

DOCUMENTO C

## **RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO SISMORRESISTENTE DE EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL**

---

**ENRIQUE CASTILLA C.**

(INSTITUTO DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES, IMME,  
FACULTAD DE INGENIERÍA, U.C.V.)

### **NOTA DEL COORDINADOR**

Documento elaborado especialmente para este volumen.

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág</b>
1 INTRODUCCIÓN	335
2 ASPECTOS GENERALES	335
3. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO	339
4. CONCLUSIONES	344

## RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO SISMORRESISTENTE DE EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL

### 1. INTRODUCCIÓN

Gran parte de la región latinoamericana se encuentra ubicada en zonas de amenaza sísmica importante, siendo Venezuela un ejemplo de ello. La población de menores recursos de esta gran región, resuelve mayoritariamente su problema de vivienda, construyéndola con muros portantes de mampostería. Adicionalmente, casi todos los planes gubernamentales de estas localidades, recurren a la mampostería estructural para sus programas de vivienda económica. Muchos de los países involucrados, cuentan con normas y reglamentos para el proyecto de edificaciones de mampostería estructural que facilitan el diseño de viviendas seguras, no siendo Venezuela uno de ellos. Esta particular condición no resulta conveniente, pues se pueden aplicar normas calibradas para otras regiones que desconocen los materiales y las técnicas constructivas locales.

Durante los últimos 15 años, el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la U.C.V., viene recogiendo experiencias analíticas y de laboratorio conducentes a racionalizar el uso de la mampostería estructural en Venezuela. Este uso se concentra principalmente, en la construcción de paredes de mampostería confinada para el soporte de viviendas económicas. Es frecuente la vulnerabilidad de estas edificaciones cuando no cuentan con detalles sismorresistentes, requiriéndose identificar los mecanismos frágiles para precisamente evitarlos. Este trabajo presenta un conjunto de recomendaciones y consideraciones para el diseño de paredes de mampostería estructural como resultado de la experiencia del IMME. Se discuten también algunos conceptos relevantes para el diseño sismorresistente que requieren de ser aplicados aunque no hayan sido estudiados en dicha experiencia.

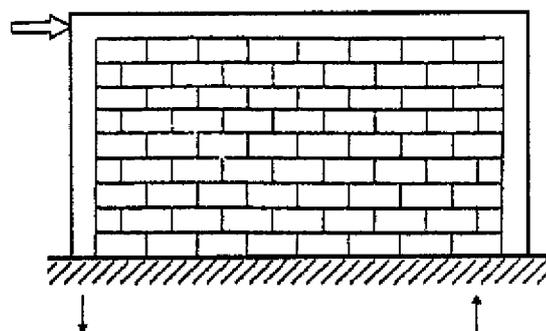
### 2. ASPECTOS GENERALES

Para poder utilizar la mampostería en Venezuela como elemento portante, y en especial con propiedades sismorresistentes, hace falta considerar 2 aspectos importantes: el primero de ellos se presenta con las alternativas de los tipos de elementos a utilizar y el segundo en la confianza con las propiedades mecánicas de los materiales a emplear. La mampostería se viene utilizando para la fabricación de columnas, vigas, paredes o muros, etc., pero la posibilidad de generar elementos estructurales atrevidos y confiables, depende entre otras cosas, del conocimiento y control de los materiales que los componen. De todas las alternativas constructivas, es quizás la mampostería estructural la que más requiere de controles de calidad estrictos y efectivos. Por ahora y para la mampostería, esta es una práctica poco común en Venezuela, lo cual

limita el espectro de elementos y miembros portantes a usar. Los muros o paredes de mampostería estructural son los menos sensibles a esta importante exigencia y por ello se presentan como la única posibilidad de uso con capacidad sismorresistente.

Los muros ofrecen básicamente 2 formas constructivas para armarlos estructuralmente. Una de ellas consiste en levantar las paredes reforzándolas internamente con acero longitudinal y transversal y rellenando los correspondientes alvéolos de los bloques con concreto líquido. A este tipo de mampostería estructural se le conoce como muros de mampostería armados internamente. Los criterios de análisis y diseño de estas paredes no difieren mucho de aquellos utilizados para paredes de concreto armado. La Figura 1 ilustra detalles de esta alternativa estructural.

**Figura 1**



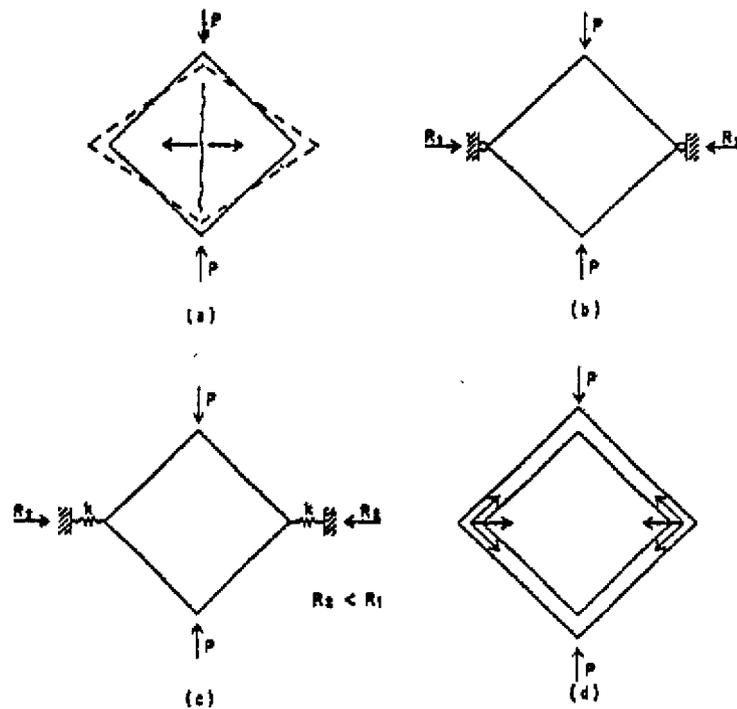
#### **ACCIÓN DE VOLCAMIENTO SOBRE MURO DE MAMPOSTERÍA**

Las paredes rodeadas de elementos menores de concreto armado presentan la segunda forma estructural conocida como muros de mampostería confinada (Figura 1). Conviene recordar por qué el confinamiento de los muros de mampostería mediante elementos menores de concreto armado, propone una alternativa para mejorar su comportamiento.

En primer lugar se garantiza la estabilidad de las paredes cuando se someten a cargas horizontales perpendiculares a sus planos. La mejor prueba de ello está en el uso que se da en muchas partes a las paredes que sirven de lindero entre terrenos y otros. Aunque de esta manera no hay aporte significativo a la resistencia lateral, se consigue evitar el colapso prematuro.

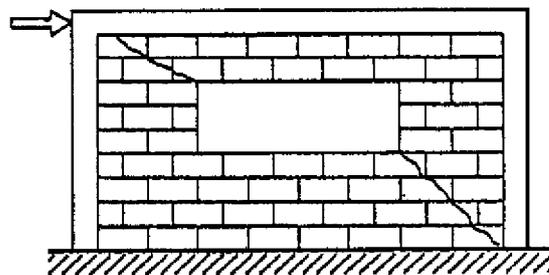
La Figura 3 ilustra claramente otra función fundamental que cumplen los elementos verticales de concreto armado (machones), para resistir el volcamiento por acciones laterales paralelas al plano del muro. Adicionalmente, este mecanismo bien controlado, puede ser una de las formas de obtener ciclos de histéresis estables para disipar energía inelástica al permitir que los aceros longitudinales de tales miembros superen su límite elástico cuando se vean exigidos por las fuertes acciones sísmicas.

Figura 2



### CONFINAMIENTO EN MAMPOSTERÍA

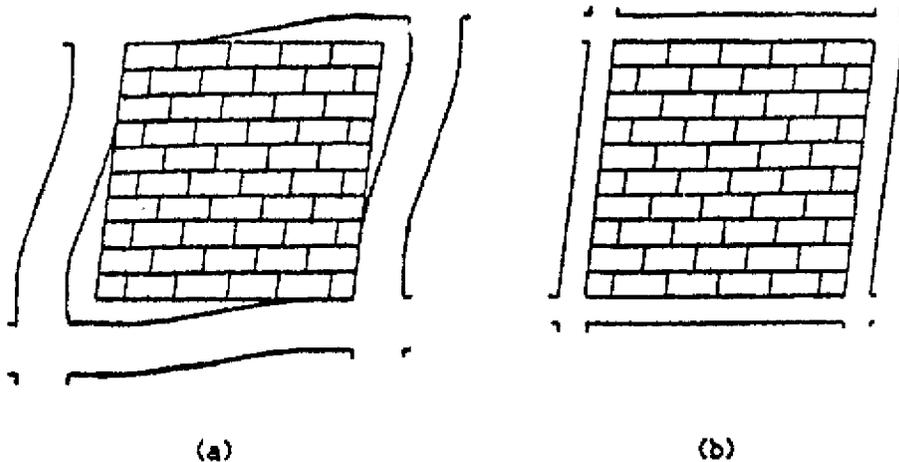
Figura 3



### ABERTURAS EN MAMPOSTERÍA

La más importante de todas las funciones del confinamiento está en retrasar el agotamiento de las paredes cuando sean sometidas a acciones de cargas laterales y gravitacionales simultáneamente. La excesiva debilidad de la mampostería para resistir esfuerzos de tracción se traduce en que si a los muros no se les adecúa, se agrietan dramáticamente consiguiendo rápidamente su ruina. El confinamiento retarda la fisuración diagonal de las paredes, aumenta la resistencia de las mismas y permite mayores niveles de deformación.

Figura 4



A) COMPORTAMIENTO DE LA MAMPOSTERÍA EN ELEMENTOS APORTICADOS.  
 B) COMPORTAMIENTO DE LA MAMPOSTERÍA CONFINADA

La Figura 2 demuestra de una manera sencilla la condición confinante. La aplicación de una fuerza compresora sobre la diagonal del muro de la Figura 2a conlleva a su obligatorio agrietamiento por el alargamiento de la diagonal opuesta. La Figura 2b ilustra la significativa mejora en el comportamiento de la pared por el impedimento del alargamiento de esa diagonal al colocar apoyos simples en los extremos indicados de la misma. Situaciones intermedias de apoyo como los de la Figura 2c son menos eficientes que la anteriormente descrita, aunque sí representan mejoras en el comportamiento global. La inclusión de elementos confinantes como los de la Figura 2d, limita a la pared a deformarse libremente en su plano de tal manera de impedir su agotamiento prematuro.

El muro ofrece resistencia y capacidad de deformación aún estando fisurado diagonalmente. No obstante, este tipo de falla no proporciona mecanismos adecuados para disipar energía inelástica por la fragilidad de los materiales, aunque se debe indicar que la fricción que se genera en las vecindades de las grietas ha demostrado ser una fuente no despreciable de disipación de energía.

La presencia de aberturas como ventanas y otros pone en condición desventajosa a la pared al proporcionar por adelantado una gran grieta (Figura 3). La falta de vaciado con mortero a las juntas verticales de la mampostería también genera un estado de pre-agrietamiento diagonal de los muros. Igualmente, no tomar provisiones para la colocación de los servicios puede ser otra forma de debilitar innecesariamente las paredes estructurales.

Muchos autores consideran que el diseño de los elementos de confinamiento puede proponerse según las exigencias para vigas y/o columnas. De ahí que todavía algunos de ellos llamen incorrectamente vigas a los elementos horizontales confinantes y columnas a los elementos verticales de confinamiento. Lo cierto es que esto tendrá sentido únicamente cuando tales miembros puedan flectar y deformarse como se ilustra en la Figura 4a. Experiencias recientes de laboratorio en muros de mampostería confinada con elementos menores de concreto armado [1], reveló que muros a escala natural bien instrumentados y de diferentes relaciones de aspecto, sometidos a severos ciclos de carga horizontal alternante y carga axial constante, se consiguieron patrones de comportamiento donde las deformadas globales de las paredes ensayadas eran de corte (Figura 4b). Al no poderse flectar estos miembros, no parece razonable proponer detalles de armado similares a los de elementos esbeltos.

La ocurrencia reciente de sismos en el territorio nacional y en la región latinoamericana, demostraron que la inmensa mayoría de los fracasos dados por la mampostería estructural, obedeció más a vulnerabilidades generadas por deficiencias constructivas, que a la mala conducta de la mampostería. No cerrar los lazos de confinamiento, interrumpir arbitrariamente el acero de refuerzo, no anclar debidamente las vigas de corona con los machones, el amarre inadecuado de pisos y techos a los muros y la mala calidad de los materiales, son algunas de las deficiencias que llevaron a daños peligrosos y que desafortunadamente se repetían con mucha frecuencia. Si tan solo se evitaran estos pequeños detalles, se lograría reducir significativamente la amenaza de ruina sobre este tipo de estructura.

### 3. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO

Desafortunadamente en Venezuela no se cuenta con una norma moderna para el diseño y construcción de estructuras de muros de mampostería. La última versión de norma oficial que consideró este tipo estructural corresponde a la norma MOP de 1.955 [2]. Esta particular condición contrasta con la experiencia de los otros países de la región latinoamericana con amenaza sísmica similar, en donde se cuentan con normas y códigos actualizados con atención especial a estructuras para la construcción de viviendas.

En el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la Facultad de Ingeniería de la UCV, se han ensayado 33 muros a escala natural contra ciclos severos de carga lateral alternante y carga axial constante. Los primeros 10 muros se levantaron con bloques de arcilla huecos y se confinaron [1]. Se ensayaron también un total de 13 muros con bloques de concreto, 11 confinados y 2 con refuerzo interior [3]. Recientemente se terminó un programa de ensayos de 10 muros confinados de ladrillos de arcilla macizos. Adicionalmente, se han ejecutado muchos trabajos para determinar las propiedades mecánicas de bloques y muretes de mampostería y se culminó un

proyecto de más de 100 probetas ensayadas para determinar las longitudes de solape de barras de refuerzo en mampostería armada internamente [4]. Todo esto ha traído como resultado una gran experiencia que necesariamente tendrá que llevarse en un futuro a una norma venezolana de muros de mampostería estructural. De momento esta experiencia servirá para formular algunas consideraciones para el diseño de paredes amenazadas por terremotos.

Lo primero que hace falta establecer es la condición de diseño. Muchas normas de la región condicionan el diseño de muros para esfuerzos de trabajo. Una propuesta moderna de norma debería estar orientada hacia el diseño por agotamiento resistente de los materiales, como se tiene contemplado para otras formas estructurales de construcción [5], obviando por lo tanto la vieja alternativa de diseño. Esto traería aspectos extras a considerar como lo son, entre otros, los factores de mayoración de cargas y los coeficientes de minoración de resistencia. Para los primeros no hay razón para que difieran de los ya indicados en [5]. Para los coeficientes de minoración de resistencia se requieren consideraciones extra en donde por supuesto se deben tomar en cuenta la calidad impredecible de la mano de obra y las tolerancias dimensionales y de resistencia. Para la capacidad a flexión de las paredes no se recomienda superar el valor 0.7, mientras que para el cortante este límite estará en 0.5.

Volviendo a retomar la experiencia del IMME, conviene mencionar que para casi todos los casos se ensayaron paredes a escala natural en donde se iban variando sus relaciones de aspecto y la carga axial permanente. Las relaciones de aspecto fueron de alto/largo de aproximadamente 0.75, 1 y 1.25. Las cargas axiales se mantuvieron constantes en cada ensayo según  $0 \leq f \leq 0.25f_m$ , siendo  $f$  el esfuerzo axial promedio aplicado por muro según su área bruta y  $f_m$  la resistencia a compresión promedio obtenida de pilas ensayadas. Para los casos en donde se aplicaron cargas axiales al muro del 25% de su resistencia compresiva, se obtuvieron fallas explosivas en los bloques de las paredes al ser sometidos éstas a cargas laterales severas. Por este motivo no parece razonable superar acciones gravitacionales sobre los muros que superen el 20% de su capacidad axial. En este sentido, la Tabla 1 ilustra una experiencia general del IMME con valores realísticos de  $f_m$  para el tipo de mampostería que pudiera utilizarse en Venezuela. Para morteros de pega con relaciones volumétricas 4:1:1 (partes de arena, cal y cemento respectivamente) para todos los casos se consigue:

TABLA 1

VALORES PROMEDIO DE  $f_m$  PARA VENEZUELA

TIPO DE MAMPOSTERIA	$f_m(k/cm^2)$
Bloques huecos de arcilla	15 a 20
Bloques de concreto estructurales	50 a 80
Bloques de concreto de menor calidad	20 a 30
Ladrillos macizos de arcilla de mejor calidad	150 a 160
Ladrillos macizos de arcilla de menor calidad	80 a 100

Respecto a las relaciones de aspecto y para el caso de la mampostería confinada, esta relación no se debe alejar mucho de la unidad pues se podría desaprovechar la ventaja del confinamiento. La vieja norma del MOP [2] recomendaba no superar el largo de la pared, es decir la distancia entre machón y machón, mas allá de 20 veces el ancho del bloque. La presencia de machones se hace también obligatoria en las esquinas de la edificación, en las intersecciones de muros portantes y en aquellos sitios donde las aberturas en las paredes condicionen el comportamiento adecuado de los muros. Quedó demostrado de los ensayos del IMME, que la capacidad a cortante de los muros dependía fundamentalmente de la calidad de los materiales, de la calidad de su construcción, de la fuerza gravitacional actuante y de la relación de aspecto de la pared, resultando en una expresión sencilla:

$$v'_m = \phi (\alpha \cdot f / f'_m + \beta \cdot e)$$

siendo:

- $v'_m$  : el máximo esfuerzo de cortante para diseño;
- $\phi$  : el factor de minoración de resistencia a corte;
- $\alpha$  : constante que depende del tipo de material utilizado y que se relaciona con la fricción;
- $f$  : el esfuerzo axial al cual se somete la pared;
- $f'_m$  : el esfuerzo máximo de diseño obtenido del ensayo de pilas;
- $\beta$  : constante que depende también del tipo de material;
- $e$  : relación de aspecto de la pared (alto/largo).

Para el caso de paredes confinadas de bloques de arcilla huecos, se encontraron valores de  $\mu$  y de  $\beta$  de 2.72 y 1.44 respectivamente considerando unidades en kg y cm [1]. En la actualidad se están procesando los registros obtenidos de la instrumentación de paredes confinadas de bloques de concreto y de ladrillos de arcilla macizos, a objeto de contar en un futuro cercano con expresiones calibradas.

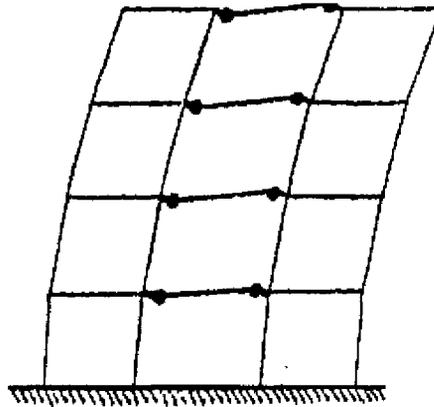
Respecto a los elementos de confinamiento se vuelve a recordar que su diseño debe ser gobernado por las acciones reales sobre tales elementos, es decir, el refuerzo longitudinal debe responder por las tracciones debidas al volcamiento y el refuerzo transversal al cortante impuesto. Experiencias recientes realizadas en el IMME están demostrando que el acero longitudinal de los machones, puede resultar en un excelente disipador de energía inelástica cuando se consigue que estos aceros se doblen por corte en la base de los muros. No obstante, debe limitarse a una deformabilidad lateral permisible a objeto de controlar el daño en las paredes.

Estas mismas condiciones son las que rigen para el caso de muros de mampostería armada internamente, es decir, equilibrio al volcamiento por la tracción fundamental del refuerzo vertical y resistencia al corte por la presencia del armado horizontal, aunque el efecto "jaula" producto del armado tipo malla, se pudiera aprovechar más desde el punto de vista sismorresistente por su comprobado mejor comportamiento. De todas maneras este acero debe estar bien adherido al concreto líquido para que cumpla la función encomendada. Debe obligatoriamente evitarse el confundir este concreto con el mortero de pega, práctica que ocurre con frecuencia.

La posibilidad de permitir reducción de acciones por respuesta no-lineal de los materiales es algo que se reconoce en todas las normas y reglamentos del mundo. Las estructuras hechas con elementos portantes de mampostería pueden beneficiarse de esta condición, aunque se debe ser muy cuidadoso en garantizar que por ello no se activen mecanismos frágiles que atenten contra la seguridad de la edificación, y más especialmente con aquellas muy repetidas que se utilicen para la construcción de viviendas. La mampostería estructural tiene propiedades mecánicas muy dependientes de cada región y por ello el utilizar las propuestas de otros lugares no resulta aplicable como puede ocurrir con otros materiales. La experiencia del IMME ha demostrado que la mampostería nacional no cuenta con ventajas aprovechables en este sentido. Por el contrario, puede ser más apto el establecer requerimientos de estados límites de diseño donde se restrinjan las deformaciones laterales de los entrepisos. En [1] se propone que este límite debe ser para muros de mampostería confinada de bloques huecos de arcilla igual a  $e/700$ , siendo  $e$  la relación de aspecto de la pared. En la actualidad se está estudiando cual debe ser la propuesta para este límite en paredes confinadas de bloques de concreto y de ladrillos macizos de arcilla.

No obstante, existen otras alternativas para disipar energía inelástica de forma estable y en donde se puede obtener un buen control de los daños. Resulta interesante estimular el uso de vigas dintel entre muros portantes (Figura 5). Todos estos miembros pueden ser diseñados y detallados para permitir daños localizados; habría que vigilar que los dinteles no generen buen acoplamiento entre muros, pues generaría en ellos cortes muy altos que contribuirían a su rápida degradación, impidiendo que cumplan la función para lo que se les diseñó.

Figura 5



### DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR VIGAS-DINTEL

Quizás una de las mayores complicaciones en el diseño de las paredes se centra en la predicción de acciones sobre las mismas cuando son sometidas a sismos severos. La distribución de cargas aplicadas requiere de consideraciones especiales para modelar los muros, en donde las deformaciones por corte son prioritarias y en donde debe ser contemplada la interacción con las vigas dentro y fuera del plano de los muros.

Existen muchas propuestas que relacionan el área de la planta de una edificación con el área de muros requerida. En recientes evaluaciones de construcciones reales de mampostería sometidas a terremotos, se encontró que la relación área de muros contra área total de plantas que superó el 2% demostró muy buenos resultados. No obstante, muchas recomendaciones recientes proponen que esta relación no debe ser menor del 0.5% [6]. Cualquiera que sea esta relación, ninguna buena experiencia se obtendría sino se construyeran los pisos de tal forma que actuaran como diafragmas rígidos que conectarán adecuadamente todos los elementos verticales portantes. Dado que en muchos casos los muros más competentes se ubican en la periferia de la edificación, el mejor aprovechamiento de éstos se consigue garantizando que los pisos los acoplen eficientemente al resto de la estructura.

Para este tipo de estructuras, la relación de rigideces entre las 2 direcciones principales de una edificación no debe ser muy alejada de la unidad. Debido a que la rigidez del piso básicamente está controlada por la rigidez a corte de los muros, esta relación puede fácilmente obtenerse con la comparación de las áreas respectivas. Para el caso de muros de igual espesor, esta comparación se puede hacer directamente con la suma de sus longitudes.

Es necesario seguir insistiendo en las implicaciones que tiene la colocación de los servicios (luz, agua, teléfono, etc.) y su interacción con las paredes portantes. Modificar y/o romper las paredes para incluir los servicios puede debilitar inconvenientemente su función estructural. Resulta muy recomen-

dable concentrar estos accidentes en paredes no estructurales, para lo cual se obligaría a reunir todos los servicios adecuadamente alrededor de ellas. Esto implicaría nuevas estrategias de diseño arquitectónico a las cuales habría que adaptarse.

Definitivamente debe discutirse que no se podrá permitir estructuras de mampostería portante donde los muros no lleguen a nivel de fundación. Cuando se insista en este tipo de interrupción, inevitablemente se estarán facilitando condiciones para activar mecanismos frágiles, como lo son la creación de pisos débiles.

El diseño de las fundaciones debe realizarse de tal forma de garantizar que no sean el eslabón débil del sistema estructural. Se hace necesario hacerlas competentes ante la capacidad de los muros. Son muchos los casos donde la fundación se resuelve con losas, y aunque luzcan como una solución viable, debe verificarse que ellas estén en condición de responder adecuadamente cuando uno o más muros alcancen su capacidad simultáneamente.

Ninguna de las consideraciones y recomendaciones indicadas anteriormente pudiera ser efectiva, sino se cuenta con una muy buena y sana práctica constructiva. Se dijo anteriormente y se vuelve a insistir en la necesidad del control de calidad de todos los materiales que componen la mampostería estructural y de la importancia del levantamiento de las paredes de acuerdo a lo previsto en el proyecto. La mampostería resulta ser extremadamente sensible al desconocimiento de tales factores y no permite el ignorarlos ni total, ni parcialmente.

#### 4. CONCLUSIONES

De las discusiones anteriores se puede concluir lo siguiente:

**1)** La mampostería estructural ofrece una alternativa viable para Venezuela en la solución de estructuras que sirvan para la construcción de nuevas viviendas.

**2)** Aunque la mampostería no ofrece las mismas propiedades de otros materiales estructurales para disipar energía inelásticamente cuando se les somete a acciones sísmicas severas, factores tales como una adecuada concepción estructural en donde se dispongan de diafragmas rígidos para los pisos y de una distribución apta de paredes estructurales en las dos direcciones principales, de cuidar los detalles en el proceso constructivo, y de limitar los daños controlando las derivas de los pisos, podrían resultar en estructuras seguras y competitivas con las estructuras de los materiales tradicionales.

**3)** Se pueden aprovechar muchas condiciones en donde se obtengan ventajas de los materiales y miembros estructurales que puedan dañarse sin riesgo por la ocurrencia de terremotos fuertes. Los dinteles bien detallados para el bajo acoplamiento de los muros y los aceros de refuerzo de baja resistencia, resultan como buenas alternativas para el control de los daños.

4) La mampostería estructural requiere del concurso de buenos proyectos y de la buena y sana práctica constructiva. No obstante, sino se cuenta con un eficiente y riguroso control de calidad de los materiales y de su proceso constructivo, no se estarán consiguiendo las necesarias edificaciones sismorresistentes.

5) En Venezuela se requiere que a muy corto plazo se disponga de una Norma moderna de diseño y construcción de edificaciones con muros de mampostería estructural. Esta Norma debe considerar el buen desempeño de tales muros contra la amenaza sísmica, y debe dirigirse hacia un diseño que aproveche el agotamiento de sus materiales.

## REFERENCIAS

1) Castilla C., E., "Experiencias Recientes en Mampostería Confinada Sismorresistente", Trabajo de Ascenso para optar a la categoría de Profesor Asociado Facultad de Ingeniería, U.C.V., Caracas, nov. 1.991.

2) "Normas para el Cálculo de Edificios 1.955" Ministerio de Obras Públicas (MOP). Dirección de Edificios e Instalaciones Industriales. Caracas, Venezuela, 1.955.

3) Castilla C., E., y Pose, M., "Evaluación del Comportamiento de Muros de Mampostería de Concreto ante Carga Horizontal". Boletín Técnico IMME, Volumen 33, Nº 1, Caracas, marzo 1.995.

4) Castilla C., E., y Villalobos, F., "Evaluación de las Longitudes de Solape del Acero de Refuerzo Vertical en Mampostería Armada Internamente Bajo Acciones Sísmicas" IX Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sísmica 28 al 30 de noviembre de 1 996. Santo Domingo, República Dominicana.

5) Norma Venezolana "Estructuras de Concreto Armado. Análisis y Diseño". COVENIN-MINDUR 1753-87. Caracas, Venezuela, 1.987

6) Gallegos, H , "Albañilería Estructural", Pontificia Universidad Católica del Perú, Fondo Editorial, 1.989.