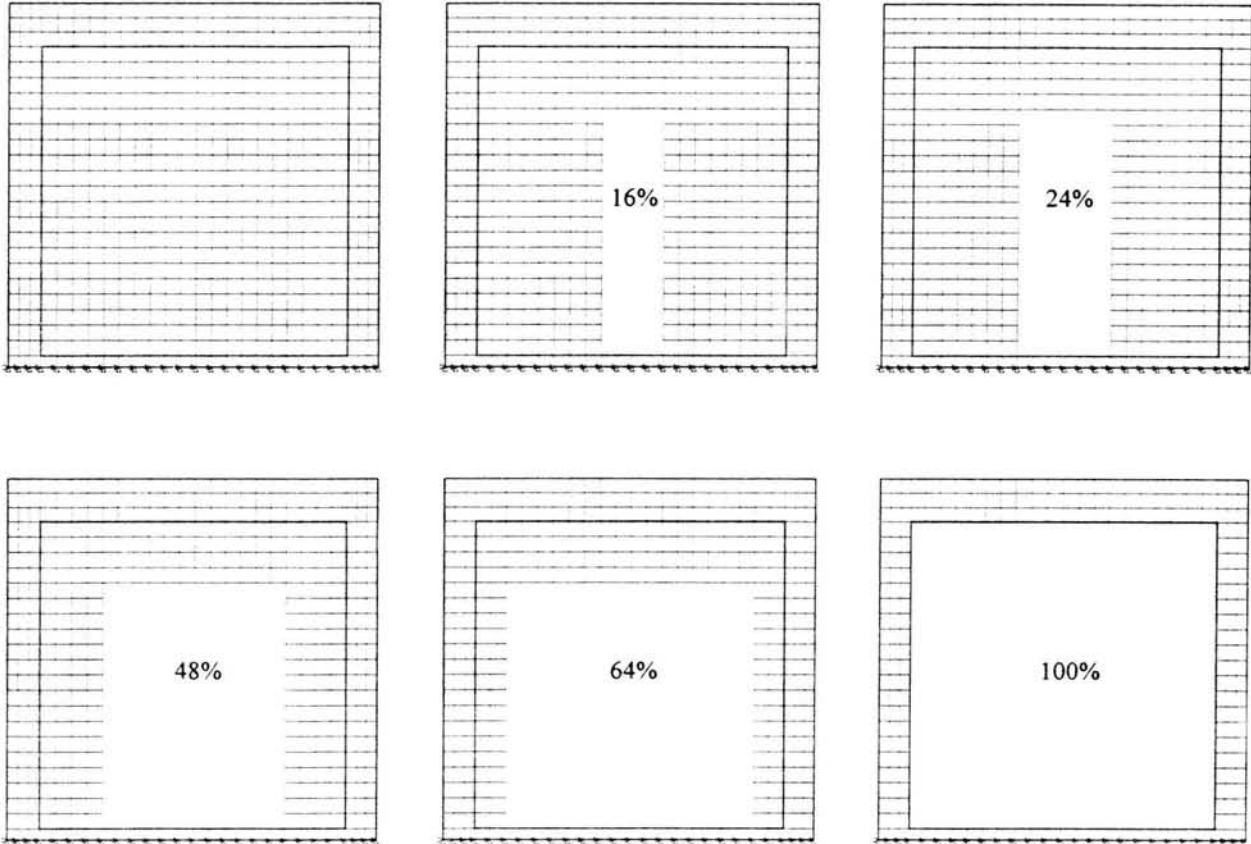


Fig. 5.16 Casos estudiados de aberturas tipo puerta.

Al igual que para los casos de ventanas, se inició con el estudio de la degradación de la rigidez lateral del muro con aberturas respecto a la rigidez inicial del muro sin aberturas al incrementarse la distorsión del sistema. En la Fig. 5.17 se muestran los resultados correspondientes. En estos análisis no se encontró de manera clara una etapa de rigidez constante con el inicio de la separación de la interfaz marco-muro; sin embargo, al iniciarse el agrietamiento diagonal se observó al igual que para aberturas tipo ventana una drástica reducción de rigidez.

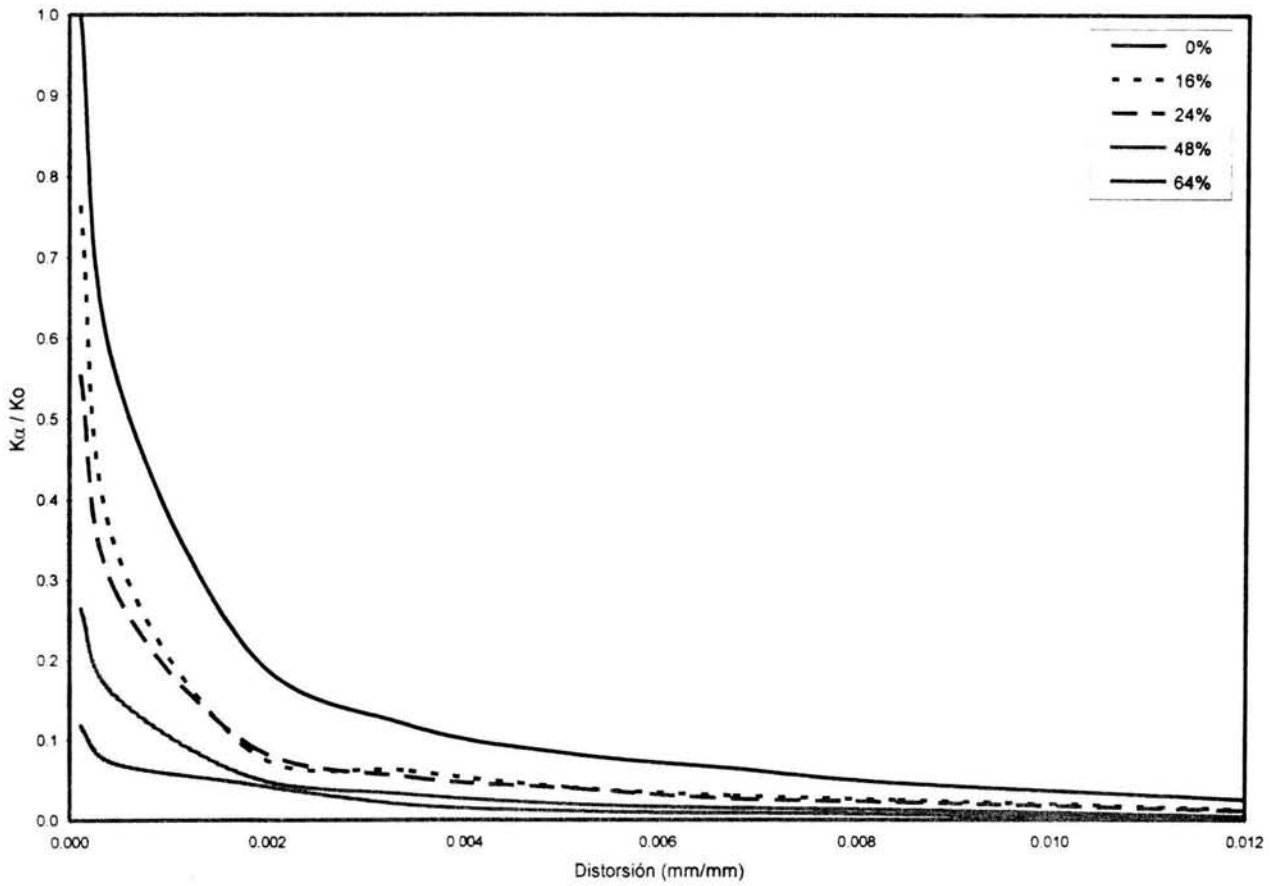


Fig. 5.17 Efecto del tamaño de la abertura tipo puerta en la degradación de rigidez secante.

Como segundo parámetro, se evaluó la contribución del muro a la fuerza lateral del conjunto. Así, en la Fig. 5.18, es posible percatarse que para el caso del muro sin aberturas, este aporta hasta antes del agrietamiento alrededor de 16 veces la rigidez lateral del marco solo, mientras que para aberturas del 24% esta contribución se ve reducida a 10 veces. Al comparar esta gráfica con la correspondiente al caso de ventanas centradas, se observa que para un mismo porcentaje de aberturas las aberturas tipo puerta incrementan en mayor medida la fuerza lateral del conjunto.

La presencia de aberturas origina que la trayectoria de transmisión de esfuerzos, que para el caso del muro sin aberturas era claramente concentrada sobre la diagonal cargada, se desvíe para formar una configuración de equilibrio rodeando la abertura. En las Figs. 5.19 a 5.22, puede apreciarse la distribución de esfuerzos en el muro para cada nivel de distorsión. En estas figuras es posible observar las diferencias en la distribución de esfuerzos en el muro para cada caso.

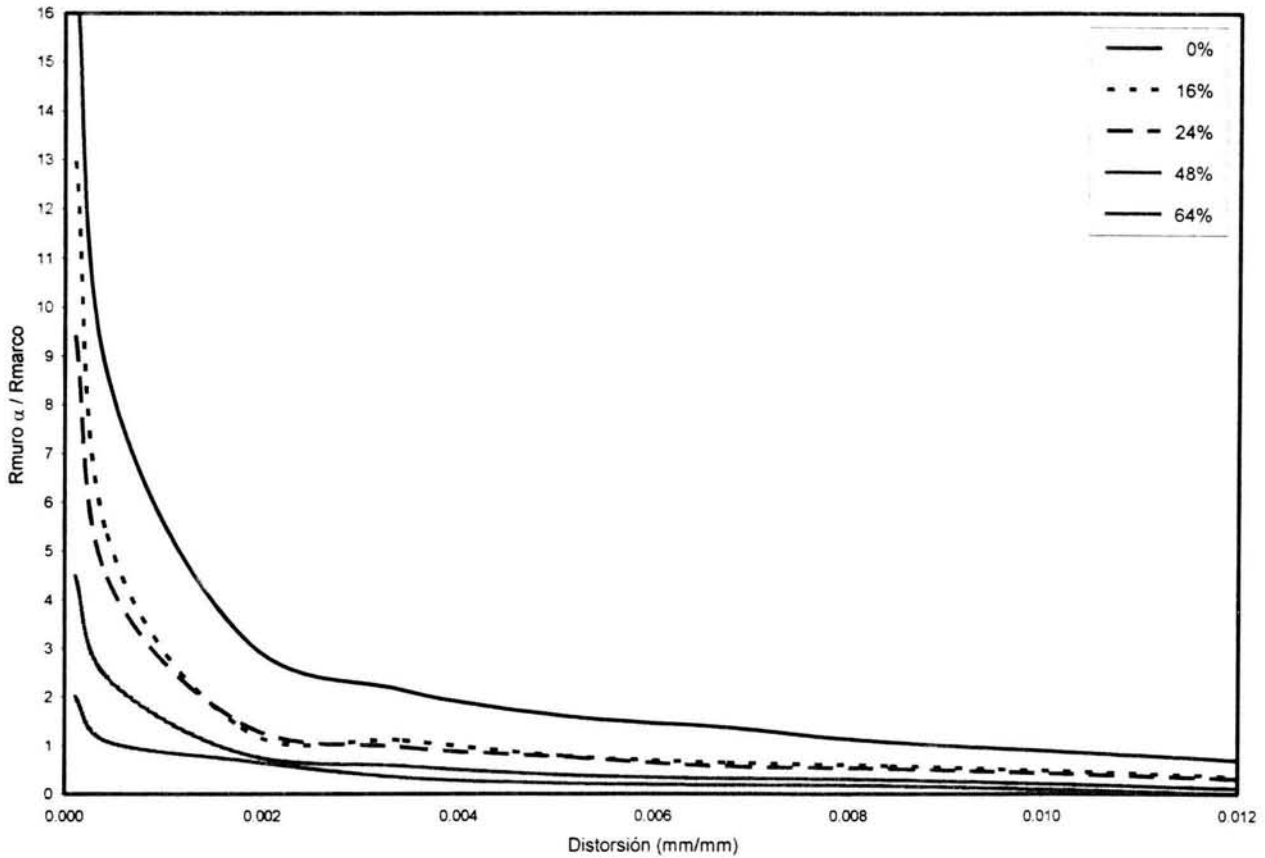


Fig. 5.18 Aportación del muro con abertura tipo puerta a la resistencia lateral.

Los elementos mecánicos en el marco para los diferentes porcentajes de aberturas, ante la distorsión de agrietamiento y resistencia del sistema, se muestran en las Figs. 5.23 y 5.24. Estas gráficas se obtuvieron y se interpretan de manera análoga a lo expuesto para el caso de muro sin aberturas. En estas gráficas puede verse el efecto en los elementos mecánicos del marco, debido a la redistribución de esfuerzos en el muro al incrementarse la abertura.

En las figuras anteriores, la magnitud de la fuerza aplicada al sistema para alcanzar la distorsión prefijada es diferente para cada porcentaje de abertura, por lo que para hacer equiparables en magnitud los diagramas, se normalizaron respecto a la fuerza lateral, obteniendo los diagramas presentados en las Figs. 5.25 y 5.26.

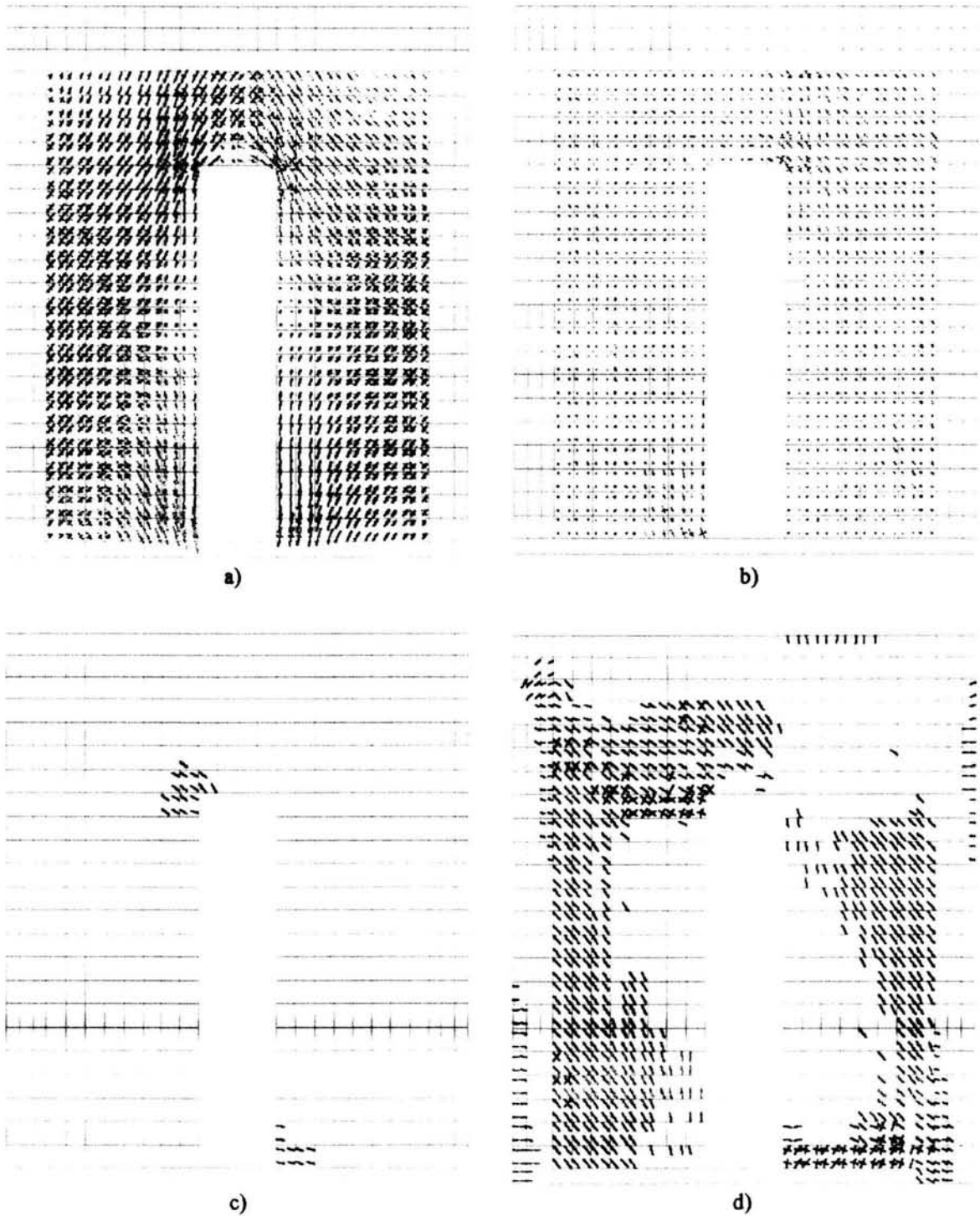


Fig. 5.19 Efectos locales en el muro con 16% de abertura.

a) Distribución de esfuerzos principales para una distorsión de 0.0002; b) Distribución de esfuerzos principales para una distorsión de 0.0006; c) Deformación de agrietamiento para una distorsión de 0.0002; d) Deformación de agrietamiento para una distorsión de 0.0006.

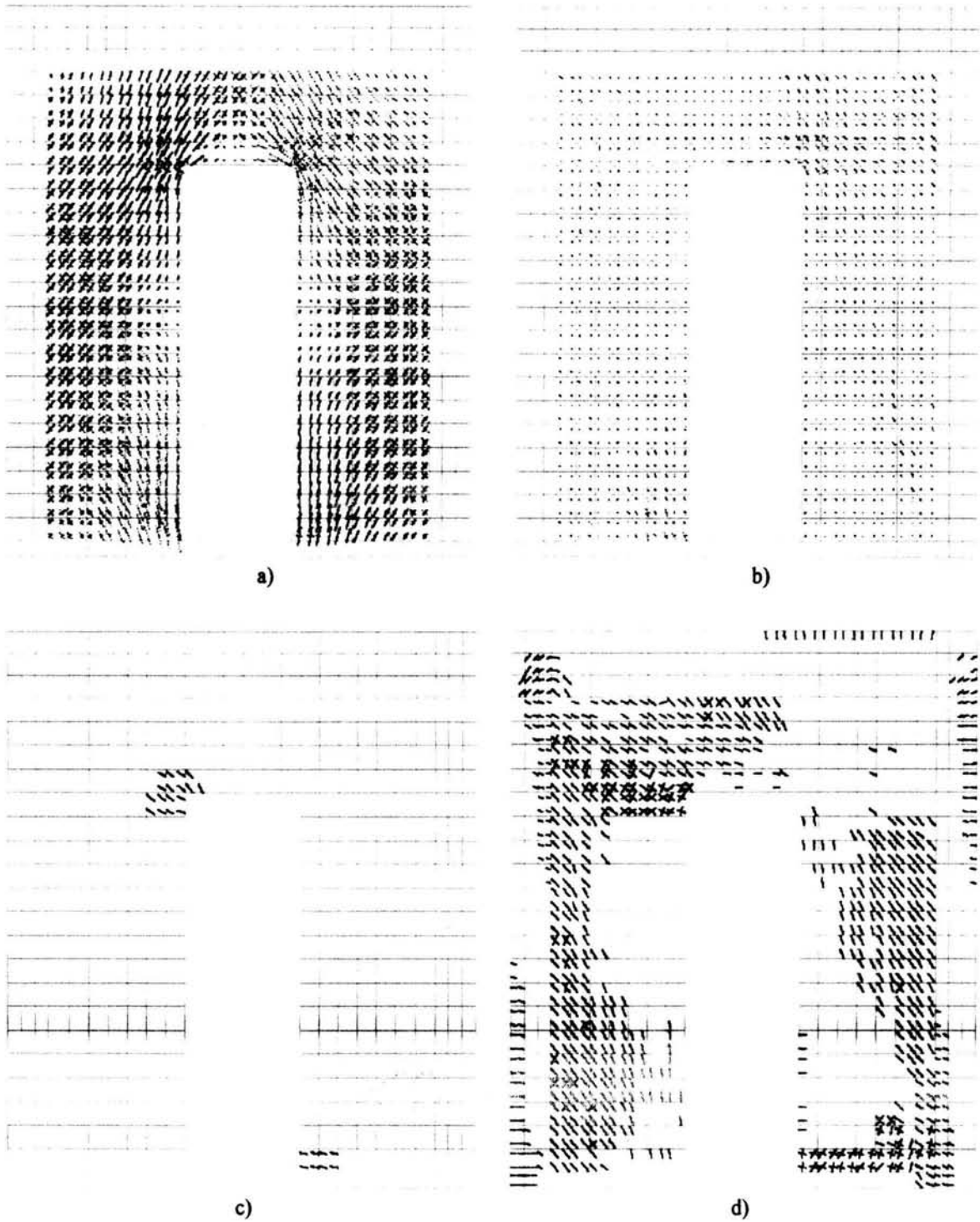


Fig. 5.20 Efectos locales en el muro con 24% de abertura.

a) Distribución de esfuerzos principales para una distorsión de 0.0002; b) Distribución de esfuerzos principales para una distorsión de 0.006; c) Deformación de agrietamiento para una distorsión de 0.0002; d) Deformación de agrietamiento para una distorsión de 0.006.

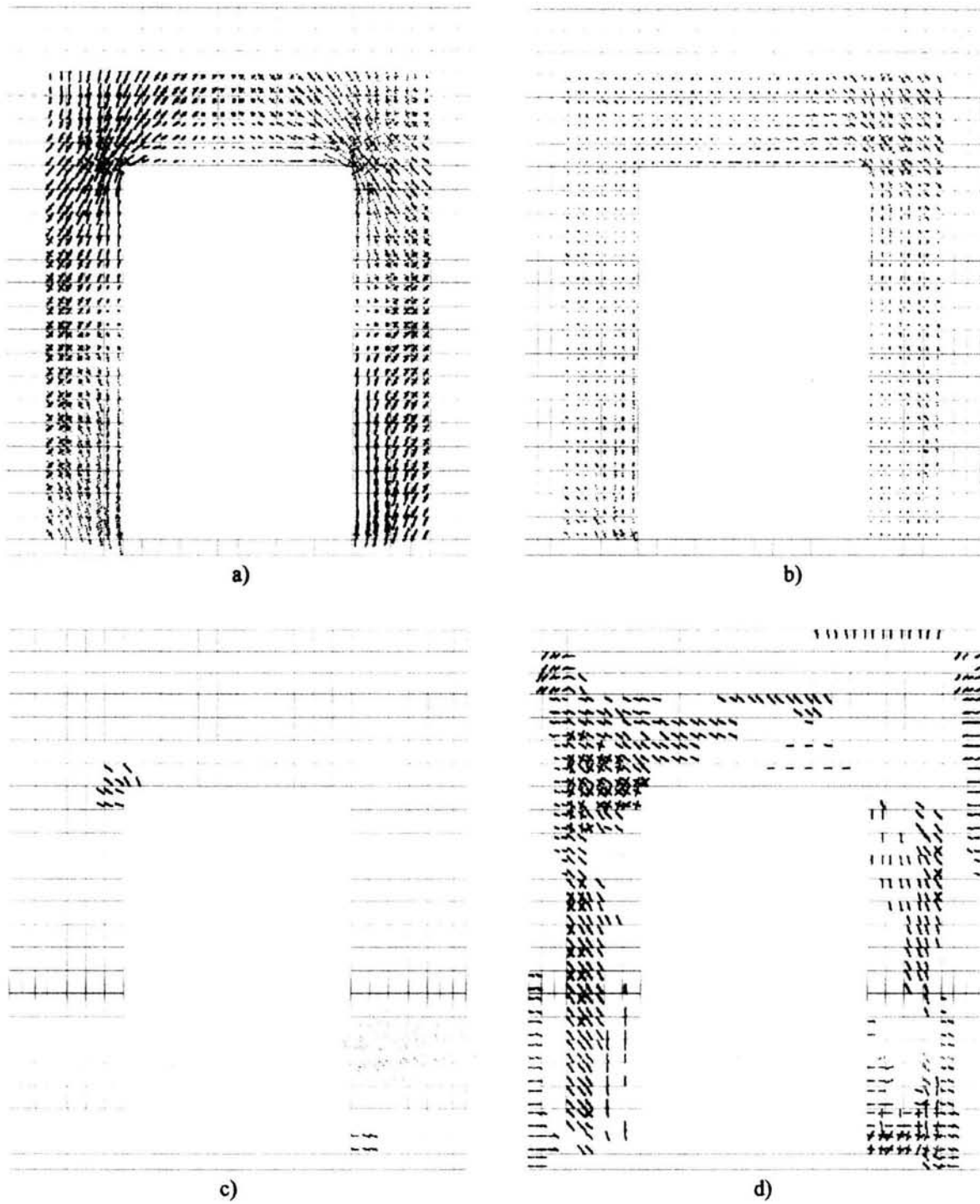


Fig. 5.21 Efectos locales en el muro con 48% de abertura.

a) Distribución de esfuerzos principales para una distorsión de 0.0002; b) Distribución de esfuerzos principales para una distorsión de 0.006; c) Deformación de agrietamiento para una distorsión de 0.0002; d) Deformación de agrietamiento para una distorsión de 0.006.

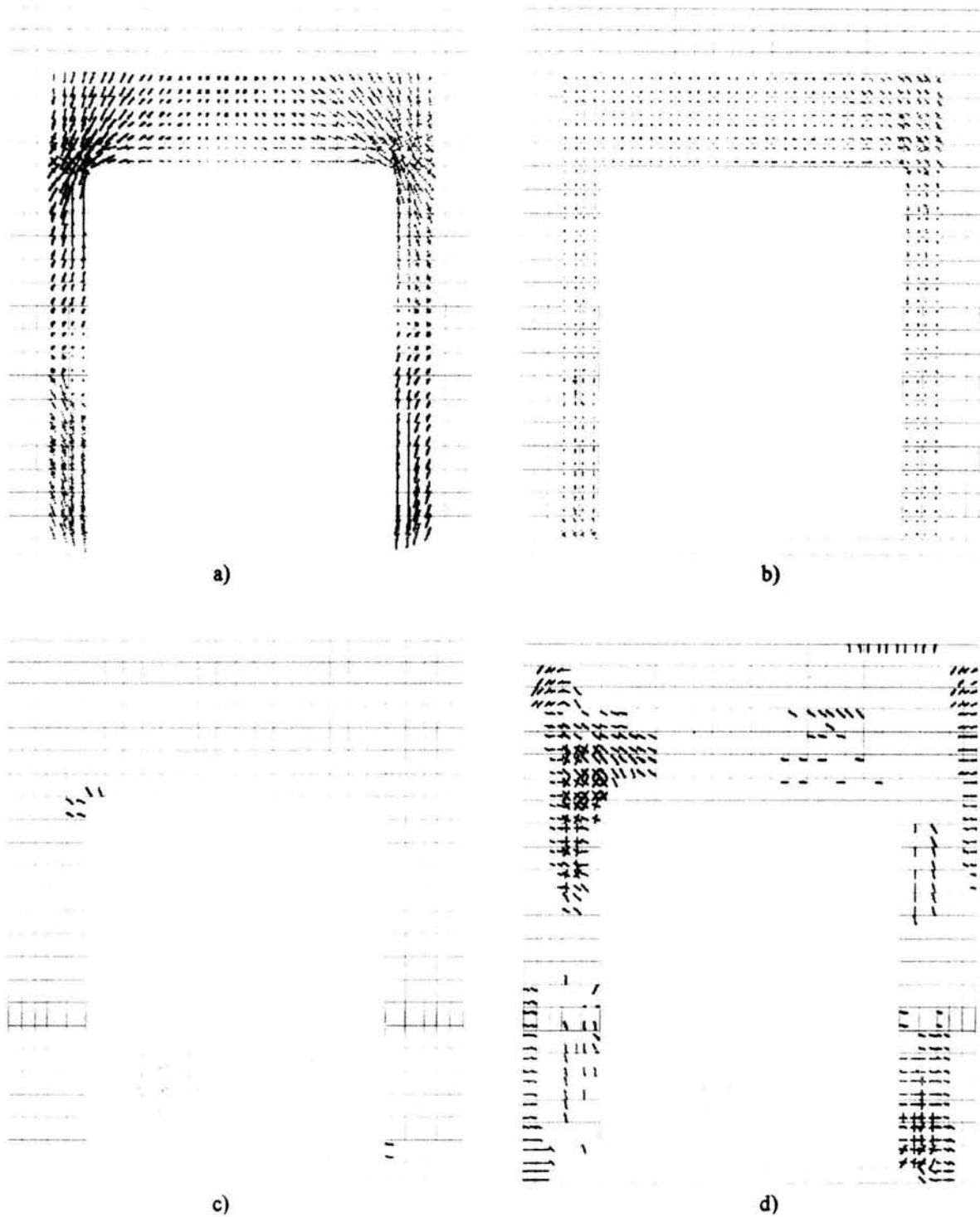


Fig. 5.22 Efectos locales en el muro con 64% de abertura.

a) Distribución de esfuerzos principales para una distorsión de 0.0002; b) Distribución de esfuerzos principales para una distorsión de 0.006; c) Deformación de agrietamiento para una distorsión de 0.0002; d) Deformación de agrietamiento para una distorsión de 0.006.

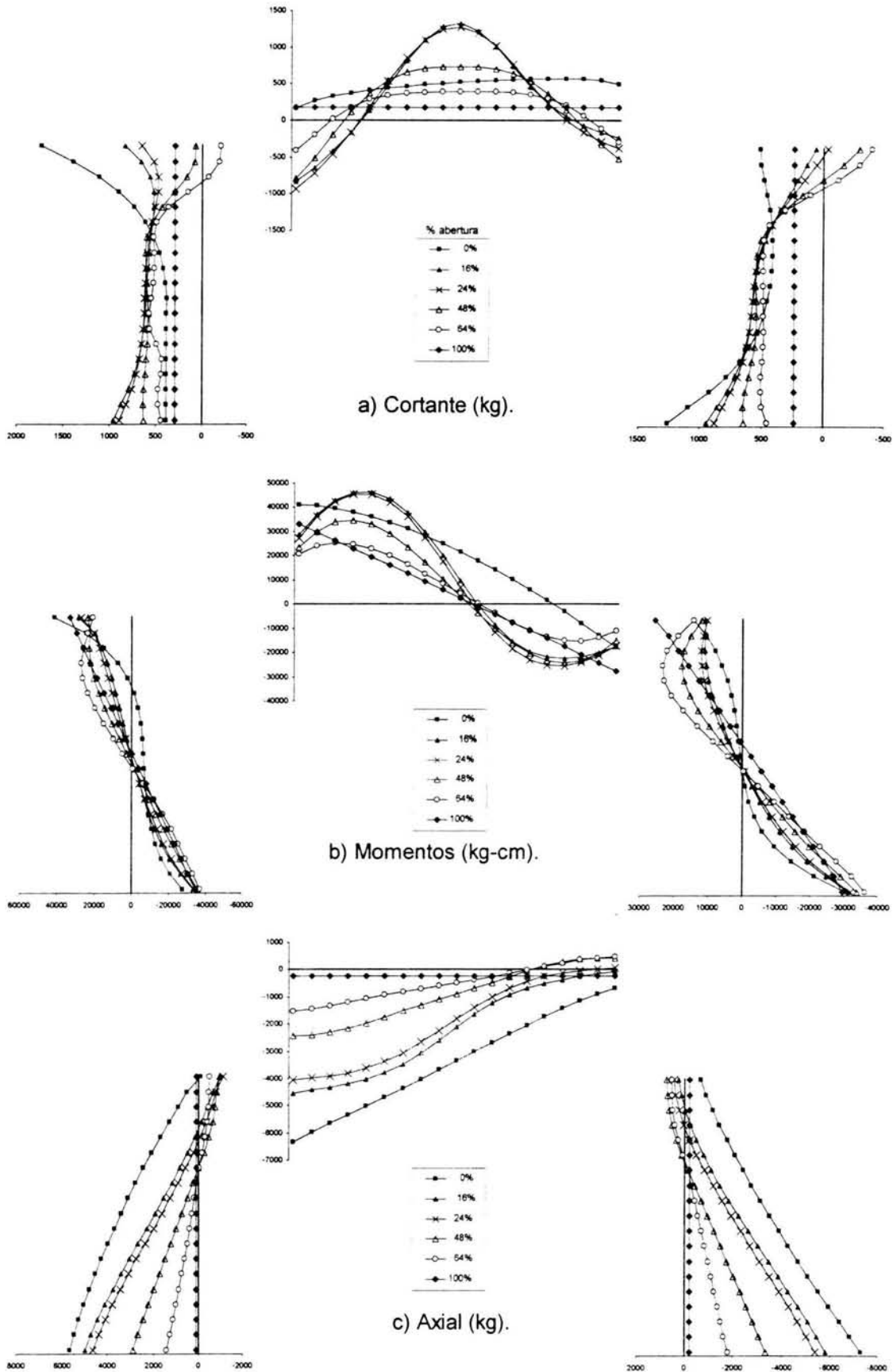


Fig. 5.23 Diagramas de elementos mecánicos ($\gamma = 0.0002$).

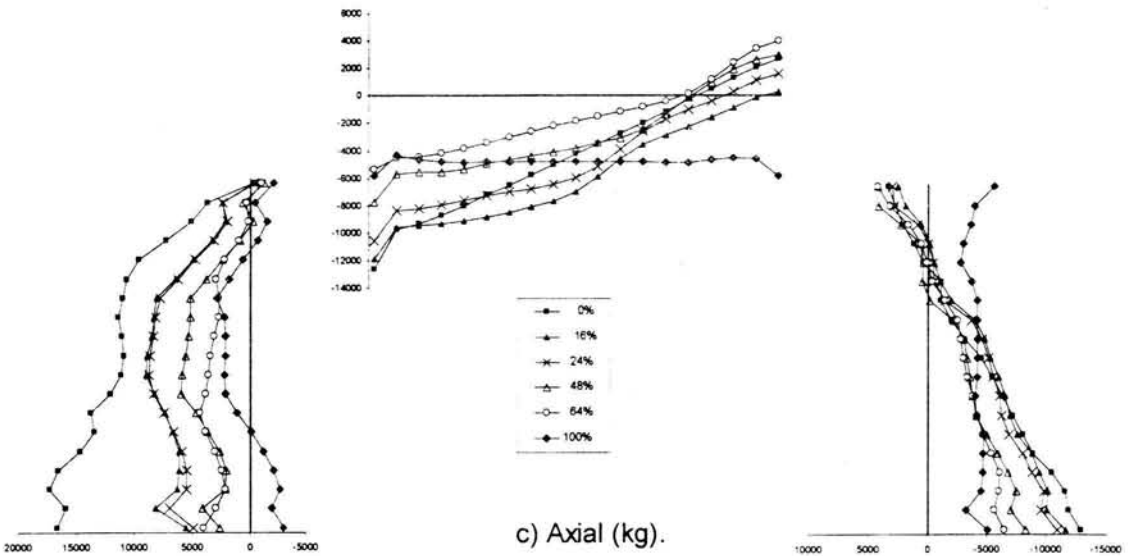
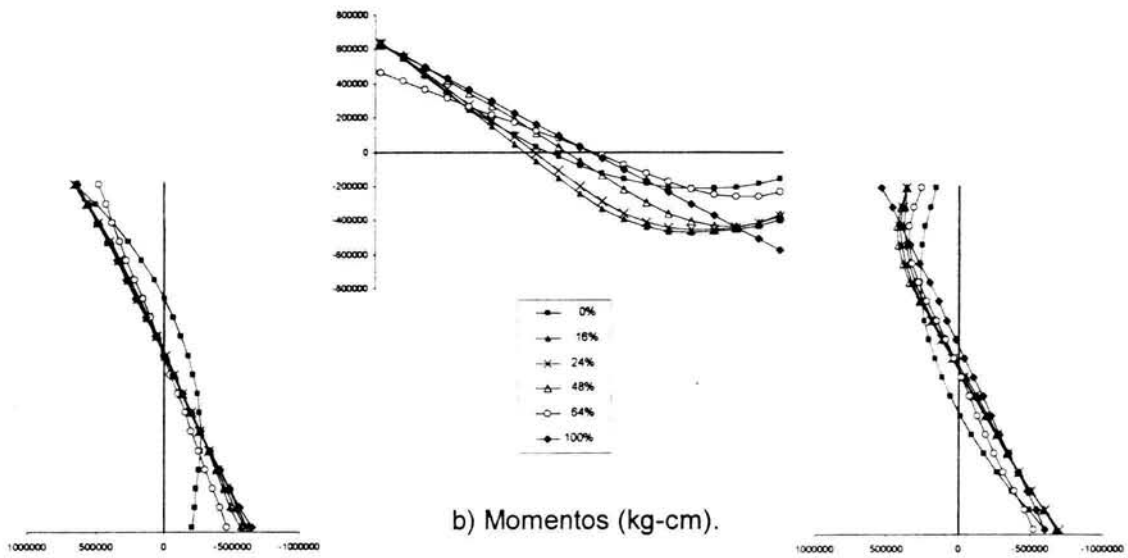
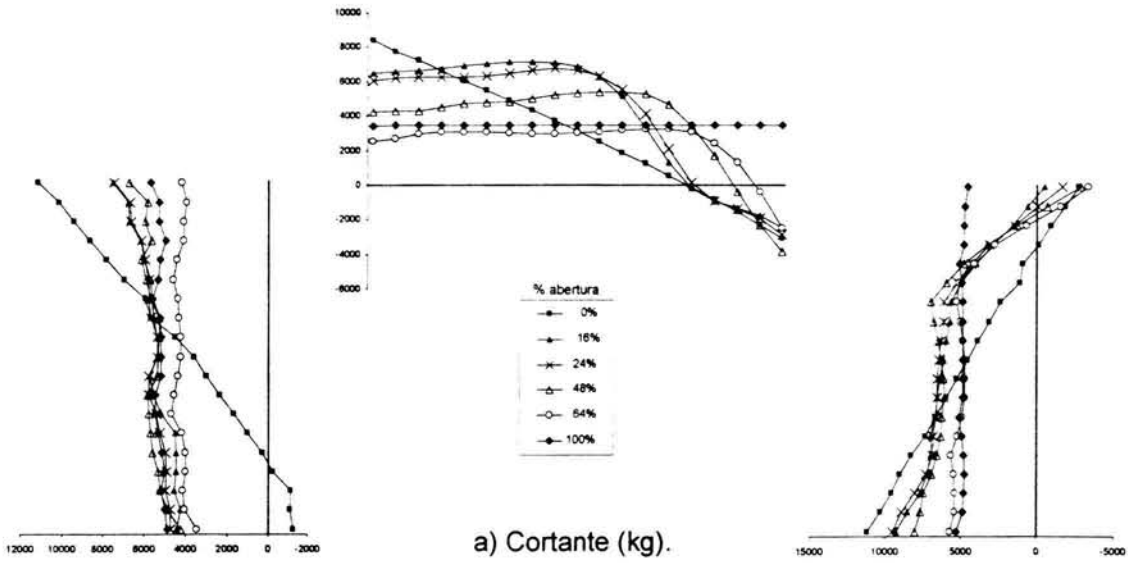


Fig. 5.24 Diagramas de elementos mecánicos ($\gamma = 0.006$).

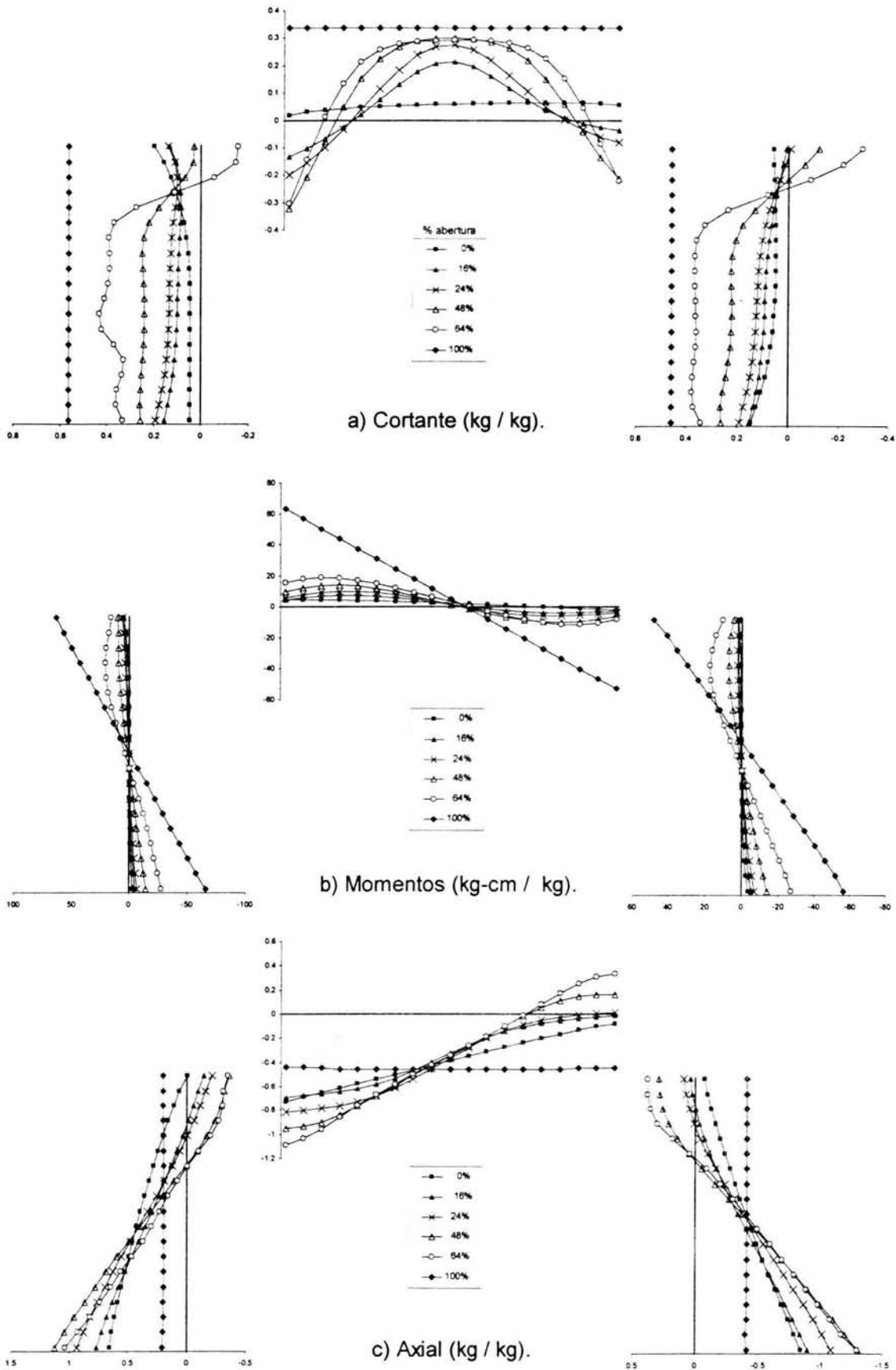


Fig. 5.25 Diagramas de elementos mecánicos normalizados ($\gamma = 0.0002$).

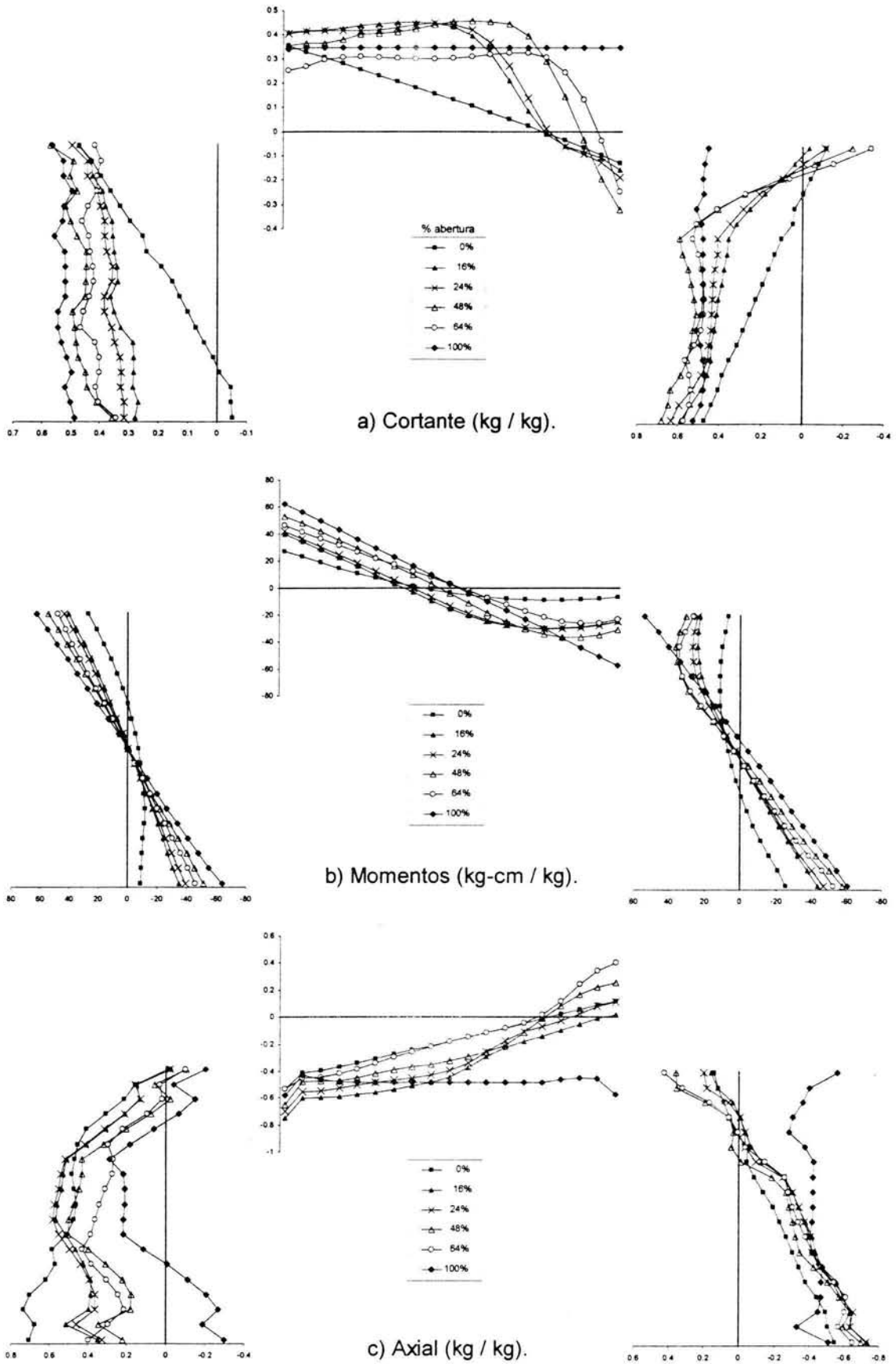


Fig. 5.26 Diagramas de elementos mecánicos normalizados ($\gamma = 0.006$).

5.3 Incorporación del efecto de las aberturas en el modelo simplificado.

Uno de los objetivos específicos planteados para este trabajo, ha sido la incorporación del efecto de las aberturas en el modelo de diagonal equivalente propuesto en el capítulo cuatro. Para esto, a partir de los modelos numéricos estudiados se determinaron curvas trilineales de comportamiento, tomando las mismas distorsiones características de agrietamiento, resistencia y última que las convenidas para el muro sin aberturas, se establecen los factores de reducción de rigidez secante, que permiten modificar la curva trilineal del muro diafragma sin aberturas en la del muro con abertura dada, Fig. 5.27.

1. Factor de rigidez secante agrietada (S_1). Este factor resulta del cociente entre la rigidez lateral para una abertura dada y el del diafragma sin abertura.

$$S_1 = \frac{K^{\alpha S_1}}{K^{\alpha S_1}} \quad (5.1)$$

2. Factor de rigidez secante resistente (S_2). Resultado del cociente entre la rigidez secante al alcanzarse la resistencia y la rigidez secante al agrietamiento, para el diafragma con la abertura dada.

$$S_2 = \frac{K^{\alpha S_2}}{K^{\alpha S_1}} \quad (5.2)$$

3. Factor de rigidez secante última (S_3). El cociente entre la rigidez secante al considerarse el límite útil y la rigidez secante al agrietamiento, para el diafragma con la abertura dada.

$$S_3 = \frac{K^{\alpha S_3}}{K^{\alpha S_1}} \quad (5.3)$$

Para cada uno de los grupos de estudio propuestos, es posible graficar estos tres factores contra el porcentaje de abertura, obteniendo curvas como la mostrada en la Fig. 5.28, para los casos de ventana centrada estudiados.

Se reconoce la debilidad del modelo de diagonal equivalente al no ser capaz de reproducir la distribución de elementos mecánicos en el marco, sin embargo, dicha debilidad podría ser subsanada si se acepta que para distorsiones menores o iguales a la de agrietamiento la distribución de elementos mecánicos se mantiene

constante y para distorsiones entre ésta y la de resistencia se acepta constante la distribución de elementos mecánicos de ésta última. Es así como, a partir del estudio paramétrico se podrían desarrollar reglas de distribución de elementos mecánicos normalizados respecto a la fuerza aplicada al sistema. El producto de los elementos mecánicos normalizados y la fuerza aplicada al sistema en estudio permiten la estimación de los elementos mecánicos en el marco.

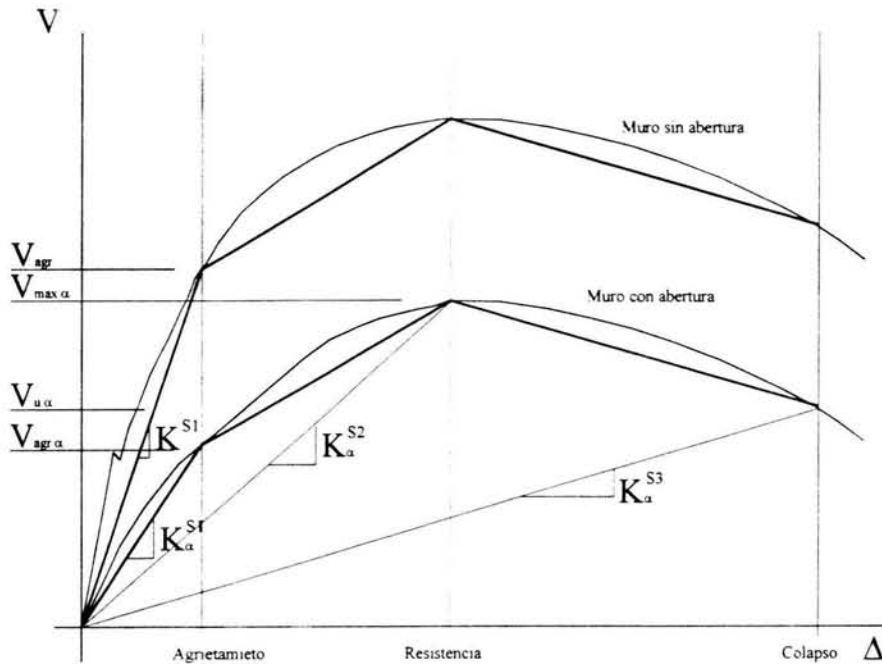


Fig. 5.27 Modelo trilineal de muros con aberturas.

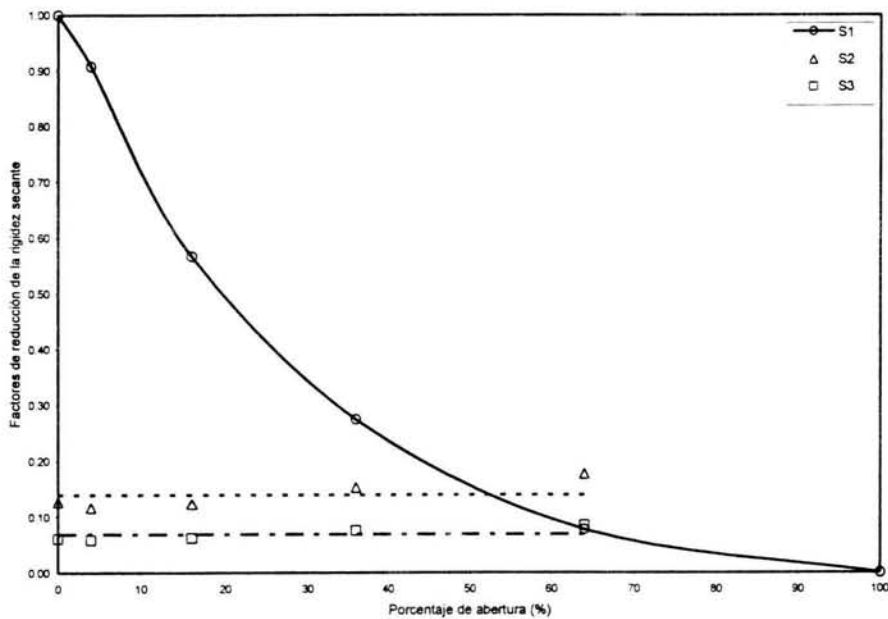


Fig. 5.28 Factores para el caso de ventana centrada.

Capítulo 6

Modelo de Análisis No-Lineal de Sistemas Marco-Muro con Aberturas

Como se ha comentado a lo largo de este trabajo, la práctica de la ingeniería requiere de modelos de análisis suficientemente precisos y prácticos en su aplicación. Esto ha generado el desarrollo de una amplia variedad de modelos para incorporar la presencia de muros en el interior de marcos.

La mayoría de estos modelos, no incorporan el efecto debido a la presencia de aberturas, por lo que, su uso en el análisis estructural, podría llegar a ser tan inconveniente, como la práctica común de no incluir los muros en el modelo estructural. Es por esto, que en este trabajo se propone una manera de incorporar el efecto de las aberturas en el comportamiento global de las estructuras.

En este capítulo, se presentan las bases para el desarrollo de un modelo analítico simplificado de fácil aplicación para el análisis no-lineal de sistemas marco-muro, que permita al ingeniero de la práctica estimar la respuesta de dichos sistemas considerando la presencia de aberturas. Se desarrolla un ejemplo sencillo, que permite clarificar la metodología propuesta en este trabajo para el análisis de sistemas marco-muro.

6.1 Descripción del método de análisis.

El trabajo desarrollado hasta este punto, se integra al plantear un procedimiento sencillo y suficientemente preciso para el análisis de un sistema marco-muro con características derivadas de un modelo conocido. Este procedimiento se resume a continuación en cinco pasos.

1. Proponer la curva de comportamiento trilineal para el muro diafragma sin aberturas.
2. Corregir dicha curva para incluir el efecto de las aberturas en el comportamiento del muro, mediante factores correctivos, como los calculados en el capítulo 5.
3. A partir de la curva obtenida en el punto anterior se define la relación fuerza-deformación axial del elemento diagonal equivalente.
4. Construcción del modelo reticular equivalente, asignándole las propiedades respectivas a los elementos del marco y la diagonal.
5. Efectuar el análisis estructural del sistema equivalente hasta alcanzar el nivel de deformación deseado.

6.2 Aplicación del modelo a un sistema marco-muro con aberturas.

Con la finalidad de ejemplificar la aplicación del modelo propuesto, se aplicó el procedimiento descrito en el inciso anterior a un sistema marco-muro de una crujía y un nivel, cuyas dimensiones vertical y horizontal a ejes son 3.00 m. El muro diafragma presenta una abertura centrada tipo ventana, con relación de aspecto h/b de 1.0 y 16 por ciento de abertura, Fig. 6.1. Las propiedades de los materiales corresponden a las de los modelos analizados con el método de los elementos finitos.

A continuación se presenta el procedimiento seguido para la aplicación del modelo de análisis:

1. Como los muros de los dos entresijos (sin considerar aberturas), presentan las mismas condiciones en geometría y material, es suficiente definir una curva de comportamiento carga-desplazamiento lateral. Los valores obtenidos para los puntos característicos, agrietamiento, resistencia y último se muestran en la tabla 6.1.
2. La curva se modifica para incluir el efecto de las aberturas en el comportamiento del diafragma, obteniéndose los valores mostrados en la tabla 6.2.

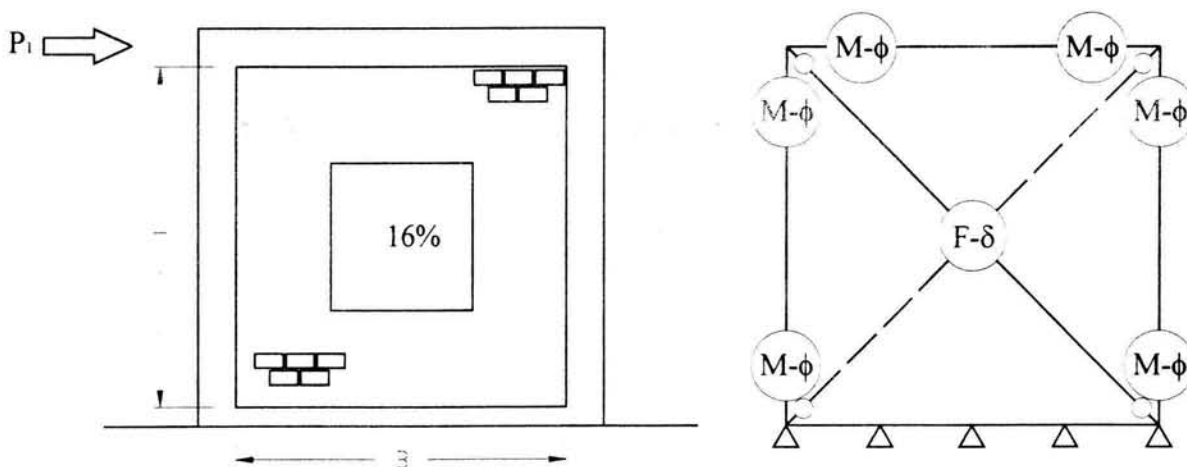
Tabla 6.1 Valores de la curva de carga-desplazamiento lateral del muro sin aberturas.

	<i>Agrietamiento</i>	<i>Resistencia</i>	<i>Ultima</i>
<i>Fuerza Lateral (t)</i>	12.1	22.1	17.1
<i>Desplazamiento (cm)</i>	0.104	1.2	2.4

Tabla 6.2 Valores de la curva de carga-desplazamiento lateral del muro con 16% de abertura.

	<i>Agrietamiento</i>	<i>Resistencia</i>	<i>Ultima</i>
<i>Fuerza Lateral (t)</i>	6.9	11.8	11.7
<i>Desplazamiento (cm)</i>	0.104	1.2	2.4

- La relación carga-desplazamiento lateral se transforma en la de fuerza-deformación axial para el elemento diagonal equivalente mediante las ecs. (4.11).
- Para el análisis del sistema estructural descrito, se recurrió a desarrollar el modelo en el programa SAP2000® (CSI, 1998). Se inició el proceso de modelación con la definición de la geometría del sistema de marcos, para posteriormente asignar articulaciones en ambos extremos de los elementos del marco, que permiten definir relaciones momento-curvatura en la sección. Una vez definidas la geometría y propiedades del marco se colocaron los elementos diagonales biarticulados en sustitución del muro, de manera semejante al modelo de diagonal equivalente propuesto por Bazán (1980); sin embargo, para el modelo aquí propuesto se le asignó la curva de comportamiento fuerza axial-deformación obtenida en el punto tres. Para este fin, al efectuar el modelo en SAP2000®, se colocó en el centro de dicha diagonal una articulación plástica con el comportamiento correspondiente (F- δ), Fig. 6.1.

**Fig. 6.1** Sistema estructural y modelo de análisis

6.3 Presentación de resultados.

En la Fig. 6.2, se presentan las curvas de comportamiento carga-desplazamiento lateral; obtenidas para los modelos de elementos finitos y diagonal equivalente propuesto en este trabajo. En dicha figura puede verse que el modelo de diagonal equivalente propuesto reproduce satisfactoriamente el comportamiento global del sistema considerado exacto (modelo de elementos finitos), hasta el máximo nivel de distorsión que admite el Reglamento de Construcción del Distrito Federal, lo cual era el objetivo de este trabajo.

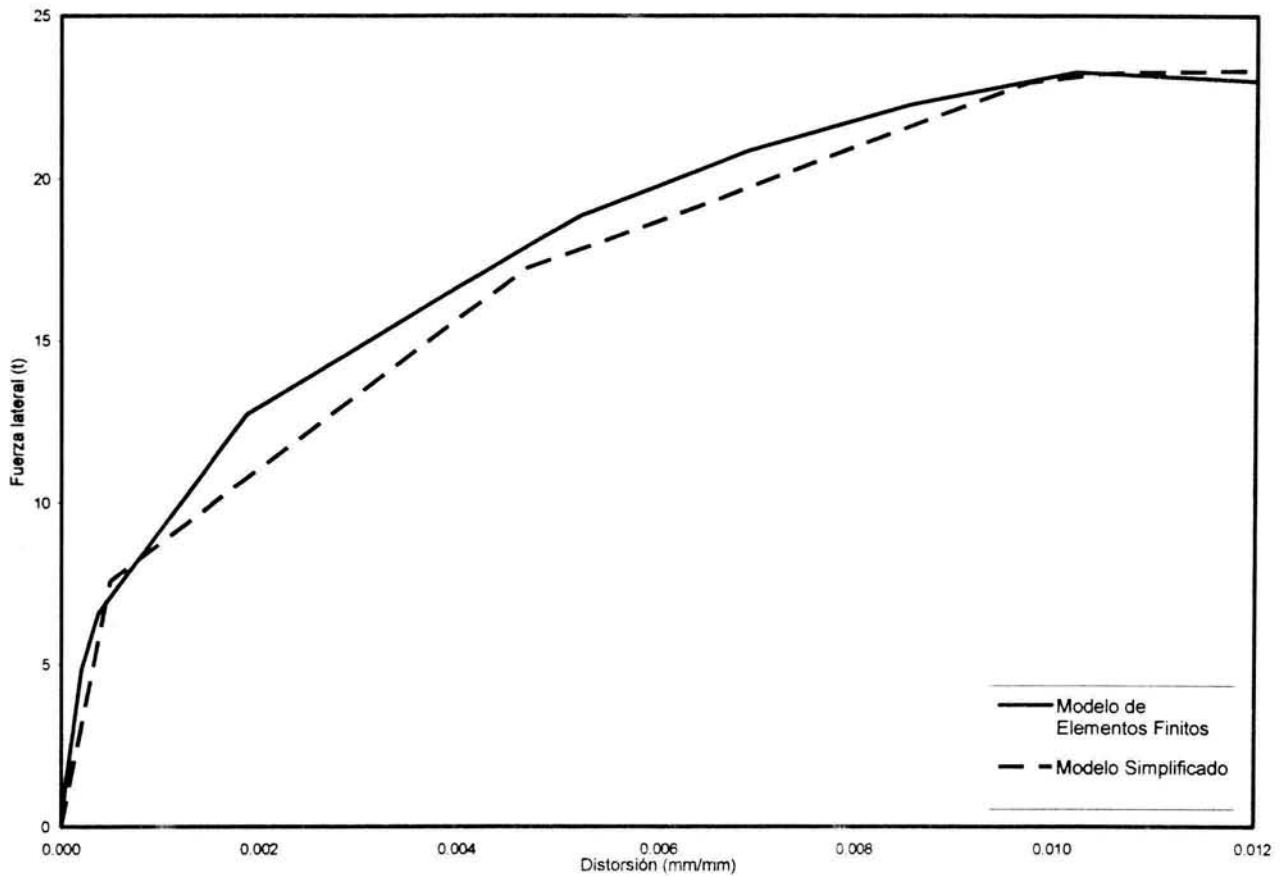


Fig. 6.2 Comparación del comportamiento estimado con los modelos de elementos finitos y el simplificado.

En la Fig. 6.3, se presenta la comparación de elementos mecánicos obtenidos con el modelo de elementos finitos y el simplificado. En la figura puede verse que el modelo propuesto no es capaz de reproducir la distribución de elementos mecánicos en el marco, lo que conlleva a que los elementos mecánicos obtenidos del análisis con el modelo propuesto no deben ser utilizados en el diseño del marco, especialmente el cortante.

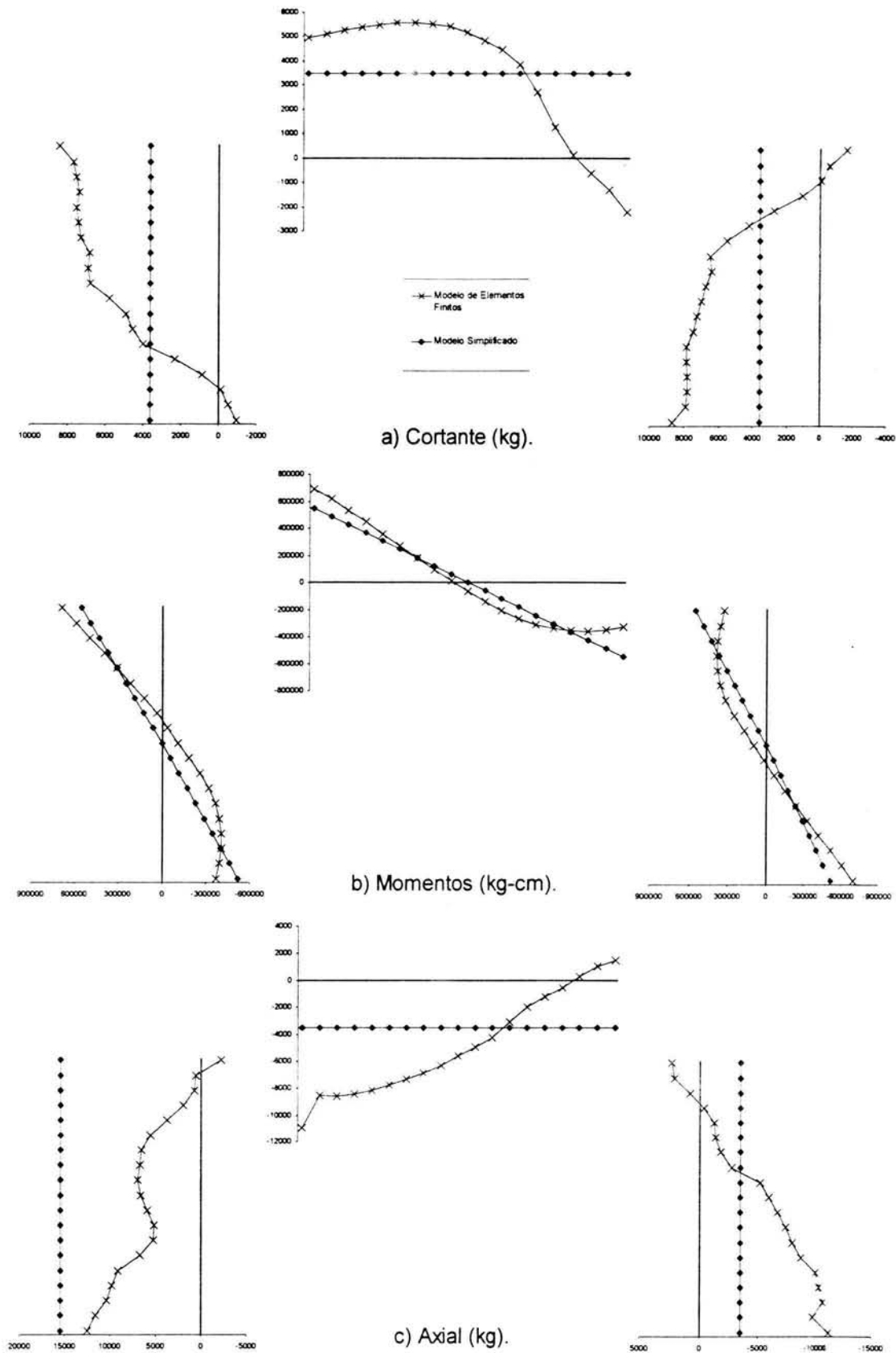


Fig. 6.3 Comparación de elementos mecánicos con los modelos de elementos finitos y el simplificado ($\gamma = 0.006$).

Es importante enfatizar, que para que el sistema sea capaz de desarrollar el comportamiento predicho en la Fig. 6.2, no deben presentarse fallas locales en el marco.

Es conocido que la falla por cortante es súbita, haciendo necesaria, una adecuada valoración de la capacidad de los elementos del marco (columnas y viga). A partir de los diagramas de elementos mecánicos normalizados, Figs. 5.13 y 5.14, Se concluye que con fines prácticos, es posible considerar que el marco no presentará falla por corte si se cuenta con un estriado suficiente, para resistir el 50% de la fuerza lateral aplicada al sistema en las columnas y el 35% de la misma en la viga superior, correspondientes a la distorsión asociada a la resistencia (0.006). En la Fig. 6.4, se muestran el cortante estimado de la manera expuesta, contra el obtenido del modelo de elementos finitos.

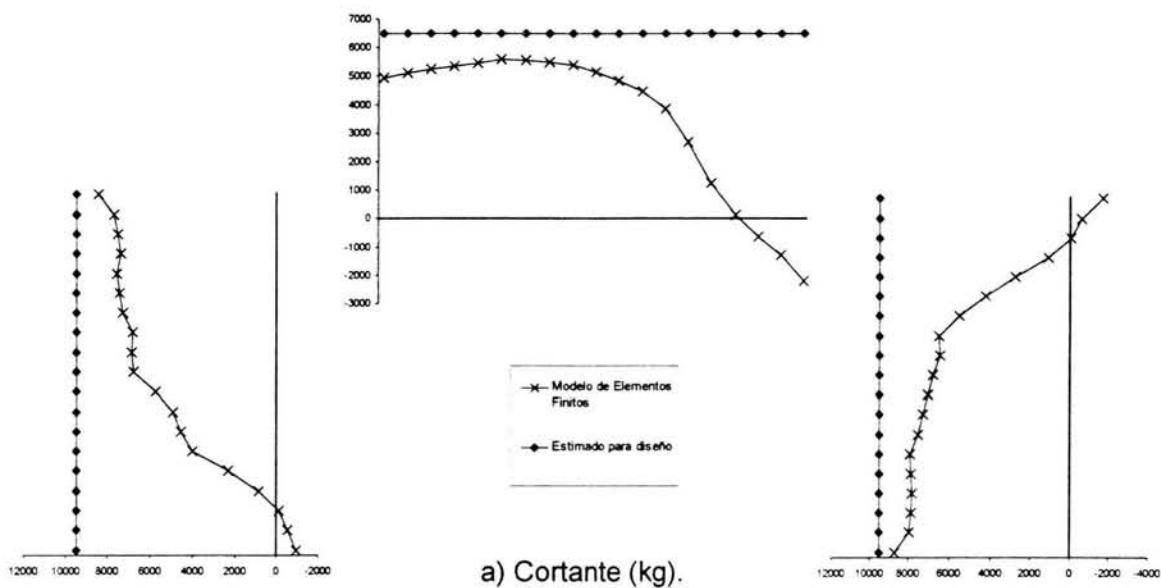


Fig. 6.4 Comparación de elementos mecánicos del modelo de elementos finitos y el estimado ($\gamma = 0.006$).

Capítulo 7

Conclusiones

En este trabajo se han expuesto brevemente, los conocimientos existentes del comportamiento de sistemas marco-muro, haciendo notar que la presencia de muros de mampostería en las estructuras a base de marcos, modifica considerablemente el comportamiento del sistema, por lo que deben ser incluidos en el análisis y diseño estructural. Estos muros con frecuencia, requieren de aberturas, ya sea por razones estéticas y/o funcionales, añadiendo para su análisis complejidad al sistema.

Con fines de investigación se desarrollaron modelos analíticos mediante elementos finitos para estudiar el efecto de las aberturas en la resistencia, rigidez y distribución de elementos mecánicos en el marco ante cargas laterales. Si bien el método del elemento finito permite modelar dichos sistemas, su implementación en estructuras complejas requiere de un gran consumo de recursos computacionales, no aceptables para fines de análisis y diseño comercial, por lo que en este trabajo se exploraron algunos métodos simplificados de análisis, proponiendo un modelo de diagonal equivalente en el que se considera la presencia de aberturas.

En este capítulo, se condensa el aprendizaje adquirido de este trabajo y algunas conclusiones que pudieran servir de pauta para trabajos futuros.

A partir de los resultados obtenidos de este trabajo se han establecido las siguientes conclusiones:

- El comportamiento de sistemas marco-muro es muy complejo, con efectos no lineales prácticamente desde el inicio de la carga; por lo que su modelado aún con el método del elemento finito, no resulta trivial, ya que requiere incluir elementos de interfaz y modelos de comportamiento para los cuales en la actualidad no se cuenta con suficiente información para establecer los parámetros necesarios. A pesar de dichas dificultades, en este trabajo se mostró que es posible definir modelos numéricos basados en el método de los elementos finitos, capaces de reproducir satisfactoriamente el comportamiento de estos sistemas.
- En este trabajo se mostró, para los casos estudiados, la diferencia en magnitud y distribución de elementos mecánicos en el marco, para los diferentes porcentajes de abertura del diafragma y para los diversos niveles de distorsión. Esto permitió resaltar la importancia de incluir las aberturas en los modelos analíticos que se usan en la práctica de la ingeniería. También se mostraron las diferencias en la distribución de esfuerzos y agrietamientos en los muros diafragmas.
- El modelo de diagonal equivalente representa el efecto en la rigidez lateral por la presencia de aberturas en los muros de relleno, pero no proporciona ninguna información con respecto a la distribución y magnitudes de los elementos mecánicos que se presentan en columnas y trabes.
- Esta deficiencia se plantea suplir con el desarrollo de envolventes de elementos mecánicos que permitan estimar la distribución y magnitud de estos en el marco dada una fuerza lateral aplicada al sistema, y así establecer recomendaciones prácticas de diseño adecuadas para sistemas marco-muro con aberturas.
- El modelo simplificado que se propone en este trabajo, demostró su potencial de reproducir resultados globales, aceptables hasta altos niveles de deformación, con relativa sencillez y sobre todo bajo consumo de recursos computacionales y humanos, por lo que su uso se considera atractivo para la práctica. Sin embargo, se encuentra limitado su uso, ya que en su estado actual, no es capaz de reproducir la distribución de elementos mecánicos en el marco.
- Con la metodología expuesta, es posible realizar, mediante un programa comercial de uso común en México; análisis de vulnerabilidad paso a paso de sistemas tridimensionales marco-muro, sometidos a carga lateral en los que se consideren los efectos no-lineales de la mampostería en el comportamiento.

De la experiencia adquirida durante el desarrollo de este trabajo, cabe hacer las siguientes recomendaciones para el desarrollo de trabajos futuros:

- Para explotar el potencial de modelos de elementos finitos como el presentado, es necesario contar con información experimental que lo respalde. Para ello es necesario diseñar y ejecutar ensayos que permitan conocer el comportamiento de las mamposterías comunes en México, principalmente en lo referente a la energía de fractura, factor de retención de cortante y demás parámetros requeridos para los modelos numéricos.
- Es posible y necesario mejorar el modelo de elementos finitos presentado. Por ejemplo, se puede probar el desempeño de los modelos definiendo superficies mixtas diferentes a la aquí utilizada para el comportamiento de la mampostería, incluidas en programas de análisis de elemento finito distintos al utilizado en este trabajo, o desarrolladas ex profeso para tesis doctorales.
- Es necesario que se realicen estudios paramétricos, para establecer relaciones que permitan generalizar el método de diagonal equivalente propuesto para sistemas marco-muro con aberturas ya que demostró potencial de producir resultados aceptables hasta altos niveles de deformación, con relativa sencillez y sobre todo bajo consumo de recursos; aspectos de particular interés para los ingenieros de la práctica.
- Un aspecto importante que no fue considerado en los modelos analizados, es el efecto benéfico en el comportamiento del diafragma que se sabe proporciona el confinamiento colocado habitualmente alrededor de la abertura. En trabajos futuros sería de interés cuantificar dicha contribución.
- Sería conveniente mejorar el modelo simplificado propuesto para estimar directamente los efectos locales como son, distribución y magnitud de elementos mecánicos en el marco. Un posible camino, es el uso de múltiples diagonales que plastifiquen en el momento adecuado y permitan reproducir adecuadamente la distribución y magnitud de los elementos mecánicos en el marco.

Referencias

- Achyutha, H., Jagadish, R., Rao, P.S. y Shakeebur, R.S. (1986).** "Finite Element Simulation of the Elastic Behavior of Infilled Frames with Openings", Computers and Structures, Vol. 23, No. 5, pp 685-696.
- Alvarez, J. y Alcocer, S. (2001).** "Estudio analítico sobre el comportamiento sísmico de muros de mampostería confinada con aberturas", Monografía CIMNE IS-46.
- Araujo, B. (2000).** "Modelo para el análisis no lineal de marcos de concreto reforzado con muros de relleno de mampostería", Tesis de Maestría, U.N.A.M.
- Araujo, B. y Ayala, G. (2000).** "Modelo para el análisis no lineal de marcos de concreto reforzado con muros de relleno de mampostería", Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Guanajuato, México.
- Ayala, A.G. (2003),** "Apuntes del curso Teoría General de las Estructuras", DEPMI, UNAM, febrero a junio, no publicado.
- Bathe, K.J. (1982),** "Finite element procedures in engineering análisis", 1ª edición, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, E.U..
- Bazán, E. (1980).** "Muros de mampostería ante cargas laterales, estudios analíticos", Tesis Doctoral, U.N.A.M.
- Benjamín, J. y Williams, H. (1958).** "The behavior of one-story bricks shear walls", Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE, julio, Vol.84, No.ST4, pp 1723/1-30.
- Bertero, V. y Brokken, S. (1983).** "Infills in seismic resistant building", Journal of the Structural Engineering, ASCE, junio, Vol.109, No.6, pp 1337-1361.
- Cerón, E. (1997).** "Desarrollo de un modelo estructural para muros de mampostería, con y sin huecos", Tesis de Maestría, U.N.A.M.
- Cervenka, V. y Pukl, R. (1995).** "SBETA. Computer program for nonlinear finite element analysis of reinforced concrete structures in plane stress state", Documentación del programa, versión 4.95, Praga, República Checa.
- Chrysostomou, C. (1991).** "Effects of degrading infill walls on the nonlinear seismic response of two-dimensional steel frames", Tesis Doctoral, Universidad de Cornell.
- Crisafulli, F. (1997).** "Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills", Tesis Doctoral, Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda, 1997.
- Crisfield, M. (1991).** "Non-linear finite element analysis of solids and structures", Vol. 1:Essentials. John Wiley & sons. Londres, Gran Bretaña.
- CSI (1998).** "SAP2000, Integrated finite element analysis and design of structures", Manual de Usuario, Berkeley, California, USA.
- Dhanasekar, M. y Page, A. (1986).** "The influence of brick masonry infill properties on the behavior of infilled frames", Proc. Instn. Civ. Engrs., diciembre, Vol. 81, pp 593-605.
-

- Fiorato, A., Sozen, M. y Gamble, W. (1970).** "An investigation of the interaction of reinforced concrete frames with masonry filler walls", Structural Research Report 370, Universidad de Illinois.
- Flores, A. y Alcocer, S. (1996).** "Calculated response of confined masonry structures", Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.1830.
- Flores, A., Marcelino, J., Lazalde, G. y Alcocer, S. (1999).** "Evaluación experimental del desempeño de marcos con bloque hueco de concreto reforzados con malla electrosoldada y recubrimiento de concreto", Informe interno IEG/03/99, CENAPRED.
- Hobbs, B. y Samai, M. (1985).** "A comparison of analytical methods for infilled frames", Internacional Symposium on Earthquake and Design Structures in Seismic Areas, University of Constantine, Algeria.
- Holmes, M. (1961).** "Steel frames with brickwork and concrete infilling", Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Vol. 19, No. 6501, pp 473-478.
- Ishibashi, K. y Katsumata, H. (1994).** "A study on nonlinear finite element analysis of confined masonry walls", Cuaderno de investigación No.15, CENAPRED.
- Karamanski, T. (1967).** "Calculating infilled frames by the method of finite elements", Symposium on tall buildings, editado por Pergamon Press.
- King, G. y Pandey, P. (1978).** "The analysis of infilled frames using finite elements", Proc. Instn. Civil Engrs., diciembre, Vol.65, No.7, pp 749-760.
- Klingner, R. y Bertero, V. (1976).** "Infilled frames in earthquake-resistant construction", Report No. EERC 76-32, University of California, Berkley.
- Liaw, T. y Kwan, K. (1985).** "Static and Cyclic Behaviours of Multistorey Infilled Frames with Different Interface Conditions", Journal of Sound and Vibration, Vol.99, No.2.
- Lourenço, P. (1996).** "Computational strategies for masonry structures", Tesis Doctoral, Universidad Tecnológica de Delft, Holanda.
- Madan, A., Reinhorn, A., Mander, J. y Valles, R. (1997).** "Modeling of masonry infill panels for structural analysis", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.123, No.10, pp 1295-1302.
- Mallick, D. y Severn, R. (1969).** "Dynamic characteristics of infilled frames", Proc. Instn. Civil Engineering, Vol.39, pp 261-287.
- Mallick, D. (1971).** "Effect of the openings on the lateral Stiffnes on infilled frames", Proc. Instn. Civil Engineering, No.7371, Vol.49, pp 193-209.
- Mayes, R. y Clough, R. (1975).** "State of the art in seismic shear strength of masonry an evaluation and review", Reporte EERC 75-21, Universidad de California.
- Mehrabi, A., Shing, P., Schuller, M. y Noland, J. (1994).** "Performance of masonry-infilled R/C frames Ander in-plane lateral loads", Reporte CU/SR-94/6, Universidad de Colorado.
- Meli, R. (1973).** "Behaviour of masonry walls under lateral loads", Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Roma.
- Meli, R. (1979).** "Comportamiento sísmico de muros de mampostería", Instituto de Ingeniería, U.N.A.M., Reporte No. 352.

- Meli, R., Reyes A. (1971).** "*Propiedades mecánicas de la mampostería*", Instituto de Ingeniería, U.N.A.M., No.288.
- Mendelson, A. (1986).** "*Plasticity: theory and application*", Robert E. Krieger Publishing Co. Malabar, Florida, E.U.
- Moghaddam, H. y Dowling, P. (1987).** "*The state of the art in infilled frames*", Reporte ESEE No. 87-2, Imperial College of Science and Technology.
- Mosalam, K. (1996).** "*Experimental and computacional strategies for the seismic behaviour evaluation of frames with infill walls*", Tesis Doctoral, Universidad de Cornell.
- NTC (2004).** "*Normas técnicas complementarias de mampostería para el reglamento de construcciones del Distrito Federal*", Gobierno del Distrito Federal, México.
- Orduña, E. (1999).** "*Modelo de muros de mampostería para el análisis no lineal de marcos de concreto reforzado con muros diafragma*", Tesis de Maestría, U.N.A.M.
- Page, A. (1978).** "*Finite element model for masonry*", Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE, Vol.104, No.ST8, pp 1267-1285.
- Park, R. y Paulay, T. (1983).** "*Estructuras de concreto reforzado*", Ed. Limusa.
- Polyakov, S. (1960).** "*On the interaction between masonry filler walls and enclosing frame when loaded in the plane of the wall*", Earthquake Engineering Reserch Institute, pp 36-42.
- RCDF-2004 (2004).** "*Reglamento de construcciones para el Distrito Federal*", Gobierno del Distrito Federal, México.
- Reflak, J. y Fajfar, P. (1991).** "*Elastic análisis of infilled frames using sub-structures*", Proc. 6th Canadian Conf. Earthquake Engrg., Toronto, 285-292.
- Riddington, J. y Stafford-Smith, B. (1977).** "*análisis of infilled frames subjected to ranking with design recomendations*", Structural Engineer, Vol.55, 263-268.
- Roeder, G. y Ayala, G. (2002).** "*Programa para el análisis no lineal con elementos finitos, NLFEM*", Instituto de Ingeniería, U.N.A.M.
- Rots, J. (1988).** "*Computational modeling of concrete fracture*", Tesis Doctoral, Universidad Tecnológica de Delft, Holanda.
- Saneinejad, A. y Hobbs, B. (1995).** "*Inelastic design of infilled frames*", Journal of Structural Engineering, ASCE, abril, Vol.121, No.4, pp 634-650.
- Schmidt, T. (1989).** "*An approach of modeling masonry infilled frames by the FE-method and z modified equivalent strut method*", Darmstadt Concrete, Annual Journal on Concrete and Concrete Structures, Vol. 4, Darmstadt, Germany.
- Shah, S., Stuart, E. y Ouyang, C. (1995).** "*Fracture mechanics of concrete*", John Wiley & Sons, Inc. Nueva York, E.U.
- Stafford-Smith, B. (1962).** "*Lateral stiffness of infilled frames*", Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE, diciembre, Vol.88, No.ST6, pp 183-199.

-
- Stafford-Smith, B. (1966).** "*Behavior of square infilled frames*", Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE, febrero, Vol.92, No.ST1, pp 381-403.
- Stafford-Smith, B. y Carter, C. (1969).** "*A method of analysis for infilled frames*", Proc. Instn. Civ. Engrs., septiembre, Vol.44, pp 31-48.
- Syrmakesis, C. y Vratsanou, V. (1986).** "*Influence of infill walls to R.C.frames response*", Proceedings of the Eighth European Conference on Earthquake Engineering, Vol.3, Portugal.
- Thiruvengadam, V. (1985).** "*On the natural frecuencies of infilled frames*", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 13, pp 401-419.
- TNO Building and Construction Research (1996).** "*DLANA user's manual, release 6.1*", TNO Building and Construction Research, Delft, Holanda.
- Tomažević, M. y Lutman, M. (1996).** "*Seismic behaviour of masonry walls: modeling of hysteretic rules*", Journal of Structural Engineering, Vol. 1040.
- Tomažević, M. (1999).** "*Earthquake-resistant design of masonry buildings*", Imperial College Press.
- Žarnic, R. y Tomažević, M. (1988).** "*An experimentally obtained method for evaluation of the behaviour of masonry infilled R/C frames*", Proceedings of the ninth world conference on earthquake engineering, Tokyo, Japan, Vol. VI, pp 163-168.



POSGRADO EN INGENIERÍA
