
INFLUENCIA DE LOS MUROS DE MAMPOSTERIA EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS APORTICADAS

Una explicación a los daños por los sismos de Octubre de 1992 en Medellín.

ROBERTO ROCHEL A.

RESUMEN

En los sismos ocurridos en Colombia en el mes de Octubre de 1992 se presentaron daños importantes en acabados, especialmente en estructuras aporticadas, con mayor intensidad en los pisos inferiores. Las causas de estos daños pueden atribuirse a la excesiva deriva permitida en estas estructuras y a un deficiente sistema constructivo que adosa los muros divisorios y de fachada a los pórticos, combinando indecudamente una estructura muy flexible con otra rígida y además con una pobre calidad de los acabados.

INTRODUCCION

Los sismos que ocurrieron en Colombia el el mes de Octubre de 1992 se han constituido en un llamado de atención para la ingeniería nacional, pues la gran cantidad de daños que se presentaron en acabados, especialmente en edificios de construcción reciente, indican que algo está fallando y que pueden presentarse daños mayores ante eventos más severos.

La no concordancia entre la estructura proyectada por el ingeniero calculista y la construída, la calidad de los acabados y las excesivas derivas permitidas en el análisis son las causas principales de los daños. Para corregir el deficiente comportamiento de las

construcciones aporticadas, se requiere desarrollar más investigaciones en los centros universitarios, incorporar a las normas de análisis las lecciones que han dejado los sismos recientes tanto en Colombia como en México y Salvador; se requiere reestructurar profundamente las oficinas de Planeación Municipal y Departamental quienes deben garantizar la calidad de la construcción.

En los sismos ocurridos en Colombia en el mes de Octubre de 1992 se presentaron daños importantes en acabados, especialmente en estructuras aporticadas, con mayor intensidad en los pisos inferiores.

En este artículo se pretende discutir la influencia que los muros divisorios y de fachada tienen en el comportamiento de la estructura y que en casos extremos pueden llevarla hasta el colapso; también se explica las causas de los daños y se discute críticamente los sistemas constructivos actuales.

ROBERTO ROCHEL A. Profesor y Jefe del Departamento de Ingeniería Civil. Universidad EAFIT.

SISTEMAS CON MUROS Y/O PORTICOS

En muchos casos para dar a los edificios tanto rigidez como resistencia ante cargas laterales se emplean muros de hormigón reforzado, usualmente combinados con pórticos (sistema dual). Otra manera de proporcionarle rigidez a los pórticos es rellenando los espacios entre vigas y columnas con muros de mampostería o contraventearlos con diagonales de hormigón y de acero.(Figura 1)

En el medio Colombiano los muros de mampostería en arcilla no reforzada no se consideran como elementos del sistema estructural y ello puede alterar sustancialmente su comportamiento. La rigidez adicional de los muros puede alterar la repartición de cargas entre los elementos resistentes. La situación arbitraria de estos elementos no estructurales, pero rígidos, puede introducir efectos de torsión donde no estaban previstos y causar el colapso total de la estructura.

ANALISIS CONVENCIONAL DE ESTRUCTURAS APORTICADAS

En el análisis convencional de estructuras aporticadas usualmente se asume que solo las vigas, las columnas y la cimentación constituyen el esqueleto de la estructura y en consecuencia, son los únicos elementos que se consideran al evaluar su resistencia, rigidez y ductilidad. Consecuentes con este planteamiento los muros divisorios y de fachada, indispensables en cualquier construcción, deben ser independientes del sistema estructural y no deben

afectar su funcionamiento; para ello, deben aislarse de la estructura mediante un adecuado procedimiento constructivo.

La no concordancia entre la estructura proyectada por el ingeniero calculista y la construída, la calidad de los acabados y las excesivas derivas permitidas en el análisis son las causas principales de los daños.

El aislar los muros de la estructura complica y encarece el procedimiento de construcción razón por la cual en el medio esto no se hace y la mampostería generalmente se coloca en las luces de los pórticos y para asegurar su estabilidad se fija con mortero a las columnas. Al quedar la mampostería adosada a las columnas restringe el movimiento relativo entre dos pisos consecutivos alterando el modelo concebido para el análisis.

El muro en ladrillo de arcilla presenta una gran rigidez para cargas aplicadas en su plano, además de una resistencia elevada. Cuando un muro se adosa a las columnas de un pórtico aumenta considerablemente la rigidez de este y si esta distribución no es simétrica puede desplazar el centro de rigidez del piso separándolo del centro de masa y ocasionando, con ello, una torsión no contemplada en el proceso de análisis que puede conducir al colapso de la estructura. Esta

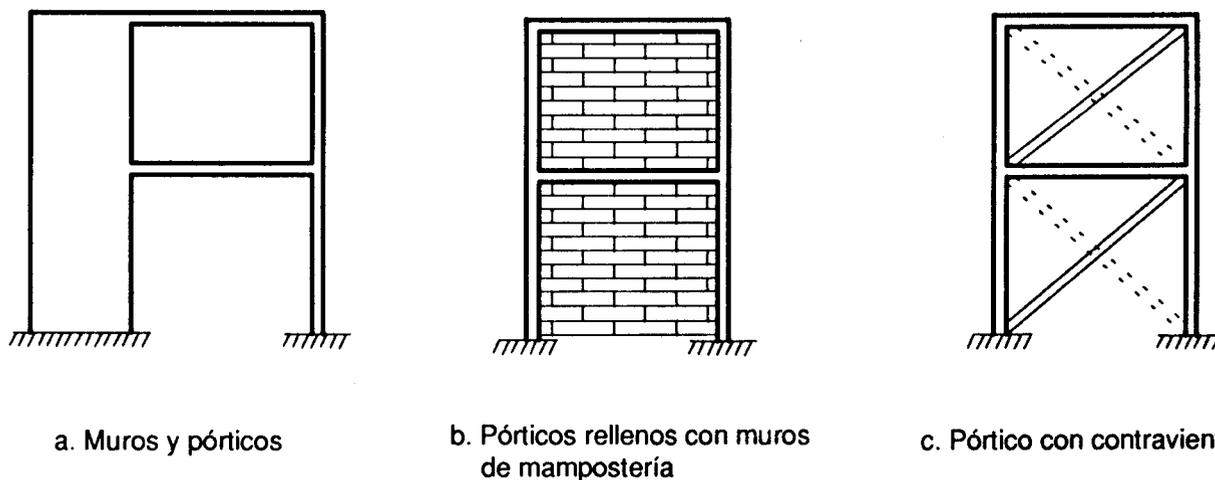


FIGURA 1. Sistemas estructurales resistentes a cargas laterales

apreciación es particularmente crítica en los edificios de esquina, en los cuales, los pórticos sobre los linderos deben estar completamente cerrados y sobre las fachadas contener grandes ventanales.

Las experiencias de sismos recientes muestran que muchos edificios han colapsado debido al incremento del cortante ocasionado por los muros divisorios, cuando estos se disponen asimétricamente; en cambio, otros edificios no han colapsado debido al aumento de resistencia que introducen los muros cuando estos se disponen de una manera simétrica.

El problema planteado tiene dos soluciones: aislar los muros de la estructura o incorporarlos al análisis, para incorporarlos en el análisis se requiere investigaciones con nuestros materiales para deducir un modelo matemático que represente adecuadamente el comportamiento real de la estructura.

Para corregir el deficiente comportamiento de las construcciones aporricadas, se requiere desarrollar más investigaciones en los centros universitarios, incorporar a las normas de análisis las lecciones que han dejado los sismos recientes.

ANÁLISIS EXPERIMENTAL

En el caso de pórticos de hormigón reforzado confinados con muros de mampostería y sometidos a cargas horizontales (sísmicas) se han realizado en México numerosas investigaciones tanto experimentales como analíticas. En estas investigaciones se parte del principio que tanto el pórtico como el muro inicialmente conforman una sola unidad en la cual son muy importantes las deformaciones por flexión y por cortante.

Sin embargo, para cargas de poca magnitud el pórtico y el muro se separan en esquinas opuestas y el pórtico se apoya en el muro de la manera indicada en la figura 2. El apoyo del pórtico sobre el muro induce en este, tanto en vigas como en columnas, fuerzas axiales, fuerzas cortantes y momentos flectores.

Los momentos flectores que se introducen tanto en las vigas como en las columnas son despreciables pues las fuerzas de contacto muro-pórtico tienen lugar cerca de los nudos.

El confinamiento que exige el CCCSR, en los extremos de las vigas y columnas, destinado a incrementar la ductilidad de la estructura, resulta ventajoso para resistir estos cortantes que inducen los muros cuando estos no se tienen en cuenta por el ingeniero calculista.

En el muro aparecen fuerzas de compresión en una diagonal que pueden producir una falla violenta del muro por aplastamiento, en la otra diagonal las

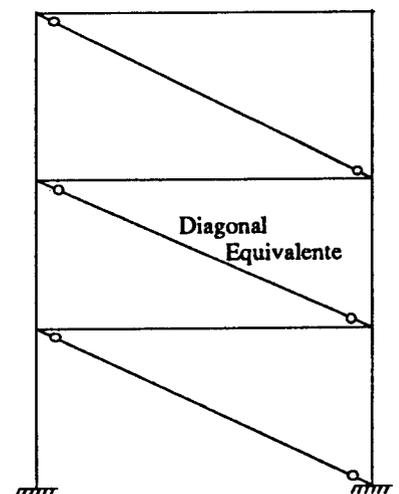
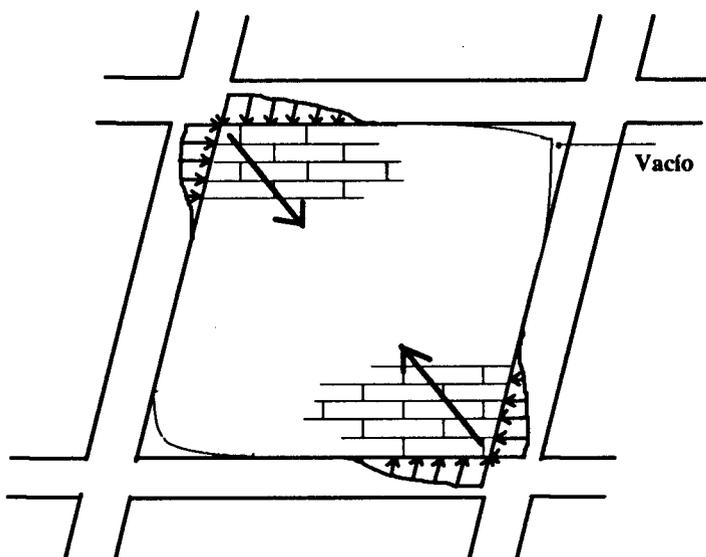


FIGURA 2. Pórtico de hormigón confinado por muros de mampostería, idealización del muro

fuerzas son de tracción y pueden producir al agrietamiento diagonal del muro.

Para el cálculo de la rigidez lateral del sistema pórtico-muro, el muro se idealiza como una diagonal que trabaja a compresión. De resultados de estudios analíticos con elementos finitos se recomienda que la diagonal equivalente tenga el mismo espesor y el mismo módulo de elasticidad del muro de mampostería, y se recomienda calcular su altura por la expresión:(Figura 3)

$$h = \left(0,35 + 0,022 \frac{E_c A_c}{G_m A_m} \right) * H$$

$E_c = 13.000 \sqrt{f'c}$ (Módulo de rigidez del hormigón en kg/cm^2)

G_m = Módulo de rigidez a cortante del muro

A_m = Area transversal del muro

A_c = Area transversal de las columnas medida entre el borde y el eje

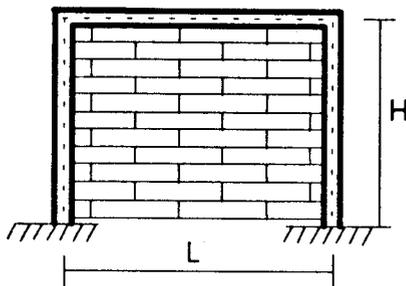
Una vez calculada el área de la diagonal esta debe modelarse al utilizar el programa de computador pues esta barra no debe tener rigidez a la flexión.

PROPIEDADES MECANICAS DE LA MAMPOSTERIA EN ARCILLA

De las memorias del Simposio Internacional sobre Mampostería Estructural y Arquitectónica, celebrado en Medellín del 23 al 24 de Julio de 1992, se extracta de las conferencias dictadas por el Ingeniero Hector Gallego las siguientes especificaciones:

MODULO DE ELASTICIDAD

"Diferentes experimentos realizados por Turnsek & Cacoviv y por Powell & Hodgkinson, en prismas ensayados con deformación controlada, han permitido determinar el gráfico normalizado de deformación para la mampostería".



"La determinación del módulo de elasticidad de la mampostería se hace, normalmente, al 50% del valor de la resistencia última, $f'm$, para tener en cuenta el comportamiento no lineal del material". (Ver figura 4)

"El módulo de elasticidad de la mampostería puede determinarse basándose en resultados empíricos. Esta evaluación ha resultado en valores del módulo de elasticidad (E_m) entre un lindero bajo de 400 $f'm$ y un lindero alto de 1.000 $f'm$ (Ver figura 5) para mampostería de ladrillos de arcilla y sílice-cal asentados con mortero". Para las aplicaciones de este artículo tomaremos el valor promedio: $E_m = 700 f'm$.

MODULO DE CORTE Y RELACION DE POISSON

Un valor aproximado del módulo de corte se puede obtener de la expresión:

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu)}$$

Expresión en la que:

ν = Es el módulo de Poisson que tiene un valor inicial de 0,20, aumentando a 0,35 en la vecindad de la rotura, y E_m es el módulo de elasticidad de la mampostería. Los diferentes autores que tratan el tema toman para la relación de Poisson un valor de 0,25.

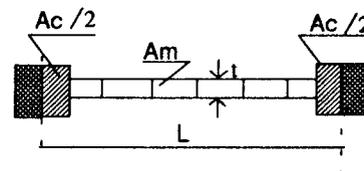
RESISTENCIA A LA COMPRESION, $f'm$.

Debe obtenerse experimentalmente según la sección D.2.7 del Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes. A falta de un valor experimental Roberto Meli sugiere tomar un valor de 15 kg/cm^2 . Para este valor de la máxima resistencia a compresión se obtendría:

$$E_m = 700 * 15 = 1.050 \text{ kg/cm}^2$$

$$\nu = 0,25$$

$$G_m = E_m / 2,5 = 4.200 \text{ kg/cm}^2$$



$$\text{Limitantes: } 0,75 \leq L/H \leq 2,50$$

$$0,90 \leq \frac{E_c A_c}{G_m A_m} \leq 11,0$$

FIGURA 3. Limitantes del modelo matemático

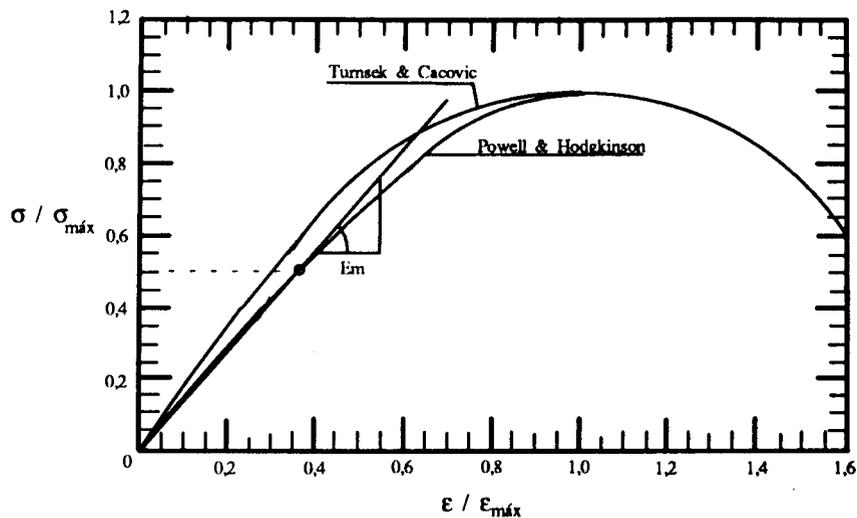


FIGURA 4. Diagrama normalizado esfuerzo (σ) vs deformación unitaria (ϵ) para el ensayo de compresión de prismas de mampostería

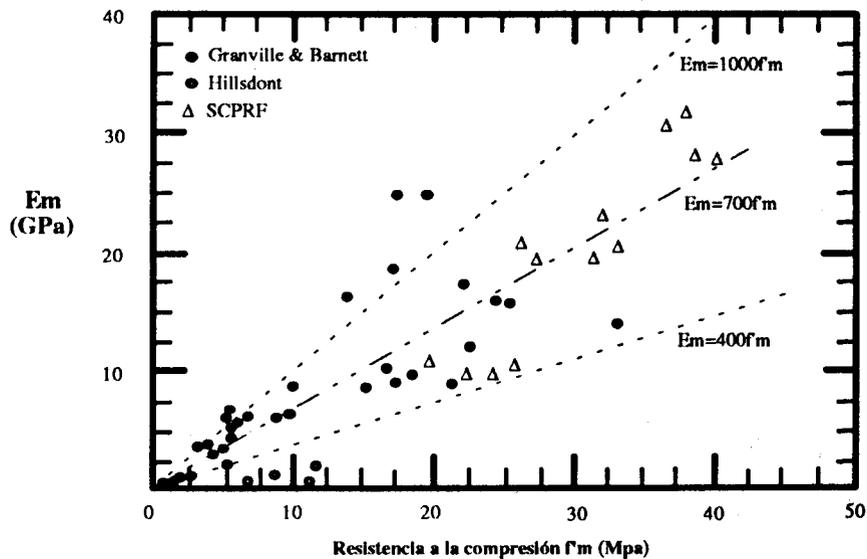


FIGURA 5. Determinación del módulo de elasticidad (E_m) de la mampostería en función de resultados de ensayos de compresión ($f'm$) experimentales para mampostería pegada con mortero

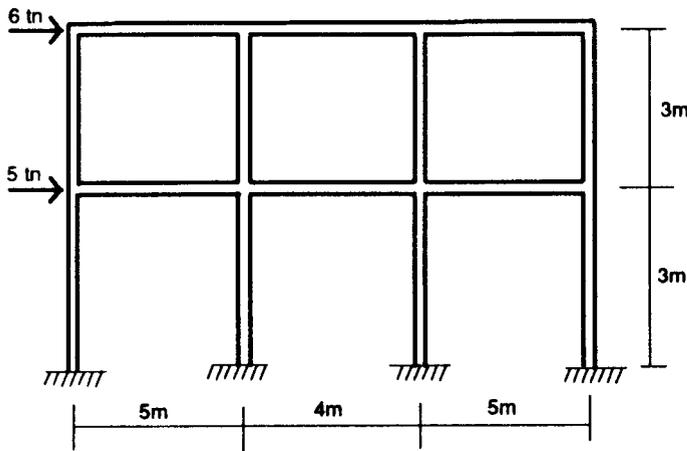
DEFORMACIONES UNITARIAS ULTIMAS

Los siguientes valores de las deformaciones unitarias últimas son utilizables para medir la resistencia y curvatura últimas de elementos de flexo-compresión, en la mampostería de bloques huecos rellenos con hormigón líquido. Están calculados en la rama descendente del diagrama esfuerzo-deformación a 0,50 $f'm$ y son los siguientes:

- Bloques unidos con mortero: 0,25%
- Bloques apilados: 0,20
- Bloques unidos con refuerzo en la junta: hasta

0,6%, dependiendo de la cuantía volumétrica del acero. Este valor máximo se alcanza para cuantías volumétricas del orden del 2%.

Ejemplo: Se desea analizar el efecto de los muros de mampostería sobre la siguiente estructura aporticada, para ello se resuelve primero el pórtico sin muros asumiendo que todos los elementos son de 30*30 cm, con $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$; luego se asume que un muro de mampostería de arcilla de 15 cm de espesor es colocado en las luces centrales y posteriormente se considera el caso de colocación del muro en todas las luces.



Para: $f'm = 15 \text{ kg/cm}^2$
 $E_m = 700 f'm = 10.500 \text{ kg/cm}^2$
 $G_m = E_m/2,5 = 4.200 \text{ kg/cm}^2$

$A_c = 900 \text{ cm}^2$
 $E_c = 188.387,9 \text{ kg/cm}^2$

Esbeltez de los muros: Luz central = $4/3 = 1,33$
 Luz extrema = $5/3 = 1,66$
 Valores satisfactorios

Para los tramos centrales: $A_m = 370 * 15 = 5550 \text{ cm}^2$
 Para los tramos extremos: $A_m = 470 * 15 = 7050 \text{ cm}^2$

Verificación del modelo:

Luz central:
$$\frac{A_c * E_c}{G_m * A_m} = \frac{900 * 188.387,9}{4.200 * 5.500} = 7,274$$

Luz extrema:
$$\frac{A_c * E_c}{G_m * A_m} = \frac{900 * 188.387,9}{4.200 * 7.050} = 5,726$$

Idealización de la diagonal: $A_d = (0,35 + 0,022 [A_c E_c / G_m A_m]) * H * t$

$E_d = E_m = 10.500 \text{ kg/cm}^2$

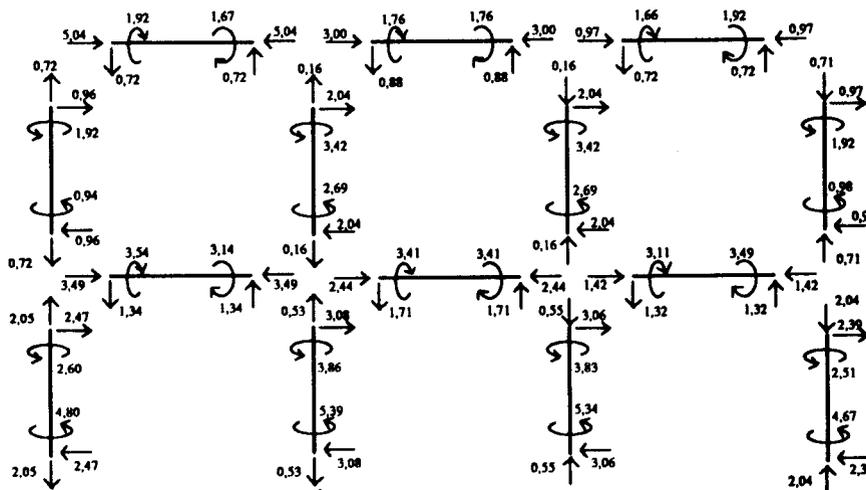
Diagonal central: $A_d = (0,35 + 0,022 * 7,274) * 300 * 15 = 2.295,126 \text{ cm}^2$

Diagonal extrema: $A_d = (0,35 + 0,022 * 5,726) * 300 * 15 = 2.141,874 \text{ cm}^2$

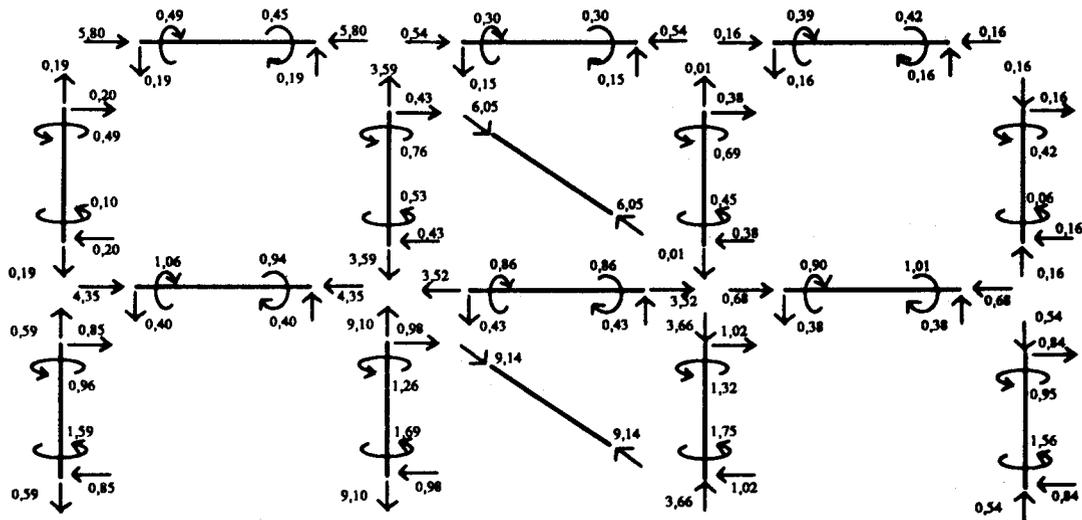
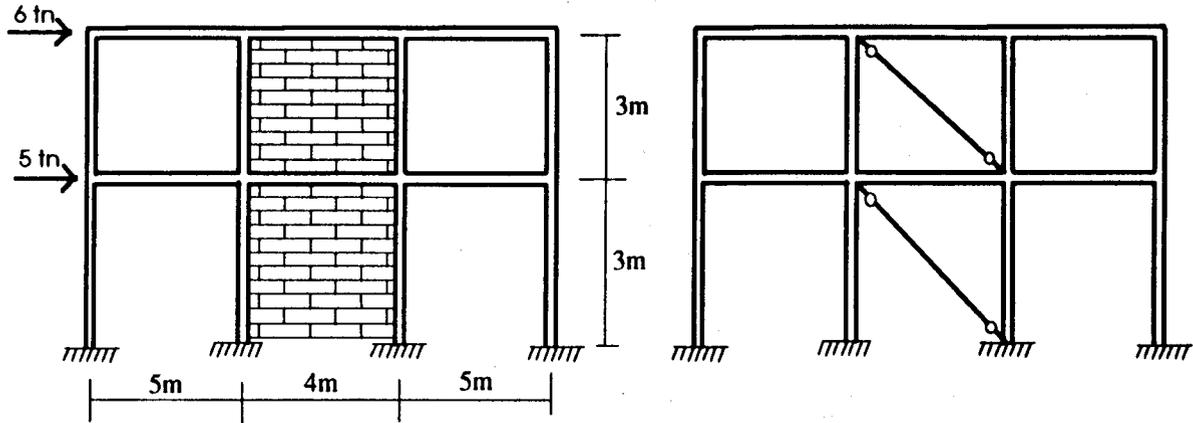
Al emplear el programa del computador deben entrarse dimensiones que representen estas áreas y hagan su inercia cero, en el caso de la diagonal central este objetivo se logra tomando, por ejemplo, las siguientes dimensiones: $b = 2.295,126 * 10^{-10} \text{ cm}$ y $h = 1 * 10^{-10} \text{ cm}$, esta modelación es necesaria pues las diagonales que representan los muros no deben absorber momentos.

a) Solución sin muros

Desplazamiento promedio del piso 2 = 1,584 cm
 Desplazamiento promedio del piso 1 = 0,814 cm
 $K_h \text{ piso 2} = 6 / (1,584 - 0,814) = 7,79 \text{ tn/cm}$
 $K_h \text{ piso 1} = 11 / 0,814 = 13,52 \text{ tn/cm}$

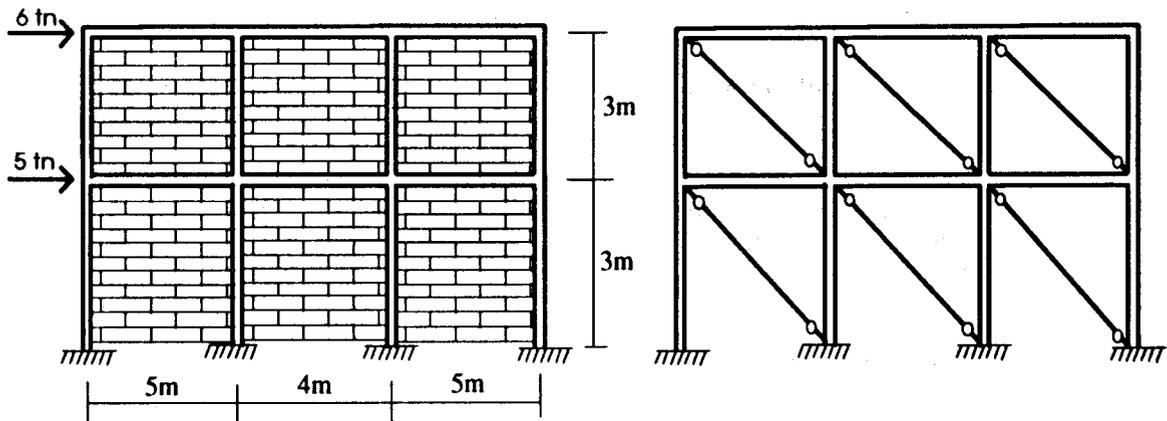


b) Solución con muros en las luces de entrada

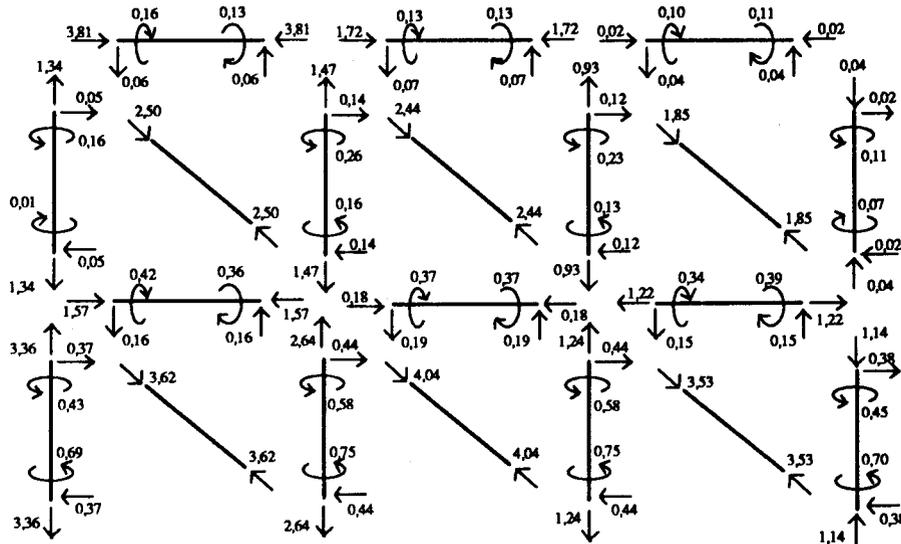


Desplazamiento promedio del piso 2 = 0,439 cm
 Desplazamiento promedio del piso 1 = 0,256 cm
 K_h piso 2 = $6 / (0,439 - 0,256) = 32,79 \text{ tn/cm}$
 K_h piso 1 = $11 / 0,256 = 43,97 \text{ tn/cm}$

c) Solución con muros en todas las luces



Desplazamiento promedio del piso 2 = 0,1757 cm
 Desplazamiento promedio del piso 1 = 0,1102 cm
 K_h piso 2 = $6/(0,176 - 0,110) = 90,91$ tn/cm
 K_h piso 1 = $11/0,110 = 100,00$ tn/cm



Análisis comparativo de los resultados:

Los porcentajes de variación se calculan respecto a los del pórtico sin muros, el signo menos indica que la acción disminuye.

Acción	Piso	Muros en las luces centrales	Muros en todas Luces
Momentos en vigas	2	-75%	-93%
	1	-70%	-90%
Momentos en columnas	2	-80%	-95%
	1	-66%	-86%
Derivas elásticas	2	-76%	-92%
	1	-69%	-86%
Rigidez	2	+321%	+1.067%
	1	+225%	+640%

Tabla 1. Influencia de los muros de mampostería de arcilla en los pórticos de hormigón

CONCLUSIONES:

- El comportamiento de los pórticos de hormigón reforzado es seriamente afectado por los muros de mampostería de arcilla cuando estos se le adosan confinándolo.
- La rigidez de los pórticos se incrementa considerablemente, lo cual se refleja en una disminución apreciable de las derivas elásticas.
- Cuando los muros se disponen de una manera simétrica se incrementa la rigidez de la estructura de una manera uniforme y no se inducen efectos desfavorables.
- Cuando los muros se disponen de una manera asimétrica, y no se considera este caso en el análisis, se presenta un peligroso desplazamiento del centro de rigidez de la estructura que conduce a una torsión no considerada en el análisis.

y que fué la causa de falla de más del 50% de los edificios en Ciudad de México en el sismo de 1985. Este caso es particularmente crítico en edificios de esquina en los cuales en los pórticos sobre los linderos deben llenarse todos los espacios, lo cual se hace frecuentemente con mampostería de arcilla, mientras que los pórticos de fachada llevan grandes ventanales.

- Debe existir concordancia entre lo proyectado y lo construido, si en el análisis no se han considerado los muros como elementos estructurales estos deben necesariamente aislarse de la estructura, aún a costa de los rendimientos económicos. Una mala disposición de los muros puede ser fatal para el comportamiento sísmico de la estructura.

Debe existir concordancia entre lo proyectado y lo construido, si en el análisis no se han considerado los muros como elementos estructurales estos deben necesariamente aislarse de la estructura, aún a costa de los rendimientos económicos.

- Las derivas inelásticas, desplazamientos relativos entre dos pisos consecutivos, que permite el Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes, para pórticos de hormigón reforzado, son del 1,5% de la altura del entrepiso (Sec. A.6.4.2), pero cuando a los pórtico se le adosan los muros estos fallan cuando la deriva alcanza valores cercanos al 0,25%. Esto implica que las normas permiten diseñar pórticos muy flexibles a los cuales se les adicionan muros muy rígidos que ante un pequeño desplazamiento lateral del pórtico se fisuran, el ejemplo más reciente lo tenemos en Medellín con los sismos de Octubre de 1992. Como los acabados en las construcciones de viviendas son muy costosos es recomendable reducir las derivas permitidas por el Código para pórticos con el fin de minimizar los daños en los muros y acabados.

- Las derivas son mayores en los primeros pisos, pues son proporcionales al cortante sísmico, de allí que el caso anteriormente mencionado es particularmente crítico en estos pisos.
- El considerar los muros en el análisis implica disminuir considerablemente los momentos tanto en vigas como en columnas, lo cual conduce a estructuras económicas. Pero a la mampostería debe darse ductilidad con una adecuada disposición del refuerzo que evite su deterioro ante ciclos de carga, teóricamente la mampostería sin reforzar debería ser prohibida en zonas sísmicas. Igualmente debe verificarse que la mampostería sí está en capacidad de soportar las cargas que se deducen del análisis sin fallar por aplastamiento y en caso de este producirse deben tomarse medidas para que no exista desprendimiento de la misma pues esto sería fatal en un evento sísmico.
- Cuando se desee considerar en el análisis el efecto de los muros debe prestarse cuidado muy especial al modelo que se va a adoptar para idealizarlos; a falta de investigaciones en el medio Colombiano, hemos tratado el tema partiendo del modelo mexicano que no necesariamente tiene que concordar con los materiales que tenemos en Colombia. Habrá que esperar los resultados de las investigaciones que actualmente se desarrollan en la Universidad de los Andes y debe exigírsele al Gobierno Nacional y a las entidades gremiales dedicadas a la construcción (Camacol), a las financieras de viviendas y a las compañías aseguradoras que inviertan en investigaciones en los centros universitarios para poder mejorar la calidad técnica del análisis, diseño y construcción de vivienda.

BIBLIOGRAFIA

- Meli Piralla, Roberto y Bazán Zurita Enrique, Manual de diseño Sísmico de Edificios, México: Limusa, 1987.
- Meli Piralla, Roberto. Diseño Estructural, México: Limusa, 1985.