

01161

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA



MODELO DE MUROS DIAFRAGMA PARA ANÁLISIS DINÁMICO

T E S I S
PRESENTADA POR

Ricardo Andrés Trujillo Henao

PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA
(ESTRUCTURAS)

Ciudad Universitaria, Junio de 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 SALE
DE LA BIBLIOTECA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA



MODELO DE MUROS DIAFRAGMA PARA ANÁLISIS DINÁMICO

T E S I S
PRESENTADA POR

Ricardo Andrés Trujillo Henao

PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA
(ESTRUCTURAS)

Director de tesis:
Dr. José Alberto Escobar Sánchez

Ciudad Universitaria, Junio de 2004.

Agradecimientos

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

NOMBRE: Ricardo Andrés Trujillo H.

FECHA: 14-06-2004

FIRMA: Ricardo A. Trujillo H.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por la valiosa formación académica recibida.

Al Programa de posgrado en Ingeniería, por su aporte a la formación de nuevos Maestros y Doctores tanto nacionales como extranjeros.

Al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por hacer parte de mi formación como maestro y por incentivar mi inquietud por la investigación; además por las facilidades logísticas y económicas brindadas.

A mi tutor y amigo Dr. José Alberto Escobar Sánchez, por ser un apoyo constante a lo largo de mi permanencia en México y por la oportunidad y confianza brindadas para trabajar con él.

A los jurados de ésta tesis, Dr. David Murià Vila, Dr. Sergio Alcocer, Dr. Oscar López B., Dr. Carlos Reyes S.; por sus valiosos aportes en la finalización de este documento y sus comentarios enriquecedores

A todos y cada uno de mis maestros y compañeros por colaborar en mi formación académica y personal.

Ricardo A. Trujillo.

RESUMEN

El comportamiento estructural ante excitaciones sísmicas de los muros de mampostería confinados por dalas y castillos, denominados muros diafragma, ha generado gran cantidad de estudios y análisis por parte de diferentes investigadores. Lo anterior se debe, principalmente a que, debido a la proliferación de este sistema constructivo, es necesario contar con modelos analíticos representativos para poder analizar y diseñar este tipo de estructuras.

Así, se han desarrollado métodos analíticos, tales como el de la diagonal equivalente o el método de la columna ancha para simular este comportamiento. Sin embargo, algunos de estos métodos proporcionan resultados adecuados únicamente en condiciones de carga estática. Al momento de invertir el sentido de aplicación de las cargas, se hace necesario realizar un nuevo análisis para tomar en cuenta este cambio de dirección de la carga. Este aspecto representa una desventaja cuando se trata de hacer análisis dinámicos de las estructuras.

En este trabajo se presenta una alternativa económicamente factible de aplicar en los despachos de ingeniería, para modelar, por medio de un programa general de análisis estructural comercial, el comportamiento de muros de mampostería ante cargas cíclicas.

Es así que, por medio de diferentes opciones del programa, se analiza la mampostería obteniendo los esfuerzos principales de los muros a manera de puntales en compresión con bajos esfuerzos a tensión en las esquinas opuestas.

Se presentan ejemplos de aplicación en los que se demuestra que los resultados obtenidos con la técnica de simulación empleada, muestran muy buena correlación respecto a otros métodos aproximados desarrollados anteriormente.

ABSTRACT

The seismic behaviour of masonry walls confined by beams and columns, denominated diaphragm walls, has generated great quantity of studies from different researchers. The reason is because due to the proliferation of this constructive system, it is necessary to have representative analytic models to be able to analyze and to design this type of structures.

Thus, several analytic methods as the equivalent diagonal or the method of the wide column to simulate this behaviour have been developed. However, these methods provide results only under static load conditions. When the direction of the loads is inverted, it becomes necessary to carry out a new analysis to take into account this change of application of the load. This aspect represents a disadvantage when a dynamic analysis of the structures is carried out.

In this work, an economically feasible alternative for applying in engineering offices, to model the behaviour of masonry walls subjected to cyclic loads by means of a commercial general program of structural analysis, is presented.

In this way, by means of different options of the program, the masonry is analyzed obtaining the compression and tension forces on the walls.

Application examples are presented. It is demonstrated that the results obtained with the proposed technique show very good correlation respect to other approximated methods previously developed.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	xi
1. ANTECEDENTES	1
1.1. ESTUDIOS EXPERIMENTALES.....	1
1.2. ESTUDIOS ANALÍTICOS DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADOS	3
1.2.1. Método de la columna ancha.....	5
1.2.2. Método de la diagonal equivalente.....	6
1.2.3. Método del elemento finito.....	7
2. MODELO PROPUESTO.....	14
3. CALIBRACIÓN DEL MODELO PROPUESTO.....	23
3.1. COMPARACIÓN CON LA DIAGONAL EQUIVALENTE	23
3.2. COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	27
3.3. APLICACIÓN EN CASAS SOMETIDAS A EXPLOSIONES	32
3.3.1. Descripción de la casa.....	33
3.3.2. Materiales estructurales.....	34
3.3.3. Instrumentación.....	35
3.3.4. Modelo de elementos finitos.....	36
3.3.5. CÁLCULO DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL	37
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	42
5. REFERENCIAS	45
6. BIBLIOGRAFÍA	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Disposición de los ensayos realizados por Benedetti (1985) y Bernardini (1979).....	2
Fig. 2 Modelo de discretizado, Gambarotta (1997).....	8
Fig. 3 Modelo de E.F. como panel completo, Gambarotta (1997).....	9
Fig. 4 Modelo simplificado de tres diagonales, Araujo (2000), y modelo de E.F. Orduña (1999).	10
Fig. 5 Modelo Mo, Aguilar et al.,(1996)	13
Fig. 6 Separación de la mampostería y los elementos confinantes debido a carga lateral; compresión en la diagonal de contacto.....	14
Fig. 7 Geometría del modelo analizado por Bazán y Meli (2002)	15
Fig. 8 Efecto del puntal de compresión en un muro de mampostería confinada de acuerdo con la acción de la fuerza lateral.....	16
Fig. 9 Detalle de una de las esquinas del Modelo propuesto.	17
Fig. 10 Elementos "NLLink" del SAP2000 (CSI)	17
Fig. 11 Errores relativos en desplazamientos del tercer piso con respecto al modelo de Bazán y Meli, obtenidos para diferentes relaciones de forma, b/h , de mallas de E.F. y tamaños de los conectores de esquina.	21
Fig. 12 Errores relativos en desplazamientos del tercer piso con respecto al modelo de Bazán y Meli, obtenidos para diferentes relaciones de forma, b/h , de mallas de E.F. y tamaños de los conectores de esquina.. Esfuerzos ocasionados por el efecto del puntal a compresión que se	

genera en el modelo estudiado por Bazán y Meli (2002) debido a carga lateral aplicada en diferente dirección.	22
Fig. 13 Elementos mecánicos y desplazamientos usando la diagonal equivalente.....	24
Fig. 14 Representación del marco de Bazán y Meli (2002), por medio del modelo propuesto en este trabajo con elementos "NLLink" y cascarón del programa SAP2000.....	25
Fig. 15 Distribución de esfuerzos en los paneles del modelo de Bazán y Meli calculados con el propuesto en el presente trabajo.	25
Fig. 16 Variación del puntal a compresión dependiendo de la dirección de aplicación de las cargas.	26
Fig. 17 Modelo experimental (Flores, et al., 1999)	27
Fig. 18 de histéresis del modelo experimental. (Flores et al., 1999)	28
Fig. 19 Resultados obtenidos con el método de la diagonal equivalente. .	29
Fig. 20 Diagrama de esfuerzos principales a compresión obtenidos con el modelo propuesto en este trabajo.	29
Fig. 21 Distribución de esfuerzos en la diagonal, dependiendo de la localización de las resultantes de las componentes principales de los esfuerzos.	31
Fig. 22. Distribución de esfuerzos principales en la sección.	32
Fig. 24 Planta de la casa sometida a explosiones subterráneas.	34
Fig. 24 Modelo en 3D de E.F. y Malla de E.F.....	37
Fig. 25 Representación esquemática del modo fundamental de vibración, $T=0.061$ s (frecuencia=16.26 Hz), participación de la masa en 40%, de la planta de la casa estudiada.	38
Fig. 27 Esfuerzos en la mampostería debidos a la aplicación de un espectro de diseño.....	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros para el modelo de E.F., (Araujo, 2000).....	10
Tabla 2 Comparación de elementos mecánicos y desplazamientos obtenidos con el modelo de la diagonal equivalente y el modelo propuesto en el presente trabajo (desplazamiento en cm, fuerzas en t y momentos en t-m).....	26
Tabla 3 Propiedades de los materiales del muro ensayado.....	28
Tabla 4 Comparación de elementos mecánicos y desplazamientos obtenidos con el resultado experimental, modelo de la diagonal equivalente y el modelo propuesto.....	31
Tabla 5 Valores permisibles de las mamposterías estudiadas suponiendo morteros con las menores resistencias recomendadas por el NTCDCEM (1995).....	35
Tabla 6 . Frecuencias de vibración en Hz y factores de participación modal de masa calculados para la casa.	39
Tabla 7 Frecuencia fundamental de vibración de la casa, medida y calculada.....	39

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1 Casa sometida a explosiones subterráneas.....	33
Fotografía 2 Disposición de los instrumentos en el interior y exterior de la vivienda sometida a explosiones subterráneas.	36

INTRODUCCIÓN

Al observar alrededor es posible notar que el uso de la mampostería en pueblos y ciudades está altamente difundido. Es por esta razón que muchos ingenieros se han dado a la tarea de investigar el comportamiento de ésta en condiciones estáticas y dinámicas.

Por otro lado, al existir la necesidad de simplificar los métodos de análisis y diseño los investigadores condensan los resultados de sus estudios. Esto genera procesos relativamente ágiles y con respuestas útiles para ser empleadas directamente en el análisis y diseño estructural.

Haciendo uso de modelos matemáticos tales como los elementos finitos, el método de la rigidez y otros, se ha llegado a proponer modelos como el de la diagonal equivalente, o el método de la columna ancha (Bazán y Meli, 2002). Con los que se llega a obtener elementos mecánicos aplicables al diseño y que llevan a resultados conservadores.

No obstante, la aplicación de estos métodos se limita a condiciones estáticas y por otro lado, los programas comerciales de computadora, capaces de realizar análisis dinámicos de estructuras de mampostería, se encuentran en el mercado a costos elevados.

En este trabajo, se hace uso de las diferentes herramientas que posee un programa general de análisis estructural que utiliza el método del elemento finito para realizar análisis dinámicos de muros de mampostería. Como resultado, se obtienen elementos mecánicos para su diseño y que, desde el punto de vista práctico, coinciden con respuestas calculadas por métodos anteriormente desarrollados así como con resultados experimentales.

Así, se llega a desarrollar una herramienta accesible a los despachos de ingeniería para que estén acorde con las nuevas tendencias de la normatividad. Con ello, se podrán realizar análisis dinámicos en las estructuras que posean muros de mampostería confinados por columnas y vigas conocidos como muros diafragma.

1. ANTECEDENTES

1.1. ESTUDIOS EXPERIMENTALES

La mampostería es un material altamente heterogéneo, tanto en sus aspectos macroscópicos, como en sus características mecánicas. Éstas, están condicionadas por la geometría y las características de resistencia de los materiales, la mano de obra y las acciones que la naturaleza ejerce sobre ellas. Todo lo anterior ha hecho que los investigadores se interesen en encontrar modelos, ya sean experimentales o analíticos para tratar de predecir su comportamiento.

Gran cantidad de estudios se ha realizado al respecto, tanto a nivel nacional como mundial. Ya sea el caso de países latinoamericanos donde su difusión es bastante amplia o en países de mayor desarrollo tecnológico, donde su uso es más reducido, pero no menos importante. Se tiene así que países como Japón, donde dicho sistema constructivo no es tan difundido, encaminan sus investigaciones para mejorar la calidad de vida de países del tercer mundo (como los llaman los autores), con el fin de obtener soluciones a la escasez de vivienda, buscando métodos de análisis, diseño y construcción que minimicen los daños por sismo (Hiroto et al., 1992).

Por otro lado, en Italia diferentes investigadores a través de los años han realizado tanto análisis experimentales como analíticos en esta área (Bernardini et al., 1978; Benedetti, 1985, Gambarotta y Lagomarsino, 1997a, 1997b, etc). En la Fig. 1 se muestra la forma en que se realizaron los ensayos de Benedetti y Bernardini, los cuales se realizaron aplicando fuerzas laterales monotónicamente crecientes.

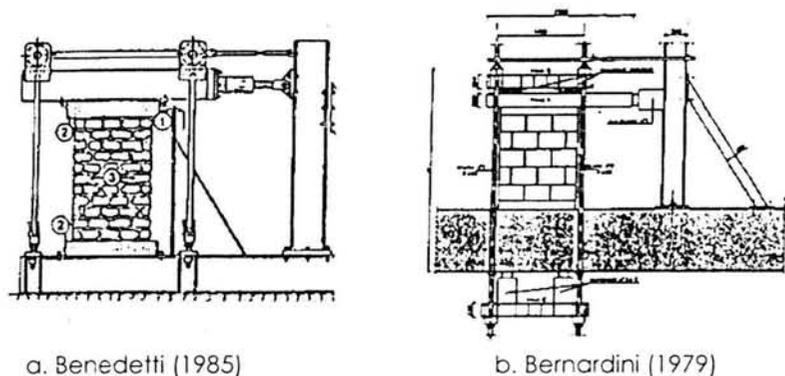


Fig. 1 Disposición de los ensayos realizados por Benedetti (1985) y Bernardini (1979).

México no se queda atrás en investigaciones relacionadas con este tema. Ya desde los años 60 se realizaron formalmente infinidad de ensayos y estudios acerca del comportamiento de los diferentes tipos de mampostería, tanto en condiciones estáticas, pseudoestáticas o dinámicas.

Es así que autores como Esteva (1966), estudiaron el comportamiento de la mampostería diafragma frente a cargas cíclicas laterales. Posteriormente, Meli (1975) realizó estudios donde se determinó el comportamiento descrito por la mampostería ante acciones sísmicas. Y en 1976, Hernández y Meli (1976), proporcionan herramientas para la disposición del refuerzo en la mampostería con el fin de mejorar su comportamiento sísmico.

Recientemente, Alcocer et al., (1999), han dedicado gran parte de sus investigaciones a analizar, modelar y tratar de comprender el comportamiento que tiene la mampostería ante excitaciones sísmicas y también a cómo prevenir comportamientos erráticos, además de sus posteriores reparaciones y rehabilitaciones.

1.2. ESTUDIOS ANALÍTICOS DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADOS

La consideración más importante para diferenciar la mampostería confinada de los muros diafragma es la robustez de los elementos confinantes. Una versión de la mampostería confinada se asemeja lo suficiente a los muros diafragma, tal como para ser modelada como tales. Este es el caso en el que primero se fabrican las dalas y castillos y la mampostería se une a tope con ellos, omitiendo así la trabazón entre el concreto de los castillos y las piezas de la mampostería.

Las cargas laterales en las estructuras ocasionan que los muros de mampostería trabajen fundamentalmente a compresión. Estos, al igual que otros elementos estructurales, presentan una relación carga-desplazamiento aproximadamente lineal hasta el instante en que se registra el primer agrietamiento. Después de que esto ocurre, incursionan en el intervalo de comportamiento no lineal, presentándose una disminución tanto de su rigidez como de su capacidad de carga.

En diversas investigaciones se ha observado que inicialmente el marco de concreto reforzado que confina y el muro, se fusionan como una columna

global ancha, proporcionando la capacidad a flexión el marco y siendo el muro el que soporta la mayoría de los esfuerzos cortantes.

Lo anterior se cumple si se garantiza que las dos partes están debidamente unidas por conectores de cortante. Si esto no se asegura en la construcción, se encuentra que a bajos niveles de deformación lateral, el muro se separa en las esquinas del marco, haciendo que el marco se apoye en dichas zonas sobre el muro ocasionando fuerzas axiales así como momentos flexionantes y cortantes en las vigas y columnas. Aunque los momentos flexionantes sean de bajo nivel debido a la proximidad de la acción a las esquinas del marco, los valores de las fuerzas cortantes sí pueden ser de consideración y pueden provocar esfuerzos a compresión elevados en las esquinas del muro.

Los diferentes tipos de estructuras y su conformación hacen que la modelación analítica de la mampostería se dificulte ya que no se puede llegar a un método único para realizar los análisis estructurales correspondientes.

Es así que para estructuras de mampostería confinada de bajo número de niveles, falta de trabazón entre los castillos y los tabiques, deficiente refuerzo horizontal y vertical, y otras circunstancias, se puede modelar su comportamiento como el de muros diafragma o muros confinados por marcos.

Las diferentes combinaciones estructurales de mampostería se pueden concentrar en las siguientes:

- Mampostería estructural o reforzada
- Mampostería confinada por dalas y castillos
- Mampostería confinada por marcos llamada muros diafragma

Algunas otras estructuras surgen de combinaciones de las anteriores.

A continuación se describen diferentes opciones que han sido propuestas para llevar a cabo el modelado numérico de muros de mampostería.

1.2.1. MÉTODO DE LA COLUMNA ANCHA

Se denomina columna ancha al elemento que concentra en su eje axial las propiedades estructurales de un muro y considera los efectos tanto de flexión como de cortante (Bazán y Meli, 2002). En este caso se supone que las vigas que se encuentran dentro de los muros tienen rigidez infinita a flexión. Este método tiene la ventaja de que las estructuras se pueden analizar como esqueléticas.

En el método de la columna ancha las matrices de rigidez de los elementos estructurales se modifican debido a la consideración de deformaciones por cortante en las columnas anchas y a la presencia de zonas rígidas en la longitud de las vigas que se encuentran dentro del muro. La aplicación del método es válida para los mismos intervalos de (rigidez relativa entre muro y marco) que se indican para el uso del método de la diagonal equivalente.

Generalmente, el intervalo de aplicación de estos métodos no cubre los casos más comunes en la práctica. En especial el de la rigidez relativa entre muro y marco, λ , en el que los valores usuales son superiores al valor máximo de $\lambda=11$. En esto influye directamente el hecho de que el Reglamento de Construcciones para el D.F., RCDF, en sus Normas Técnicas Complementarias de Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCDM 1995) (2.4.6), indique que el módulo de cortante de la mampostería, G_m , debe calcularse como $G_m=0.3E_m$ donde E_m es el módulo de elasticidad de la mampostería. Como una opción, los tableros muro-marco considerados como columnas se pueden modelar con momento de inercia $I = A_c l^2$, donde A_c es el área de la sección transversal de la columna y l la longitud de la base del muro de mampostería.

1.2.2. MÉTODO DE LA DIAGONAL EQUIVALENTE

Consiste en idealizar cada muro confinado por medio de un elemento diagonal cuyas propiedades son equivalentes a las del muro (Bazán y Meli, 2002). Toma en cuenta el hecho de que bajo la acción cargas laterales, relativamente pequeñas, el muro se separa del marco en esquinas opuestas y queda en contacto con las otras dos esquinas produciendo el efecto de puntal en compresión.

Para aplicar este método se debe cumplir que el valor de la relación de aspecto del muro, b/h esté comprendido entre 0.75 y 2.5, y que el de la relación de rigideces, $\lambda=EcAc/GmAm$, entre el marco y el muro, se encuentre entre 0.9 y 11. En estas ecuaciones, b es la distancia entre ejes de las columnas, h es la altura del entrepiso, E_c es el módulo de elasticidad

del concreto, G_m es el módulo de cortante del muro, A_c es el área de la sección transversal de cada columna del marco y A_m es el área de la sección transversal del muro.

La diagonal equivalente tiene el mismo espesor, t , y módulo de elasticidad E_m que el muro y su ancho será $w=(0.35+0.022\lambda)h$. En la deducción de esta ecuación se consideró que $G_m=0.4E_m$, sin embargo, en el RCDF vigente (1995), se propone que el módulo de cortante de la mampostería se calcule como $G_m=0.3E_m$. Este valor coincide con el propuesto en las Normas Técnicas Complementarias aprobadas para el año 2004 (NTCDM 2004).

1.2.3. MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO

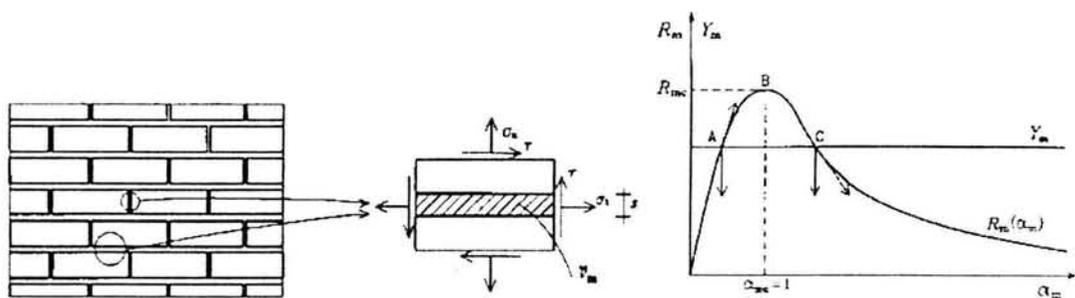
Consiste en dividir un medio continuo en subregiones, denominadas elementos finitos (E.F.). Para modelar los muros se pueden emplear elementos cuadrados que posean como grados de libertad dos desplazamientos y un giro en cada nodo. Una parte importante del análisis con este método consiste en definir adecuadamente el tamaño de los elementos necesarios para representar el comportamiento de la estructura.

La complejidad del comportamiento de la mampostería lleva a múltiples formas en la idealización de los modelos de E.F. De allí las diferentes opciones que existen, ya sea por medio de diagonales únicas, varias diagonales, paneles completos de E.F. planos, haciendo uso de análisis

lineales, no lineales, dinámicos y estáticos, la combinación es amplia y no menor que los trabajos realizados al respecto.

Gambarotta y Lagomarsino, (1997a y 1997b), realizaron diferentes modelos de E.F., con el fin de encontrar la disposición y conformación de estos elementos de manera que se obtuvieran los resultados más cercanos al comportamiento de la mampostería como material compuesto.

Considera de manera detallada todos los elementos que conforman la mampostería y los une, formando interfaces entre los materiales, tanto para los tabiques, como las juntas de mortero. Analiza cada uno como un material y reproduce su comportamiento a medida que se le induce daño. En la Fig. 2 se observan los modelos discretizados y el comportamiento evolutivo de las uniones de mortero.



a) Discretización del mortero

b) Evolución estable e inestable de la unión de mortero.

Fig. 2 Modelo de discretizado, Gambarotta (1997).

Después de definir cuál va a ser el comportamiento de cada uno de los componentes del muro, desarrolla un modelo de E.F., en el cual se detalla de manera minuciosa cada una de las interfaces.

Después de este primer modelo, se procedió a unificar las interfaces y proporcionar un segundo modelo con E.F. planos homogéneos, que representaran el comportamiento de los materiales y su comportamiento en conjunto. Lo anterior se aprecia en la Fig. 3, donde se representa la unión de los modelos discretizados con anterioridad.

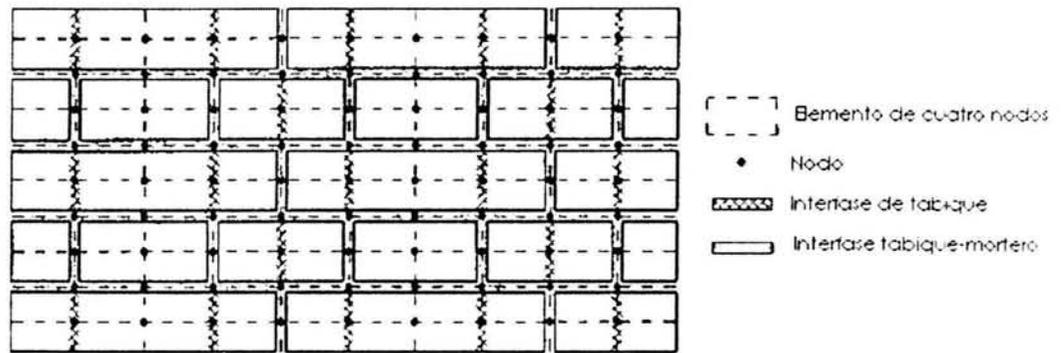
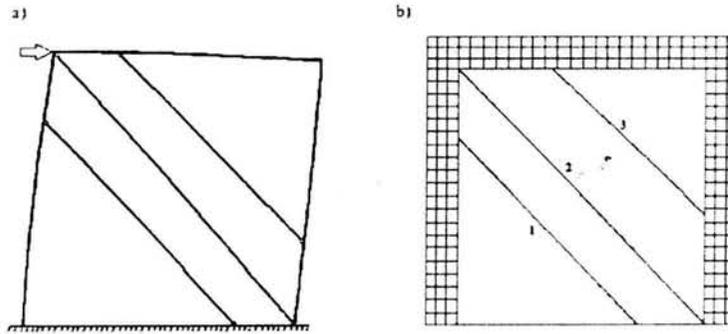


Fig. 3 Modelo de E.F. como panel completo, Gambarotta (1997).

Orduña (1999) desarrolló un modelo de E.F. de tres diagonales para modelar el comportamiento analítico de muros diafragma y el marco lo modeló como E.F. sólidos.

A partir del modelo de Orduña (1999), Araujo (2000), propuso un modelo para el análisis no lineal de muros diafragma (Fig. 4). Sus resultados fueron calibrados con investigaciones realizadas en el CENAPRED (Flores, et al., 1999).



a) modelo de tres diagonales, Araujo (2000) b) modelo de elementos finitos, Orduña (1999)

Fig. 4 Modelo simplificado de tres diagonales, Araujo (2000), y modelo de E.F. Orduña (1999).

Para estos modelos de E.F., se emplearon los parámetros que se anotan en la Tabla 1.

Tabla 1 Parámetros para el modelo de E.F., (Araujo, 2000).

	E Kg/cm ²	f _c Kg/cm ²	f _t Kg/cm ²	G _{fc} Kg/cm ²	G _{ft} Kg-cm/cm ²	v	c Kg/cm ²	Tan (∅)	Tan(ψ)
Mampostería	28000	7.5	2.0	2.0	0.04	0.20	-	-	-
Concreto	115220	235	23.5	5.0	0.05	0.20	-	-	-
Interfaz	35000	-	0.0	-	-	0.20	1.8	0.8	0.0
Acero	2x10 ⁶	4400	4400	-	-	-	-	-	-

A partir de los análisis realizados, se obtuvieron los elementos mecánicos para diseño, tanto en columnas, como en vigas. Para los análisis se empleó un programa de cómputo especializado cuyo costo es tan elevado que hace que su uso quede fuera del presupuesto de los despachos de cálculo.

Por otro lado Álvarez et al., (2001), desarrollaron un modelo de análisis no lineal de muros de mampostería con aberturas, sujeto a cargas laterales. En él se empleó el método de los E.F. haciendo uso del programa de computadora SBETA (Cervenka y Pukl, 1995).

En el estudio de Álvarez et al., (2001) se hace uso de resultados obtenidos en ensayos realizados por Alcocer et al., (1999) Fig. 5 y Aguilar et al. (1996), con muros de mampostería confinada, tanto completos, como con aberturas de ventanas y puertas.

Para los materiales, se utilizaron las siguientes consideraciones:

- Comportamiento no lineal en compresión, incluyendo el ablandamiento,
- Fractura del concreto a tensión basada en la mecánica de la fractura no lineal,
- Criterio de falla por esfuerzo biaxial,
- Reducción de la resistencia a compresión después del agrietamiento,
- Reducción de la rigidez por cortante después del agrietamiento, y

Además, se supuso una adherencia perfecta entre el concreto y el acero de refuerzo.

Las condiciones impuestas para el análisis fueron las siguientes:

- En el análisis se supuso la condición de estado plano de esfuerzos.
- Los especímenes se consideraron empotrados en el lecho superior de la viga de desplante.
- Se usaron E.F. cuadrilátero de cuatro nodos para el modelado del tablero de mampostería y de los elementos de concreto.
- La base y altura de cada E.F. se supuso aproximadamente igual a dos hiladas de mampostería.

- Las barras de refuerzo de los elementos confinantes se modelaron de forma discreta.
- La mampostería es un material anisotrópico. Sin embargo, se consideró que a escala macroscópica, se puede idealizar como un material isótropo hasta antes del agrietamiento. Después del agrietamiento, éste se idealizó como ortótropo, donde el eje de ortotropía se hizo coincidir con la grieta.
- Se consideró como interfaz rígida la zona de contacto de la mampostería con los elementos de concreto reforzado (castillos y dalas). Esta hipótesis resulta válida siempre y cuando las piezas que quedan en contacto con los castillos estén dentadas para incrementar así la trabazón de los tabiques del tablero con el concreto de los castillos.

Después de todas las consideraciones anteriores, se procedió a modelar analíticamente el ensaye, teniendo en cuenta todas las acciones, tanto gravitacionales, como sísmicas que se impuso a los muros en el laboratorio.

Para los paneles de mampostería y para los elementos de concreto, se emplearon mallas de E.F.

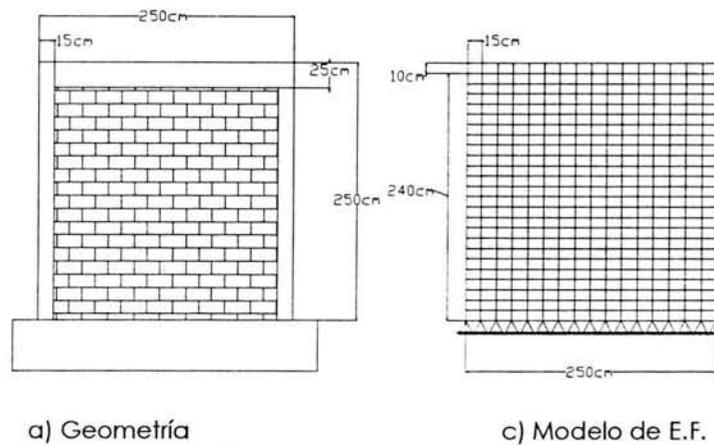


Fig. 5 Modelo Mo, Aguilar et al., (1996)

A partir de los resultados obtenidos se llegó a recomendaciones importantes para el diseño de la mampostería confinada cuando presenta aberturas.

Otros autores prefieren hacer uso de programas diseñados por ellos mismos. Tal es el caso de Sánchez et al., (2003), quienes desarrollaron un programa de cómputo para el cálculo de la respuesta no lineal de sistemas de un grado de libertad con modelos degradantes para mampostería. En él, hacen uso de tres modelos de comportamiento de la mampostería. Primero puramente elástico. El segundo con componente plástica, pudiendo ser elastoplástico perfecto, pero no degradante en esta etapa. Y un tercer modelo, que en su tercera rama reproduce condiciones de degradación de rigidez con base en estudios de Tomazevic y Lutman (1996). Estos modelos fueron desarrollados para mamposterías europeas y fueron adaptados a las mamposterías confinadas construidas con materiales pumíticos comúnmente empleadas en la zona metropolitana de Guadalajara.

2. MODELO PROPUESTO

Con la finalidad de proponer un modelo de E.F. para la mampostería de muros diafragma, apto de reproducir el comportamiento de la misma en análisis dinámicos y que fuera de fácil acceso para los despachos de ingeniería, se utilizó el programa general de análisis SAP2000 (CSI, 1997). Los resultados obtenidos se calibraron con el método de la diagonal equivalente y con resultados de ensayos experimentales realizados en el CENAPRED. Los valores del error relativo entre el modelo analítico y el experimental de las respuestas fueron satisfactorios.

Bajo la premisa de que al someterse a desplazamientos relativamente pequeños, la mampostería confinada por columnas y vigas se separa de los elementos estructurales en las esquinas (Fig. 6), se construyó un modelo de E.F. de los muros de mampostería. Este modelo cumple con relaciones de esbeltez de los elementos cascarón (base, altura y espesor) apropiadas para aplicar este concepto.

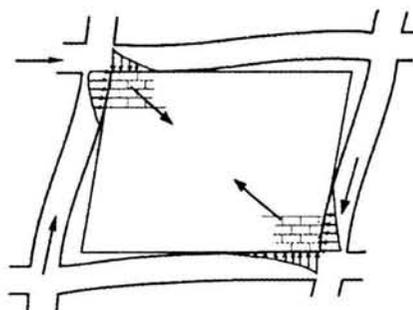
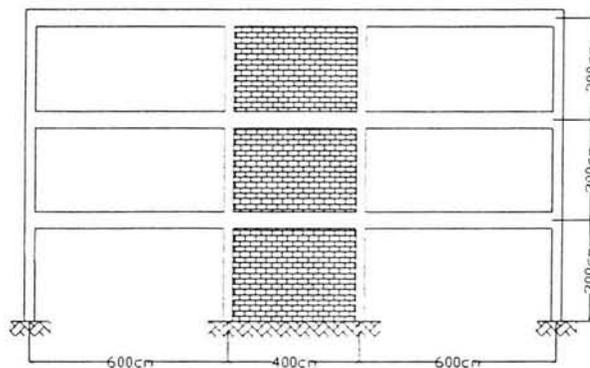


Fig. 6 Separación de la mampostería y los elementos confinantes debido a carga lateral; compresión en la diagonal de contacto.

Las propiedades de los materiales se mantuvieron constantes y congruentes con el modelo base (Bazán y Meli, 2002), así como la geometría global y general de cada uno de los elementos que lo conforman (Fig. 7).



Columnas de 30 x 30 cm y vigas de 25 x 50 cm de concreto con $E_c=141000 \text{ kg/cm}^2$, muros de tabique de barro recocido de 15 cm de espesor con $G_m=2400 \text{ kg/cm}^2$.

Fig. 7 Geometría del modelo analizado por Bazán y Meli (2002)

En el modelo de E.F., los muros se separaron de las columnas y vigas y se colocaron elementos conectores en sus esquinas que sólo se activan cuando la diagonal es sometida a compresión, como se ilustra en la Fig. 8.

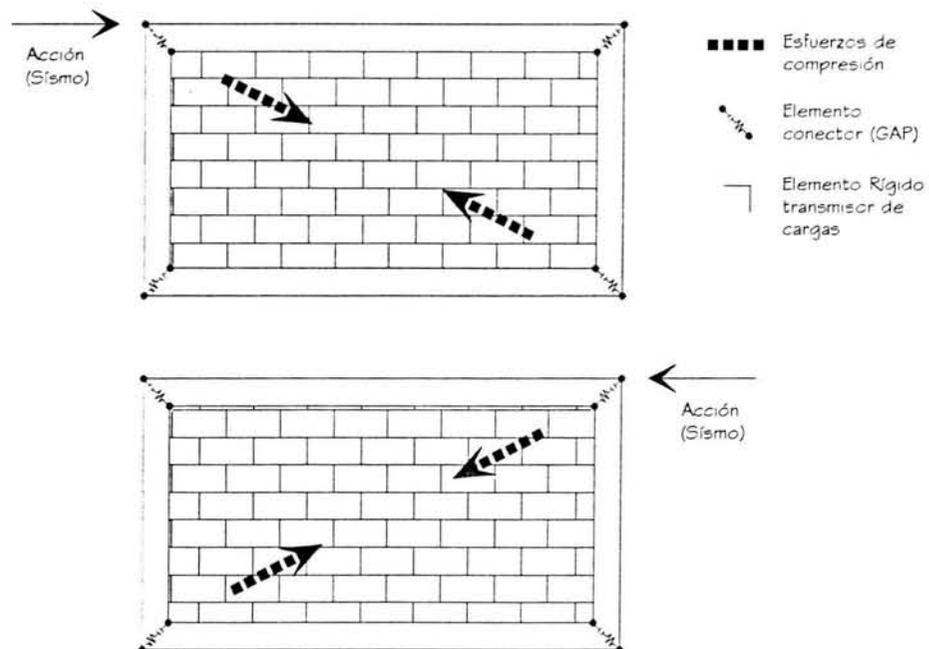


Fig. 8 Efecto del puntal de compresión en un muro de mampostería confinada de acuerdo con la acción de la fuerza lateral.

La separación entre los elementos confinantes y el muro, se debe a la separación real que se presenta entre estos debido a tensiones ocasionadas por deformaciones laterales, aun de bajo nivel. Con el fin de transmitir uniformemente la carga desde el marco al muro, la separación se hace de igual dimensión tanto en el sentido horizontal, como vertical, formándose un ángulo de 45° entre la viga o la columna, con el conector que transmite las cargas a la mampostería (Fig. 9).

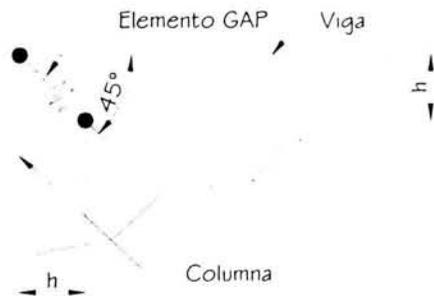
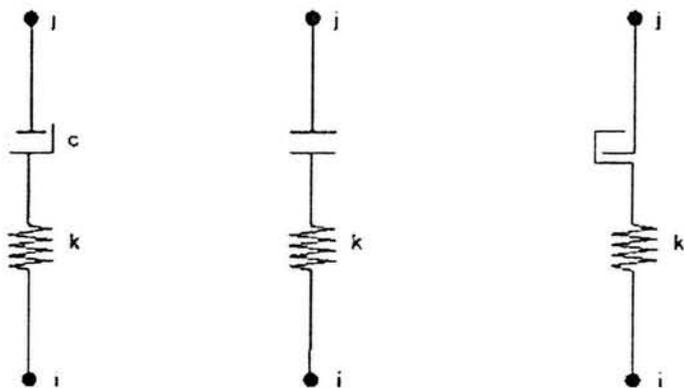


Fig. 9 Detalle de una de las esquinas del Modelo propuesto.

Para transmitir las cargas del marco a los muros de mampostería se utilizaron los elementos "NLLink" del SAP2000, los cuales pueden tener propiedades lineales o no lineales (Fig. 10).



a. Elemento "Damper"

b. Elemento "Gap"

c. Elemento "Hook"

Fig. 10 Elementos "NLLink" del SAP2000 (CSI)

En este caso también se utilizaron elementos "Gap", los cuales se activan únicamente cuando están sometidos a fuerzas de compresión. Así se simula el comportamiento de las esquinas que se encuentran a compresión de la mampostería. Cuando se aplican desplazamientos que someten el elemento a tensión, éste se libera, simulando que las esquinas

del muro que se separan de los elementos confinantes se encuentran a tensión.

Con el objetivo de establecer un límite inferior del valor de la rigidez de estos elementos conectores, y así evitar la asignación de valores arbitrarios que podrían afectar la transferencia de las cargas al muro, se propuso que su rigidez se calculara como:

$$K_N = \left(\frac{Ac + Av}{2} \right) \frac{Ec}{l} \quad (1)$$

donde Ac es el área de la sección transversal de la columna o castillo, Av es el área de la sección transversal de la viga o dala, Ec es el módulo de elasticidad del concreto de estos elementos y l tiene unidades de longitud iguales a las empleadas en las demás variables de la ecuación (1).

Al elemento "Gap", se le deben asignar valores de masa, peso e inercias rotacionales. En este caso la masa y peso son igual a cero y los valores de las inercias rotacionales son iguales a las de las vigas.

Para asignar las propiedades lineales inherentes a las direcciones locales se asignan valores de rigidez y amortiguamiento efectivos. En el caso de ser usados con propiedades no lineales para análisis paso a paso, se deben proporcionar valores a la rama inelástica.

A partir de ensayos realizados en la mampostería confinada se ha encontrado que el comportamiento de la misma es básicamente elástico

hasta que se genere su primer agrietamiento diagonal. Antes de éste, ningún otro tipo de agrietamiento afecta el comportamiento elástico lineal. Las Normas Técnicas Complementarias (NTCDM-95, 1995) en el inciso 3.1.6.f. , dice: " A menos que ensayos en pilas permitan obtener una mejor determinación de la curva esfuerzo-deformación de la mampostería, ésta se supondrá lineal hasta la falla" y en el inciso 3.2.1 dice: "La determinación de las fuerzas y momentos internos en los muros se hará, en general, por medio de un análisis elástico de primer orden". Es así que para estructuras en las que interviene la mampostería, el análisis y diseño se realiza básicamente elástico.

Los modelos del presente trabajo se realizaron haciendo uso de las recomendaciones propuestas en la normatividad existente. Las disposiciones del RCDF permiten el uso de una rigidez secante en el punto de falla de la gráfica esfuerzo deformación unitaria. Lo anterior implica, de manera indirecta, una degradación de la rigidez de la mampostería por ingresar en el intervalo de comportamiento inelástico.

Por otro lado, la longitud de los conectores en ángulo de las esquinas se definió analizando el comportamiento de modelos tomando como base el propuesto por Bazán y Meli (2002) de la diagonal equivalente. Así, el modelo de E.F. se calibró para que reprodujera de manera adecuada los resultados obtenidos por Bazán y Meli (2002) buscándose que proporcionara información apropiada sobre la distribución de esfuerzos en los muros.

Para tener en cuenta que dos de las esquinas de la mampostería quedan en contacto con los elementos confinantes cuando se encuentran sometidos a esfuerzos de compresión, en las esquinas se colocaron unos elementos rígidos. Las propiedades mecánicas y de sección transversal de éstos son iguales a las de las vigas, pero con una longitud definida por la calibración realizada al modelo y que se encuentra relacionada con la longitud de los lados de los elementos cascarón que conforman el muro de mampostería.

Para lograr lo anterior, se construyeron modelos de muros con diferentes relaciones de forma *base/altura*. Para representar el muro se determinó que con E.F. de dimensión no mayor a 50x50 cm los resultados eran satisfactorios (Arroyo et al., 2002).

Se modelaron diferentes longitudes de los conectores, relacionándolos con la longitud del lado de los elementos finitos definidos. Así, se estudiaron conectores con longitud igual a $2/3$ de esta dimensión, $1/2$ de la misma, e incluso se modeló usando conectores que abarcaran un ancho igual al sugerido por las ecuaciones de la diagonal equivalente.

En la Fig. 11 se presentan los errores relativos en los valores de los desplazamientos del tercer piso con respecto al modelo de Bazán y Meli, obtenidos para diferentes tamaños de los elementos conectores de esquina y relaciones de forma para las mallas de E.F. propuestas en este estudio. Como se puede observar, los elementos que poseen una longitud no mayor de $2/3$ el tamaño del lado de los elementos cascarón utilizados para modelar el muro, presentan los menores valores del error relativo para relaciones de forma del muro b/h entre 1.25 y 1.5. Estos elementos tienen

las mismas propiedades geométricas y de material que las vigas que confinan al muro.

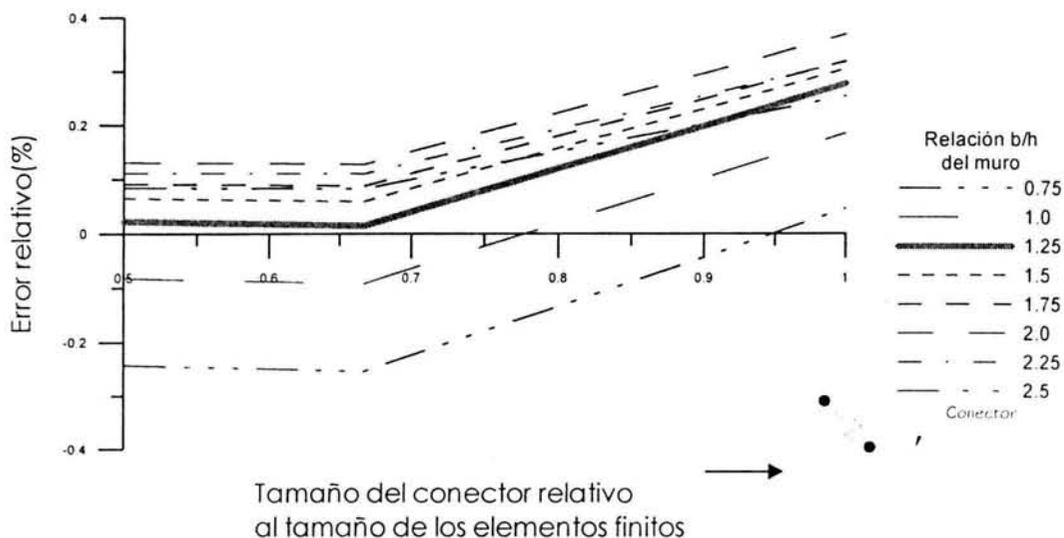


Fig. 11 Errores relativos en desplazamientos del tercer piso con respecto al modelo de Bazán y Meli, obtenidos para diferentes relaciones de forma, b/h , de mallas de E.F. y tamaños de los conectores de esquina.

Así, a partir de los resultados obtenidos, se determinó que una dimensión igual a $2/3$ la longitud del lado de los elementos finitos cascarón utilizados para modelar el muro, proporciona los resultados más adecuados.

Una vez definida la dimensión de los E.F. tipo cascarón, así como las dimensiones, materiales y propiedades geométricas de los elementos de los conectores, se construyó un modelo matemático del marco estudiado por Bazán y Meli (2002). En la Fig. 12 se presentan los esfuerzos ocasionados por el efecto del puntal a compresión que se genera en este modelo debido a carga lateral estática aplicada en su plano con diferente sentido. Se puede observar que el modelo es capaz de reproducir la

configuración de los esfuerzos de compresión en el muro para ambos casos de aplicación de la carga lateral.

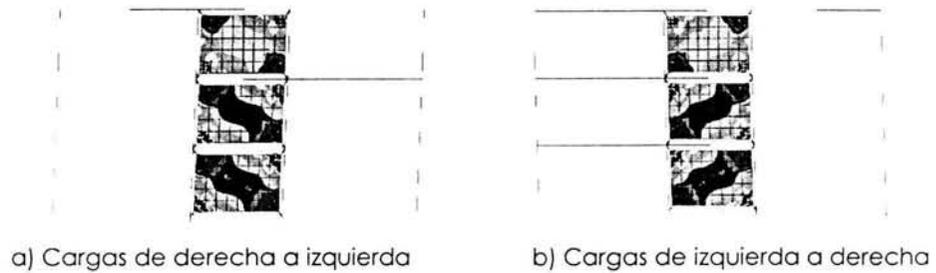


Fig. 12. Esfuerzos ocasionados por el efecto del puntal a compresión que se genera en el modelo estudiado por Bazán y Meli (2002) debido a carga lateral aplicada en diferente dirección.

El modelo propuesto permite realizar análisis en diferentes sentidos de aplicación de la carga sin tener que cambiar la configuración del modelo. El modelo de la diagonal equivalente, implica eliminar la diagonal y colocar otra en sentido contrario cuando se hace inversión del sentido de las cargas. Además de lo anterior, la diagonal equivalente está restringida a análisis de tipo estático. El presente trabajo permite la realización de análisis estáticos, pseudodinámicos y dinámicos.

3. CALIBRACIÓN DEL MODELO PROPUESTO

Para validar los resultados que se obtienen con el modelo propuesto en este trabajo, a continuación se presenta la comparación de los resultados obtenidos con el modelo analítico, con otros resultados teóricos y con resultados experimentales.

3.1. COMPARACIÓN CON LA DIAGONAL EQUIVALENTE

El modelo estudiado es un marco plano de tres crujiás y tres pisos (Fig 7). Las crujiás externas miden 6 m de longitud y la interior 4 m. Esta crujiá es la que contiene a los muros de mampostería. Cada entrepiso tiene una altura de de 3 m. En la Fig. 7 también se muestra el muro estudiado así como las dimensiones de los elementos estructurales que lo forman.

A partir de los análisis del modelo con diagonal equivalente se obtuvieron los elementos mecánicos y desplazamientos que se muestran en la Fig 13.

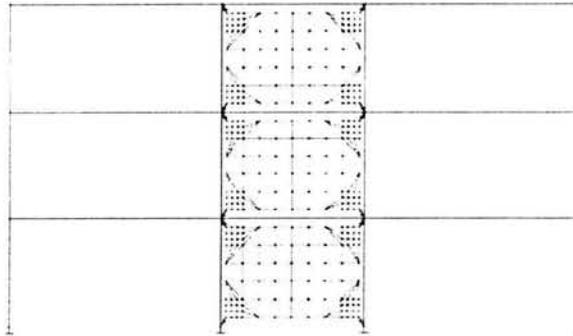


Fig. 14 Representación del marco de Bazán y Meli (2002), por medio del modelo propuesto en este trabajo con elementos "NLink" y cascarón del programa SAP2000.

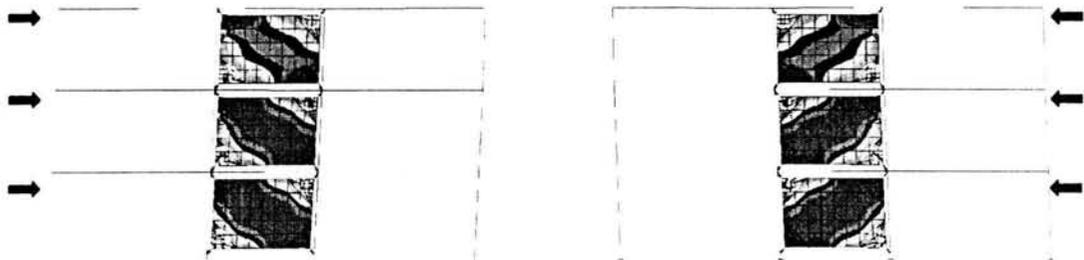


Fig. 15 Distribución de esfuerzos en los paneles del modelo de Bazán y Meli calculados con el propuesto en el presente trabajo.

En la Fig. 15 se muestra la distribución de esfuerzos a compresión en los paneles obtenidos con el modelo propuesto en el presente trabajo para la mampostería. Las fuerzas laterales aplicadas al marco generan un puntal de compresión en los muros de mampostería.

Como se puede observar, el modelo de E.F. propuesto reproduce el efecto de puntal a compresión que pretende representar el método de la diagonal equivalente. Ante la aplicación de cargas laterales estáticas con diferente dirección se puede observar la formación del puntal a compresión generado (Fig 16). En este caso se comprueba el trabajo de

los E.F. que se activan y desactivan de acuerdo con la dirección de aplicación de las cargas.



a) Fuerza de izquierda a derecha

b) Fuerza de derecha a izquierda

Fig. 16 Variación del puntal a compresión dependiendo de la dirección de aplicación de las cargas.

De los análisis realizados con el método de la diagonal equivalente y con el modelo propuesto en este trabajo, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2 Comparación de elementos mecánicos y desplazamientos obtenidos con el modelo de la diagonal equivalente y el modelo propuesto en el presente trabajo (desplazamiento en cm, fuerzas en t y momentos en t-m).

	Bazán - Meli	Propuesto	Error Relativo %
Desplazamiento	1.50	1.49	-0.67%
Cortante A	1.67	1.65	-1.20%
Cortante B	1.99	1.95	-2.01%
Cortante C	2.06	1.94	-5.82%
Cortante D	1.70	1.61	-5.29%
Momento A	2.87	2.83	-1.39%
Momento B	3.18	3.16	-0.63%
Momento C	3.28	3.15	-3.96%
Momento D	2.92	2.76	-5.48%
Axial 1er piso	13.23	12.57	-4.99%

La fuerza axial obtenida en los elementos cascarón, se obtuvo como el promedio de las fuerzas principales en estos elementos, en la sección ortogonal a la dirección del puntal a compresión en la diagonal.

3.2. COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con el objetivo de calibrar los resultados obtenidos con el modelo propuesto en este trabajo, se analizó el muro confinado que se muestra en la Fig. 17 ensayado en laboratorio (Flores et al., 1999).

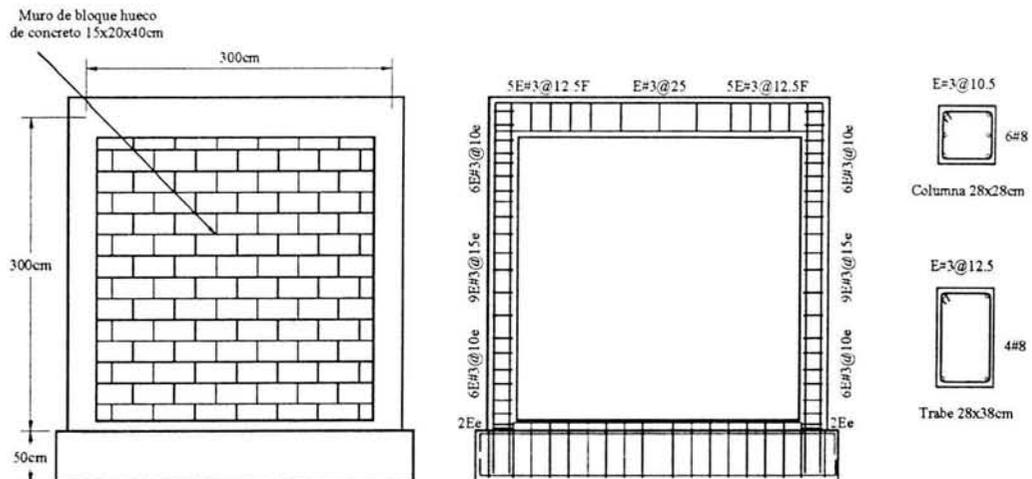


Fig. 17 Modelo experimental (Flores, et al., 1999)

Las propiedades de los materiales empleados se pueden observar en la Tabla 3.

Tabla 3 Propiedades de los materiales del muro ensayado (Flores, et al., 1999).

	E	f _c
	Kg/cm ²	Kg/cm ²
Mampostería	28000	7.5
Concreto	115220	235
Acero	2x10 ⁶	4400

El ensaye se realizó aplicando ciclos de carga lateral, además de dos cargas puntuales en las uniones viga-columna, de 37 t. Los ciclos histeréticos se muestran en la Fig. 18.

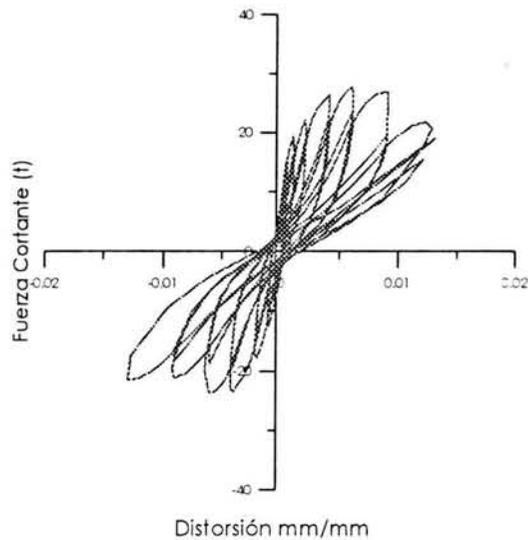


Fig. 18 Ciclos de histéresis del modelo experimental. (Flores et al., 1999)

Este muro se modeló tanto con el método de la diagonal equivalente, como con el método propuesto en este trabajo. Los resultados obtenidos para ambos métodos se presentan en las Figs. 19 y 20, respectivamente y en la tabla 4.

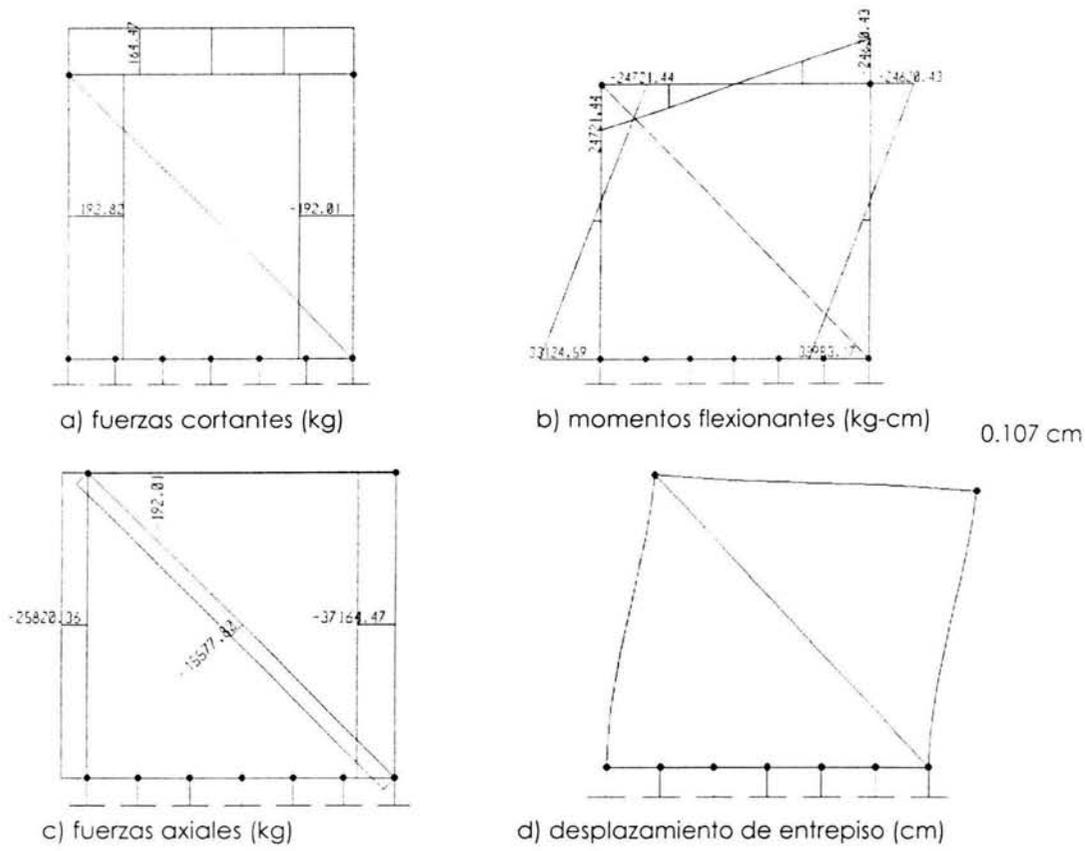


Fig. 19 Resultados obtenidos con el método de la diagonal equivalente.

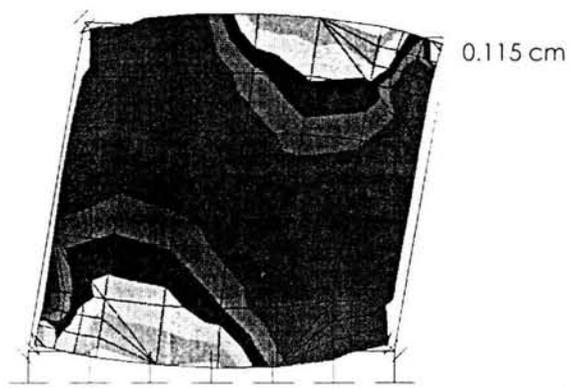


Fig. 20 Diagrama de esfuerzos principales a compresión obtenidos con el modelo propuesto en este trabajo.

De los resultados experimentales se pudo observar que para una carga de 11.4 t (112 kN) y una distorsión unitaria de 0.0003 se presentó el primer agrietamiento inclinado próximo al centro del muro siguiendo las juntas de los bloques en forma escalonada (Flores et al., 1999).

Para comportamiento elástico, el valor de la componente diagonal en la mampostería, debido a la fuerza lateral, se puede calcular como

$$F_{diag} = \frac{11.4}{\cos 45^\circ} = 16.122t \quad (2)$$

En la ecuación 2, se emplea el valor de la carga lateral hasta el instante en que ocasionó el primer agrietamiento diagonal. A partir de este valor, el comportamiento de la mampostería es no lineal.

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos experimentalmente, los calculados con el método de la diagonal equivalente y los que se obtienen con el método propuesto en el presente trabajo. Se puede observar que tanto los valores de las distorsiones de entrepiso, como los de los elementos mecánicos son muy parecidos entre sí, Sin embargo, en este caso tanto el modelo propuesto como el de la diagonal equivalente tienden a presentar un comportamiento más flexible que el experimental.

Tabla 4 Comparación de elementos mecánicos y desplazamientos obtenidos con el resultado experimental, modelo de la diagonal equivalente y el modelo propuesto.

	Experimental	Diagonal equivalente	Error relativo %	Propuesto	Error relativo %
Desplazamiento	0.0910	0.1070	18%	0.115	26%
Distorsión	0.0003	0.0004	33%	0.0004	33%
Fuerza en la diagonal	16122	15577	-3%	14201	-12%

Desplazamientos en cm, distorsión en cm/cm y fuerzas en kg.

En la Fig. 21 se muestra la distribución de esfuerzos en la diagonal ortogonal a la diagonal en compresión. Es apreciable la tendencia a seguir una distribución de tipo normal o log-normal, de lo que se puede concluir que al ser omitidos los elementos cascaron de lo extremos, se puede tener entre un 80% y 90% de confiabilidad, ya que el error relativo entre la fuerza medida en la diagonal y la calculada, es del orden del 12%, caso en el cual no se tuvieron en cuenta los elementos cascarón afectados por los conectores rígidos. Las curvas se obtienen de realizar el promedio de fuerzas principales en los nodos de los cascarones o al centro del cascarón.

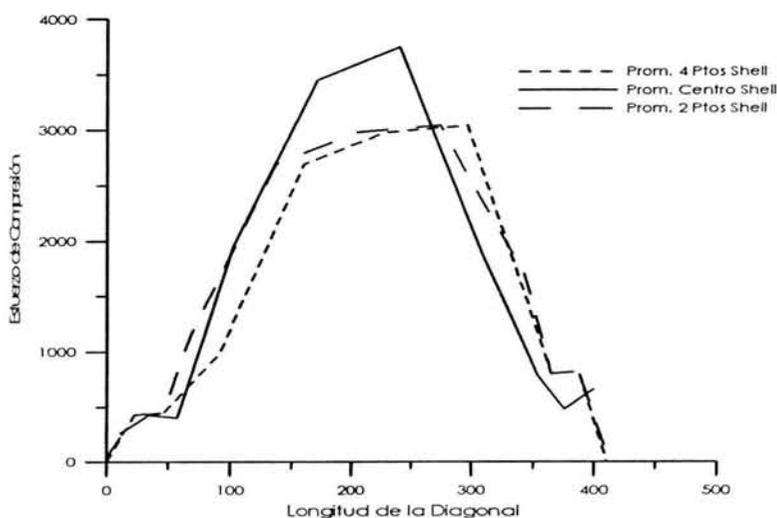


Fig. 21 Distribución de esfuerzos en la diagonal, dependiendo de la localización de las resultantes de las componentes principales de los esfuerzos.

En la Fig. 22 se presenta la distribución de esfuerzos sobre la sección ortogonal a la dirección de la diagonal a compresión obtenida con el método propuesto. Se puede apreciar que la mayor concentración de esfuerzos está hacia el centro del muro y se van disminuyendo hacia las esquinas.

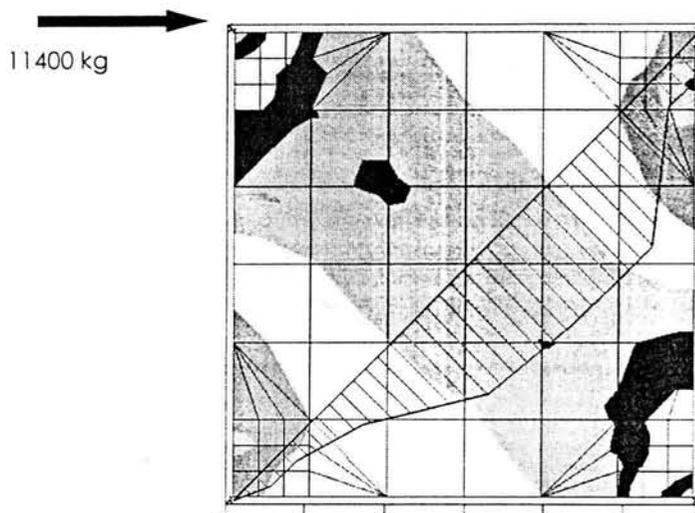


Fig. 22. Distribución de esfuerzos principales en la sección.

3.3. APLICACIÓN EN CASAS SOMETIDAS A EXPLOSIONES

Con el objeto de calibrar la aplicación del modelo propuesto a una estructura real sometida a cargas dinámicas, se construyeron modelos de E.F., para estudiar el comportamiento de una casa de mampostería confinada, que fue sometida a explosiones subterráneas, la cual se encontraba instrumentada (Murià Vila et al., 2003).

El objetivo primordial del estudio realizado era encontrar la causa por la cuál se estaban averiando las casas de la zona de Macuspana, Tabasco. La casa fue sometida al efecto de detonaciones a diferentes distancias que iban desde 60 hasta 240 m, con profundidades de 20 y 30 m.

En este capítulo se estudian los efectos de las correspondientes a estos dos límites.



Vista lateral derecha de la casa estudiada.

Fotografía 1 Casa sometida a explosiones subterráneas.

3.3.1. DESCRIPCIÓN DE LA CASA

Su estructuración consiste de muros de carga de mampostería de bloque de concreto hueco, apoyados sobre una dala de concreto reforzado de 20x50 cm que funciona como zapata de cimentación. Está techada con losa de concreto reforzado de 10 cm de espesor (Foto. 1, Fig. 24).

Esta casa tiene una terraza a la entrada rodeada de un pretil, cuyo techo, también de losa, está soportado por tres castillos de concreto reforzado. Aparentemente, todos los muros están confinados con dalas y castillos de

concreto reforzado. La casa está localizada en una zona rural del Estado de Tabasco y aparentemente fue construida sin control de calidad adecuada.

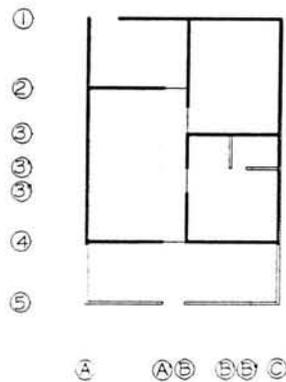


Fig. 23 Planta de la casa sometida a explosiones subterráneas.

3.3.2. MATERIALES ESTRUCTURALES

Los Reglamentos de Construcciones del Estado de Tabasco (RCT NTCDCEM, 1995) no establecen los valores específicos para las propiedades mecánicas de los materiales a utilizar en las construcciones de mampostería. Por esta razón fue necesario realizar pruebas de resistencia de materiales típicos del lugar.

Para el caso de los muros de mampostería, en la Tabla 5 se describen los valores obtenidos de las pruebas de laboratorio que se utilizan en los modelos de computadora Murià Vila et al., 2003.

Tabla 5 Valores permisibles de las mamposterías estudiadas suponiendo morteros con las menores resistencias recomendadas por el NTCDCEM (1995)

Piezas	fp* Kg/cm ²	CV %	fm* Kg/cm ²	Vm* Kg/cm ²	Em cd Kg/cm ²	Ems Kg/cm ²	Gmcd Kg/cm ²	Gms Kg/cm ²
BB	18	17	7	2	5341	2337	2136	935
BM	11	17	4	2	3158	1382	1263	553

BB- Bloque bueno

BM- Bloque malo

CV- Coeficiente de variación de fp

Em cd- Modulo de elasticidad para cargas de corta duración

fp*-Esfuerzo de compresión de diseño

Em s- Modulo de elasticidad para cargas sostenidas

fm*- Resistencia de diseño a compresión de la mampostería

Gm cd- Modulo de cortante usando Em cd

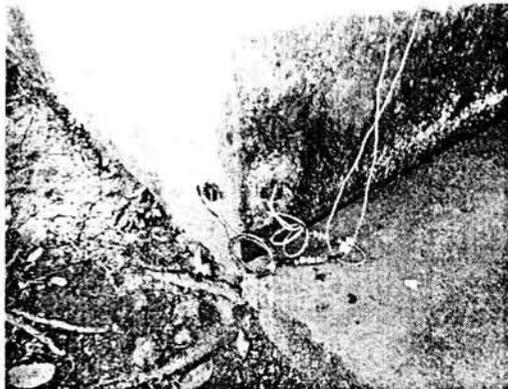
Vm*- Resistencia de diseño a compresión diagonal

Gm s- Módulo de cortante usando Em s

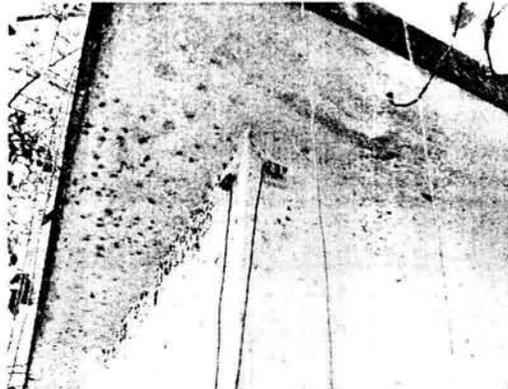
3.3.3. INSTRUMENTACIÓN

La casa fue instrumentada con siete servo-acelerómetros uniaxiales de la marca Donner y con un sismógrafo tridimensional de la marca CMG que se distribuyeron en puntos estratégicos para capturar las aceleraciones de sus muros al someterse a explosiones subterráneas a diferentes distancias de la misma.

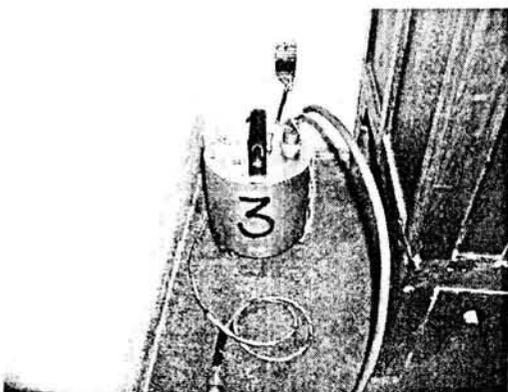
Además, a 3 m de distancia de cada vivienda y sobre la línea de ubicación de los explosivos, se instaló en la superficie del terreno un arreglo de tres servo-acelerómetros uniaxiales Donner y un sismógrafo tridimensional CMG (Foto 2). Lo anterior con el fin de registrar los movimientos en dos componentes horizontales, transversal (T) y longitudinal (L), y uno vertical (V), y así poder comparar con los movimientos que se registren en la estructura y estimar los efectos de interacción suelo-estructura.



a). Servo-acelerómetros, muro inferior.



b). Servo-acelerómetros, muro superior



c) Sism. tridimensional CMG, interior de la vivienda



d) Sism. tridimensional CMG, a 3 m de la vivienda

Fotografía 2 Disposición de los instrumentos en el interior y exterior de la vivienda sometida a explosiones subterráneas.

3.3.4. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

En el modelo de E.F. se incluyeron elementos viga, elementos barra y elementos cascarón, siendo todas las dalas, castillos, contratrabes, soporte de techo y conectores de esquina elementos viga, los paneles de mampostería y el techo como elementos cascarón y los transmisores de carga de los marcos a la mampostería fueron elementos "NLLink" (Fig. 24).

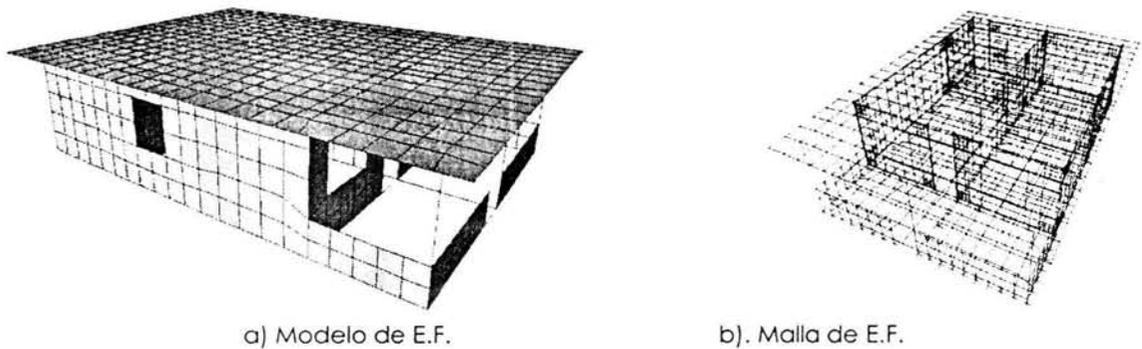


Fig. 24 Modelo en 3D de E.F. y malla de E.F..

Una vez ensamblado el modelo, se sometió a los registros de las excitaciones dinámicas, los mismos que fueron medidos en la casa real.

3.3.5. CÁLCULO DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL

Para calcular la respuesta estructural, en el modelo matemático se tomaron en cuenta todos los elementos estructurales que participan tanto en rigidez como en masa, incluyendo los muros de mampostería de altura total y parcial. Se realizó un análisis modal espectral para calibrar el modelo de E.F. con los modos y frecuencias medidas experimentalmente de pruebas de vibración ambiental.

En la Fig. 25 se muestra la deformada de la planta producida por el modo fundamental de vibración de la casa, en el que se puede apreciar un gran aporte de la masa del techo, el cuál induce desplazamientos claramente definidos en el sentido de menor rigidez de la estructura.

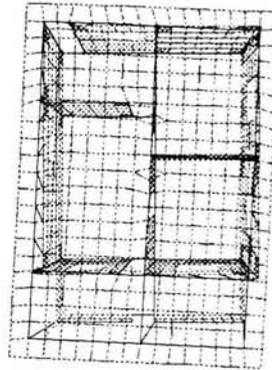


Fig. 25 Representación esquemática del modo fundamental de vibración, $T=0.061$ s (frecuencia=16.26 Hz), participación de la masa en 40%, de la planta de la casa estudiada.

En la Tabla 6 se muestran las frecuencias fundamentales de vibración calculadas de la casa, y los factores de participación de masa tanto en sentido longitudinal, como transversal. Se puede notar que es bastante rígida, algo característico de estas estructuras. Además de poseer participación de la masa en muchos modos, lo que indica que hay aporte significativo de modos locales, tales como parapetos y muros aislados.

Tabla 6. Frecuencias de vibración en Hz y factores de participación modal de masa calculados para la casa.

MODO	FRECUENCIA	L	T	MODO	FRECUENCIA	L	T
1L	10.07	1.25	0.01	21T	28.58	0	2.14
2L	10.81	38.89	0.46	22	29.58	0.01	0.01
3L	12.11	3.89	0	23	30.77	0	0
4	13.16	0.01	0.02	24	31.64	0	0.05
5T,L	15.17	6.2	56.02	25	31.82	0	0
6T	15.76	0	3.76	26T	33.08	0	2.43
7L,T	16.34	21.23	9.07	27	34.54	0.02	0.02
8L	16.88	2.03	0.19	28	35.17	0	0.01
9	18.98	0.18	0.26	29	35.92	0.18	0.12
10	19.6	0.06	0.14	30T	36.63	0	1.95
11L	19.99	2.12	0.02	31	36.82	0	0.01
12	21.12	0.02	0.02	32T,L	37.07	0.53	1.16
13L	23.54	2.27	0	33L	37.17	1.53	0.4
14	23.92	0.12	0.03	34L	37.45	2.04	0
15	24.02	0.11	0.01	35	37.71	0.11	0
16	24.41	0.01	0	36	38.33	0	0.01
17	25.7	0	0	37	40.61	0.03	0.01
18T	26.53	0	2.59	38	41.14	0	0
19	26.61	0.01	0.56	39	41.93	0.01	0.01
20T	26.8	0	2.68	40	43.91	0.01	0.03

En la Tabla 7 se muestran las frecuencias de vibración de la casa en sentido transversal y longitudinal, tanto medidas en pruebas de vibración ambiental como calculados. Se puede observar que para el sentido longitudinal y transversal las frecuencias de vibración de la casa se obtuvieron de una manera bastante aproximada.

Tabla 7 Frecuencia fundamental de vibración de la casa, medida y calculada.

Frecuencia medida (Hz)	Frecuencia calculada con base rígida (Hz)
13.38 (T), 11.91 (L)	15.15 (T), 10.06 (L)

Con el objetivo de revisar la capacidad sísmica de la casa, se realizó un análisis modal espectral de la misma. En la Fig. 27, se presentan las trayectorias de los esfuerzos a compresión en los muros, ocasionados por la

aplicación del espectro de diseño de Macuspana, Tabasco. El espectro se aplicó en porcentajes de 100-30 y 30-100 en la dirección longitudinal y transversal, tal como lo indican las normas. Lo anterior con el fin de encontrar los esfuerzos que se ocasionaron a la mampostería debido a las explosiones subterráneas y saber si se excedía su capacidad resistente. Se puede observar la inversión de sentido en la distribución de los esfuerzos debido al cambio en la dirección de aplicación de las cargas.

Al revisar el valor promedio de los esfuerzos calculados en la mampostería, se encuentra que está sometida, en su condición más crítica, a una quinta parte de su resistencia nominal.

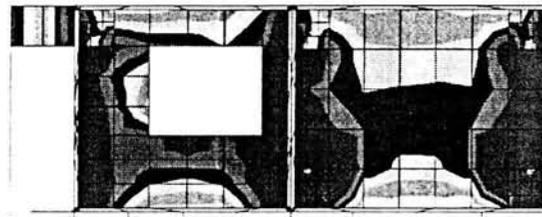


Fig. 26 Esfuerzos en la mampostería debidos a la aplicación de un espectro de diseño.

Las distorsiones de entrepiso muestran que esta estructura dispone de suficiente rigidez lateral ante la acción de las fuerzas sísmicas calculadas con el espectro utilizado. Los valores de estas distorsiones son inferiores a 0.003 por ciento, valor para el cual se inicia daño en construcciones de mampostería.

Al realizar los análisis dinámicos de la casa sometida a las explosiones se encontró que, cualitativa y cuantitativamente los resultados de las distorsiones calculadas y las medidas eran semejantes entre sí. Los valores

medidos fueron de $8.17E-03$ y los calculados fueron de $5.6E-03$ para explosiones a 60m de distancia. Para 240 m de distancia fueron de $3.34E-03$ y $4.98E-03$ para los medidos y calculados.

Como se puede apreciar, los efectos dinámicos de las explosiones en los muros de la casa son incipientes frente a la magnitud de los esfuerzos inducidos por los desplazamientos ocasionados por cargas sísmicas o por los efectos de los hundimientos del suelo.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Actualmente existen varios modelos analíticos para tratar de reproducir el comportamiento de la mampostería. Sin embargo, aún es necesario mejorarlos y tratar de dejar de lado la complejidad matemática para ir en busca de métodos sencillos, útiles y en especial seguros. Con ellos será posible realizar diseños confiables respecto a la respuesta que tendrán las estructuras ante sollicitaciones sísmicas.

Por otro lado, también se han realizado gran cantidad de ensayos de laboratorio de la mampostería en sus múltiples versiones, y en la mayoría de ellos se ha llegado a resultados difícilmente predecibles. Esto ha hecho que al realizar el análisis de una estructura de mampostería se modele con propiedades elásticas, tanto por las complicaciones que conlleva un análisis no lineal, como por las incertidumbres que se tienen en el comportamiento de la misma.

Los métodos de análisis como el de la rigidez, que se ha usado desde hace mucho tiempo, y con mayor auge desde la aparición de las computadoras, proporcionan herramientas para encontrar soluciones rápidas a nuestras sollicitaciones. Por otro lado, el uso de las computadoras lleva a poder utilizar métodos de análisis en ocasiones complejos en los que se requiere gran cantidad cálculo numérico. Estos métodos han entrado a

jugar un papel muy importante en el análisis estructural, tal es el caso del Método de los Elementos Finitos.

En el presente trabajo se presentó un método alternativo y relativamente simple para emplear en el programa SAP2000, para analizar estructuras de mampostería. El método propuesto es accesible a los despachos de ingeniería y permite, además de los tradicionales análisis estáticos, aplicar análisis dinámico modal a las estructuras.

El uso del método propuesto en este trabajo para análisis estáticos proporciona resultados semejantes a los obtenidos con el método de la diagonal equivalente. Similar situación se observa al comparar con resultados de ensayos experimentales.

En el programa SAP2000 las características que poseen los elementos "GAP", hacen que el método propuesto proporcione buenos resultados para análisis dinámicos. A su vez, el aprovechamiento de las ventajas de los E.F. facilita la observación del comportamiento de los esfuerzos en los muros de mampostería. Lo anterior facilita la toma de decisiones respecto a la cantidad y distribución del acero de refuerzo en los muros.

Aunque los programas generales de análisis, como el SAP2000 posean herramientas avanzadas, solo para casos muy específicos se pueden hacer análisis no lineales. En el programa mencionado, únicamente tienen propiedades de no linealidad los "NLLink" al realizar análisis paso a paso, de otra manera solo se logran comportamientos lineales de los mismos.

En los análisis dinámicos que se realicen con el modelo propuesto, se debe tener especial atención en los elementos no estructurales, ya que generalmente afectan en modos locales.

Se debe proporcionar continuidad a los elementos finitos, ya que la base de su teoría es la correcta comunicación entre los nodos de los elementos.

Las recomendaciones para el análisis y diseño que la actual normatividad establece para estructuras de mampostería, van respaldadas por otras que se deben tener en cuenta para su construcción, ya que al modelar una estructura se supone que las labores constructivas se van a realizar como se contempló en el diseño, cualquier modificación, puede hacer que el comportamiento de la estructura se aleje del intervalo en que se tenía pensado, ésta iba a reaccionar.

Por último, independientemente de la utilidad que presten los métodos analíticos propuestos con anterioridad a este trabajo y el que aquí se incluye, no se debe perder de vista la necesidad de tener un criterio amplio y ético de los resultados que ellos nos proporcionan, y basar los diseños propuestos en los conocimientos adquiridos, la experiencia y el buen juicio.

5. REFERENCIAS

Aguilar, G., Meli, R., Díaz, R. y Vázquez del Mercado, R. (1996), "Influence of horizontal reinforcement on the behaviour of confined masonry walls". 11 WCEE, Acapulco, México, Paper No. 1380.

Alcocer S., Murià Vila D., y Peña I., (1999). "Comportamiento dinámico de muros de mampostería confinada" , Instituto de Ingeniería, 616, UNAM. México.

Álvarez J.J., Alcocer S.M. y Contreras J., (2001). "Comportamiento analítico no lineal de muros de mampostería con aberturas sujetos a fuerzas laterales", 2º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, Madrid, España.

Araujo C., (2000), "Modelo para el análisis no lineal de marcos de concreto reforzado con muros de relleno de mampostería", Tesis de Maestría. DEPMI, UNAM.

Arroyo R. Magallanes Z. y Jaimes C. (2002), "Comportamiento estructural de edificios con distribución asimétrica de muros mampostería confinados por marcos de concreto, ubicados en la ciudad de Chilpancingo, Gro", XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puebla, Pue, México.

Bazán E. y Meli R., (2002), "Diseño sísmico de edificios", Limusa, México.

Benedetti D., (1985), "Esperienze a Taglio su Pannelli in Tufo", Ingegneria Sismica, N.3.

Bernardini A., Modena C., y Vescovi U. (1978), "Ricerca sperimentale sui parametri di resistenza e deformabilità di murature in laterizio armato e alveolato", Construire, N.109

Cervenka V. y Pukl R., (1995), "SBETA. Computer program for nonlinear finite element analysis of reinforced concrete structures. Program documentation, release 4.95", Praga.

CSI, (1997), "SAP2000, Analysis Reference", Vols I y II, Computers and Structures Inc., Berkeley California, EUA.

Esteva, L., (1966), "Behavior under alternating loads of masonry diaphragms framed by reinforced concrete members". International Symposium on the Effects of Repeated Loading of Materials and Structural Elements, R.I.L.E.M., México D.F., México.

Flores L., 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 preparado para AC-TELMEX", CENAPRED, México D.F.

Flores L. y Alcocer S., (1996), "Calculated response of confined masonry structures", Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1830.

Gambarotta L. y Lagomarsino S., (1997a), "Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls. Part II: the continuum model and its applications", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, 441-462.

Gambarotta L. y Lagomarsino S. (1997b), "Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls. Part I: the mortar joint model and its applications", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, 423-439.

Hernández O. y Meli R., (1976), "Modalidades de refuerzo para mejorar el comportamiento sísmico de muros de mampostería", Instituto de Ingeniería, 382, UNAM. México.

Hiroto K., Tetsuro G. y Masanori L., (1992), "Cyclic Loading Tests Of Confined Masonry Wall Elements For Structural Design Development Of Apartment Houses In The Third World", Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España.

Meli R., (1975), "Comportamiento sísmico de muros de mampostería", Instituto de Ingeniería, 352, UNAM, México.

Murià Vila D., Escobar S, J.A., Ovando E., y Lermo J., (2003), "Obtención de curvas límites de vibración superficial en la región sur, segunda etapa.- Elaborado para PEMEX Exploración y Producción Activo de Exploración Reforma-Comalcalco, Región Sur". Instituto de Ingeniería, México D.F.

NTCDM-95, (1995), Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Mampostería, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.

NTCDM-04, (2004), Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Mampostería, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.

NTCDS-95, (1995), Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.

NTCDS-04, (2004), Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.

Orduña A. (1999), "Modelo de muros de mampostería para el análisis no lineal de marcos de concreto reforzado con muros diafragma", Tesis de Maestría. DEPMI, UNAM.

RCDF-95, (1995), "Reglamento de Construcciones del Distrito Federal", Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.

RCDF-04, (2004), "Reglamento de Construcciones del Distrito Federal", Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.

RCT-95, (1995), "Reglamento de Construcciones del Municipio de Jalapa Estado de Tabasco", Periódico Oficial, 25 de febrero de 1995, Villahermosa, Tabasco.

Sánchez A., Leyva A. y Urzúa A., (2003), "Software para el cálculo de respuestas no lineales de sistemas de un grado de libertad con modelos degradantes para mampostería", XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Gto.

Tomazevic M. y Lutman M., (1996), "Seismic Behavior of Masonry Walls: Modeling of Hysteretic Rules", ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 1040.

Zhang L., Brincker R., y Andersen P.; "Modal Indicators for Operacional Modal Identification".

<http://www.cse.polyu.edu.hk/~dynamics/Comparison/2001.4.pdf>

6. BIBLIOGRAFÍA

Bazán E. (1980), "Muros de mampostería ante cargas laterales-estudios analíticos", Tesis de doctor, UNAM.

Manfredi G., Mazzolani S. y Masi A., (1992), "Review of existing in experimental testing of masonry structures subjected to horizontal loads. Earthquake Engineering", Tenth World Conference.

Tena A., (1992), "Seismic evaluation of unreinforced masonry structures with flexible diaphragms", Earthquake Spectra, Vol. 8, No. 2.