

## EFFECTOS DEL PISO BLANDO EN ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA EN CHIAPAS

Raúl González H.<sup>1</sup>, Jorge Aguilar C.<sup>2</sup>, Carlos Narcía L.<sup>1</sup>,  
Robertony Cruz D.<sup>2</sup>

### RESUMEN

*La condición de entrepiso blando trae como consecuencia muchos problemas en diversas estructuras tras presentarse un sismo moderado o intenso, lo anterior es debido a que no hay suficientes estudios del fenómeno, en esa medida no hay disposiciones reglamentarias que cubran los esfuerzos que experimentan las construcciones que presentan esta condición de diseño. Para este trabajo se desarrollan modelos de piso blando para dos y cuatro niveles considerando el piso blando en el primero y segundo nivel, respectivamente, así como modelos en L con salientes hasta del 100% para modelos de plantas en L simétricas considerando también el efecto de piso blando, empleándose sismos de subducción registrados en Chiapas.*

**Palabras clave:** Piso blando, mampostería, estructuras.

### ABSTRACT

The soft-story condition brings as a consequence many problems in various structures after a moderate or intense earthquake, this is due to the fact that there are not enough studies of the phenomenon, to that extent there are no regulations that cover the efforts that the constructions present with this de-

sign condition. For this work, soft story models are developed for two and four levels considering the soft story conditions in the first and second levels, respectively, as well as L-shaped models with protrusions up to 100% for symmetric L-shaped plant models considering also the effect of soft story, using subduction earthquakes registered in Chiapas.

**Keywords:** Soft floor, masonry, structures.

### INTRODUCCIÓN

Las construcciones pueden sufrir daños cuando se someten a excitaciones sísmicas, sin embargo, para una misma configuración estructural, región y sismo; los daños no son homogéneos. Lo anterior está determinado por varios factores, como son: El sistema estructural, las características del sismo, la calidad de la construcción y su mantenimiento (González y Gómez, 2008). No obstante, lo anterior, de acuerdo con experiencias de sismos importantes ocurridos en el pasado, los daños y su magnitud se deben - en mayor medida - a irregularidades tanto en planta como en elevación; encontrándose que, para estructuras bajas, el piso blando representa una irregularidad determinante de su vulnerabilidad y de la posibilidad de presentar daños, e incluso llegar al colapso.

La reglamentación nacional empleada para el diseño de estos sistemas en la mayor parte del territorio nacional son las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal del 2004 (NTC-RCDF-2004), las cuales son empleadas para el diseño por sismo en el estado de Chiapas. Sin embargo, estas normas se refieren al problema de entrepiso blando como una condición de irregularidad y la agrupan con otras condiciones de menor importancia, en la misma categoría del comportamiento sísmico.

Dichas normas se limitan a la aplicación de factores incrementales sobre las fuerzas de diseño en la

<sup>1</sup> Profesor investigador, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Facultad de Ingeniería, Libramiento Norte Poniente, CU, Caleras Maciel, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México; ingeraul@yahoo.com.

<sup>2</sup> Profesor investigador, Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ingeniería, Boulevard Belisario Domínguez Km # 1081, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, jaguilar@unach.mx.

estructura. Este enfoque, de acuerdo con el análisis realizado, presenta problemas, ya que sólo amplifica las fuerzas y no analiza los cambios de rigidez, resistencia y capacidad de deformación, que es el parámetro analizado en el presente trabajo como el que determina el nivel de daños que la estructura experimentará.

De igual forma la propuesta que asumen las NTC-RCDF-2004 frente al problema de piso blando, tampoco considera los niveles superiores de esfuerzos y demandas de deformación inelástica en la estructura, o la posición del nivel blando en altura. Esto puede conducir a una inestabilidad dinámica, lo cual es más significativo conforme aumenta el tamaño de la estructura, incluso para estructuras bajas si los materiales son de muy baja resistencia, como en el caso de Chiapas, ya que las estructuras de mampostería de más de tres niveles experimentan una concentración de esfuerzos en planta baja, lo cual hace que la estructura se comporte como una con piso blando.

A continuación, se presentan algunos ejemplos de daños en estructuras durante eventos sísmicos importantes en México y en el extranjero entre 1985 y 2008,

**Tabla 1. Efecto de sismos recientes en edificios. Modificada de Solomon y Murat, 2008.**

Nombre del sismo	Fecha	M.	Referencia	Columna corta	Discontinuidad de columnas	Piso blando	Torsión	Diseño estructural deficiente	Colindancias	Problemas de reglamentos	Conexiones	Columna débil y viga fuerte	Materiales débiles o sin refuerzo	Llenamiento	Deslizamiento de tierras
El Asnam, Argelia	10/10/80	7.3	EERI, 1983	*											
Vila del Mar, Chile	03/03/85	7.8	ICH, 1988	*											
Michoacán, México	19/09/85	8.1	Popov, 1987 y Teza, 2004	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Loma Prieta, Estados Unidos	17/10/89	6.9	EERI, 1989	*					*	*				*	
Spizak, Armenia	07/12/88	6.8	Teza, 2004				*	*	*	*	*	*	*	*	*
Luzon, Filipinas	16/07/90	7.8	Hopkins, 1992			*	*	*						*	*
Erzincan, Turquía	13/03/92	6.7	Saackoglu y Ersoy, 1995	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Northridge, Estados Unidos	17/01/94	6.7	Teza, 2004	*			*	*	*	*	*	*	*	*	*
Kobe, Japón	17/01/95	6.9	Teza, 2004				*	*	*	*	*	*	*	*	*
Kocaeli, Turquía	17/08/99	7.4	Nasim et al., 2000	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Chi-Chi, Taiwan	21/09/99	7.6	Tsai et al., 2000	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
San Salvador, El Salvador	13/01/01	7.6	Alarcón, 2005	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Bhoj, India	26/01/01	7.7	Humar et al., 2001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Tecoman, México	21/01/03	7.8	Akocor y Kilger, 2006	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Bingöl, Turquía	01/03/03	6.4	Dogangün, 2004	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Lefkada, Grecia	14/08/03	6.2	Karakostas et al., 2005	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Bam, Irán	26/12/03	6.5	Teza, 2004	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Sumatra, Indonesia	26/12/04	9.3	CAEE, 2003	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Java, Indonesia	27/03/06	6.3	EERI, 2006	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Pisco, Perú	15/08/07	8.0	Elnashai y otros, 2008	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Weochnan, China	12/03/08	8.3	Xiao, 2008	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

los cuales son extraídos de la literatura y confirman que las fallas por irregularidades continúan repitiéndose puntualmente, haciendo énfasis en irregularidades como el piso blando. En la Tabla 1 se resume el efecto de los sismos en estructuras de concreto y mampostería durante los terremotos que han sido importantes en la historia de la ingeniería sísmica.

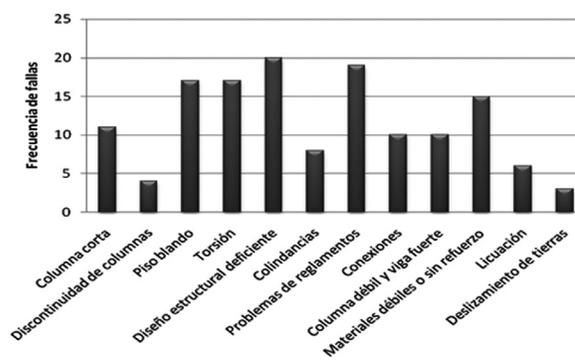


Figura 1. Frecuencia de daños durante eventos sísmicos asociados con distintos fenómenos constructivos, de diseño o geotécnicos de acuerdo con los datos de la Tabla 1.

Como se observa en Tabla 1, prácticamente en el total de los 21 sismos analizados se presentan al menos tres parámetros de este tipo de patologías. Siendo conscientes de esto, podemos afirmar que cualquier tipo de irregularidad sigue siendo una de las causas más recurrentes en los daños que se presentan durante los sismos en todo tipo de edificaciones, lo cual se reafirma al observar la Figura 1.

## CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS ESTUDIADOS

Para el desarrollo de la investigación se consideraron cinco plantas regulares, una cuadrada de 6x6 y cuatro rectangulares con las relaciones: 6x12, 6x15, 6x24 y 6x30, con relaciones lado corto respecto a lado largo de 1:1, 1:2, 1:2.5, 1:4 y 1:5. La segunda y tercera de estas relaciones son las que se manejan como límites en el reglamento del Distrito Federal. Se probó el efecto de piso blando en estructuras regulares con y sin el efecto de alargamiento, colocando el piso blando en el nivel uno y en el dos, para modelos de cuatro niveles, los cuales fueron realizadas retomando los modelos de González y Gómez (2008).



Figura 2. Ejemplos de estructuras con piso blando, adicionalmente problemas de cambio brusco de rigidez y masa en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Para el modelado estructural se empleó el programa de análisis estructural SAP2000 v10.0.1 Advanced mediante el Método de Elementos Finitos (MEF), para alturas de entrepiso de 2.60 m, que son las usuales en la ciudad de estudio; se modelaron estructuras de uno, dos y cuatro niveles.

El fenómeno de cambio de rigidez con la altura es propio de estructuras incluso de dos niveles, tal como el caso de casas habitación adecuadas como locales comerciales en planta baja, o en aquellas cuyos proyectos arquitectónicos favorecen áreas comunes en planta baja con escasa densidad de muros y áreas dormitorio en planta alta con mayor densidad, lo cual cambia abruptamente la rigidez de un nivel a otro inmediato inferior (Figura 2).

La primera foto de la Figura 2 corresponde a una vivienda de dos niveles con piso blando e irregularidad en planta y en elevación, por sus características se observa que proviene de un proceso de autoconstrucción. Por su parte, la foto del centro corresponde a un edificio de cuatro niveles que se usará como oficinas. La estructura en construcción se apoya en una planta baja rígida de mampostería y las tres plantas superiores, pretenden trabajar como un sistema de marcos con columnas de 25x20 a cada tres o cuatro metros y vigas de 30x20. Por sus características se observa que proviene de un proceso de autoconstrucción, y que presenta errores conceptuales muy importantes y la posibilidad de presentar un piso blando en el segundo nivel.

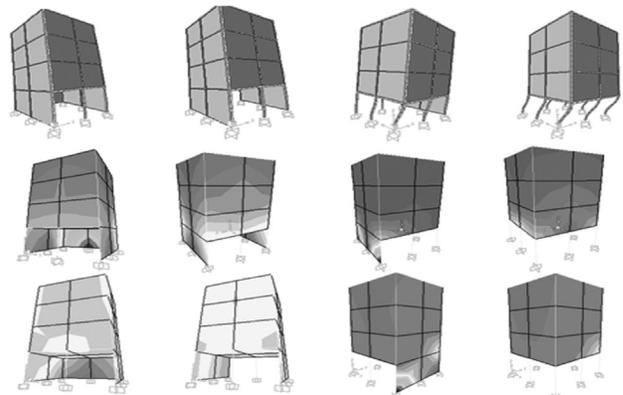


Figura 3. Deformada, esfuerzos a corte y a flexión respectivamente, en los muros del edificio con la relación 1:1, considerando el piso blando para cuatro niveles.

### Estudio del efecto de piso blando

Para el estudio se desarrollaron 480 corridas computacionales para modelos con tres alturas (2.70 m, 5.40 m y 10.80 m, las alturas de entrepiso propias de la zona), ocho plantas (una cuadrada, tres rectangulares y cuatro secciones L), diez sismos y dos opciones de piso suave, en el primer y segundo nivel. Para las primeras corridas se consideró un edificio con una relación de aspecto 1:1, para comparar los resultados con los demás modelos. Las deformadas de los modelos son correspondientes al trabajo de corte que predomina en las estructuras de mampostería. Mientras que los esfuerzos son graduales a las

dimensiones de las estructuras analizadas, pero su estudio es clave en el proceso de comparación cuantitativo de éstos.

En los modelos se eliminan los muros del frente, después los de atrás y finalmente los muros de los costados de la sección constructiva, simulando una construcción en la que la planta baja se emplea como local comercial o estacionamiento y la planta superior como habitación, oficinas, etc. En la Figura 3 se presentan, respectivamente, las deformadas y los esfuerzos de corte y flexión de estos modelos.

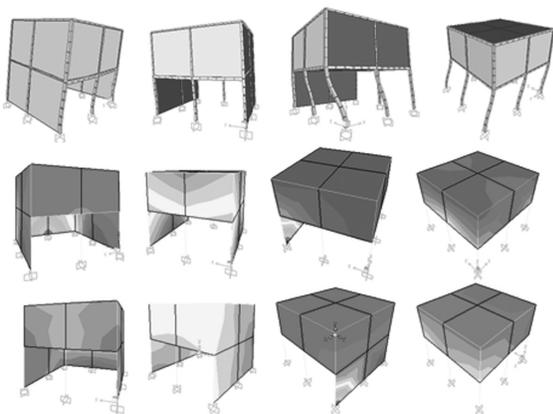


Figura 4. Deformada, esfuerzos a corte y a flexión, respectivamente, en los muros del edificio con la relación 1:1, considerando el piso blando para dos niveles.

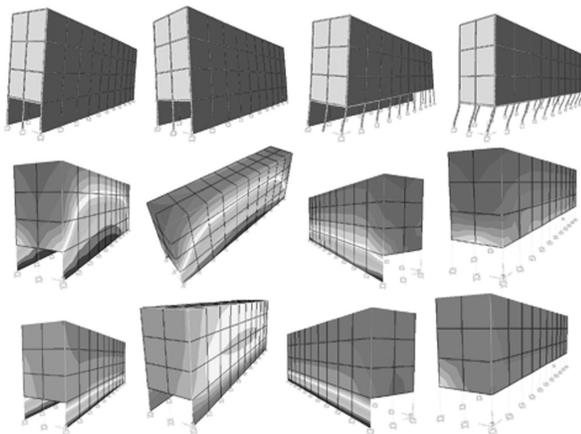


Figura 5. Deformada, esfuerzos a corte y a flexión, respectivamente, en los muros del edificio con la relación 1:5 considerando el piso blando para cuatro niveles.

Las deformadas de la Figura 3 presentan un comportamiento frágil en su planta baja, la cual opera como fusible, ya que al reducir gradualmente los muros comienza una distribución concentrada de esfuerzos en un menor número de elementos, lo que implica un incremento muy significativo en las demandas. Los cambios de rigidez son tan abruptos que la estructura termina colapsando (por el nivel de esfuerzos y deformación alcanzada) antes de retirar todos los muros de la planta baja en los edificios de cuatro niveles.

Un proceso similar con modelos de dos niveles muestra el mismo comportamiento frágil que los modelos de cuatro niveles. Sin embargo, debido a que la masa que se encuentra sobre la planta débil es menor, el incremento de esfuerzos que se genera es menos importante. Aun así, la vulnerabilidad es muy alta por el efecto de torsión amplificada, como en las deformadas y distribución de esfuerzos de corte y flexión que se muestran en la Figura 4.

Después de estudiar el efecto de piso blando con plantas cuadradas, con relación 1:1, se realizaron modelos para dos alturas (5.40 m y 10.80 m) y para distintas relaciones de alargamiento, tomando las mismas consideraciones para retirar los muros. En la Figura 5 se presentan las deformadas y los esfuerzos de corte y flexión de los modelos con relación de largo ancho de 1:5, la única que se mostrará aquí.

Las deformadas de la Figura 5 presentan un comportamiento frágil en su planta baja (mismo patrón que los anteriores), la cual opera como fusible. A diferencia de los modelos anteriores, el retirar muros en el sentido corto no afecta tanto como en aquellos modelos sin alargamiento importante, ya que es difícil pensar que no habrá más muros transversales en el sentido largo, salvo en las bodegas y estacionamientos. Por el contrario, cuando se retiran los muros largos de manera integral en plantas alargadas, el colapso es casi inmediato. En los modelos de distribución de esfuerzos de la Figura 5 podemos observar que se presentan concentraciones solamente en los dos primeros niveles, trabajando muy poco los niveles superiores.

En la siguiente etapa del estudio de piso blando se realizaron modelos en L con salientes del 100% y dos y cuatro niveles. Estos modelos se compararon con modelos de plantas en L simétricas, tomando las mismas consideraciones para retirar los muros. En la

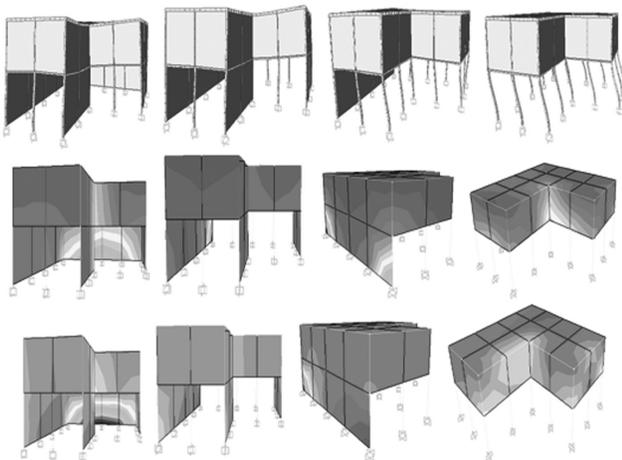


Figura 6. Deformada, esfuerzos a corte y a flexión en los muros del edificio considerando el piso blando gradualmente para dos niveles, en sección L y con salientes del 100%.

Figura 6 se presentan las deformadas y los esfuerzos de corte y flexión de los modelos.

Las deformadas de la Figura 6 presentan un comportamiento frágil en su planta baja, la cual opera como fusible. Al reducir gradualmente los muros comienza una distribución concentrada de esfuerzos en un menor número de elementos, lo que implica un incremento muy significativo en las demandas. Los cambios de rigidez no son tan abruptos como en otros casos, ya que existen familias de muros paralelos en ambos sentidos, aunque la irregularidad en planta aporta más a la posibilidad de colapso que el piso blando.

El enfoque de las normas NTC-DS-RCDF-2004 (Diseño por sismo) de aplicar factores incrementales a las fuerzas de diseño en toda la estructura, de acuerdo con el análisis realizado, presenta problemas en su consideración, ya que sólo amplifica las fuerzas y no analiza adecuadamente los cambios de rigidez, resistencia y, principalmente, la capacidad de deformación. Tampoco se consideran los niveles superiores de esfuerzos y demandas de deformación inelástica que hay en la estructura, o la posición del nivel blando en altura, lo cual puede conducir a una inestabilidad dinámica.

Miranda (2005) encuentra las siguientes consecuencias en la forma en que se maneja esta problemática por mala interpretación y/o carencias del reglamento en la materia:

- a) La demanda de desplazamiento global sufre un incremento, desde dos y hasta cinco veces. En el estudio de Miranda (2005) se propone la siguiente ecuación, la cual se grafica en la Figura 7.

$$\frac{T_{1eb}}{T_{1r}} = \frac{1}{-13.62 + 14.6 \left( \frac{K_{1eb}}{K_{1r}} \right)^{0.015}} \quad (1)$$

donde:

$T_{1be}$  es el periodo de la estructura con entrespacio blando,

$T_{1r}$  es el periodo de la estructura normal,

$K_{1be}$  es la rigidez de la estructura con entrespacio blando y,

$K_{1r}$  es la rigidez de la estructura normal.

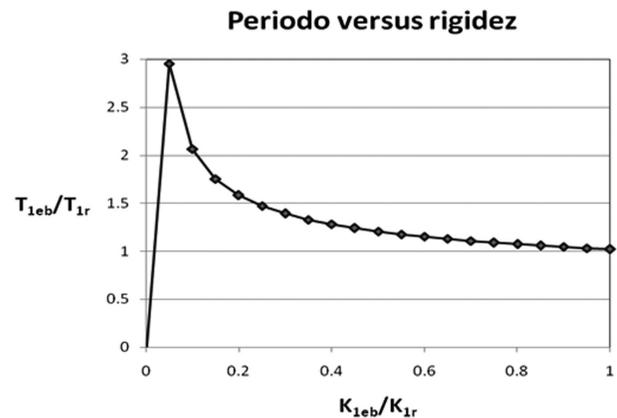


Figura 7. Variación del periodo fundamental con la disminución de la rigidez con la ecuación de Miranda (2005).

En la Figura 7 se muestra el incremento del periodo de la estructura con piso blando, respecto a la rígida. Tras analizar este efecto se puede decir que cuando se coloca un piso blando se flexibiliza la estructura, por lo que tiene un periodo mayor, al cual se le asigna un coeficiente sísmico menor; quizás es una de las razones principales para que estas estructuras hayan sobrevivido. Este fenómeno que puede parecer similar al del aislamiento sísmico es más importante en las zonas con espectros mayores.

- b) La demanda de desplazamiento lateral se concentra en el entrespacio blando, provocando

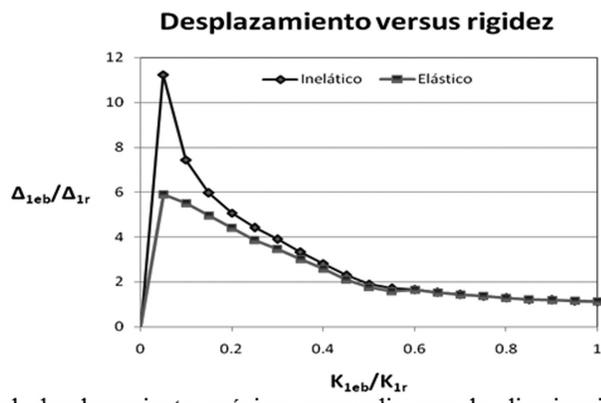


Figura 8. Variación del desplazamiento máximo promedio con la disminución de la rigidez con la metodología de Miranda (2005) para una estructura rectangular de cuatro niveles con y sin entrepiso blando.

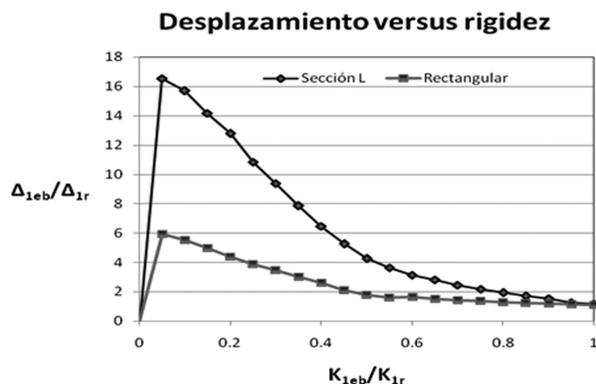


Figura 9. Variación del desplazamiento máximo promedio con la disminución de la rigidez de para una estructura rectangular de cuatro niveles con y sin entrepiso blando y una sección L irregular.

que éste presente las mayores deformaciones inelásticas. Los análisis elásticos subestiman la demanda de deformación lateral, como se observa en la Figura 8, donde se comparan los resultados del modelo de Miranda, que es analizado de manera inelástica, contra uno similar elástico elaborado para este estudio. En la Figura 9 se muestran los efectos de la irregularidad sumados al piso blando, donde se amplifican en más de 2.5 veces.

- c) Deformaciones laterales grandes actuando junto con la carga axial pueden provocar no linealidades geométricas, además de las no linealidades del material (efecto  $P-\Delta$  y  $p-\delta$ ). La combinación provoca inestabilidad dinámica de la estructura.

Algunas recomendaciones en la literatura para el análisis adecuado de este fenómeno consisten en: Colocar distintos factores de ductilidad en el nivel de piso blando respecto al resto de la estructura, considerar adecuadamente la sobrerresistencia y rigidez que le aportan al sistema los elementos estructurales y no estructurales, así como estimar adecuadamente los desplazamientos. Con estas medidas estamos más cercanos a determinar la realidad de las demandas inelásticas de deformación, pero no son suficientes si el cambio de rigidez es más abrupto del 40%.

En la Tabla 2 se muestra los factores de  $Q'$  en función de la irregularidad de la estructura, recordando que las NTC-DS-RCDF-2004 permiten cambios de rigidez hasta del 50%. Estos factores incrementan la rigidez de toda la estructura, lo cual no atiende al problema. El reglamento no hace referencia específica ni a la ubicación del piso blando, ni al número de niveles de la estructura.

Tabla 2. Factores de incremento de las fuerzas sísmicas por irregularidad en las NTCS-RCDF-2004.

Condición	$Q'$	Ecuación
Regular	1.00	$1.00C_s/Q'$
Ligeramente irregular	0.90	$1.10C_s/Q'$
Irregular	0.80	$1.25C_s/Q'$
Fuertemente irregular	0.70	$1.42C_s/Q'$

Donde:  $C_s$  es el coeficiente sísmico y  $Q'$  es el factor de comportamiento sísmico.

El efecto del piso blando transgrede las condiciones de un diseño deseable en mampostería tales como la consistencia, ya que en las normas se solicita se proporcione densidad y regularidad de ubicación de muros en planta para lograr homogeneidad en la distribución de esfuerzos. Adicionalmente se desea que las estructuras de mampostería presenten un comportamiento estable con degradación de esfuerzos gradual, pero al presentar un piso blando habrá una degradación súbita de resistencia y capacidad de deformación.



Figura 10. Estructuras que presentan piso blando a consecuencia de la debilidad de la mampostería, no obstante que físicamente no se presenta tal (Jean, 2007).

El efecto de piso blando se ha presentado en estructuras que no presentan cambios importantes en la distribución de rigidez en la altura, pero que cuentan con muros de mampostería débiles que no pueden manejar la concentración de la demanda inelástica a la que estuvieron sujetos principalmente los niveles inferiores como se observa en la Figura 10 obtenida de Jean (2007).

### COMENTARIOS FINALES

Los estudios paramétricos realizados nos permiten identificar las condiciones más importantes de vulnerabilidad por irregularidad por piso blando de manera cualitativa y cuantitativa. Dentro de los resultados más importantes hasta ahora obtenidos, podemos señalar lo siguiente:

- En el trabajo se muestra el análisis sísmico de modelos de edificaciones para las cuales se observa cómo las configuraciones con distintas irregularidades hacen que las construcciones sean más vulnerables, no importando el sistema estructural o los materiales empleados. Estas afirmaciones se ven fortalecidas con el conjunto de estudios analíticos realizados en México y el extranjero.
- La distribución espacial de las demandas de aceleración en edificaciones con problemas de

irregularidades en planta y elevación supera, en muchas ocasiones, a los lineamientos establecidos en las normas técnicas complementarias del Distrito Federal. Lo anterior nos obliga a seguir investigando en la materia para colocar límites más adecuados o a solicitar análisis más estrictos cuando así sea necesario.

### REFERENCIAS

- Alarcón P. (2005). "Comportamiento sísmico de estructuras de mamposterías". Curso corto regional sobre edificaciones de mampostería. Morelia, Michoacán, México. (Memorias en CD)
- Alcocer S. y Klingner R. (2006). "El sismo de Tecmán, México del 21 de enero de 2003". Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica y Earthquake Engineering Research Institute, México, D.F.
- CAEE (2005). "Reconnaissance report on the December 26, 2004 Sumatra Earthquake and tsunami". The Canadian Association for Earthquake Engineering, Canada.
- Dogangün A. (2004). "Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl earthquake in Turkey". Engineering Structural 26, 841-856.
- Earthquake Engineering Research Institute. (1983). "El-Asnam, Algeria Earthquake, 10 October, 1980; A Reconnaissance and Engineering Report". Earthquake Engineering Research Institute, United States of America.