

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERIA

Tomás A. Sánchez¹

I. ANTECEDENTES

La mampostería, como uno de los materiales de construcción más antiguos utilizado por el hombre generalmente se asocia con procedimientos artesanales tanto en la fabricación de piezas como en los procesos constructivos. El término mampostería abarca una gran diversidad de materiales que difieren en el tipo de pieza. Las piezas, se elaboran con procesos que van desde el puramente artesanal como el tabique de barro recocido, hasta los procesos industrializados bien establecidos, que han permitido fabricar piezas con diferentes características y propiedades mecánicas (Figura 1).

Es importante mencionar, que los valores de las propiedades mecánicas de las piezas para mampostería son muy diversos y tienen un alto grado de dispersión. Se ha visto que aun en los casos de producción más industrializada, el control de calidad se concentra más en las propiedades geométricas y estéticas (tamaño, forma, color, textura, etc.) que en las mecánicas o de resistencia.

Por otra parte en nuestro país, así como en diversos países de Centro y Sudamérica, las construcciones a base de muros de mampostería de baja y mediana altura son muy populares. Los sistemas constructivos a base de muros de carga, representan en su mayoría la solución más conveniente para construcciones de vivienda económica en las que además se requiere una subdivisión del área total en espacios pequeños.

En la actualidad, la utilización de la mampostería con fines estructurales y no estructurales no ha caído en desuso. Cabe mencionar que la continua utilización de muros de mampostería se basa en aspectos sociales, culturales, económicos, y desde un punto de vista práctico en las ventajas que proporciona. Entre las principales están sus múltiples funciones, ya que a la vez que sirve como elemento divisorio y aislante, puede proporcionar una función estructural. Además, su sistema constructivo no requiere de un equipo elaborado y costoso ni de una mano de obra muy especializada a pesar de que la calidad de la mano de obra juegue un papel importante en las propiedades estructurales del muro terminado.

Son bien conocidas las desventajas del sistema en lo que respecta a su baja resistencia a la tensión y su poca capacidad de admitir deformaciones en su plano. Esto ha obligado a emplear diferentes modalidades de refuerzo y a seguir requisitos de diseño y construcción más estrictos para su aplicación en zonas sísmicas. En México, el estudio formal de la mampostería se remonta más allá de tres décadas. Una visión general del estado del arte de la mampostería en otros países, indica que durante la última década ha habido una acelerada investigación analítica y experimental. Lo anterior, aunado a la experiencia adquirida en sismos pasados, ha contribuido a que el conocimiento sobre el comportamiento sísmico de la mampostería se haya incrementado notablemente. Como resultado, los códigos actuales para el diseño de la mampostería, están respaldados por criterios más racionales y menos burdos que los de antaño.

En lo que sigue se describen los diferentes tipos de estructuras de mampostería así como su comportamiento sísmico. Se presenta el proceso de diseño y los métodos de análisis para estas estructuras con fundamento en las especificaciones del último Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RDF-87). Finalmente se discuten algunos aspectos importantes de la supervisión en edificaciones de mampostería.

¹Investigador en el Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, D. F.

II. TIPOS DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERIA

Las Normas de Mampostería del último Reglamento de Construcciones (Ref.1) clasifican a los muros de mampostería que tengan una función estructural en una de las categorías siguientes:

a) Muros Diafragma

Se trata de elementos que están rodeados por las vigas y columnas de un marco estructural de acero o de concreto al que proporcionan rigidez ante cargas laterales al actuar como diafragma. La función del marco es resistir las cargas verticales y la flexión general, así como la de confinar el muro (Figura 2).

b) Muros Confinados

La llamada mampostería confinada puede considerarse como el sistema más utilizado en nuestro medio principalmente en zonas sísmicas. El sistema consiste en rodear perimetralmente al muro de carga con elementos de concreto reforzado (castillos y dalas) de espesor igual al muro, con el fin de proporcionar a éste un confinamiento que mejore su ductilidad y le permita soportar repeticiones de carga lateral sin deteriorarse excesivamente. En las mismas Normas para diseño y construcción de estructuras de mampostería, se especifican requisitos mínimos de dimensionamiento y refuerzo de los elementos de concreto confinantes (Figura 3).

c) Muros Reforzados Interiormente

En la mampostería reforzada interiormente se distribuye el refuerzo horizontal y vertical en el interior del muro aprovechando para ello piezas huecas o con formas especiales para alojar el refuerzo y en otros casos también las juntas. En el caso de muros reforzados, el Reglamento también especifica requisitos de construcción y cuantías mínimas del acero de refuerzo (Figura 4).

d) Muros no reforzados

Se incluye bajo este título a aquellos muros que no tengan el refuerzo necesario para ser incluidos en algunas de las tres categorías anteriores.

e) Otros

Se podrán considerar otros tipos de refuerzo o modalidades constructivas de mampostería siempre que sea demostrable analítica y experimentalmente que cumplen con los requisitos de seguridad estructural que marca el Reglamento y sus Normas Técnicas respectivas.

Existe otro tipo no menos importante de elementos de mampostería y que se identifican como **no estructurales**. Este es el caso de elementos arquitectónicos como los muros divisorios y que serán objeto de consideraciones importantes en el inciso siguiente.

III. COMPORTAMIENTO SISMICO

Los daños causados por sismos intensos en construcciones de mampostería han sido con frecuencia muy severos y es común que el desempeño de estas construcciones se compare desfavorablemente con el de estructuras de acero y de concreto. Sin embargo la mayoría de las fallas se han presentado en construcciones de mampostería que no fueron objeto de un diseño estructural y que mostraron defectos obvios de estructuración, de construcción y de calidad de materiales.

Muros no reforzados.

La experiencia en construcciones de adobe (Figura 5) y de mampostería no reforzada señala que su

comportamiento sísmico es deficiente. Las principales causas que contribuyen a su mal comportamiento son:

- a) Escasa resistencia en tensión del adobe y escasa adherencia de los morteros de lodo.
- b) No se logra una buena liga entre los muros transversales aún con cuatrapeo de las piezas.
- c) Alto grado de Intemperismo.
- d) Aberturas en forma de puerta o ventana no reforzadas.
- e) Elevados pesos sobre los muros provenientes de sistemas de techos.

Este tipo de construcciones debe evitarse en zonas sísmicas; o en su caso, mejorar su comportamiento sísmico por medio de algún refuerzo que produzca una liga adecuada entre los elementos y proporcione cierto confinamiento y ductilidad a los muros.

Muros de Mampostería Confinada.

En lo que concierne a construcciones de mampostería confinada, puede decirse que su comportamiento observado ha sido satisfactorio. La contribución del marco perimetral de concreto reforzado es importante en cuanto a que provee al tablero de una mayor capacidad de deformación y de una liga muy efectiva con los elementos adyacentes y con el sistema de piso. A pesar de que el confinamiento evita la súbita falla frágil del muro, no se evita la posibilidad de agrietamientos diagonales, ya que la resistencia en tensión diagonal de la mampostería no se incrementa apreciablemente por la presencia de dadas y castillos. Una solución para incrementar la resistencia en cortante de la mampostería confinada, es mediante el uso de refuerzo horizontal en la junta.

Muros reforzados interiormente.

La mampostería con refuerzo interior es un procedimiento constructivo muy utilizado en otros países como Japón, E.U.A., Nueva Zelanda, pero no tan popular en nuestro medio. El proceso constructivo resulta mucho más elaborado y detallado para obtener un correcto llenado o colado de los huecos así como una correcta colocación del refuerzo. En la práctica mexicana, resulta difícil la supervisión de su construcción lo que ha contribuido a una mala reputación del sistema.

Respecto a su comportamiento sísmico puede decirse que ha sido defectuoso; en general, por falta de supervisión durante el proceso constructivo. Otra de las desventajas observadas en la mampostería con refuerzo interior son: fallas locales de las piezas huecas por desprendimiento de sus paredes, que la liga entre distintos elementos es menos efectiva y que se requieren altas cantidades de refuerzo para asegurar un buen comportamiento. Sin embargo este procedimiento tiene la ventaja sobre el sistema tradicional de mampostería confinada de que el refuerzo incrementa su resistencia y reduce el agrietamiento a espesores pequeños y además, de que el muro puede quedar aparente, es decir, que no requiere de un acabado adicional.

Es interesante mencionar que en países como Japón y Estados Unidos el sistema constructivo consiste en llenar completamente los huecos de todas las piezas. Utilizan un mortero con elevada fluidez y refuerzan con altas cuantías de acero horizontal y verticalmente creando prácticamente un muro monolítico con lo cual se obtiene un incremento en la resistencia y un comportamiento más dúctil con respecto a la mampostería no reforzada y confinada.

Muros Diafragma.

El caso de los muros diafragma que se ligan a la estructura principal (rellenando crujías en marcos de acero o concreto), merece una atención especial ya que incrementan la rigidez de la misma alterando la distribución de fuerzas entre los distintos elementos resistentes. Su distribución asimétrica en planta es muy desfavorable. La evidencia de su comportamiento durante sismos pasados son fallas y agrietamientos de estos muros por no considerarse como elementos estructurales en el diseño, generando una incompatibilidad entre la flexibilidad de la estructura principal y la propia de la mampostería.

Cabe mencionar una situación que frecuentemente ha causado daños en sismos severos, y se refiere a la situación en que un muro diafragma llene parcialmente la altura del tablero del marco (Figura 6). En este caso,

la parte superior de la columna queda sujeta a una fuerza cortante muy elevada ya que la gran rigidez proporcionada al tablero por el muro atrae una fuerza sísmica importante. La relación altura a peralte de la columna corta propicia una falla por cortante de naturaleza frágil especialmente cuando no se proporciona suficiente refuerzo transversal.

Muros no Estructurales.

Los daños por sismo identificados en elementos no estructurales indican que en algunos casos se descuidaron aspectos fundamentales del diseño. Cabe recordar que un correcto diseño sismorresistente deberá evitar el daño no estructural causado por sismos moderados que puedan presentarse durante la vida útil de la construcción. Para ello, se deben tener presentes las siguientes consideraciones:

- a) Que la estructura principal posea suficiente rigidez lateral de manera que sus desplazamientos laterales estén dentro de los límites permisibles marcados por el Reglamento.
- b) Revisar las fuerzas de inercia inducidas en los elementos no estructurales debido a su propia masa y que pueden causar su falla o volteo local (Figura 7).
- c) Proveer de las holguras y detalles necesarios para que los elementos no estructurales se comporten realmente en la forma supuesta en el diseño (Figura 8).

Generalmente se cuenta con dos opciones para la protección sísmica de elementos no estructurales de mampostería:

Una consiste en desligarlos de la estructura principal de manera que las deformaciones de ésta no les afecten previendo para ello detalles que aseguren su estabilidad.

La otra consiste en ligarlos de la estructura, pero limitando los desplazamientos de ésta a valores que no produzcan daños en estos elementos. El hecho de ligar los muros implica necesariamente considerarlos en el diseño como elementos estructurales y revisar que su presencia no afecte el comportamiento de la estructura al interactuar con ella. Además de revisar que los esfuerzos que se inducen en la mampostería no excedan a su resistencia.

Finalmente, también se han identificado otros factores que contribuyeron a que estructuras de mampostería principalmente en viviendas hayan mostrado un mal comportamiento sísmico, como son hundimientos diferenciales previos a sismos, escasez de muros en alguna dirección y distribución asimétrica de los mismos.

IV. DISEÑO

Las recomendaciones para el diseño estructural de la mampostería han sido tradicionalmente muy someras, basadas en procedimientos muy burdos de revisión de esfuerzos y en el empleo de factores de seguridad muy altos. Como se mencionó en un principio, los extensos estudios sobre las propiedades mecánicas y el comportamiento estructural de la mampostería, han permitido elaborar normas de diseño más completas. Un ejemplo de ello son las últimas dos versiones de las Normas para Mampostería del Reglamento de Construcciones para el D.F. En el caso de las Normas de Mampostería de 1976, éstas marcaron un cambio radical con respecto a la práctica de diseño anterior. Se presentan en un formato de diseño moderno y racional basado en las propiedades mecánicas del material y en resultados experimentales así como en la evidencia del comportamiento de estructuras reales. Además, esas Normas sirvieron de modelo para la elaboración de recomendaciones y de reglamentos sobre mampostería de otros países.

Durante los sismos de 1985, se obtuvieron registros de movimientos del terreno con aceleraciones mayores a las previstas por el Reglamento en vigor (RDF-76) . Esto condujo, a que en la última versión de 1987, se incrementaran los coeficientes sísmicos y se modificaran otros factores que inciden en la resistencia estructural. Como consecuencia, ahora se debe cumplir con disposiciones más estrictas de resistencia sísmica para las zonas de lago y de transición. Lo anterior no afectará sensiblemente los proyectos usuales para viviendas de uno o dos pisos que tengan cantidades suficientes de muros en ambas direcciones. Sin embargo, para edificios de mediana altura (de 4 o más niveles) lo anterior hace necesario introducir en los proyectos tipo de vivienda multifamiliar, modificaciones sustanciales que incrementen su capacidad sísmica ante las exigencias de la nueva Normativa.

A continuación se exponen brevemente los principales aspectos Reglamentarios propuestos por las Normas de Mampostería del Reglamento de Construcciones en vigor. Cabe mencionar que el procedimiento de diseño prescrito está basado en un formato de diseño por resistencia o de estados límite, que es el adoptado en general por el Reglamento. Además, se imponen requisitos geométricos y de refuerzo y se requiere una revisión de la seguridad ante los distintos estados límite.

Para determinar los esfuerzos básicos resistentes de la mampostería como son su resistencia al corte y a la compresión, se establecen procedimientos de ensaye relativamente simples (Figura 9) y se proporcionan además los valores específicos para los materiales de empleo más común. Los esfuerzos propuestos representan valores mínimos probables del esfuerzo de falla.

Para el análisis por cargas verticales se pide que la estructura cumpla con ciertos requisitos para evitar la aparición de momentos flexionantes importantes o efectos de esbeltez significativos (ver inciso 4.1.2 de la Ref. 1).

Para el cálculo de la carga vertical resistente se utiliza la expresión

$$PR = FR FE fm^*AT \quad \dots (1)$$

En donde

FR = 0.6 para muros confinados o reforzados de acuerdo con 3.3 ó 3.4 de la Ref (1)

FR = 0.3 para muros no reforzados

fm* = Esfuerzo de diseño en compresión de la mampostería

FE = Factor de reducción por excentricidad y esbeltez

AT = Area de la sección transversal del muro

Para los muros reforzados verticalmente y que cumplan con los requisitos especificados en las secciones 3.4 y 4.2.4 de las Normas para mampostería (Ref. 1), se pueden aplicar las hipótesis a flexocompresión adoptadas para elementos de concreto reforzado y con ello, incrementar sustancialmente su capacidad de carga vertical.

Para el análisis por cargas laterales, es recomendable que la estructuración de muros de carga de mampostería, cumpla con los requisitos del inciso 4.1.3 de las Normas de Mampostería (Ref. 1) para que sea aplicable el Método Simplificado de análisis sísmico. Con esto se podrá verificar además, el diseño realizado con los análisis elásticos, estáticos o dinámicos resueltos con programas de cómputo.

A grandes rasgos, el método simplificado que se describe con más detalle en el inciso siguiente, solicita la revisión de la capacidad a cortante de los muros ignorando los efectos de torsión y de los momentos de volteo. Para ello, se considera que la fuerza cortante que toma cada muro es proporcional a su área transversal. Dos de las hipótesis que se hacen en este método han sido consideradas particularmente debatibles: la de que la distribución de esfuerzos cortantes entre todos los muros es uniforme y la de que se puedan ignorar los efectos de flexión. Por ello se ha recomendado el uso de modelos más refinados que tomen en cuenta las diferentes rigideces relativas de los muros considerando sus deformaciones de flexión y de cortante, así como el acoplamiento que proporcionan los sistemas de piso y los pretilas y dinteles de fachada. Existe sin embargo, la opinión generalizada de que los edificios de este tipo diseñados con el método simplificado han tenido un desempeño adecuado ante efectos sísmicos, lo que hace dudar de la necesidad de recurrir a procedimientos más refinados.

Según el Reglamento, la resistencia a cargas laterales de un muro deberá revisarse para el efecto de la fuerza cortante, del momento flexionante en su plano y eventualmente por momentos flexionantes debidos a empujes normales a su plano.

La fuerza cortante resistente se determina mediante la ecuación 3.a o 3.b según sea aplicable.

$$V_m = F_R (0.85 v^* A_T) \text{ para muros diafragma} \quad \dots (3.a)$$

$$V_m = F_R (0.5v^* A_T + 0.3P) < 1.5F_R v^* A_T \text{ para otros muros} \quad \dots (3.b)$$

En términos de esfuerzo: $v_m = F_R(0.5v^* + 0.3\sigma) < 1.5F_R v^*$

En donde:

$F_R = 0.7$ para muros confinados, con refuerzo interior, o diafragma.

$F_R = 0.4$ para muros no confinados ni reforzados.

v^* = Esfuerzo cortante medio de diseño

P = Carga vertical que actúa sobre el muro

Nota: Cuando se coloque refuerzo horizontal en muros confinados o reforzados interiormente cumpliendo con las cuantías mínimas especificadas para cada caso, podrá incrementarse en un 25% la fuerza cortante resistente calculada con la ecuación 3.a o 3.b.

Para revisar la resistencia a flexión o flexocompresión en el plano del muro debido a las cargas laterales se pueden utilizar las expresiones (4) y (5a y b) que están respaldadas por resultados experimentales que han demostrado a partir de algunas hipótesis simplificativas, que el criterio para el cálculo a la capacidad en flexocompresión de elementos de concreto reforzado es válido para la mampostería.

Para flexión simple el M_R se calcula como:

$$M_O = F_R A_s f_y d' \quad \dots (4)$$

En donde:

A_s = área del acero colocado en el extremo del muro

d' = distancia entre los centroides del acero colocado en ambos extremos del muro

Si hubiera carga axial sobre el muro, el momento se calculará de acuerdo con la ecuación :

$$M_R = M_O + 0.3P_U d; \text{ si } P_U < P_R/3 \quad \dots (5.a)$$

o con la ecuación:

$$M_R = (1.5M_O + 0.15P_U d)(1 - P_U/P_R) \text{ si } P_U > P_R/3 \quad \dots (5.b)$$

En donde:

P_U = carga axial total sobre el muro

d = peralte efectivo del refuerzo de tensión

P_R = resistencia a la compresión axial calculada según la Ec. (1)

$F_R = 0.8$ si $P_U < P_R/3$

$F_R = 0.6$ en caso contrario

V. METODOS DE ANALISIS

El análisis riguroso de estructuras a base de muros de mampostería ante cargas laterales y verticales es complejo por tratarse de arreglos tridimensionales que no se prestan fácilmente a la subdivisión en marcos bidimensionales. Además, la heterogeneidad en las propiedades mecánicas de los materiales componentes y su elevada anisotropía, obligan al empleo de simplificaciones que permitan modelar con las herramientas de cómputo actualmente disponibles este tipo de estructuras de una manera confiable.

A continuación se explican con más detalle los métodos de análisis sísmico comúnmente adoptados en estructuras de mampostería.

V.1. METODO SIMPLIFICADO

Si se asume que en una construcción de mampostería cada muro de cada nivel toma una fracción de la fuerza lateral y que es proporcional a su área, el esfuerzo cortante medio será el mismo en todos los muros de un nivel dado. Esta suposición da lugar al empleo del llamado método simplificado de diseño sísmico, en el que basta dividir la fuerza cortante en cada entrepiso entre la suma de las áreas transversales de muros en la dirección considerada, para obtener un esfuerzo medio que se compara con un valor admisible o resistente. Como se explicó en el punto anterior, para que sea aplicable el método, la estructura deberá cumplir con los requisitos señalados en las normas para mampostería y para diseño por sismo del Reglamento de Construcciones en vigor (RDF-87), que se refieren en general, a que la altura de la construcción no rebase los 13m, que sea simétrica, con forma regular y no muy esbelta. Además se solicita que tenga losas de concreto monolíticas y ligadas a los muros mediante dadas y castillos.

De esta manera, el método asume que la fuerza cortante resistente de un entrepiso cualquiera se puede determinar como:

$$V_R = (\Sigma A_m) v_m \quad \dots(6)$$

En donde:

ΣA_m = Suma de áreas transversales de los muros en la dirección considerada

v_m = Esfuerzo resistente al cortante de la mampostería obtenido con la expresión (3.b)

Para tomar en cuenta la menor rigidez de los muros cortos, en los que la relación de esbeltez H/L sea mayor que 1.33, deberán reducir su resistencia al corte al multiplicar su capacidad por el factor F_i definido en la Ec. 7:

$$F_i = (1.33 L/H)^2 < 1 \quad \dots (7)$$

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

$$V_A = F_c F_n C_s W_T \quad \dots (8)$$

En donde:

F_c es el factor de carga correspondiente.

F_n es un factor correctivo por la altura del piso considerado y que vale uno 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.

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 (Tabla 1).

Finalmente, W_T es el peso total del edificio.

Tabla 1. Coeficientes sísmicos reducidos para el Método Simplificado correspondientes a estructuras del grupo B.

Zona	Muros de piezas macizas o diafragmas de madera contrachapada			Muros de piezas huecas o diafragmas de duelas de madera		
	H < 4m	4m < H < 7m	7m < H < 13m	H < 4m	4m < H < 7m	7m < H < 13m
I	0.07	0.08	0.08	0.10	0.11	0.11
II y III	0.13	0.16	0.19	0.15	0.19	0.23

Nota: Para estructuras del grupo A, estos coeficientes deberán multiplicarse por 1.5

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 que:

$$W_T = nwA_p \quad \dots (9)$$

en que A_p es el área en planta del edificio, w es la carga uniforme por unidad de área y n 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:

$$F_n = \frac{(n+j)(n-j+1)}{n(n+1)} \quad \dots (10)$$

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

Con este procedimiento la resistencia sísmica de un edificio de muros de carga es directamente proporcional al área total de muros. Por tanto, ya que la fuerza cortante sísmica depende de la masa del edificio y esta es, en general, proporcional al área total en planta de la construcción, puede definirse un índice de la seguridad ante efectos sísmicos de una construcción en un sitio dado, como la relación entre el área transversal efectiva de muros, en la dirección en que ésta es mínima, y el área total en planta de la construcción, es decir:

$$d = \frac{\Sigma F A_m}{A_p} \quad \dots (11)$$

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

$$V_A = F_c C_s n w A_p = V_R = F_R v_M \Sigma F A_m \quad \dots (12)$$

de donde se obtiene que:

$$d = \frac{\Sigma F A_m}{A_p} = \frac{F_c n C_s w}{F_R v_M} \quad \dots (13)$$

Este índice adimensional llamado densidad de muros, es de fácil determinación y proporciona una medida de la resistencia sísmica necesaria para el edificio. Además, se ha encontrado que tiene una excelente correlación con el nivel de daño observado en construcciones de este tipo sometidas a sismos severos.

Estrictamente el método simplificado solo debería emplearse en construcciones donde sean despreciables las deformaciones por flexión (edificaciones de uno o dos niveles con relaciones de aspecto muy bajas en muros). Sin embargo en la práctica, diversos reglamentos permiten su uso aun en edificios de mediana altura en que no son despreciables tales deformaciones. La aplicación a estos casos en que teóricamente no es aplicable, se deriva probablemente de la observación de que el nivel de daño ante sismos intensos sigue siendo aproximadamente proporcional al índice de densidad de muros, aun en edificios de mediana altura. Sin embargo se considera conveniente que para edificaciones de más de dos niveles se recurra a procedimientos más refinados de análisis que el método simplificado. Con respecto al índice de densidad de muros, su empleo debe limitarse a evaluaciones generales de seguridad de edificaciones existentes.

V.2. METODOS REFINADOS DE ANALISIS

La aplicación de métodos más refinados como el estático o dinámico modal con técnicas de espectro de respuesta, se justifican ampliamente en edificios tipo de conjuntos habitacionales por su carácter repetitivo, pero se enfrentan a complicaciones en el modelado correcto de la estructura principalmente por la irregularidad de la distribución de los muros en planta, lo que no permite definir ejes y dificulta la subdivisión en marcos.

Una representación suficientemente precisa se logra mediante marcos equivalentes en que los muros se idealizan como columnas anchas, que son columnas equivalentes ubicadas en el centro de los muros cuyas propiedades de inercia y área de cortante reproducen las deformaciones de flexión y de cortante del muro. También se recomienda tomar en cuenta la participación de muros transversales en el incremento del momento de inercia (Ref. 8). Para ello se propone considerar un ancho efectivo de los muros transversales como patín del muro longitudinal con el que se intersectan.

El acoplamiento entre los muros se reproduce mediante vigas equivalentes, que tienen una rigidez a la flexión infinita en el tramo que queda dentro de la longitud del muro y el momento de inercia de la viga y losa en cierto ancho equivalente en los tramos entre muros. Se debe tomar en cuenta la contribución de pretilos y dinteles a la rigidez de la viga equivalente. En la Figura 10 se presentan los criterios para las propiedades de la viga equivalente. En la Figura 11 se muestra un ejemplo de un marco equivalente para la fachada de un edificio típico.

Mediante la utilización de programas de cómputo actualmente disponibles (como el ETABS), es posible resolver con cierta facilidad modelos refinados que consideren estos aspectos. En el caso de edificios desplantados en zonas de 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 inferior ficticio, cuyas columnas reproducen la rigidez a traslación y rotación del conjunto suelo-cimentación calculadas con base en los métodos de las normas de diseño por sismo del RDF-87. Los resultados de análisis de este tipo han sido comparados con aquellos obtenidos experimentalmente de pruebas de vibración ambiental y con la evidencia real de comportamiento ante sismos moderados. Los resultados son en general, satisfactorios.

En el caso de muros de mampostería que actúan como diafragmas de marcos de concreto o acero, se ha encontrado que bastan cargas laterales relativamente pequeñas para que el muro se separe del marco en esquinas opuestas y quede en contacto en las otras dos esquinas produciendo un efecto de puntal (Figura 12). Para el cálculo de la rigidez lateral, la idealización más común es simular el muro como una diagonal equivalente de compresión. Estudios analíticos de elementos finitos que toman en cuenta la separación entre marco y muro (Ref. 5) recomiendan que se considere una diagonal equivalente del mismo espesor y módulo de elasticidad del muro y cuyo ancho sea igual a:

$$w_o = (0.35 + 0.022\lambda)h \quad \dots(14)$$

En esta expresión h es la altura del tablero entre ejes y λ mide la rigidez relativa de marco y muro en la forma:

$$\lambda = (E_c A_c) / (G_m A_m) \quad \dots(15)$$

En donde E_c y A_c son el módulo de elasticidad y el área transversal de la columna del marco respectivamente y G_m y A_m son el módulo de rigidez al cortante y el área transversal del muro respectivamente.

VI. COMENTARIOS FINALES

Sobre los Métodos de Análisis.

El hecho de que el método simplificado permita ignorar los efectos de flexión en los muros, implica que pueden reforzarse los castillos con el acero mínimo aun para edificios de hasta 13 metros que es la máxima altura que se permite para emplear dicho método. Por ello es recomendable que al diseñar con el método simplificado edificios de más de dos pisos se revise la resistencia a flexión de los muros con alguna consideración práctica. Para muros con poco o nulo acoplamiento como los mostrados en la Figura 13, se tiene que prácticamente no existe restricción al giro por parte del sistema de piso. En estos casos conviene calcular el momento producido en la base de los muros como el producto de las fuerzas laterales obtenidas en cada nivel según el método simplificado por su brazo con respecto a la sección considerada, es decir considerando el muro como cantiléver. Para muros que tengan un acoplamiento significativo por ejemplo por la presencia de pretilas en que la restricción al giro en cada piso es elevada, puede considerarse un momento flexionante igual a la fuerza cortante actuando en el entrepiso en cuestión multiplicada por la altura del entrepiso. La fuerza cortante en cada muro es igual al esfuerzo promedio actuante según el método simplificado multiplicado por el área transversal del muro.

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, tipo de mampostería y altura del edificio. En un análisis dinámico espectral las fuerzas sísmicas se determinan en función de los períodos de vibración del edificio. Para el caso de edificios en que se considera su base empotrada, la alta rigidez de la estructura da lugar a períodos muy bajos que se traducen en ordenadas espectrales pequeñas, de aquí que las fuerzas sísmicas resulten claramente menores a las correspondientes del método simplificado. Sin embargo, para estructuras de mampostería con cimentaciones desplantadas sobre terreno blando, los períodos de vibración aumentan significativamente por efectos de interacción suelo-estructura (traslación y rotación de la base) llevando al edificio a una región del espectro de diseño donde las ordenadas son mayores. Lo anterior sugiere no perder de vista estas consideraciones cuando se realicen análisis sísmicos con mayores refinamientos que el método simplificado.

Sobre las propiedades mecánicas de las piezas para mampostería.

Los resultados de un estudio concerniente a estos aspectos (Ref. 9) indican que la gran diferencia en resistencia de productos de una misma denominación comercial, se debe a que no se sigue una misma especificación que fije límites para la resistencia. En los productos de fabricación artesanal, la gran variabilidad de uno a otro productor depende principalmente de la diversidad de las materias primas y de las dosificaciones de las mismas, así como de los distintos procedimientos que cada artesano emplea en el proceso de fabricación. La variabilidad en propiedades estructurales implica la necesidad de tomar factores de seguridad. En el formato de diseño generalmente adoptado, que es el de estados límite, se adoptan factores de seguridad parciales que afectan distintas variables. Se aplican factores de carga a los efectos de las acciones y factores de reducción a la resistencia calculada, que a la vez se determina empleando para las propiedades más importantes valores *característicos o mínimos probables* que pretenden cubrir parcialmente la dispersión que se tiene en la variable particular. Lo anterior sugiere la implantación de una normativa en cuanto a propiedades mecánicas para la producción industrial y principalmente para la artesanal encaminada a uniformizar la elevada variación en resistencia de piezas para mampostería.

Sobre la seguridad sísmica y supervisión.

El buen comportamiento sísmico de una construcción de mampostería depende en forma muy importante de la elección de una estructuración correcta, de la observancia de requisitos de detalle y de diseño local y de una buena ejecución de la construcción. Las recomendaciones al respecto están en general bien establecidas en los reglamentos. La regularidad y simetría de la distribución de muros en planta y en elevación, la liga y continuidad del refuerzo entre muros transversales y de los muros con las losas de piso y la cimentación; la adopción de sistemas de piso que tengan rigidez y resistencia para fuerzas en su plano de manera que actúen como diafragma; el refuerzo local alrededor de los huecos y, sobre todo, la correcta colocación del refuerzo horizontal y vertical necesario según

los cálculos, son los aspectos que más deben cuidarse.

A pesar de que han sido plenamente identificables los aspectos que hacen que una estructura sea más o menos vulnerable ante los efectos sísmicos, no se debe olvidar que siguen existiendo en México un elevado número de viviendas (principalmente de mampostería) pertenecientes al llamado sector informal. Un alto porcentaje de esta construcción tradicional de vivienda, adolece en la mayoría de los casos de una normativa de construcción y del acceso a técnicos calificados para el proyecto y supervisión de la misma. Esto ha dado lugar a serias condiciones de riesgo entre otros aspectos por el uso de materiales de calidad muy pobre, tipos de construcción muy vulnerables y calidad de ejecución defectuosa. Debe reconocerse por tanto, la importancia de una participación interdisciplinaria y en nuestro caso técnica, para dar solución al problema que se refiere a los asentamientos humanos que crecen al margen de los planes urbanos de desarrollo.

Por otra parte, está muy difundida en el medio de los ingenieros estructurales una desconfianza hacia el uso de la mampostería reforzada por la *dificultad de una supervisión* que garantice el cumplimiento de la correcta colocación del refuerzo. Abundan de hecho los casos encontrados a raíz de los daños ocasionados por temblores intensos, en que el refuerzo colocado realmente en los muros era muy inferior al especificado. Los edificios de vivienda de mampostería no están sujetos con frecuencia al grado de rigor en la supervisión que es usual en obras que se consideran más importantes. Esto, aunado a la dificultad que representa seguir paso a paso la construcción de cada muro para verificar la correcta colocación del refuerzo, justifica en parte dicha desconfianza.

Sin embargo, la selección de empresas y obreros calificados y el muestreo de porciones de muro puede superar estas dificultades y garantizar el nivel de calidad deseado. Es claro que con modificaciones sencillas a la práctica actual en cuanto al tipo de piezas empleadas y tipo y cantidad de refuerzo, pueden alcanzarse resistencias y comportamiento mucho más favorables que los que ahora se tienen. No debe olvidarse sin embargo que ello llevará necesariamente a hacer más agudos los problemas de supervisión y control de calidad antes mencionados.

VII. BIBLIOGRAFIA

1. Departamento del Distrito Federal, "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería", Gaceta Oficial del Departamento del D.F., marzo de 1989, 19 pp.
2. Departamento del Distrito Federal, "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal", Gaceta Oficial del Departamento del D.F., julio de 1987, 100 pp.
3. Departamento del Distrito Federal, "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo", Gaceta Oficial del Departamento del D.F., noviembre de 1987, 21pp.
4. J.D. Dowrick, "Earthquake Resistant Design. A Manual for Engineers and Architects", J. Wiley, New York, 1977.
5. E. Bazán y R. Meli, "Manual de Diseño Sísmico de Edificios de Acuerdo con el Reglamento de Construcciones del D. F.", México, D. F., 1985, 241pp.
6. Hernández, O., "Comportamiento y Diseño de Elementos de Mampostería", XIV Curso Internacional de Ingeniería Sísmica. División de Educación Continua, UNAM, agosto de 1988, 47 pp.
7. Meli, R., "Diseño Sísmico de Edificios de Muros de Mampostería. La Práctica Actual y el Comportamiento Observado", Revista Ingeniería Sísmica, México D.F., septiembre-diciembre de 1990, pp. 7-28.
8. Instituto de Ingeniería, "Comentarios y Ejemplos de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería" Serie No. ES-4, UNAM, México D.F., Enero de 1992, 119 pp.
9. Meli, R. y O. Hernández, B., "Propiedades de Piezas para Mampostería Producidas en el Distrito Federal", Publicación #297 del Instituto de Ingeniería de la UNAM. México, D. F., diciembre de 1977. 46 pp.

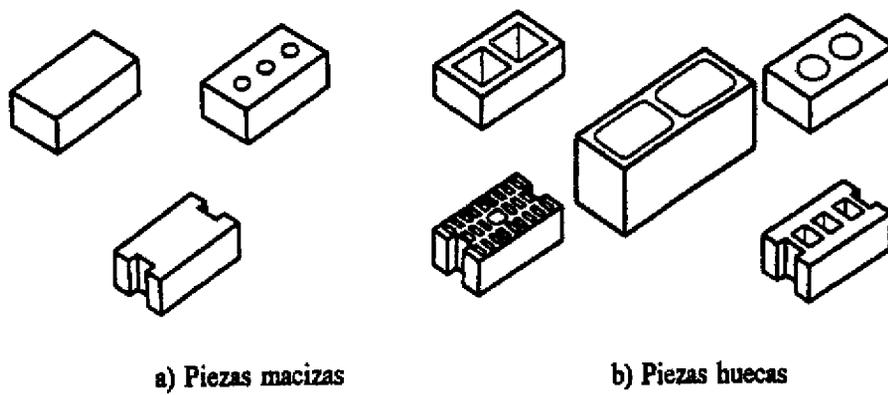


Figura 1. Tipos comunes de piezas de mampostería

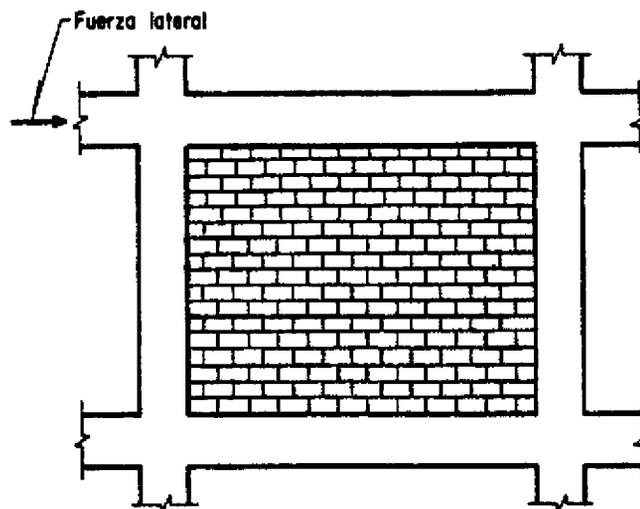
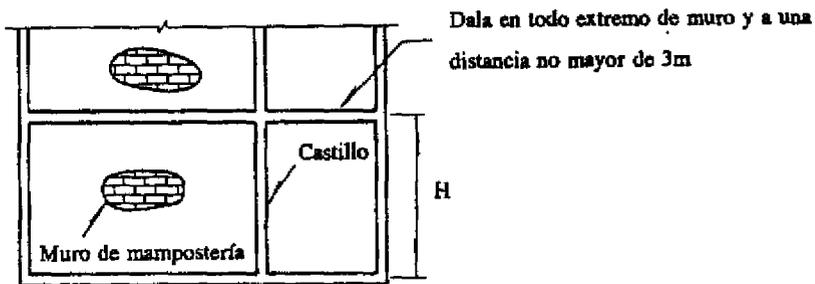
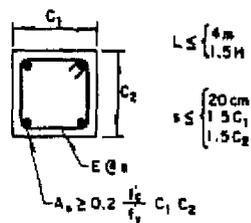


Figura 2. Muro diafragma

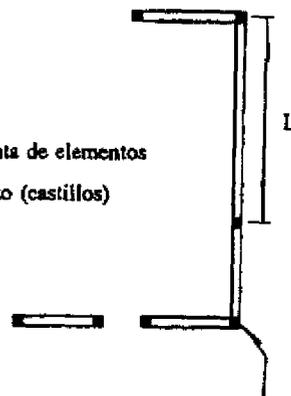


Distribución en elevación de elementos de confinamiento verticales (castillos) y horizontales (dalas)



Criterios de refuerzo según RDF-87

Distribución en planta de elementos verticales de refuerzo (castillos)



Castillos en toda intersección y extremo de muros y a una separación no mayor que L

Figura 3. Características de la mampostería confinada

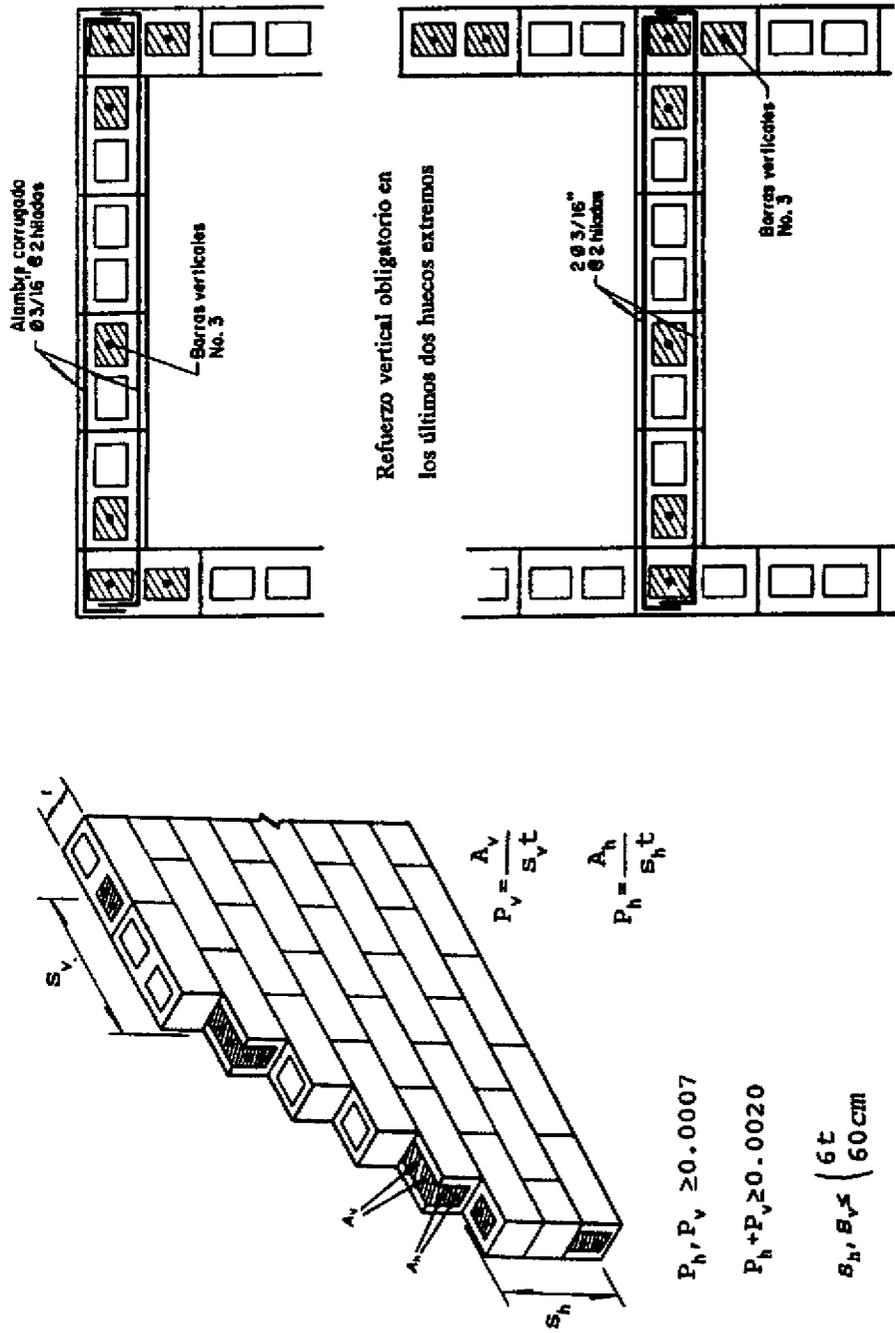


Figura 4. Características de la mampostería con refuerzo interior



Figura 5. Mampostería de adobe sin refuerzo

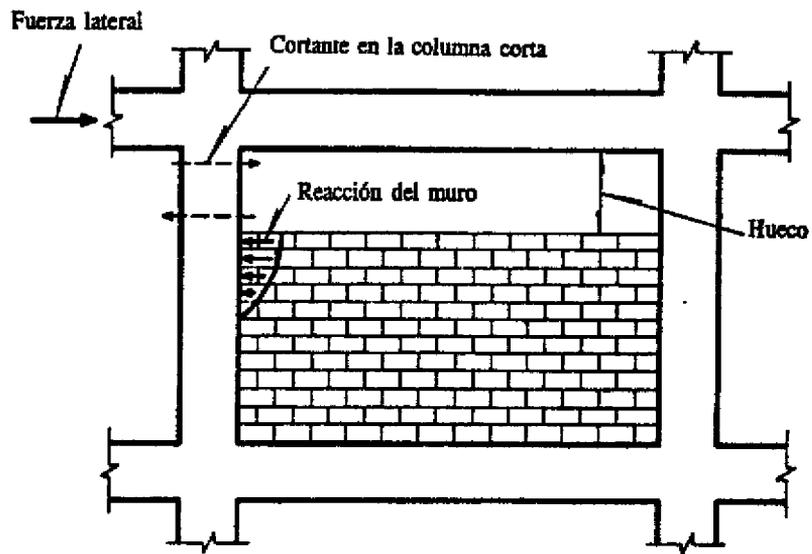


Figura 6. Efecto de columna corta en muro diafragma de altura incompleta (Ref. 8)

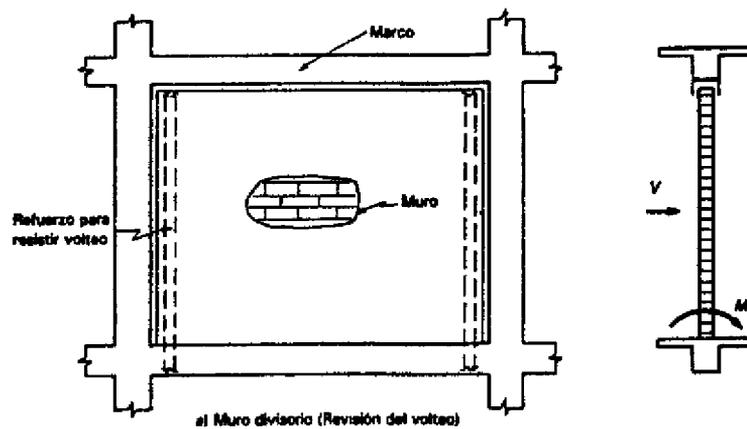


Figura 7. Revisión del volteo en muro no estructural (Ref. 5)

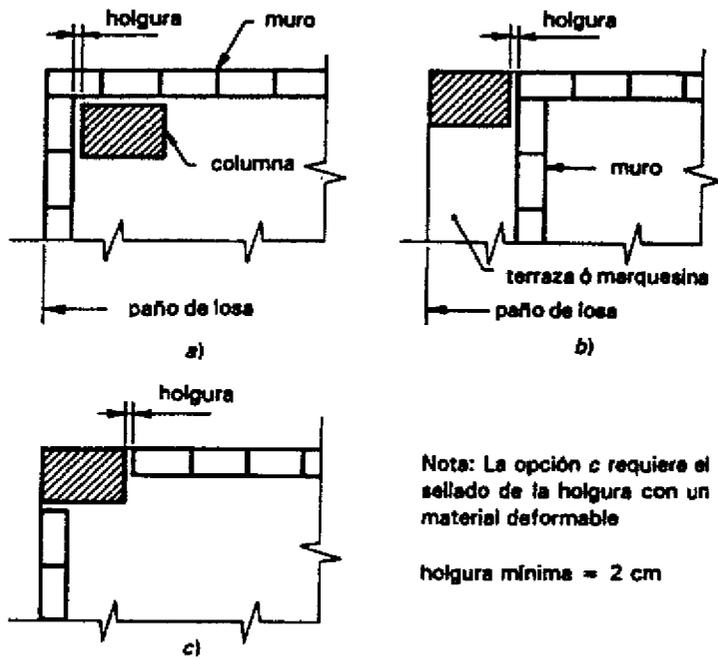


Figura 8. Posibles disposiciones de muros en planta para desligarlos de la estructura (Ref. 5)

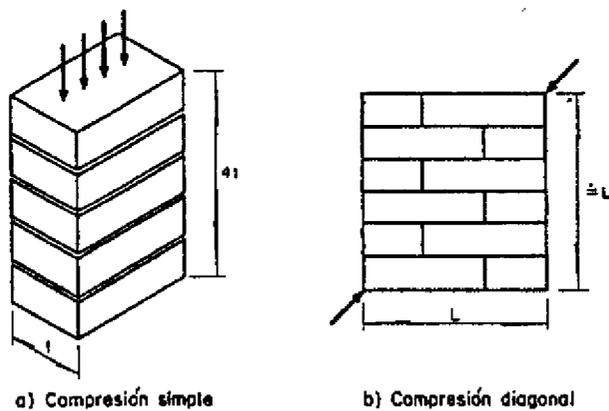
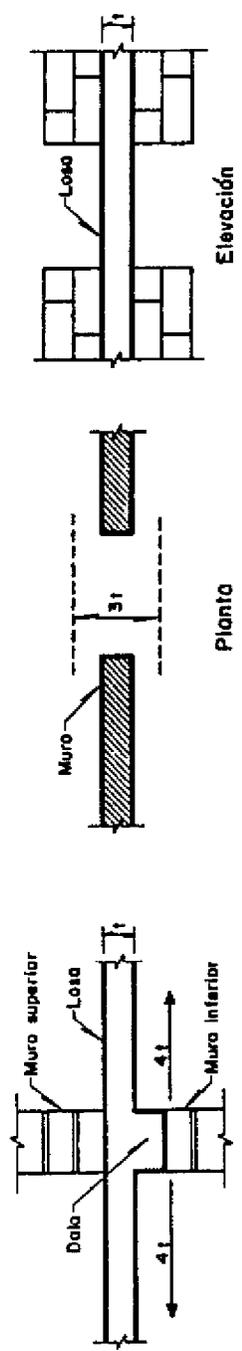
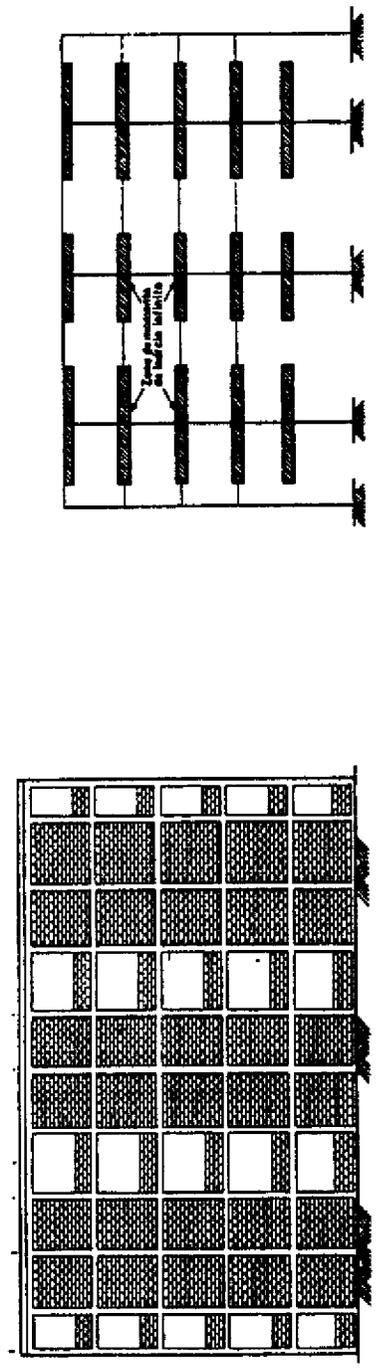


Figura 9. Ensayos para determinación de propiedades mecánicas de la mampostería



a) Losa con dala (o viga) b) Losa sin viga

Figura 10. Ancho efectivo de losa para cálculo de momento de inercia de la viga de acoplamiento



a) Vista del eje A b) Marco equivalente del eje A

Figura 11. Modelo de marco equivalente para el análisis

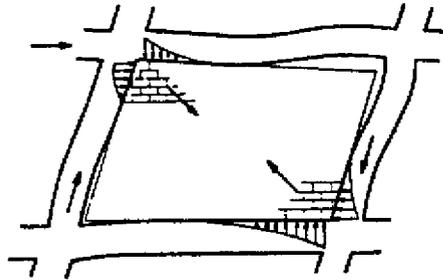


Figura 12. Interacción entre un muro diafragma y el marco que lo rodea

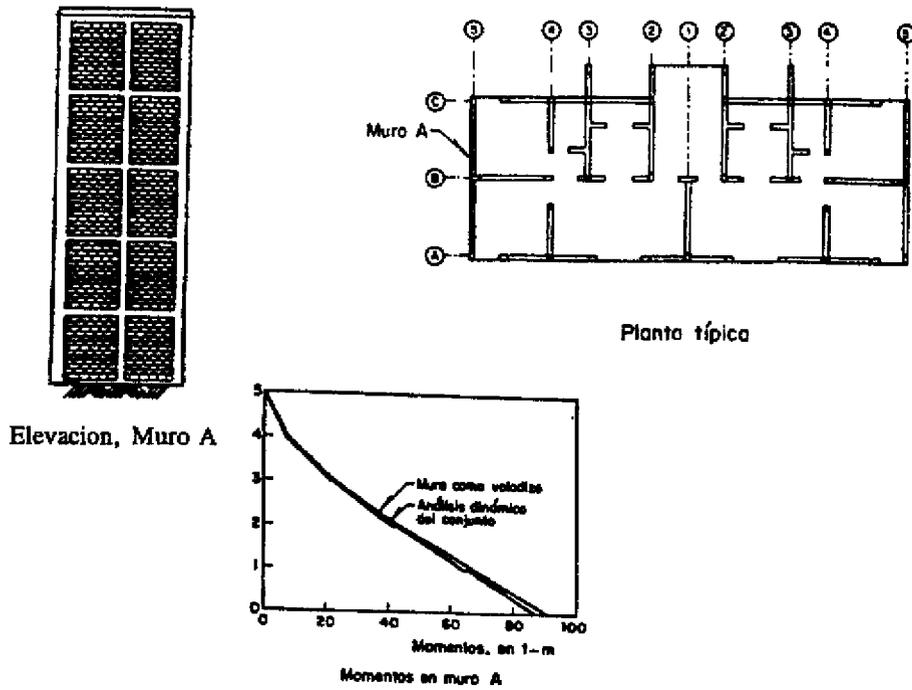


Figura 13. Comportamiento como voladizo de un muro cabecero