

## **RESUMEN**

Uno de los problemas más serios que enfrenta el país es el déficit en vivienda. Para abatirlo será necesario emplear técnicas tradicionales de construcción, así como procedimientos y materiales semi-industrializados e industrializados. Uno de los atributos que deben tener las viviendas es la seguridad estructural, en particular, ante efectos sísmicos. En este trabajo se recopilan cuatro artículos de investigaciones recientes sobre seguridad sísmica de la vivienda económica. Se presenta una descripción y discusión de la práctica de diseño y construcción de mampostería en México. Se incluyen los resultados de la evaluación de las características estructurales de conjuntos habitacionales de interés social en México, los cuales serán usados para orientar futuros estudios. Finalmente, se describen las dos primeras fases experimentales desarrolladas en el CENAPRED, y se evalúan los resultados obtenidos y las repercusiones para la práctica de diseño y construcción de estructuras de mampostería.

## **ABSTRACT**

Deficit in housing buildings is one of the most serious problems faced by the country. To lower it, it will be necessary to use traditional construction techniques, as well as semi-industrialized and industrialized systems and materials. Structural safety, particularly against seismic effects, is one attribute which shall be met by housing buildings. In this volume, four research papers dealing with the seismic safety of low-cost housing are compiled. A description and discussion of current masonry design and construction in Mexico are presented. Results of a survey on the structural characteristics of low-cost housing developmens are presented; such assessment will be used as a feedback for future studies. Finally, the first two experimental phases carried out in CENAPRED are discussed; results obtained and their impact on masonry design and construction are evaluated.

## INTRODUCCION

La edificación de viviendas en México representa un alto porcentaje de la actividad de la industria de la construcción. Como ejemplo, según estadísticas recientes, más del 50% de la producción de acero de refuerzo se destina a la construcción de viviendas unifamiliares y multifamiliares. En ellas, la mampostería, tanto en sus modalidades confinada o reforzada, es el material más comúnmente empleado. Se prevé que lo seguirá siendo porque utiliza mano de obra intensamente, la cual es comparativamente barata en México, y porque satisface el gusto y preferencia de la población. Además de satisfacer mínimos de higiene y comodidad, las viviendas deben tener un adecuado nivel de seguridad estructural, en particular ante sismos.

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) desarrolla desde 1990 un programa sobre seguridad sísmica de la vivienda económica. Los objetivos del proyecto son:

1. Verificar experimentalmente la seguridad sísmica de estructuras de mampostería diseñadas y construidas según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal en vigor.
2. Evaluar el efecto de distintas alternativas de refuerzo en el comportamiento sísmico de muros de mampostería.
3. Proponer, si es necesario, modificaciones a las prácticas de diseño y construcción de estructuras de mampostería que conduzcan a construcciones más seguras y eficientes.
4. Adecuar la seguridad sísmica de las construcciones con el peligro sísmico de diferentes regiones.
5. Valorar el desempeño de nuevos sistemas constructivos.

La parte más relevante del programa es una investigación experimental que incluye el ensayo de sistemas estructurales a escala natural para determinar las características del comportamiento sísmico de las estructuras de mampostería confinada, que constituyen la solución más común en la actualidad, y para evaluar la eficiencia de algunas modificaciones a la práctica actual.

El programa incluye también estudios de propiedades mecánicas de los materiales de construcción y estudios analíticos sobre el comportamiento sísmico de la mampostería.

El programa cuenta con el apoyo del Instituto del Fondo Nacional para la Vivienda de los Trabajadores (INFONAVIT), que es el principal promotor de la vivienda de interés social en el país, y de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA).

Este Cuaderno de Investigación está integrado por los primeros estudios realizados en este proyecto. En el primer artículo se describe y discute la práctica de diseño y construcción de mampostería en México. En el segundo artículo se presenta un estudio sobre las características estructurales de conjuntos habitacionales de interés social en México. En el tercero y cuarto artículos, respectivamente, se describen las dos primeras fases experimentales de la investigación del CENAPRED, y se evalúan los resultados obtenidos y las repercusiones para la práctica de diseño y construcción de mampostería.

**I**

**MAMPOSTERIA ESTRUCTURAL**

**LA PRACTICA, LA INVESTIGACION Y**

**EL COMPORTAMIENTO SISMICO OBSERVADO EN MEXICO**

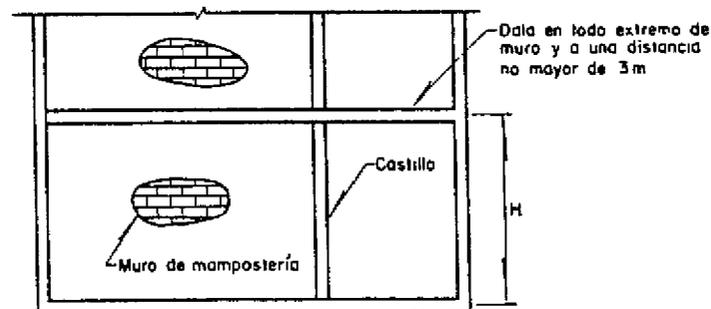
por

**Roberto Meli**

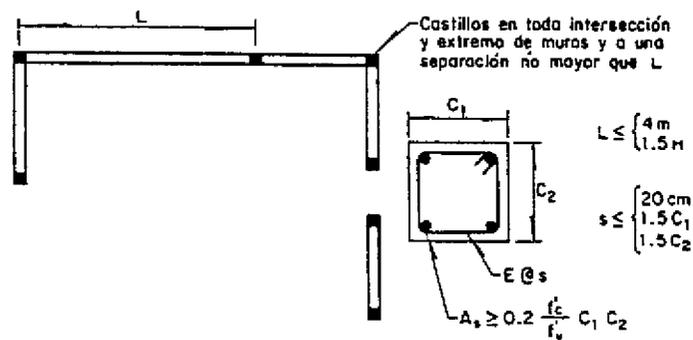
## 1. INTRODUCCION

Los muros de mampostería siguen siendo los elementos estructurales más empleados para resistir tanto las fuerzas verticales como las horizontales en edificios de vivienda, sea unifamiliar o multifamiliar, en México. Las piezas y morteros empleados para muros permanecen esencialmente los mismos desde hace varias décadas y la forma típica de refuerzo es mediante pequeñas columnas y vigas de concreto que se denominan en México castillos y dalas, en la modalidad que se ha denominado mampostería confinada. En la Fig. 1 se resumen los principales requisitos de las normas mexicanas (Refs. 1 y 2) relativas a la posición de dalas y castillos, y al refuerzo mínimo de estos elementos. Los múltiples intentos realizados a lo largo de los años para modernizar, industrializar o hacer más eficiente el sistema constructivo han tenido poco éxito.

El desempeño de estas construcciones durante sismos intensos ha sido en general satisfactorio, especialmente en la ciudad de México. Esto contradice la opinión generalizada en otros países, de que, por su baja resistencia a tensión y su comportamiento frágil, la mampostería no es un material adecuado en zonas de alta sismicidad, a menos que se refuerce de modo similar al concreto reforzado. Esta última consideración ha dado lugar al desarrollo



Distribución en elevación de elementos de refuerzo, verticales (castillos) y horizontales (dalas)



Distribución en planta de elementos verticales de refuerzo (castillos)

Figura 1 Requisitos para la Mampostería Confinada

de la mampostería con refuerzo interior (llamada mampostería reforzada), en la cual una abundante cantidad de refuerzo horizontal y vertical se coloca en el interior del muro, en los huecos de las piezas que son posteriormente rellenos con un mortero de cemento con consistencia de lechada. Este es el único tipo de mampostería estructural aceptado en zonas sísmicas de países como Nueva Zelanda y los Estados Unidos de América. En forma muy limitada es aceptado también en el Japón, en donde en términos generales no se considera a la mampostería como un material estructural idóneo, por su debilidad ante efectos sísmicos.

La mampostería reforzada ha tenido muy poca aceptación en México, principalmente porque no se ha podido implantar una práctica local para su correcta ejecución. En diversos casos en que se ha aplicado, se ha encontrado que el refuerzo no se había colocado en la cantidad y posición adecuadas y que el colado de los huecos interiores se había efectuado de manera defectuosa. Por estas razones se han tenido daños importantes por sismo en algunos edificios en que se ha aplicado este sistema.

Los requisitos de las normas nacionales para la mampostería confinada son un reflejo de la práctica que se originó a principios de siglo, y que ha evolucionado con base en el comportamiento observado de las construcciones y también los resultados de un importante programa de investigación experimental realizado principalmente entre 1965 y 1975 (Refs. 3 a 5).

En lo que resta de este artículo se resumirán los principales estudios experimentales que han servido de base para la práctica y las normas de diseño; se presentarán los métodos de diseño especificados por las normas mexicanas; se compararán resultados de métodos simplificados y de procedimientos más refinados para el análisis sísmico de edificios de mampostería; se evaluará el desempeño de estas edificaciones durante sismos recientes en México; y se describirán brevemente los estudios experimentales actualmente en proceso para mejorar la práctica actual de diseño y construcción.

## **2. ESTUDIOS EXPERIMENTALES**

Las propiedades mecánicas de los tipos de mampostería más usados en México fueron determinadas en un amplio programa experimental realizado a principios de los años 70. Actualmente está en proceso otro estudio para verificar si ha habido cambios significativos en los materiales que se producen.

Se determinaron la resistencia en compresión, la absorción y el peso volumétrico de las piezas (ladrillos y bloques). En términos generales se encontró que la variabilidad de la resistencia era elevada, no sólo en las piezas de producción artesanal, sino también en aquellas producidas industrialmente, en las cuales la apariencia y la regularidad geométrica son las características que se cuidan en el control de calidad, más que la resistencia. El coeficiente de variación entre piezas de un mismo lote no es muy alto, entre 15% para producción con buen control de calidad y 25% para control pobre en producción artesanal. Sin embargo, la variación entre las resistencias promedio de lotes diferentes de un mismo productor es elevada y también lo es la de piezas de similares características de diferentes productores. El coeficiente de variación global, incluyendo estos factores se acerca a 30%.

Los morteros empleados para muros estructurales se dosifican por volumen y se mezclan a mano. Los ensayos muestran que el coeficiente de variación de morteros pobres es superior a 30%.

Se realizaron numerosos ensayos para determinar la resistencia en compresión simple y la curva esfuerzo-deformación de pilas de mampostería formada por diferentes combinaciones de piezas y morteros (Fig. 3). Los resultados fueron similares a los que se encuentran bien establecidos en la literatura técnica sobre el tema (Refs. 5 y 7). La relación entre la resistencia en compresión de la mampostería y la de la pieza es de aproximadamente 0.5 para bloques de concreto y 0.35 para ladrillos. El efecto de la calidad del mortero en la resistencia es significativo sólo cuando se asocian morteros pobres a piezas de alta resistencia, en cuyo caso la relación entre la resistencia del conjunto y la de la pieza es menor que el valor anterior. El comportamiento es aproximadamente lineal hasta cerca de la falla que es muy frágil, especialmente para piezas de alta resistencia. En la Fig. 2 se muestran curvas esfuerzo-deformación típicas de algunas combinaciones de piezas y morteros.

Con el fin de determinar índices del comportamiento de muros de mampostería sujetos a fuerzas cortantes en su plano, se diseñó un ensayo de compresión diagonal en muretes, que se muestra esquemáticamente en la Fig. 3. Se realizó el ensayo para distintas combinaciones de piezas y morteros, determinando el esfuerzo cortante resistente promedio. No hay una correlación clara entre la resistencia a cortante de los muretes y la resistencia a compresión de piezas y morteros. Para piezas de baja resistencia unidas con morteros de buena calidad la falla ocurre por una grieta diagonal que atraviesa indistintamente las piezas y el mortero. Para este tipo de falla la resistencia a cortante aumenta aproximadamente con la raíz cuadrada de la resistencia en compresión de la mampostería. Para piezas de buena resistencia, la grieta diagonal corre por las juntas y la resistencia a cortante depende más de la calidad del mortero y de la adherencia entre éste y la pieza, que de la resistencia en compresión de la mampostería. La resistencia a cortante es mayor para piezas con superficie irregular en las que puede haber penetración del mortero para formar llaves de cortante.

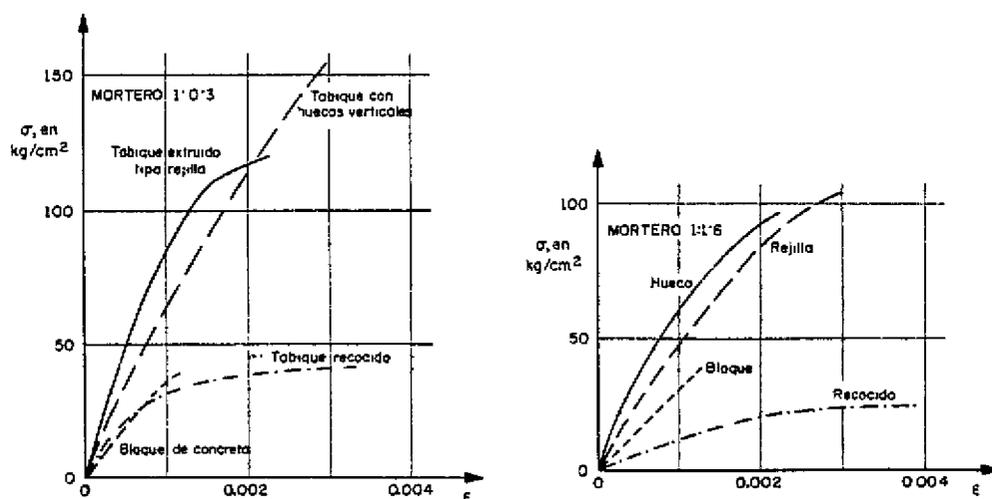


Figura 2 Curvas Esfuerzo-Deformación de Pilas en Compresión

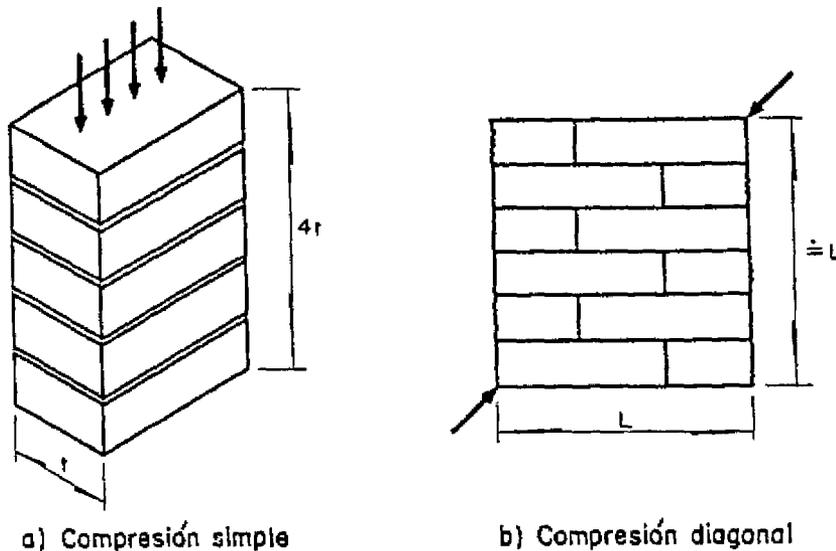


Figura 3 Ensayes para la Determinación de Propiedades Mecánicas de la Mampostería

En términos generales la resistencia en cortante de la mampostería es muy variable y depende de características particulares de cada combinación de piezas y morteros. No es posible dar reglas simples para su determinación. Este debe hacerse con ensayos para los materiales específicos.

Se realizaron algunos ensayos para estudiar el comportamiento de muros de mampostería a escala natural ante fuerzas de compresión aplicadas en forma axial o con cierta excentricidad. Sobre este tema existe una amplia información en la literatura técnica internacional (Refs. 6 y 7) y los resultados obtenidos en nuestros ensayos fueron congruentes con ello.

La investigación más relevante del programa mencionado se refirió al comportamiento ante fuerzas laterales en el plano del muro, para representar los principales efectos sísmicos en este tipo de elementos. Se ensayó un gran número de muros de distintas características en cuanto a materiales, sistemas de refuerzo, condiciones de carga y otras propiedades. En términos generales se encontró que la carga que produce el agrietamiento diagonal varía muy poco con el refuerzo del muro. Para muros confinados, la cantidad y detallado del refuerzo en los extremos de los castillos afecta significativamente la ductilidad, aunque no modifica en forma importante la resistencia. Para muros con refuerzo interior, la cantidad de refuerzo horizontal y vertical influye en forma importante en la capacidad y en la ductilidad. Para ambos tipos de mampostería, la capacidad de los muros aumenta en forma aproximadamente lineal con el nivel de carga axial aplicado, dentro del intervalo de esfuerzos de compresión inducidos por las cargas gravitacionales en edificios de este tipo. En la Fig. 4 se muestran algunos ejemplos del efecto de la carga axial y del refuerzo en el comportamiento de los muros. La ductilidad que se puede alcanzar en muros, sean confinados o con refuerzo interior, es elevada si la falla es regida por los momentos flexionantes, mientras que para falla por cortante se pueden alcanzar factores de ductilidad de desplazamiento de 3 ó 4 con un refuerzo apropiado. La ductilidad se reduce cuando la carga axial sobre el muro es elevada.

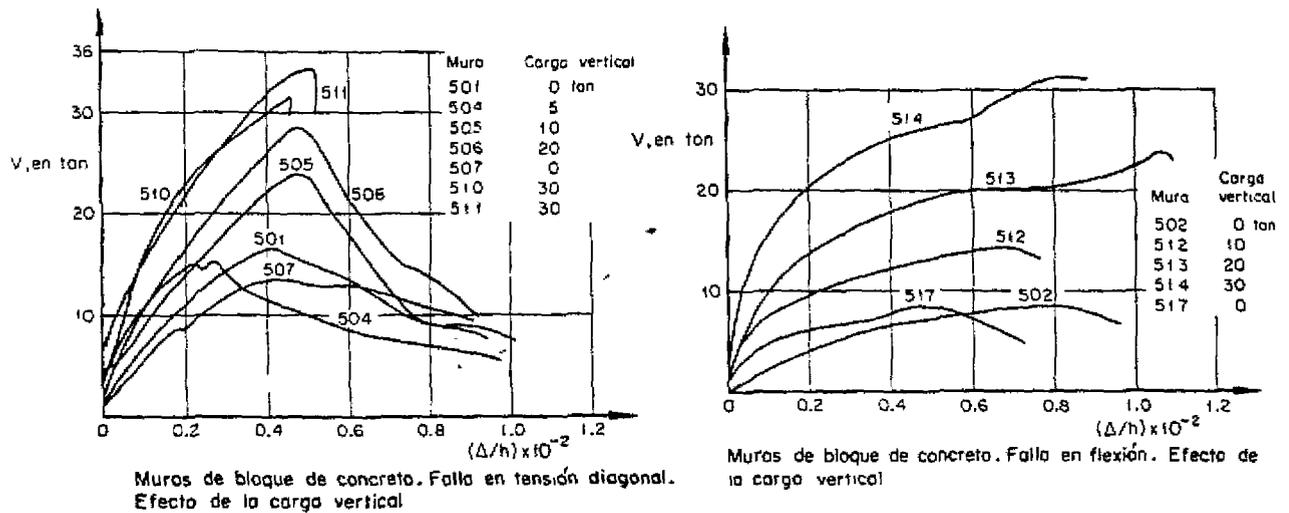


Figura 4 Curvas Esfuerzo-Deformación para Muros de Bloque de Concreto ante Cargas Laterales Monótonas

Los ensayos de muros (de 3 x 3 m) ante cargas laterales alternadas proporcionan información valiosa sobre el deterioro del comportamiento ante cargas cíclicas. Para mampostería confinada se observa un deterioro muy rápido una vez ocurrido el agrietamiento diagonal y para deformaciones angulares del orden de 3 al millar. Para mampostería con refuerzo interior, cuando éste es escaso, el deterioro es más drástico que en la mampostería confinada (Fig. 5a), y sólo cuando todos los huecos de las piezas se rellenan con lechada (grout) y además se tienen cuantías elevadas de refuerzo horizontal y vertical, se logran ciclos de histéresis estables y con buena disipación de energía. En términos de deterioro, los muros construidos con piezas macizas tienen un mucho mejor comportamiento que los de las piezas huecas, ya que en estas últimas el progresivo desprendimiento de las paredes de la pieza aceleran el deterioro.

Como resultado del programa experimental se propusieron valores de diseño para las principales propiedades mecánicas de la mampostería más común. Para otras combinaciones se han definido los métodos para determinar en forma experimental dichas propiedades.

### 3. LA PRACTICA DE DISEÑO

Desde 1976 las normas de diseño están formuladas en un formato de estados límite en el cual las cargas actuantes deben multiplicarse por factores de carga y compararse con las cargas resistentes afectadas por factores de reducción específicos para cada estado límite y elemento estructural.

Efecto de la carga vertical en el deterioro Ensayes en voladizo, Muros con refuerzo interior, Falla de cortante,

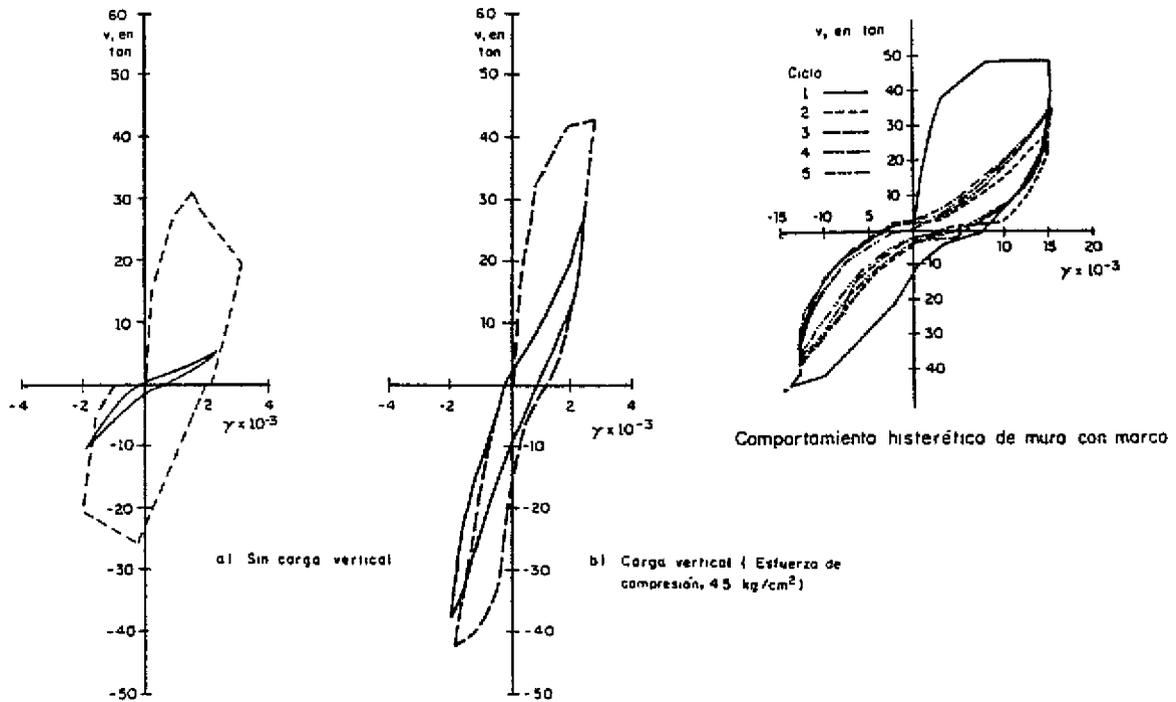


Figura 5 Ciclos de Histéresis para Muros de Mampostería

El análisis y el dimensionamiento se realizan generalmente con métodos simplificados cuyo uso es permitido por la norma para edificios pequeños y regulares: la altura no debe exceder de 13 m, los pisos y techos deben ser diafragmas rígidos, la relación altura a espesor de los muros no debe ser mayor de 20, el arreglo de muros debe ser simétrico e igual en todos los pisos.

Dentro de estos métodos simplificados, se permite que las cargas axiales sobre los muros se determinen mediante una "bajada de carga" por áreas tributarias y que los efectos de la excentricidad de la carga y de la esbeltez de los muros se tomen en cuenta por factores reductivos de la resistencia, especificados para condiciones típicas.

La carga vertical resistente se calcula como

$$P_R = F_R F_E f'_m A_m \quad (1)$$

en donde el factor de reducción de resistencia,  $F_R$ , se toma como 0.6 para la mampostería confinada y para la reforzada, y como 0.3 para mampostería sin refuerzo. El factor reductivo por excentricidad y esbeltez se toma como 0.6 para muros exteriores y para los interiores que soportan claro asimétrico, y se toma como 0.7 para muros interiores que soporten losas de claros simétricos;  $f'_m$  es la resistencia nominal en compresión de la mampostería, para la cual la norma proporciona valores recomendados para los materiales más comunes.  $A_m$  es el área transversal del muro. Se permite un ligero incremento en la capacidad del muro para tomar en cuenta la contribución del refuerzo.

En cuanto al diseño por cargas laterales, este se realiza por el método simplificado de diseño sísmico que se describirá en la sección siguiente.

#### 4. EL METODO SIMPLIFICADO DE DISEÑO SISMICO

El método simplificado se basa en suponer que la fuerza cortante que se genera por efecto del sismo, en cada entrepiso y en cada dirección, se distribuye entre los muros alineados en dicha dirección, en forma proporcional al área de cada muro. En términos de un comportamiento elástico-lineal, esto equivale a suponer que las deformaciones de los muros son debidas solamente a efectos de esfuerzos cortantes y, por tanto, la rigidez de cada muro es proporcional a su área transversal. En términos de comportamiento plástico la hipótesis implica que todos los muros pueden llegar a desarrollar simultáneamente su capacidad resistente, antes del colapso. Con la hipótesis anterior se obtiene que el esfuerzo cortante medio sobre cada muro es el mismo y la fuerza cortante resistente del entrepiso se puede determinar como

$$V_R = (\Sigma A_m) v_m \quad (2)$$

donde  $\Sigma A_m$  es la suma de las áreas transversales de los muros en la dirección considerada y  $v_m$  es la resistencia a cortante de la mampostería. Para tomar en cuenta la menor rigidez de los muros cortos, en los que la relación entre la altura, H, y la longitud, L, excede de 1.33, la contribución de estos se reduce multiplicándola por el factor

$$F_1 = (1.33 L/H)^2 \quad (3)$$

Esta reducción puede efectuarse afectando el área de los muros por el coeficiente  $F_1$ , de manera de obtener un área efectiva de muros para propósito de su contribución a la resistencia sísmica.

El esfuerzo cortante resistente de la mampostería,  $v_M$ , se determina según la norma respectiva (Ref. 2), con la expresión

$$v_M = F_R (0.5v^* + 0.3 \sigma) \leq 1.5 F_R v^* \quad (4)$$

en donde  $F_R$  es el factor de resistencia,  $v^*$  es el esfuerzo cortante básico resistente de la mampostería y  $\sigma$  es el esfuerzo promedio de compresión por el efecto de las cargas axiales sobre el muro. Si se supone, como es usual, un esfuerzo de compresión constante sobre todos los muros, igual al peso total del edificio arriba del entrepiso considerado, dividido entre el área total de muros en dicho entrepiso, entonces  $v_M$  resulta constante para todos los muros.

La fuerza cortante resistente del entrepiso, así calculada, debe compararse con la fuerza cortante sísmica actuante que, para el método simplificado, se determina como

$$V_A = F_c F_n C_s W_T \quad (5)$$

en donde  $W_T$  es el peso total del edificio,  $C_s$  es el coeficiente sísmico neto que para el método simplificado se obtiene directamente de las normas en función de la altura del edificio y del tipo

de mampostería;  $F_n$  es un factor correctivo por la altura del piso considerado y que vale 1 para la planta baja y se va reduciendo para los pisos superiores con base en la hipótesis de una distribución de fuerzas laterales linealmente creciente con la altura;  $F_c$  es el factor de carga correspondiente (1.1 para combinaciones que incluyan fuerzas sísmicas).

Para el caso usual en edificios de este tipo, en que todos los pisos son iguales en área, cargas y distribución de muros, se tiene

$$W_T = n w A_p \quad (6)$$

en que  $A_p$  es el área en planta del edificio,  $w$  es la carga uniforme por unidad de área y  $n$  es el número de pisos.

Para este caso se tiene además que el entrepiso crítico es la planta baja en la cual la cortante es máxima. La cortante en los pisos superiores queda reducida por el factor

$$F_n = \frac{(n+1)(n-j+1)}{n(n+1)} \quad (7)$$

en que  $j$  es el nivel inmediatamente abajo del cual se quiere calcular la fuerza cortante sísmica.

El método simplificado puede interpretarse como un procedimiento para determinar el área transversal de muros que se requiere en cada dirección para resistir las fuerzas sísmicas. Esta puede expresarse en términos de un índice adimensional igual a la suma de las áreas transversales efectivas de los muros en la dirección considerada, dividida entre el área de la planta tipo del edificio; o sea

$$d = \frac{\sum F_i A_m}{A_p} \quad (8)$$

Se tendrán dos valores,  $d_x$  y  $d_y$ , para las direcciones respectivas.

La resistencia sísmica mínima necesaria se deriva de la igualación entre las fuerzas cortantes actuantes y resistentes

$$V_A = F_c C_s n w A_p = V_R = F_R V_M \sum F_i A_m \quad (9)$$

de donde se obtiene

$$d = \frac{\sum F_i A_m}{A_p} = \frac{F_c n C_s w}{F_R V_M} \quad (10)$$

o sea,  $d$  es una medida de la resistencia sísmica necesaria para el edificio. Este índice de densidad de muros, de fácil determinación, proporciona una forma directa de determinar la idoneidad sísmica de un edificio de este tipo, de acuerdo con el método simplificado. Más adelante se hará uso del mismo para algunas comprobaciones.

## 5. METODOS REFINADOS DE DISEÑO SISMICO

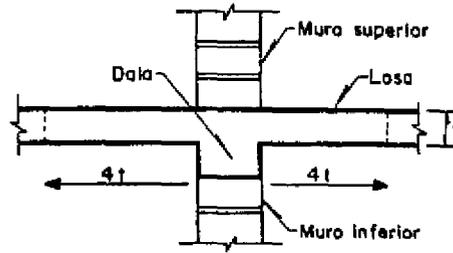
La mayoría de los proyectos tipo usados para vivienda multifamiliar de interés social cumplen con los requisitos para poder emplear el método simplificado, ya que no pasan de 13 m de altura, son simétricos, regulares y no muy esbeltos y tienen losas de concreto monolíticas y ligadas a los muros mediante dadas y castillos. Por su carácter repetitivo, estos edificios ameritan ser sometidos a un método refinado de diseño sísmico; sin embargo, los criterios de diseño adoptados por diferentes proyectistas son muy dispares y no siempre correctos. A continuación se describe el procedimiento que se considera idóneo.

Los edificios en cuestión están formados por placas, horizontales y verticales, con un arreglo tridimensional complejo. Un modelo riguroso implicaría una representación mediante una malla de elementos finitos. Sin embargo, se logra generalmente una representación suficientemente precisa mediante marcos equivalentes en que los muros se representan como columnas anchas, que son columnas equivalentes ubicadas en el centro de los muros y que tienen momento de inercia y área de cortante tales que reproducen las deformaciones de flexión y de cortante del muro. El acoplamiento entre los muros se reproduce mediante vigas equivalentes, las que tienen un momento de inercia infinito en el tramo que queda dentro de la longitud del muro, y tienen el momento de inercia de la losa (y de la viga-cadena) en cierto ancho equivalente en los tramos entre muros. Se debe tomar en cuenta la contribución de pretilas y dinteles a la rigidez de la viga equivalente. En la Fig. 6 se resumen los criterios para las propiedades de la viga equivalente. Un ejemplo de marco equivalente para la fachada de un edificio típico se presenta en la Fig. 7.

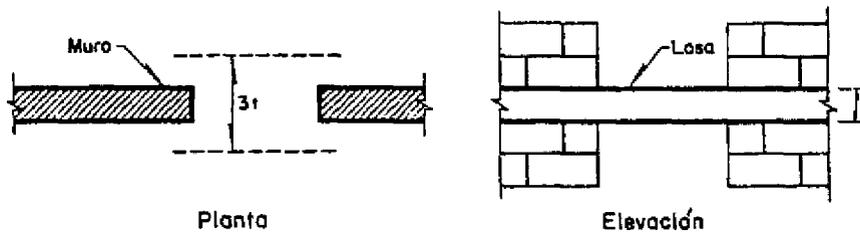
Entre los programas de cómputo que permiten analizar un modelo de esta índole se encuentra el ETABS, que es el más difundido entre las firmas de ingeniería. Entre los métodos de análisis que pueden resolverse con estos programas, el más adecuado es el dinámico modal con espectro de respuesta.

Para una predicción correcta de la respuesta, cuando el edificio está sobre terreno blando, es necesario tomar en cuenta la interacción suelo-estructura, ya que por la gran rigidez lateral de estos edificios, las rotaciones y desplazamientos de la base afectan significativamente los desplazamientos totales. El modelo más práctico para tal fin es mediante un piso ficticio, colocado abajo de la cimentación y que se integra con columnas que reproducen la rigidez a traslación y rotación del conjunto suelo-cimentación. Estas rigideces se determinan con los métodos aproximados de las normas de diseño por sismo del Distrito Federal (Ref. 8).

Los resultados del análisis de este tipo de estructuras han sido comparados con la respuesta dinámica de edificios, medida ante vibración ambiental y ante sismos moderados, con resultados en general satisfactorios.

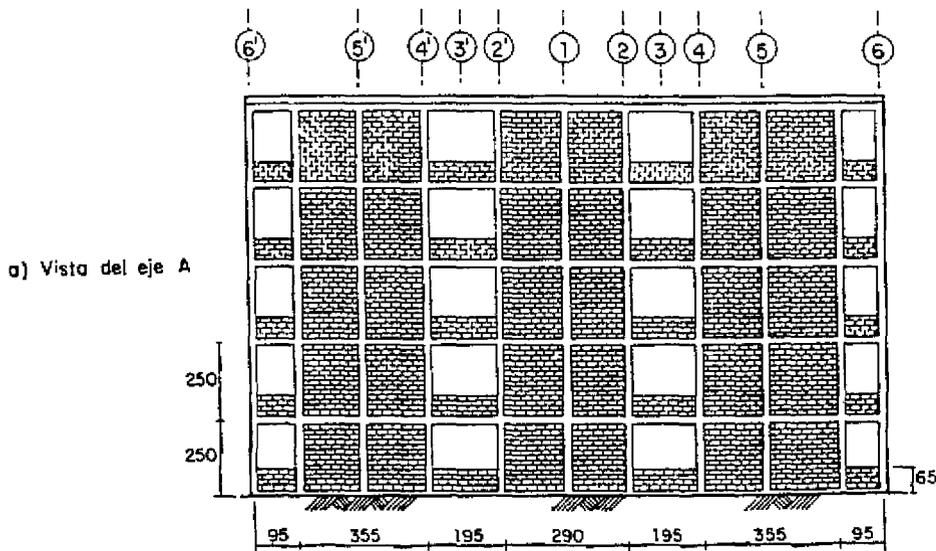


a) Losa con dala (o viga)



b) Losa sin viga

Figura 6 Ancho Efectivo de Losa para el Cálculo del Momento de Inercia de la Viga de Acoplamiento



b) Marco equivalente del eje A

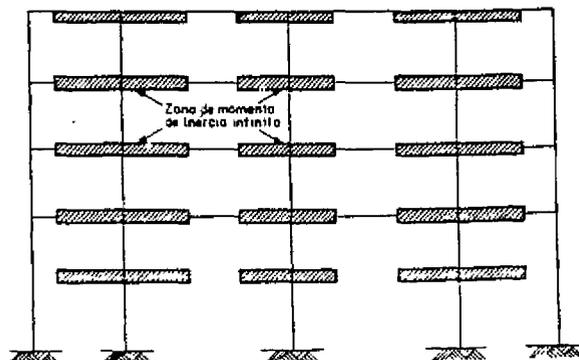


Figura 7 Modelo de Marco Equivalente para un Muro de Fachada

Conviene examinar las diferencias entre los resultados de un análisis refinado como el anterior y los del método simplificado.

Una de las hipótesis del método simplificado es que los esfuerzos cortantes medios son los mismos sobre todos los muros, excepto para los muy esbeltos ( $H/L > 1.33$ ) que absorben una fuerza lateral menor. En la Fig. 8 se muestra la distribución de esfuerzos cortantes entre los muros de un edificio típico. Se aprecia que en la dirección longitudinal los esfuerzos varían entre 0.89 y 1.68  $\text{kg}/\text{cm}^2$  (0,087 y 0,165 MPa, respectivamente), mientras que en la transversal el intervalo es entre 0.66 y 1.38  $\text{kg}/\text{cm}^2$  (0,065 y 0,135 MPa, respectivamente). En ambos casos las variaciones son elevadas. En comparación, del método simplificado resultan esfuerzos de 1.62  $\text{kg}/\text{cm}^2$  (0,159 MPa) y 1.40  $\text{kg}/\text{cm}^2$  (0,137 MPa) para la dirección longitudinal y transversal, respectivamente. En este caso el esfuerzo cortante máximo según el análisis dinámico resulta sólo ligeramente superior al del método simplificado (en la dirección longitudinal). Esto se debe a que la fuerza cortante total que debe distribuirse entre los muros es menor en el primer caso, como se explicará más adelante.

La otra hipótesis debatible del método simplificado es que los momentos flexionantes en los muros son despreciables. Los diagramas de momentos que resultan en un muro cabecero, y en uno de fachada del edificio anterior se presentan en la Fig. 9. El muro cabecero, al no tener prácticamente restricción al giro, actúa casi como un voladizo y presenta momentos elevados en su base. El muro de fachada, al estar fuertemente acoplado por las losas y pretilas de la fachada, presenta un diagrama de momentos similar al que se determinaría considerando el muro empotrado en sus extremos en cada entrepiso. Por el gran peralte de la sección transversal de los muros y por el efecto de la carga axial, los momentos flexionantes elevados que resultan del análisis refinado no siempre requieren de fuertes cantidades de refuerzo en los castillos extremos de los muros; sin embargo, con frecuencia estas cantidades exceden de las mínimas especificadas por las normas, que serían las estrictamente necesarias según el método simplificado.

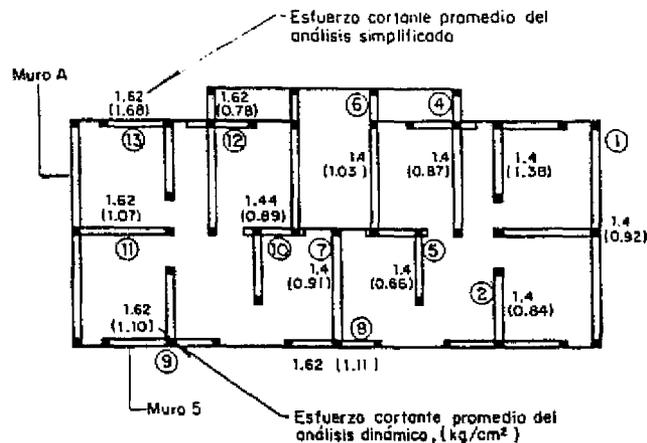


Figura 8 Comparación de Esfuerzos Cortantes Sísmicos para un Edificio Tipo

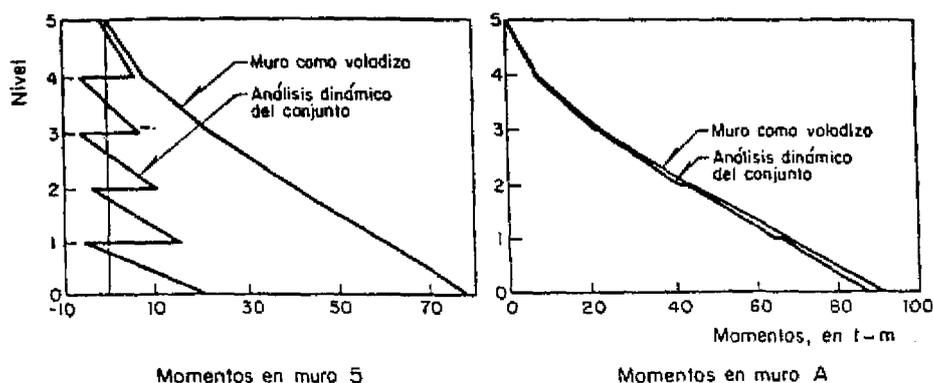


Figura 9 Distribución de Momentos Flexionantes por Sismo en Muros de un Edificio Tipo

Los diagramas de momentos flexionantes que se obtienen en el muro de fachada según el método refinado de análisis, deben tomarse con reservas. El fuerte acoplamiento proporcionado por la losa y el parapeto puede verse reducido ante solicitaciones elevadas por el agrietamiento de la "viga de acoplamiento" sobre la cual actúan momentos flexionantes elevados. Cuando los parapetos y dinteles no están rematados por dadas bien reforzadas y ancladas en sus extremos, es dudoso que puedan resistir momentos flexionantes significativos y es mejor ignorar su contribución al momento de inercia de la viga de acoplamiento.

La comparación de los resultados del diseño sísmico realizado con el método simplificado y con el refinado requiere de la consideración de las diferencias en los coeficientes sísmicos especificados para cada caso. En el método simplificado se dan coeficientes sísmicos netos en función del tipo de suelo, del tipo de mampostería y de la altura del edificio. En el análisis dinámico espectral las fuerzas sísmicas se determinan en función de los periodos de vibración del edificio. Cuando este se considera empotrado en su base, la alta rigidez de las estructuras de este tipo da lugar a periodos muy bajos que redundan en ordenadas espectrales pequeñas según los espectros de diseño de los reglamentos mexicanos. Por ello la fuerza cortante sísmica resulta claramente inferior a la correspondiente al método simplificado. Cuando se tiene una cimentación sobre terreno blando, las deformaciones por la traslación y la rotación de la base del edificio no son despreciables e incrementan significativamente el periodo, llevando el edificio a una región del espectro de diseño donde las ordenadas son mayores. Por ejemplo, para el edificio típico de cinco pisos cuya planta se ha ilustrado en la Fig. 4, de acuerdo al método simplificado, se debe emplear un coeficiente sísmico de 0.19. El análisis dinámico espectral considerando el edificio empotrado en su base arroja un coeficiente de cortante basal de 0.16, mientras que si se toma en cuenta la deformación de la cimentación, dicho coeficiente aumenta a 0.182. En la Fig. 10 se ilustra el espectro de diseño (reducido por el factor de comportamiento sísmico  $Q=2$ ). Se aprecia que un análisis dinámico considerando el edificio empotrado conduciría a resultados poco conservadores y que los coeficientes sísmicos del método simplificado son similares a los del análisis refinado, si se toma en cuenta la interacción suelo-estructura.

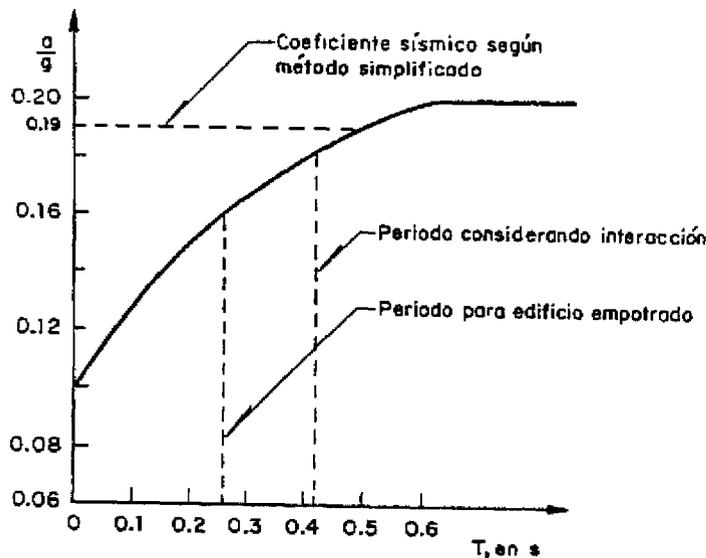


Figura 10 Coeficientes Sísmicos de Diseño del Edificio de la Fig. 8 según Diferentes Métodos (Dirección Longitudinal)

## 6. COMPORTAMIENTO SISMICO OBSERVADO

La reputación de la mampostería como material para estructuras resistentes a sismos es mala a nivel internacional. Los informes de daños de la mayoría de los sismos importantes destacan el mal desempeño y el alto número de colapsos de construcciones de este material. Sin embargo, estas anotaciones se refieren casi siempre a construcciones de mampostería no reforzada y de materiales pobres como el adobe. Hay que reconocer que la baja resistencia a tensión de la mampostería limita fuertemente la capacidad de los muros para resistir cargas laterales y que el comportamiento del material es inherentemente frágil. Sin embargo, los edificios de este material cuentan usualmente con un elevado número de muros alineados en dos direcciones ortogonales, lo que proporciona una alta resistencia a cargas laterales en ambas direcciones. Además, con el confinamiento proporcionado por las dalas y castillos o con el refuerzo horizontal y vertical colocado en el interior de los huecos del muro, se puede evitar la posibilidad de un colapso frágil y proporcionar una aceptable ductilidad a los muros.

Para el sismo de México de 1985 se realizó una evaluación general del comportamiento de edificaciones de mampostería cuyos resultados se presentan en la Ref. 9, con las conclusiones que se resumen a continuación.

El número de edificios de este tipo en los que se encontraron ciertos daños en un levantamiento realizado por el Departamento del Distrito Federal, es elevado. Un examen más cercano de la lista de edificios identificados como dañados revela que en su gran mayoría se trata de edificaciones de materiales pobres, construidas sin criterios ingenieriles y en muchos casos muy deterioradas por las humedades y el intemperismo. También se constata que en la

mayoría de los casos los agrietamientos que presentaban eran atribuibles principalmente a hundimientos diferenciales y que el sismo había vuelto a poner en evidencia viejas lesiones que habían sido ocultadas por recubrimientos.

No se encontró ningún caso de colapso o daño grave en edificios con mampostería confinada según los requisitos reglamentarios. En particular, en los edificios de los grandes conjuntos habitacionales de vivienda popular, de construcción reciente, no se reportó ningún caso de daño significativo en la ciudad de México. En la zona epicentral se sabe que hubo algunos casos de daños en estas construcciones.

De la lista de construcciones dañadas se estudió una muestra de 23 edificios elegidos entre los que fueran de materiales más modernos y con características similares a las exigidas por los reglamentos actuales.

De cada edificación se obtuvieron los planos constructivos, se hizo un levantamiento en sitio para comprobar los datos de planos y para registrar los agrietamientos que presentaban. Se hizo una revisión de la seguridad sísmica con el método simplificado y se determinó el índice de densidad de muros en cada dirección con el método descrito en la sección anterior.

Del análisis detallado de cada caso se llegó a la conclusión de que en 9 de los 23 edificios el agrietamiento se debía exclusivamente a hundimientos diferenciales y que en otros cuatro había materiales pobres, degradados por las humedades y no se tenía refuerzo de dadas y castillos en la cantidad requerida. De los 10 edificios restantes puede decirse, en términos generales, que los que mostraban agrietamiento importante y claramente debido a sismo, presentaban una reducida cantidad de muros, al menos en una dirección y en algunos casos una distribución asimétrica de los mismos que generaba torsiones importantes.

El grado de daño que presentaban los muros se calificó en una escala de 0 a 5, en que el grado máximo indica un daño irreparable con pérdida de capacidad de carga del muro. Se determinó un grado de daño para cada dirección, también se calculó para cada dirección, el índice de densidad de muros según la definición dada en la sección 4 de este artículo. La correlación entre el grado de daño y el índice de densidad de muros se muestra para cada dirección de los diez edificios en la Fig. 11. Se aprecia que los daños importantes corresponden a edificaciones con una baja densidad de muros y hay una clara tendencia a la disminución del daño, a medida que aumenta el valor de  $d/n$ . Una tendencia similar se ha encontrado en una evaluación del nivel de daño de edificios chilenos sometidos al sismo del 3 de marzo de 1985 en Chile (Ref. 10). Los resultados de la Fig. 11, sin embargo, ponen en evidencia también que hubo cierto daño en estructuras con alta densidad de muros (6y, 14y, 15y). Si consideramos que un gran número de edificios modernos de este tipo tienen densidades de muros más pequeñas que las de estos tres casos y que no sufrieron daños en el sismo de 1985, debemos concluir que los agrietamientos, por cierto menores, que presentaban estos edificios no fueron debidos al efecto sísmico, sino probablemente a hundimientos diferenciales (o a una combinación de los dos efectos).

Debido a las incertidumbres sobre la verdadera causa de los daños no se intentó emplear los resultados anteriores para deducir una ecuación que relacionara el grado de daño con la densidad de muros.

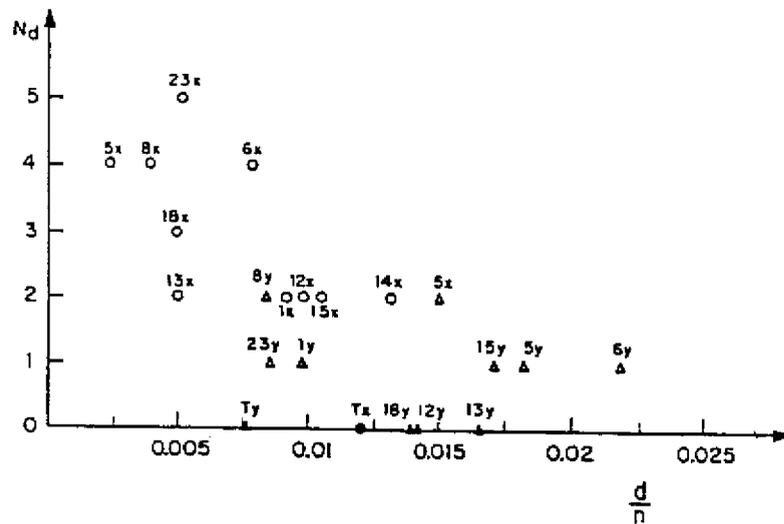


Figura 11 Relación entre Densidad de Muros y Nivel de Daño en Edificios de Mampostería

En diversos casos los análisis revelan que las cortantes que se debieron haber inducido en los muros son mayores que las resistencias al corte esperadas de la mampostería, por lo que deberían haberse presentado más daños de los que se observaron. La explicación se encuentra que, para el caso de las zonas de terreno blando de la ciudad de México, las fuerzas que realmente se introducen en los edificios son menores que las que resultan de los procedimientos usuales de análisis. En estos casos una parte importante de la energía del sismo no se traduce en vibración del edificio, sino se disipa en el suelo por radiación. Resultados de mediciones de respuesta de edificios masivos y rígidos como los aquí estudiados, y análisis teóricos de la interacción suelo-estructura para casos típicos indican que las aceleraciones inducidas en la estructura son mucho menores que las que se deducen de los procedimientos de análisis prescritos por los códigos.

## 7. MUROS DIAFRAGMA

Tradicionalmente, las estructuras de concreto y de acero en México han contado con la contribución de paredes de relleno de mampostería que han contribuido significativamente a la resistencia y rigidez ante cargas laterales. Recientemente, estos elementos divisorios están siendo sustituidos cada vez más por paneles ligeros de baja rigidez.

La función estructural de un muro diafragma es diferente a la de un muro confinado, los primeros no contribuyen a tomar las cargas verticales y actúan exclusivamente como elementos rigidizantes para cargas laterales. Su efecto se modela comúnmente como el de una diagonal equivalente de compresión, cuya área es  $t \cdot w$ , siendo  $t$  el espesor del muro y  $w$  un ancho equivalente igual a

$$w = (0.35 - 0.022 \lambda)h \quad (11)$$

donde  $h$  es la altura del diafragma y  $\lambda$  la rigidez relativa de diafragma a marco. Se adopta

para la diagonal el módulo de elasticidad de la mampostería. El efecto rigidizante del diafragma es muy elevado.

En términos generales el desempeño de edificios con muros diafragma de mampostería, indica que éstos han tenido un efecto muy favorable. En algunos casos la posición inadecuada de los diafragmas ha ocasionado problemas. Tal es el caso de edificios con distribuciones asimétricas en planta de diafragmas de mampostería, en los que las vibraciones torsionales han concentrado fuerzas en algunos elementos y producido su falla. Los casos de muros diafragma que se descontinuaban en la planta baja produciendo el llamado piso flexible o piso débil han sido causa de un número considerable de fallas en la ciudad de México.

De acuerdo a la norma la resistencia a cortante del diafragma se calcula como

$$V_R = F_R(0.8 v_m^* A_m) \quad (12)$$

en donde el factor de reducción  $F_R$  se toma también en este caso como 0.7, y la resistencia en cortante de la mampostería,  $v_m$ , es la misma que para muros de carga.

## 8. TENDENCIAS ACTUALES Y ESTUDIOS ADICIONALES

Las modificaciones de los requisitos de diseño sísmico que se han producido después de 1985, primero en el Distrito Federal y después en otros estados, están dando lugar a cambios significativos en los proyectos de vivienda multifamiliar en las zonas de mayor riesgo sísmico del país.

En el Distrito Federal, en la zona del lago, los coeficientes sísmicos se incrementaron en 67%; para las estructuras de mampostería este incremento ha sido parcialmente contrarrestado por un aumento del factor de reducción para la resistencia en cortante de 0.6 a 0.7. El resultado neto es un aumento de 43% en la resistencia necesaria a fuerza cortante, lo que redonda en un incremento equivalente en el área transversal de muros necesaria para cada dirección, para una misma calidad de mampostería.

Si se emplea el método simplificado, los incrementos son aún más notables. Los coeficientes sísmicos netos especificados para este método se han incrementado en porcentajes diversos según el caso. Parte del aumento para edificios sobre suelo blando se debe a que se reconoce que el periodo fundamental de vibración es mayor del que se había supuesto anteriormente, debido al efecto de rotación y traslación de la base. Por ello estos edificios caen en una zona más desfavorable del espectro de diseño, como se aprecia en la Fig. 10. De allí que, por ejemplo, para edificios con altura de entre 7 y 13 m, de piezas macizas, el coeficiente sísmico haya aumentado en 90% (0.10 a 0.19) con respecto al reglamento anterior.

La densidad de muros,  $d$ , necesaria para edificios de pesos y propiedades típicos en México, de mampostería de tabique confinado, según se ha determinado con el método simplificado de diseño sísmico se muestra en la Fig. 12. Se aprecia que, según el código anterior (1976) se requería aproximadamente un área de muros en cada dirección igual a 0.7% del área en planta, por cada piso de altura del edificio. Así, para un edificio típico de cinco

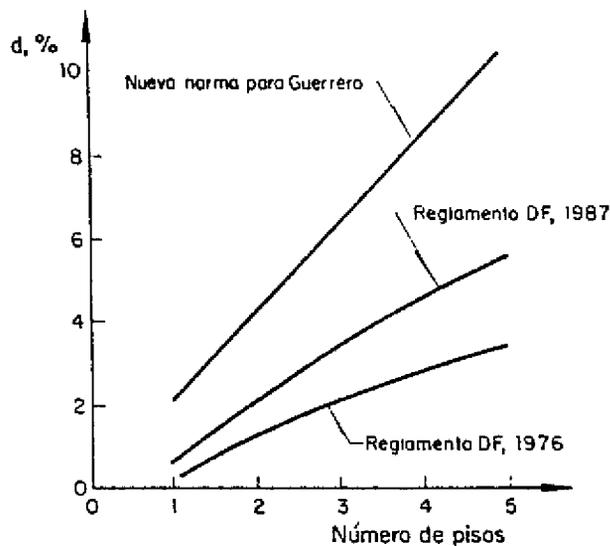


Figura 12 Densidad de Muros Requerida por las Normas en Edificios Típicos sobre Terreno Blando

pisos se requeriría 3.5% en cada dirección. Para el mismo caso el nuevo reglamento exige 5.6%. Esto equivale a que, considerando las dos direcciones, aproximadamente 11% del área de cada planta va a estar ocupada por los muros. Para una zona de mayor riesgo sísmico como la costa de Guerrero, los requisitos son más estrictos y para el mismo edificio de cinco pisos sobre terreno blando, se requeriría que más de 20% del área en planta fuera ocupada por muros, lo que volvería claramente antifuncional a la construcción.

Los proyectistas han respondido a estos cambios reglamentarios de modos muy diversos. Se ha buscado usar materiales de mayor resistencia, pero el incremento en la resistencia a cortante permitido por las normas es muy reducido. Sobre todo se ha recurrido en las zonas de mayor riesgo sísmico a combinar muros de concreto con los de mampostería; con ello se han introducido dudas sobre la validez y la forma de aplicación del método simplificado para ese caso. La repercusión económica de esas modificaciones es significativa y es necesario uniformar criterios y aclarar las dudas existentes, para lo cual se requieren algunos estudios; en particular los que se describen a continuación.

La medición de la respuesta de los edificios en cuestión ante sismos de intensidad moderada o grande, es esencial para determinar las sollicitaciones reales que se introducen en la estructura y para verificar los métodos de diseño. Es necesario instrumentar un grupo de edificios representativos en regiones donde se esperan movimientos sísmicos de diferentes características y, en particular, en edificaciones sobre suelo blando para entender más claramente la interacción suelo-estructura para este caso y cuantificar la disipación de energía por radiación hacia el terreno. Es posible que el análisis de estas mediciones permita reducir la magnitud de las fuerzas sísmicas de diseño especificadas por las normas para esta condición de suelo.

El comportamiento sísmico de estas estructuras se ha estudiado hasta la fecha mediante el ensayo de paredes aisladas. Para entender el comportamiento de la estructura completa es necesario determinar experimentalmente la interacción entre los diferentes elementos. Esto requiere del ensayo de sistemas planos de varios muros acoplados por sistemas de piso de diferentes características y, finalmente, del ensayo de edificios completos a escala natural para comprender el efecto tridimensional. En la Fig. 13 se muestra el modelo de este tipo que se ha ensayado recientemente en el Centro Nacional de Prevención de Desastres.

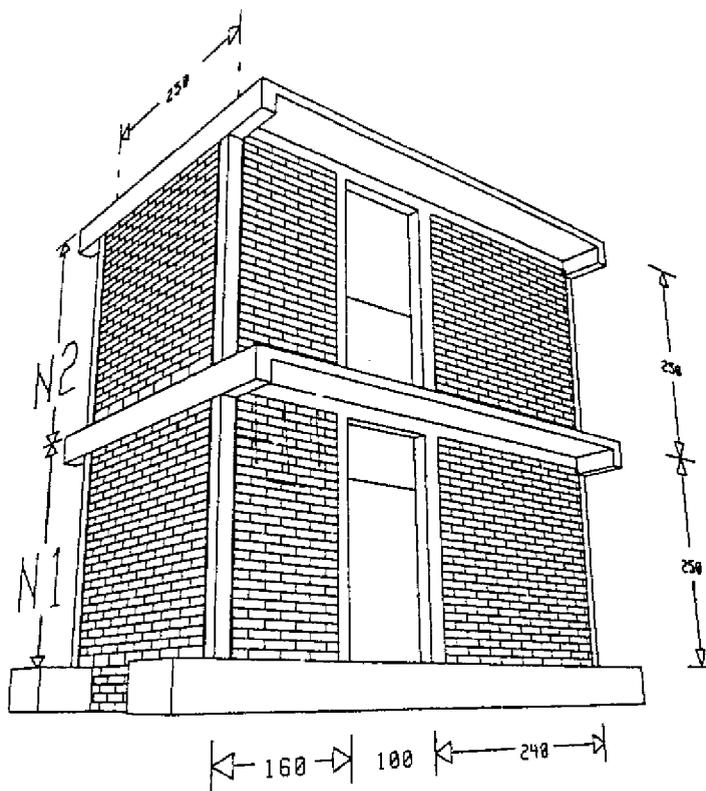


Figura 13 Estructura de dos Pisos a Escala Natural Ensayada ante Cargas Laterales Alternadas en el CENAPRED

## 9. REFERENCIAS

1. Instituto de Ingeniería, "Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería. Manual con Comentarios y Ejemplos," UNAM, Publ. No. 403, jul. 1977.
2. Departamento del Distrito Federal, "Normas Técnicas Complementarias Para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería," Gaceta Oficial del Departamento del D.F., mar. 1989, 19 pp.
3. Esteva, L., "Behavior under Alternating Loads of Masonry Diaphragms Framed by Reinforced Concrete Members," Symposium on Effects of Repeated Loading in Materials and Structural Elements, RILEM, México, D.F., 1966.
4. Meli, R., "Comportamiento Sísmico de Muros de Mampostería," Instituto de Ingeniería UNAM, Publ. No. 352, México, D.F., abr. 1975, 114 pp.
5. Hernández, O. y R. Meli, "Modalidades de Refuerzo para Mejorar el Comportamiento Sísmico de Muros de Mampostería," Instituto de Ingeniería, UNAM, Publ. No. 382, México, D.F., dic. 1976, 31 pp.
6. Sahlin, W., "Structural Masonry," Prentice Hall, 1971.
7. Paulay, T., y M.J.N. Priestley, "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings", J. Wiley, 1992, 744 pp.
8. Departamento del Distrito Federal, "Normas Técnicas Complementarias Para Diseño por Sismo," Gaceta Oficial del Departamento del D.F., nov. 1987, 21 pp.
9. Berrones, R., "Evaluación del Comportamiento de Edificios de Muros de Mampostería en los Sismos de Septiembre de 1985," Tesis Profesional, Fac. de Ingeniería, UNAM, 1987.
10. Astroza, M., M.O. Moroni, y M. Küpfer, "Calificación Sísmica de Edificios de Albañilería de Ladrillo Confinada con Elementos de Hormigón Armado," Comunicación personal, 1993.