

Control de daños por sismos en edificios con muros de Mampostería *

Roberto Meli **

RESUMEN

Se revisa la información experimental referente a los daños por deformaciones laterales excesivas en muros de mampostería con el fin de establecer un procedimiento racional para obtener los desplazamientos máximos de entrepiso que se deben permitir en los reglamentos sísmicos. Se emplean los resultados de un gran número de ensayos en muros de mampostería realizados en el Instituto de Ingeniería de la UNAM para proponer las distorsiones que corresponden a diferentes niveles de daños en los muros.

Se propone un criterio de optimización con bases probabilísticas para obtener los desplazamientos permisibles; se obtienen resultados cuantitativos para condiciones representativas del diseño y construcción en la Ciudad de México. Se señalan las limitaciones del procedimiento propuesto y de los valores supuestos para algunas variables.

1. OBJETIVOS

La baja resistencia en tensión de la mampostería la hace muy vulnerable a deformaciones en el plano, como las causadas por desplazamientos laterales en edificios sometidos a acciones sísmicas o de viento, y las producidas por movimientos verticales de la cimentación debido a asentamientos diferenciales. Muchas de las pérdidas económicas en las construcciones modernas sometidas a movimientos sísmicos fuertes han

provenido del agrietamiento en muros de mampostería divisorios o de relleno, como también de otros daños no estructurales en edificios de cierta altura cuya escasa rigidez dio lugar a desplazamientos laterales que excedieron los permisibles en la mampostería.

Además de los requisitos dirigidos a lograr adecuada ductilidad y resistencia ante acciones laterales, los reglamentos sísmicos especifican deformaciones angulares de entrepiso permisibles, que no se deben exceder bajo un conjunto de cargas laterales equivalente a la acción del sismo de diseño, con el propósito de que las estructuras así diseñadas tengan suficiente rigidez, para evitar daños no estructurales excesivos bajo sismos frecuentes de baja intensidad. Se dice que las deformaciones angulares permitidas por los reglamentos están relacionadas principalmente con los daños de muros de relleno de mampostería; sin embargo, el autor no conoce alguna determinación cuantitativa de los valores especificados. Al menos en México, entre los proyectistas de estructuras está difundida la opinión que los requisitos para desplazamientos laterales especificados por los reglamentos vigentes son poco estrictos, y que los edificios diseñados según estos reglamentos están expuestos a una probabilidad de daños no estructurales que excede a la que la mayor parte de los propietarios están dispuestos a aceptar.

Como base de cualquier requisito racional sobre el tema se requiere un conocimiento completo de

** Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

* Traducción del artículo "Control of Earthquake Damage in Buildings with Masonry Walls" presentado al 6° Congreso Internacional sobre Estructuras de Mampostería, Roma, junio 1982.

la relación entre deformaciones en el plano y cantidad de daños en muros de mampostería.

Se puede obtener información importante de los ensayos experimentales efectuados en diferentes proyectos de investigación del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, específicamente aquellos referentes al estudio del comportamiento sísmico de muros de mampostería de diferentes tipos, ref 1 y 2, y los que se refieren a la obtención de relaciones agrietamiento - deformación angular en muros de mampostería y a su empleo en la formulación de recomendaciones sobre asentamientos permisibles en construcciones de muros de carga en edificios de pocos niveles.

Los principales objetivos de este artículo son resumir e interpretar los resultados de los programas de investigación mencionados, con el propósito de obtener relaciones daño-deformación en diferentes tipos de muros de mampostería. Se hace un intento de establecer una metodología para el empleo de esta información con el fin de obtener valores óptimos de deformaciones permisibles congruentes con la filosofía de diseño de los reglamentos sísmicos vigentes.

2. RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LAS RELACIONES AGRIETAMIENTO-DISTORSION ANGULAR EN MAMPOSTERIA

Cuando un marco se somete a cargas laterales, los muros de relleno se deforman por cortante; el daño en éstos se puede relacionar con la distorsión angular en el plano, γ , la que es igual a la relación entre el desplazamiento relativo de entrepiso y la altura de éste, como se muestra en la fig 1. El estado de esfuerzos se puede representar con una aproximación aceptable si se aplica una carga de compresión en una de las diagonales del muro; éste es el tipo

de ensaye que más comúnmente se ha empleado para estudiar el comportamiento de muros de relleno de mampostería sometidos a cargas laterales. En la ref 3 se pueden encontrar resultados de una serie de ensayos de este tipo; se estudió la influencia de algunas variables en la distorsión angular que causa el primer agrietamiento. El estudio se basó en los ensayos experimentales de aproximadamente 200 muros pequeños de forma cuadrada (0.4 m por lado). En forma adicional se estudió la influencia de otras variables y el comportamiento posterior al agrietamiento, mediante el ensaye de 26 muros de 2 x 2 m como se muestra en la fig 2.

Los ensayos en muretes tuvieron la finalidad de averiguar la influencia de la rapidez de deformación (o de carga) en las propiedades mecánicas; estos ensayos se realizaron para cuatro diferentes velocidades de deformación. En los ensayos más rápidos se obtuvo la falla en pocos minutos, mientras que en los más lentos se incrementó la distorsión angular a una rapidez constante con el fin de que el agrietamiento se produjera en aproximadamente dos meses. En los ensayos para las diferentes velocidades de deformación no se encontró una diferencia significativa en la distorsión angular correspondiente al agrietamiento, aunque para los especímenes con las velocidades de deformación más lentas se registraron deformaciones al agrietamiento ligeramente menores. Aún cuando la velocidad de deformación correspondiente a una acción sísmica es mayor que las que se emplearon en estos ensayos, se supuso que independientemente de la velocidad de deformación se podían usar todos los resultados de los mencionados ensayos para la evaluación de las relaciones agrietamiento-distorsión angular relativas a los efectos sísmicos.

En la tabla 1 se resumen los resultados de los ensayos en muretes. Los especímenes de mampos

terfa que se ensayaron incluyeron tabiques macizos de barro hechos a mano, tabiques extruidos perforados con un porcentaje pequeño de huecos, diferentes tipos de tabiques huecos y un tabique sílico-calcáreo. En la preparación de los morteros para los muros pequeños se usaron tres tipos de dosificaciones de cemento, cal y arena. Como se puede ver en la tabla 1, las distorsiones angulares correspondientes al agrietamiento son bastante variables, siendo las distorsiones para los muros con tabiques macizos mayores que las correspondientes a los tabiques huecos. En promedio se obtuvieron los mismos resultados para morteros con dosificaciones cemento, cal y arena de 1:0:3 y 1:1:6; en el caso de morteros 1:2:9 esta propiedad fue en promedio 78 por ciento de la de los casos anteriores.

Los tabiques con huecos grandes, tienen poca área de contacto con el mortero y la adherencia entre ambos materiales es pobre debido a que las superficies de los tabiques son lisas; ambas situaciones dan lugar a fallas prematuras de adherencia a lo largo de las juntas. En los casos de superficies muy rugosas y para tabiques con huecos pequeños, el mortero penetra el bloque y produce resistencia al cortante por un anclaje mecánico; como además, se tiene en estos casos una buena adherencia, la falla es gobernada por la resistencia a tensión del mortero o del tabique mismo, para esfuerzos y deformaciones más altos que aquellos correspondientes a los tabiques huecos.

En los casos de ensayos de muros a escala natural se usaron los mismos tipos de tabiques y morteros que en los muretes; la velocidad de deformación fue tal que la falla se alcanzó en aproximadamente tres semanas. Las principales variables estudiadas fueron la forma de refuerzo y la carga vertical sobre el muro. Los muros se rodearon con un marco de concreto muy delgado con el que se pretendía simular el con-

finamiento que en las estructuras proporcionan las losas de piso y muros transversales. En algunos ensayos se usaron marcos de concreto más gruesos a fin de reproducir la influencia de un marco de confinamiento, asimismo en algunos muros se colocó refuerzo vertical en los huecos de las piezas.

En la tabla 1 se muestran algunos resultados, de los cuales se pueden obtener las siguientes conclusiones. La resistencia al agrietamiento fue en forma sistemática 80 por ciento de la obtenida en muretes, mientras que la deformación de agrietamiento fue en promedio 72 por ciento. Estas diferencias se atribuyen a que en los especímenes pequeños el sistema de carga produjo un mayor confinamiento y por consiguiente incrementó la resistencia a la tensión. Para tabiques macizos unidos con buen mortero, se encontró que la distorsión angular correspondiente al agrietamiento γ_0 fue ligeramente mayor que 10^{-3} radianes, en los casos de mampostería con tabique hueco, γ_0 fue aproximadamente la mitad de este valor.

La deformación al agrietamiento se incrementó en forma significativa por la presencia de carga vertical de compresión (aproximadamente al doble para un esfuerzo de compresión de 3.6 kg/cm^2). γ_0 se incrementó también ligeramente cuando los muros se aplanaron con un mortero de cemento o de yeso; en ambos casos cuando se observó una grieta en el aplanado, ésta siempre penetró en la mampostería. Este comportamiento observado fue contrario a la creencia previa que el yeso sería más frágil que la mampostería y que se agrietaría primero.

El tamaño del marco de confinamiento y el refuerzo interior no afectaron γ_0 , pero sí modificaron significativamente el comportamiento posterior al agrietamiento. Como una medida de la cantidad de daños se midieron los anchos de las grietas.

tas diagonales más largas. Como se puede ver en la fig 3, se observó una relación lineal entre el ancho de grieta, w , y la distorsión, γ , del tipo

$$w = \alpha (\gamma - \gamma_0)$$

en donde α es una constante que depende del tipo de tabique, de la carga vertical y del refuerzo. El ancho de grieta creció más rápido para tabiques huecos que para los macizos; además la presencia de carga vertical disminuyó la rapidez de crecimiento del ancho de grieta.

Las curvas de carga-deformación de la fig 4 muestran que la resistencia disminuye en forma continua después del agrietamiento diagonal; la reducción de la resistencia se pudo retardar apreciablemente en los muros con refuerzo interior o con marco de confinamiento. El daño a los marcos de confinamiento ocurrió para distorsiones superiores a aproximadamente 3×10^{-3} radianes; asimismo, cuando la distorsión llegó a cerca de 10^{-2} rad la capacidad se redujo a menos de 50 por ciento. El comportamiento que se muestra en la fig 4 fue característico de ensayos con cargas sostenidas o con incrementos muy lentos de las distorsiones a lo largo de varias semanas. En ensayos bajo cargas de corta duración se observó un comportamiento mucho menos frágil.

Se efectuó otro programa de investigación que comprendía el ensayo ante cargas laterales repetidas de 15 muros a escala natural, similares a los previamente descritos (ref 2). El objeto de esta investigación fue encontrar modalidades de refuerzo que mejoraran la ductilidad y la capacidad de absorción de energía. En la tabla 2 se muestran los promedios de las distorsiones correspondientes al agrietamiento, γ_0 , y las distorsiones máximas para las cuales la resistencia al agrietamiento podía ser sostenida; estos resultados corresponden tanto a muros de tabique huecos como a muros de bloques de concre-

to. Los valores de γ_0 son muy parecidos a los obtenidos en ensayos con distorsiones que se incrementaban lentamente ($\gamma_0 \doteq 0.5 \times 10^{-3}$ para tabiques huecos). No obstante, el comportamiento posterior al agrietamiento fue mucho más dúctil que en los ensayos previamente descritos; en muros con marcos de confinamiento y con refuerzo interior se podía sostener una distorsión de casi 20 veces γ_0 antes que la carga disminuyese a niveles menores que la resistencia correspondiente al agrietamiento diagonal; en muros con sólo refuerzo interior la distorsión máxima fue considerablemente menor.

En la fig 5 se muestran curvas cortante-distorsión para muros ensayados bajo cargas laterales monótonas (ref 4); los muros con sólo refuerzo interior sufrieron una reducción drástica de la capacidad de carga para distorsiones menores que 5×10^{-3} rad, mientras que los muros confinados por marcos podían sostener distorsiones de 10^{-2} antes que se redujera significativamente su capacidad de carga.

Desde el punto de vista del comportamiento bajo acciones sísmicas lo que importa es el daño que puede sufrir un muro cuando se somete a repeticiones de cargas alternadas, como también la degradación progresiva de la capacidad de carga que puede ocurrir bajo tales cargas cíclicas.

De los resultados encontrados en los ensayos descritos en las ref 1 y 4 se puede concluir que los muros contruidos con piezas huecas sufren una degradación mucho mayor que aquéllos contruidos con piezas macizas; ésto se debe a que las paredes de las piezas huecas se aplastan y se desmoronan después que se forma una grieta diagonal. En muros confinados con marcos se produce una degradación importante cuando una grieta diagonal penetra en la columna como resultado de la concentración de esfuerzos cortantes que ocurre en las esquinas del marco después del agrietamiento diagonal de los muros.

No obstante, si la resistencia al cortante en los extremos de las columnas es suficientemente grande para evitar la propagación de las grietas diagonales en las esquinas, es posible lograr un deterioro muy pequeño para grandes distorsiones. En realidad se pudo incrementar la carga hasta prácticamente la máxima capacidad inicial después de más de 50 ciclos de distorsiones mayores que 30×10^{-3} radianes. En la fig 6 se muestran algunos ciclos para las curvas cortante-distorsión en muros de piezas huecas rodeadas por marcos fuertes o débiles. Se puede ver que en el primer caso, se producen degradaciones grandes para $\gamma = 3 \times 10^{-3}$; en el segundo caso la degradación no es muy importante para $\gamma = 5 \times 10^{-3}$, y muro con marco resistente pudo sostener una distorsión de 15×10^{-3} con un deterioro moderado.

De los resultados comentados en los párrafos anteriores se pueden proponer algunos valores característicos que determinan las relaciones agrietamiento-distorsión en muros de mampostería sujetos a compresiones diagonales de corta duración (ver tabla 3). Los muros de piezas macizas se distinguen de los huecos; en los primeros se admiten mayores distorsiones antes del agrietamiento. Las distorsiones correspondientes al agrietamiento son mayores en muros con cargas verticales; se proponen diferentes valores para muros con refuerzo interior o con marco de confinamiento ligero, para muros de relleno en marcos muy resistentes y para muros sin refuerzo. Los parámetros característicos de las relaciones agrietamiento-distorsión son: distorsión en el primer agrietamiento (γ_0), pendiente de la curva que relaciona el ancho de grieta con la distorsión (α), la distorsión que causa daño estructural en el refuerzo interior o en el marco de confinamiento o en las piezas (γ_s), y la distorsión correspondiente a una reducción significativa de la capacidad lateral de los muros (γ_u).

3. OBSERVACIONES DE DAÑOS EN EDIFICIOS EXISTENTES

Existen muy pocas mediciones o estimaciones confiables de los desplazamientos laterales experimentados por edificios existentes y de su relación con los daños no estructurales. En algunos casos se calcularon los desplazamientos experimentados a partir de los registros de acelerogramas localizados en los pisos superiores de edificios. A pesar de la falta de precisión en la estimación de desplazamientos a partir de la doble integración de acelerogramas, hay indicios claros que los desplazamientos relativos de entrepiso menores de 0.002 o 0.003 veces la altura del piso no produjeron daño en los muros de relleno de mampostería.

A partir de mediciones de hundimientos y de los daños que ellos causaron en edificios, se puede obtener información indirecta del daño que los desplazamientos laterales pueden producir durante un sismo. Sin embargo, se han encontrado grandes dificultades cuando se ha tratado de correlacionar las mediciones de asentamientos entre crujeas con los daños en los muros; esto se debió principalmente a la falta de un punto inicial de referencia. Se encontró una mejor correlación entre daños en edificios y un índice aproximado de la distorsión total; este índice se definió como el cociente entre el asentamiento diferencial entre el centro y la esquina del edificio y la distancia entre estos puntos. En la ref 3 se pueden encontrar los resultados de un estudio estadístico de los asentamientos y daños en construcciones de mampostería portante de pocos pisos. Se encontró que para el mismo nivel de asentamientos el daño disminuyó con el nivel de cargas verticales actuantes en los muros, lo que es congruente con el encontrado en los ensayos experimentales.

A partir de estas investigaciones de asentamientos diferenciales se concluyó que en gene-

ral los daños en muros de mampostería empiezan cuando las distorsiones exceden 3×10^{-3} radianes.

Parece claro que las distorsiones capaces de producir daño en muros de mampostería en edificios existentes son significativamente más grandes que aquéllas que se ha encontrado que producen agrietamientos en ensayos de laboratorio ante cargas de compresión diagonal. Se atribuye esta diferencia a separaciones pequeñas existentes entre la estructura y los muros, lo cual permite que la estructura tenga algún desplazamiento antes que haga contacto con el relleno, como se puede ver en la fig 1, y también que el muro rote con respecto a su base. Las distorsiones que se propusieron en el capítulo previo se obtuvieron de mediciones de deformaciones dentro del muro de mampostería (a partir de los cambios de longitud de ambas diagonales). Se encontraron valores más grandes para γ_0 cuando las distorsiones se obtuvieron como las relaciones entre el desplazamiento lateral en la parte superior del muro y la altura del mismo, en ensayos en voladizo. Por ejemplo en una serie de ensayos de este tipo, Esteva (ref 5) encontró que en promedio las distorsiones en el agrietamiento fueron 2×10^{-3} radianes para muros diafragma de piezas macizas y 1.5×10^{-3} radianes para piezas huecas.

Para fines del cálculo de desplazamientos relativos de entrepiso en edificios, las distorsiones deberán incluir los movimientos relativos entre el marco y el muro. A fin de tomar en cuenta este efecto, se sugiere sumar un valor constante de 1×10^{-3} radianes a las distorsiones obtenidas a partir de ensayos directos de los muros relleno presentadas en la tabla 3. Este incremento afectará principalmente los valores de γ_0 y es congruente con la hipótesis de una separación inicial entre el marco y el muro y también con la diferencia entre las distorsiones medidas en el muro y las totales en el mar-

co.

Con estas modificaciones los valores de la tabla 3 se pueden usar como base para obtener relaciones daño-distorsión para estructuras con marcos y muros de relleno. Sin embargo, se requieren mucho más mediciones directas en edificios a fin de obtener valores más confiables.

4. REQUISITOS DE LOS REGLAMENTOS PARA LIMITAR LOS DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS DE PISO

Las especificaciones para el diseño sismo-resistente estipuladas por la mayor parte de los reglamentos de construcción requieren el cálculo de los desplazamientos relativos de entrepiso a partir de un análisis elástico de la estructura sujeta al mismo sistema de fuerzas laterales utilizado para verificar la resistencia estructural. Se debe verificar que los desplazamientos relativos calculados no exceden los valores permisibles. Para poder examinar la validez de los desplazamientos admisibles se deben recordar varios aspectos del diseño sísmico. Las fuerzas laterales equivalentes estipuladas por los reglamentos son mucho menores que aquellas que serían originadas por el sismo de diseño si la estructura respondiera dentro de su rango lineal. Se acepta que una parte de la energía generada por el sismo se puede disipar por un comportamiento inelástico y por consiguiente la resistencia requerida es menor para estructuras dúctiles que para las frágiles. Las fuerzas de diseño estipuladas por los reglamentos se reducen proporcionalmente a un factor de ductilidad que se supone que el sistema estructural particular es capaz de desarrollar antes de la falla. Sin embargo, los desplazamientos laterales máximos que la estructura tendría bajo el sismo de diseño no se calculan con estas fuerzas reducidas; si el comportamiento es elasto-plástico los desplazamientos serían aproximadamente los calculados por un análisis elástico con las fuerzas laterales reducidas, pero multiplicados

por el factor de ductilidad respectivo.

También se debe recordar que lo que los reglamentos tratan de evitar o limitar con este tipo de especificaciones son los daños no estructurales para sismos cuyas intensidades son mucho menores que la del sismo de diseño. Por sencillez de análisis las revisiones de desplazamientos se hacen para el mismo sismo de diseño empleado para verificar la resistencia estructural, en lugar de estipular un "sismo de servicio" diferente con fuerzas de diseño menores. Por consiguiente los desplazamientos permisibles especificados por los reglamentos son mayores que aquellos que se pretende no sean excedidos bajo sismos moderados y además son usualmente más grandes que aquellos que producen daños en muros de mampostería.

Los desplazamientos relativos permisibles estipulados por diferentes reglamentos muestran variaciones grandes. El Reglamento del Distrito Federal establece que los desplazamientos relativos de entrepiso (multiplicados por el factor de ductilidad) no deben exceder 0.008 veces la altura de entrepiso, esto cuando los muros de mampostería, divisorias o diafragmas, no están aislados en forma apropiada de la estructura principal. El Reglamento ATC-3 de los Estados Unidos de Norteamérica, estipula desplazamientos relativos de entrepiso permisibles que varían de 0.010 a 0.015 veces la altura del entrepiso, dependiendo de la importancia del edificio. Por otro lado el Reglamento de Nueva Zelanda establece que los desplazamientos relativos calculados no deben exceder 0.0006 veces la altura del entrepiso; en caso que ésto no se pueda cumplir los muros se deben separar de la estructura principal. La gran diferencia entre estos valores permisibles pone en evidencia que se basan en criterios radicalmente distintos.

Las limitaciones de desplazamientos usualmente no gobiernan el diseño sismo-resistente de es-

tructuras con muros de carga de mampostería, para las cuales las reducciones por ductilidad permitidas por los reglamentos son muy bajas y el área de muros que se necesita para resistir en cada dirección las fuerzas cortantes proporcional a la estructura suficiente rigidez para cumplir los requisitos de desplazamientos. Por el contrario, las limitaciones de desplazamientos son generalmente el factor crítico en el diseño de edificios a base de marcos de varios pisos en zonas de alto riesgo sísmico, donde se debe a menudo incrementar las dimensiones de las vigas y columnas más allá de las requeridas con fines de resistencia, a fin de lograr suficiente rigidez lateral.

5. UN CRITERIO DE OPTIMIZACION PARA LA DEFINICION DE DESPLAZAMIENTO PERMISIBLE

Un criterio racional para establecer desplazamientos permisibles debe balancear el costo de incrementar la rigidez lateral de una estructura con las consecuencias de sismos que podrían producir el agrietamiento de los muros divisorios y otros daños no estructurales. Un criterio de optimización comúnmente aceptado en este sentido implica minimizar la suma del costo de construcción más las pérdidas económicas esperadas debidas a los daños.

Puede suponerse que el proceso de ocurrencia de los movimientos sísmicos en el lugar de la edificación es tal que una cierta medida de la intensidad sísmica, i , está relacionada con la tasa promedio anual de excedencia, v , como sigue (ref 6):

$$i = A v^{-1/r} \quad (1)$$

El exponente r se encuentra por el ajuste a datos estadísticos; para frecuencias de ocurrencia bajas r generalmente se encuentra cercano a 2.5; en el intervalo de sismos moderados frecuentes r está usualmente alrededor de 1. Se

puede también aceptar que una medida de la acción sísmica (coeficiente sísmico u ordenada espectral para una estructura de un cierto periodo y amortiguamiento) está relacionada linealmente con i . Adicionalmente, si se calculan los desplazamientos por medio de un análisis lineal, el desplazamiento relativo de entrepiso máximo calculado será proporcional al coeficiente sísmico, luego puede escribirse

$$\gamma = a v^{-1/r} \quad (2)$$

Esta ecuación da el desplazamiento de entrepiso que se excede en promedio en una tasa anual v .

De acuerdo con el criterio adoptado de optimización, cuando el desplazamiento máximo en un edificio excede al que inició el agrietamiento en la mampostería, debe asignarse a los daños pérdidas monetarias. En la ref 3 se describe un intento de obtener una relación entre la distorsión y los daños, por medio de la toma de fotografías de muros que fueron llevados a diferentes niveles de daños correspondientes a diversos valores de distorsiones. Estas fotografías se mostraron a ingenieros especialistas en estimación de costos para construcción de edificaciones, a quienes se les consultó sobre el monto de los costos de las reparaciones que se requerían para restablecer las condiciones iniciales de los muros. Los costos de reparaciones promedio se expresaron como fracciones de los costos de edificación de muros nuevos y se muestran para un caso particular en la fig 7. Los costos así obtenidos se incrementaron al doble a fin de tomar en cuenta los costos asociados con las pérdidas indirectas causadas a los ocupantes y a los propietarios de los edificios. En la fig 7 se muestra una curva típica que se obtuvo de acuerdo con este criterio, la que se puede expresar como:

$$\begin{aligned} D &= 0 && \text{si } \gamma < \gamma_0 \\ D &= D_0 (\gamma/\gamma_0)^n && \text{si } \gamma_0 \leq \gamma \leq \gamma_M \\ D &= D_M && \text{si } \gamma > \gamma_M \end{aligned}$$

en donde D es la relación entre el costo de los daños y el costo por reposición de los muros. Se encontró que n variaba entre 1.5 y 2.

Por medio de la ec 2 se puede expresar el daño en términos de la frecuencia esperada de excedencia, v . Esto lleva a la relación que se muestra en la fig 8. El daño esperado por unidad de tiempo correspondiente a una intensidad con una tasa de excedencia γ es igual al producto $D(v)dv$. Por lo tanto el valor del daño esperado por unidad de tiempo es el área bajo la curva D versus v de la fig 8.

$$E \{D_U\} = \int_0^{\gamma_0} D(v) dv \quad (4)$$

Los costos de los daños que ocurren en diferentes épocas durante la vida esperada de un edificio se debe transformar a valor presente considerando una tasa, ϕ , definida como la diferencia entre la tasa de interés y la tasa de incremento del costo de construcción; por tanto el valor presente del costo esperado del daño es

$$E \{D_T\} = \frac{1 - \rho^{-\phi L}}{\phi} E \{D_U\} = L' E \{D_U\} \quad (5)$$

donde L es la vida esperada del edificio.

El costo de construcción se puede separar en una parte independiente de la rigidez lateral y en otra que disminuye en forma lineal con los desplazamientos laterales permisibles; de esta hipótesis se tiene

$$C = C_D \left(q + p \frac{\gamma_D}{\gamma_0} \right) \quad (6)$$

donde C_D es el costo de construcción del edificio si la estructura se diseña de tal manera que su distorsión calculada, γ_D , es igual a γ_0 bajo el sismo de diseño; p es la fracción del costo que es independiente de la rigidez lateral y $q = 1 - p$

Si se establece como objeto minimizar la suma del costo total más el daño esperado se tiene

$$C_T = D + E \{D_T\} \quad (7)$$

La estructura óptima es aquella en la cual el desplazamiento calculado bajo el sismo de diseño satisface la condición

$$\frac{\partial C_T}{\partial \gamma_D} = 0 \quad (8)$$

Si se resuelve la ec 8 para las condiciones establecidas en las ecs 2 a 7, se obtiene el siguiente resultado

$$\frac{\gamma_D}{\gamma_0} = \left(\frac{p}{L' \beta v_D r^k} \right)^{1/(1+r)} \quad (9)$$

donde

$\beta = \frac{D_M}{C_D}$ relación entre el daño máximo en los elementos no estructurales y el costo total de los edificios.

$\mu = \frac{D_M}{D_0}$ relación entre daño máximo y el daño en el primer agrietamiento.

$$k = \frac{1}{r/n} + \frac{\mu^{1-r/n} - 1}{(n/r-1)\mu}$$

A continuación se presentan valores que se consideraron representativos de edificios típicos en la Ciudad de México y de los requisitos del reglamento local.

v_D	frecuencia esperada de excedencia del sismo de diseño	= 0.02 año
L	vida esperada del edificio	= 50 años
ϕ	tasa de interés efectivo	= 0.03
β	costo relativo de elementos no estructurales susceptible a daños	= 0.20
μ	= D_M / D_0 ; de la fig 7	= 133
n	para muros diafragma en marcos fuertes	= 1.8
r	exponente de la ec 1	= 1.5
p	fracción del costo dependiente de la rigidez lateral	= 0.1

Para estas hipótesis, el valor óptimo de γ_D/γ_0 es 2.5. Esto significa que el desplazamiento calculado con el sismo de diseño no debería exceder 0.005 para muros de relleno de piezas macizas y 0.0037 para muros de relleno de piezas huecas.

Se debe mencionar que los resultados son bastante sensibles a cambios en algunas de las variables y que algunas de éstas no se pueden establecer con buena aproximación. Por ejemplo, si el sismo de diseño especificado por el reglamento tiene un periodo de retorno de 250 años en lugar de 50 años, se incrementarían al doble los desplazamientos permisibles. Por otro lado los métodos de optimación descritos no toman en cuenta, por ejemplo, las incertidumbres existentes en los valores de las variables. Los valores anteriores para los desplazamientos permisibles se derivaron sobre la base de que en el diseño no se toman factores de seguridad adicionales. En realidad tanto la rigidez lateral como las fuerzas sísmicas de diseño se definen en forma algo conservadora, por tanto los desplazamientos permisibles podrían ser más altos y más cercanos a los valores de los reglamentos vigentes.

6. CONCLUSIONES

Se ha presentado información sobre el costo del daño que puede esperarse en muros de mampostería sujetos a distorsiones en el plano. La información obtenida con ensayos en laboratorio es bastante amplia y concluyente. Sin embargo, parece que los muros de mampostería en edificios existentes son capaces de aceptar sin daños distorsiones mayores que las obtenidas en laboratorio. Es necesario realizar evaluaciones cuidadosas de los daños en edificios después de un sismo a fin de poder cuantificar aceptablemente estas discrepancias.

Se ha usado un método de optimización aproximado a fin de encontrar los desplazamientos permisibles que se deben especificar de acuerdo con los métodos de diseño que estipulan los reglamentos sísmicos vigentes. Se han encontrado valores que son menores que aquellos especificados por el Reglamento del Distrito Federal. Sin embargo, los resultados son bastante sensibles a los valores que asignan a algunas variables, para las cuales fue necesario hacer suposiciones bastante arbitrarias; los valores que se asignen a dichas variables deben basarse en la opinión de diferentes especialistas en la materia. Uno de los objetivos de este artículo es despertar el interés en realizar estudios dirigidos a lograr soluciones más racionales del problema.

REFERENCIAS

1. Meli R., "Comportamiento sísmico de muros de mampostería" pub No. 352, *Instituto de Ingeniería*, UNAM, México, abr 1975
2. Hernández O. y Meli R., "Modalidades de refuerzo para mejorar el comportamiento sísmico de muros de mampostería" pub No. 382, *Instituto de Ingeniería*, UNAM, México, sep 1976
3. Meli R. y Hernández O., "Efectos de hundimientos diferenciales en construcciones a base de muros de mampostería" pub No 382, *Instituto de Ingeniería*, UNAM, México, mar 1975
4. Meli R., "Behaviour of masonry walls under lateral loads" *Proc Fifth World Conference on Earthquake Engineering*, Roma, 1973
5. Esteva L., "Behaviour under alternating loads of masonry diaphragms framed by reinforced concrete members" *Symposium on the Effects of Repeated Loading in Material and Structural Elements*, RILEM, México, 1966
6. Esteva L., "Seismicity" capítulo 6 de *Seismic Risk and Engineering Decisions* editado por E. Rosenblueth y C. Lomnitz. Elsevier, Amsterdam, 1976

Pieza	Mortero (1)	Muretes		Muros a escala natural				
		(2) v_0	(3) γ_0	(4) Refuerzo	(2) v_0	(3) γ_0		
Tabique de arcilla macizo	1 0 3	0.46	1.1	II	0.35	1.6		
	1 1 6	0.40	1.1					
	1 2 9	0.38	0.9	II				
Tabique de barro tipo rejilla	1 0 3	0.46	1.0	I	0.54	1.3		
	1 1 6	0.40	1.1					
	1 2 9	0.31	1.0	I				
Tabique de barro tipo panel	1 0 3	0.82	1.6	I	0.54	1.3		
				I($\sigma = 0.37$)			0.75	2.0
	1 2 9	0.37	1.0	I				
Tabique de barro perforado	1 0 3	0.95	0.9	I	0.82	0.5		
	1 1 6	0.77	0.8					
	1 2 9	0.44	0.7	I				
Tabique de barro con huecos circulares	1 0 3	0.41	0.7	I	0.33	0.4		
	1 0 3			I($\sigma = 0.78$)			0.56	0.9
	1 0 3		III	0.41	0.3			
	1 1 6	0.35	0.8					
	1 2 9	0.30	0.6	I	0.23	0.3		
Tabique de barro con huecos cuadrados	1 2 9			I($\sigma = 0.36$)	0.45	1.0		
	1 0 3	0.55	1.4	I	0.32	0.6		
	1 0 3			II			0.23	0.6
	1 0 3		III	0.28	0.3			
	1 2 9	0.23	0.4					
Tabique hueco sílico-calcáreo	1 0 3	0.66	0.5		0.42	0.8		
	1 2 9	0.39	0.3	III				

(1) Dosificación de mortero por volumen, cemento: cal:arena

(2) Esfuerzo cortante en el agrietamiento Mpa

(3) Distorsión en el agrietamiento ($\times 10^3$)

(4) Refuerzo I: marco de confinamiento ligero (ancho de 70 mm); II: marco de confinamiento robusto (150 mm de ancho); III marco de confinamiento ligero más refuerzo vertical en tres agujeros

σ = esfuerzo vertical, Mpa

TABLA 2. DISTORSIONES CRITICAS PARA MUROS ENSAYADOS CON CARGAS DE CORTA DURACION

Tipo de muro	γ_0	γ_m
Tabique hueco con marco de confinamiento y refuerzo interior	0.7	13.2
Tabique hueco con refuerzo interior	0.5	2.9
Bloque hueco con refuerzo interior	0.5	4.8

TABLA 3. DISTORSIONES CRITICAS A PARTIR DE ENSAYES DE COMPRESION DIAGONAL

Tipo de tabique	γ_0				γ_M			
	$\sigma = 0$	$\sigma > 0.2$	α	γ_s	Sin refuerzo	Reforzado interiormente	Marco ligero	Marco robusto
Macizo	1.0	1.5	1.1	3	3	---	15	30
Hueco	0.5	1.0	1.4	3	3	6	10	20

γ_0 distorsión en la primera grieta diagonal, en rad x 10^{-3}

γ_s distorsión en el comienzo del daño estructural

γ_m distorsión en la falla estructural

α constante de la ecuación $\omega = \alpha (\gamma - \gamma_0)$

ω ancho de grieta, en mm

σ esfuerzo de compresión debidos a carga vertical en el muro (Mpa)

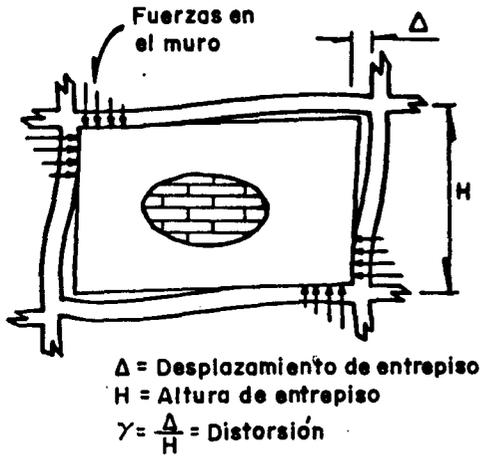


Fig 1. Fuerzas en un marco con muros de relleno sujeto a cargas laterales

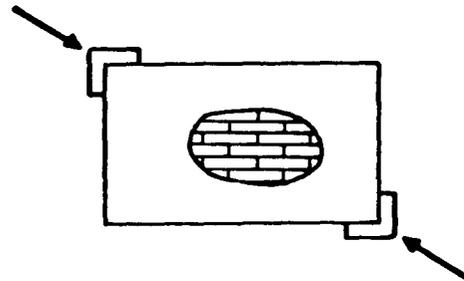


Fig 2. Ensaye en compresión diagonal

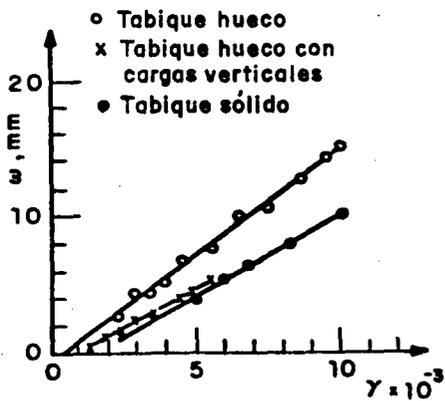


Fig 3. Ancho de grieta versus distorsión en ensayos a compresión diagonal

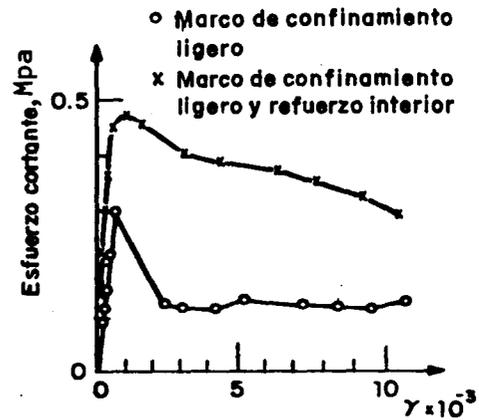


Fig 4. Curvas carga-distorsión para muros con deformaciones crecientes lentas

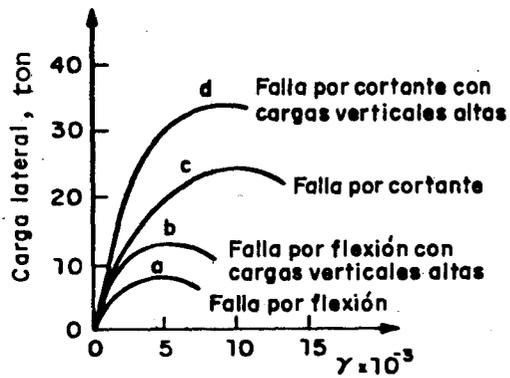
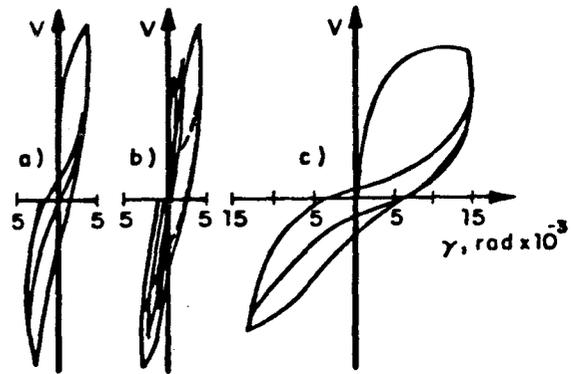
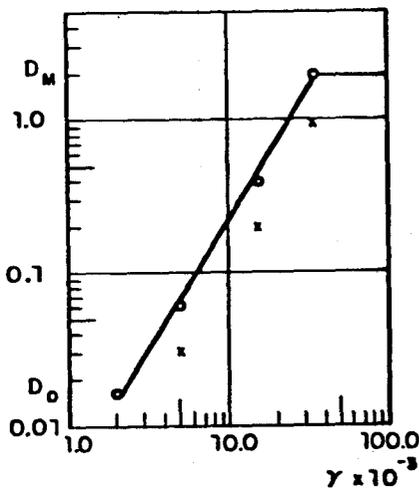


Fig 5. Curvas carga-distorsión para muros bajo cargas laterales monotonas de corta duración



a) Tabiques huecos con refuerzo interior
 b) Tabiques sólidos en un marco de confinamiento ligero
 c) Tabiques sólidos en un marco de confinamiento robusto

Fig 6. Curvas típicas cargas laterales alternadas versus distorsión



D Costo de daños como una fracción del costo de reconstrucción
 x Costo de reparación
 o Costo de daños

$$D = D_0 (\gamma / \gamma_0)^{1.8}$$

$D_0 = 0.015$
 $D_M = 2$

Fig 7. Relaciones daño-distorsión para un muro de relleno de tabique sólido

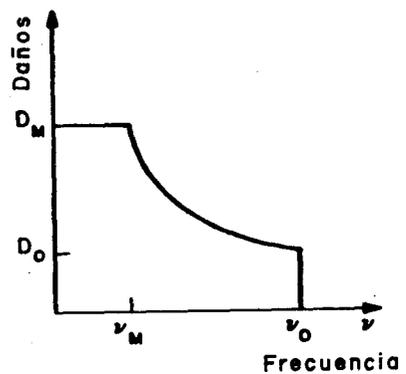


Fig 8. Relación típica daño-frecuencia