

INFLUENCIA DE LA MAMPOSTERÍA NO REFORZADA EN EL COMPORTAMIENTO INELÁSTICO DE PÓRTICOS DE CONCRETO

INFLUENCE OF NONREINFORCED MASONRY IN THE INELASTIC BEHAVIOR OF CONCRETE FRAMES

JULIÁN CARRILLO

Profesor Investigador, Universidad Militar "Nueva Granada". wcarrillo@umng.edu.co

GIOVANNI GONZÁLEZ

Profesor Investigador, Universidad Militar "Nueva Granada". giogon@umng.edu.co

Recibido para revisar 18 de Mayo 2006, aceptado 26 de Septiembre de 2006, versión final 8 de Noviembre de 2006

RESUMEN: Los muros no estructurales pueden ser desplazados de un lugar a otro por variaciones en el uso de los espacios, originando aún durante sismos moderados, una interacción pórtico-relleno que puede alterar significativamente la concepción de los diseños convencionales. Por lo tanto, es necesario evaluar la influencia que tienen estos rellenos en el comportamiento inelástico local y global de los edificios, especialmente cuando esta interacción causa efectos negativos a los elementos que conforman el sistema. Teniendo en cuenta lo anterior, se presentan en este trabajo los resultados de una investigación analítica y computacional, donde se realiza la modelación inelástica de tres edificios típicos (de 3, 7 y 13 pisos) utilizando el método del puntal diagonal equivalente, con el propósito de cuantificar la influencia (positiva ó negativa) de los rellenos de mampostería en el comportamiento local y global de las edificaciones. Adicionalmente se presenta una herramienta que permite tener en cuenta estos elementos durante el proceso de análisis y diseño estructural.

PALABRAS CLAVE: Pórtico de concreto, Mampostería, Comportamiento inelástico, Modelación, Puntal diagonal.

ABSTRACT: The nonstructural walls can be displaced from a place to another one by variations in the use of the spaces, originating even during moderate earthquakes, a frame-infill interaction that can significantly alter the conception of the conventional designs. Therefore, it is necessary to evaluate the infills influence related to the local and global inelastic behavior of the buildings, especially when this interaction causes negative effects to the elements that conform the system. Considering the previous fact, in this paper the results of an analytical and computational investigation are presented, where the inelastic modeling of three typical buildings (of 3, 7 and 13 floors) is made, using the equivalent diagonal strut method, in order to quantify the influence (positive or negative) of the masonry infills in the local and global behavior of the constructions. Additionally, it is presented a tool that allows considering these elements during the structural analyses and design process.

KEYWORDS: Concrete frame, Masonry, Inelastic behavior, Modeling, Diagonal strut.

1. INTRODUCCIÓN

La mampostería utilizada para la construcción de muros divisorios y fachadas en los edificios de concreto, es considerada normalmente por los diseñadores estructurales sólo como una sobrecarga de efecto uniforme para la estructura y como tal es ignorada en el proceso de análisis y diseño estructural. A pesar de que el

comportamiento de la estructura compuesta de concreto y mampostería ha sido estudiado por muchos años, este sistema ha tenido algunas dificultades para ser modelado analíticamente a causa de: (1) carencia del conocimiento de la modelación de la estructura compuesta pórtico – mampostería no reforzada, debido a la ausencia de resultados experimentales de los materiales y técnicas de construcción comunes en nuestro medio, (2) complejidad de cálculo, debido a las

incertidumbres estructurales asociadas a las características mecánicas del frágil material de relleno y las condiciones de contacto, las cuales cambian a lo largo de su interfase con el concreto, constituyendo fuentes adicionales de dificultad de modelación; y (3) formación de diversos y complejos modos de falla, junto con la complicada naturaleza anisotrópica y heterogénea del muro, debido a la interacción a lo largo de los planos débiles del mortero de pega.

No tener en cuenta la interacción de esta estructura compuesta no está siempre en el lado de la seguridad, puesto que la interacción entre el muro y el pórtico bajo cargas laterales altera significativamente las características dinámicas de la estructura y por lo tanto su respuesta a las cargas sísmicas, las cuales crean una fuente importante de riesgo durante estos movimientos.

2. MÉTODO DEL PUNTAL DIAGONAL EQUIVALENTE

Para tener en cuenta la influencia de la mampostería en el comportamiento inelástico de los edificios se utiliza el método del puntal diagonal equivalente, el cual maneja un procedimiento estático no lineal (NSP, por sus siglas en inglés). El método utilizado es un análisis de pushover de un pórtico que contiene puntales equivalentes excéntricos que representan la mampostería. El método puede ser usado tanto para pórticos completamente rellenos como para paneles de mampostería parcialmente rellenos y con aberturas. Usando puntales excéntricos en este análisis global, se producirán efectos directamente del relleno sobre las columnas, con lo cual no se necesitará evaluar estos miembros localmente. Este método se basa en el desarrollo de rótulas plásticas que capturan las propiedades no lineales del sistema estructural. El método estudiado ha demostrado resultados confiables basados en datos experimentales y análisis de elementos finitos no lineales (Carrillo, 2006).

2.1 Procedimiento estático no lineal para edificios con rellenos de mampostería

En el procedimiento estático no lineal (pushover), el modelo que incorpora directamente una respuesta inelástica del material, es desplazado hasta un “desplazamiento objetivo” para revisar los resultados de fuerzas internas y las deformaciones que se presentan. El “desplazamiento objetivo” representa el máximo desplazamiento probable a ser experimentado durante el sismo de diseño. El modelo matemático de la estructura se somete a un aumento monótonico de fuerzas o desplazamientos laterales (pushover) hasta que el “desplazamiento objetivo” es excedido o la estructura sufre colapso. Debido a que el modelo matemático incorpora los efectos de la respuesta inelástica del material, el cálculo de las fuerzas internas serán aproximaciones razonables de aquellas esperadas durante el sismo de diseño.

La curva pushover se construye hasta un desplazamiento aproximadamente igual al 2.5% de la altura del edificio. Las cargas laterales se aplican a la estructura en una distribución tal que simule la probable distribución de las fuerzas inerciales en un sismo. Para análisis tridimensional, la distribución horizontal debe simular la distribución de fuerzas de inercia en el plano de cada diafragma de piso. Para ambos análisis, bidimensional y tridimensional, deben considerarse por lo menos dos modelos de distribuciones verticales de carga lateral. En general el procedimiento de análisis estático no lineal se resume en los siguientes tres pasos (ATC-40, 1996):

2.1.1 Demanda sísmica sobre la estructura

Se encuentra representada por el espectro de diseño del sitio donde está localizada la edificación. El espectro de diseño se construye para el amortiguamiento intrínseco de la edificación.

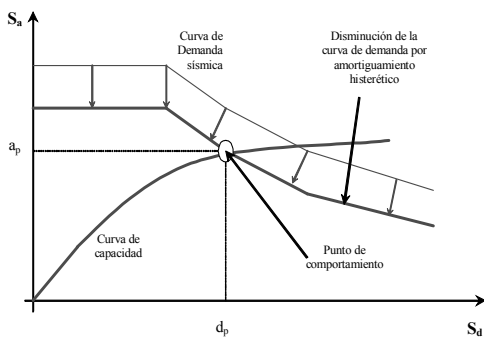
2.1.2 Capacidad de la estructura

El objetivo principal de los procedimientos no lineales simplificados es la generación de la curva de capacidad (pushover curve, en ingles). Esta curva representa los desplazamientos laterales como una función de la fuerza aplicada a la estructura. Este proceso es independiente del método usado para calcular la demanda y del criterio del ingeniero estructural.

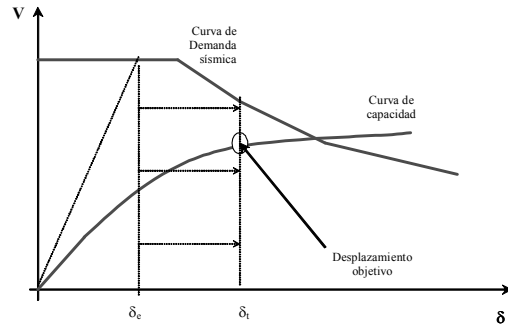
2.1.3 Comportamiento

Para la evaluación del desplazamiento hasta el cual llegará la estructura con el sismo de diseño, se pueden emplear varios métodos entre los que se destacan los siguientes: (1) el método del espectro de capacidad, el cual reduce el espectro elástico debido al amortiguamiento histerético (daño) proporcionado por la estructura y lo intercepta con la curva de capacidad en el sistema coordinado espectral para encontrar el punto de comportamiento (ver Figura 1.a), y (2) el método de los coeficientes de desplazamiento (ver Figura 1.b), el cual modifica el desplazamiento elástico con coeficientes para calcular el desplazamiento objetivo. Usando el punto de comportamiento o el desplazamiento objetivo, la respuesta global de la estructura y los componentes de deformación individual son comparadas con los límites establecidos para cumplir los objetivos de comportamiento para el edificio.

En la Figura 1, S_a y S_d son la aceleración y el desplazamiento espectral, a_p y d_p son la aceleración y el desplazamiento en el punto de comportamiento, V es el cortante en la base, δ es el desplazamiento y δ_e y δ_t son los desplazamiento elástico y objetivo.



(a) Método del espectro de capacidad
(a) Capacity spectrum method



(b) Método de los coeficientes de desplazamiento
(b) Displacement coefficient method

Figura 1. Métodos para el cálculo del punto de comportamiento. Tomada de Reyes, 2001
Figure 1. Methods for calculating the behavior point. Taken from Reyes, 2001

2.2 Evaluación de la resistencia en el plano

A continuación se describen las variables necesarias para realizar la modelación en el plano del sistema pórtico de concreto - mampostería no reforzada:

2.2.1 Ancho del puntal diagonal equivalente

Las expresiones usadas en este artículo han sido adoptadas de Mainstone (1971), Stafford-Smith y Carter (1969), entre otros. Sin embargo, se han realizado algunas modificaciones con el fin de calibrar estos resultados con los obtenidos experimentalmente utilizando mampostería de fabricación Colombiana (Carrillo, 2006). El ancho del puntal equivalente, a , depende de la relación de rigidez a flexión del relleno y las columnas del pórtico de confinamiento (λ_1). Esta rigidez relativa debe ser evaluada usando la Ecuación 1.

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_m t \text{sen } 2\theta}{4 E_c I_{col} h} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

donde E_m es el módulo de elasticidad de la mampostería, t es el espesor del muro, θ es el ángulo de inclinación del puntal, E_c es el módulo de elasticidad de las columnas de confinamiento, I_{col} es el momento de inercia de la columna y h es la altura del relleno. Usando esta expresión Mainstone (1971) consideró la flexibilidad relativa del pórtico respecto al relleno en la

evaluación del ancho del puntal equivalente del panel, tal como se muestra en la Ecuación 2.

$$a = 0.175 D (\lambda_r H)^{-0.4} \quad (2)$$

donde D es la longitud diagonal del relleno y H es la altura del pórtico de confinamiento. Sin embargo, si hay aberturas presentes y/o daños en el relleno existente, el ancho del puntal equivalente debe ser reducido usando la Ecuación 3.

$$a_{red} = a (R_1)_i (R_2)_i \quad (3)$$

donde $(R_1)_i$ y $(R_2)_i$ son factores de reducción debido a la presencia de aberturas y al daño del relleno respectivamente (Al-Chaar, 2002). Teniendo en cuenta los resultados experimentales obtenidos (Carrillo, 2006), el ancho del puntal diagonal equivalente debe ser corregido de acuerdo con la Ecuación 4:

$$a_{puntal} = 3 \times a_{red} \quad (4)$$

2.2.2 Excentricidad del puntal diagonal equivalente

El puntal equivalente de mampostería está conectado a los elementos del pórtico, tal como se muestra en la Figura 2.

$$l_{columna} = \frac{a}{\cos \theta_{columna}} \quad (5)$$

$$\tan \theta_{columna} = \frac{h - \frac{a}{\cos \theta_{columna}}}{l} \quad (6)$$

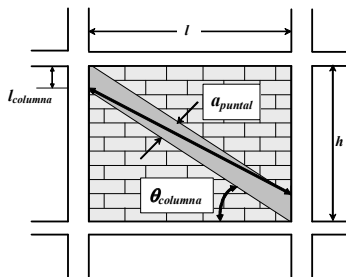


Figura 2. Posición del puntal. Adaptada de Al-Chaar, 2002

Figure 2. Strut position. Adapted from Al-Chaar, 2002

El puntal debe estar simplemente apoyado a la columna a una distancia $l_{columna}$ de la cara de la viga. Esta distancia está definida en las Ecuaciones 5 y 6. Usando esta configuración, la fuerza del puntal es aplicada directamente a las columnas.

2.2.3 Comportamiento carga-deformación del puntal

La resistencia del puntal se determina calculando la carga necesaria para alcanzar la resistencia a la compresión (R_{compr}) y al cortante ó a la adherencia del relleno de mampostería (R_{cort}). La componente de estas fuerzas en la dirección del puntal equivalente es usada para asignar la resistencia del puntal. Esta resistencia es definida como R_{puntal} (Ecuación 7) y gobierna la resistencia de la rotula plástica en el elemento.

$$R_{puntal} = R_{compr} \leq R_{cort} / \cos \theta_{puntal} \quad (7)$$

$$\tan \theta_{puntal} = \frac{h - 2l_{columna}}{l} \quad (8)$$

donde θ_{puntal} es el ángulo del puntal excéntrico respecto a la horizontal, definido por la Ecuación 8. La resistencia a la compresión del relleno se evalúa usando la Ecuación 9.

$$R_{comp} = a_{red} t_{efec} f'_m \quad (9)$$

donde f'_m es la resistencia a la compresión de la mampostería y t_{efec} representa el espesor neto del panel de mampostería. La carga horizontal lateral requerida para alcanzar la resistencia al cortante del relleno se calcula con la Ecuación 10.

$$R_{cort} = A_n f'_v (R_1)_i (R_2)_i \quad (10)$$

donde A_n es el área neta de la sección transversal de la junta de pega del panel de relleno a lo largo de su longitud ($l \times t_{pega}$), t_{pega} representa el espesor transversal del mortero de pega y f'_v es el menor valor entre las resistencias al cortante y a

la adherencia (mortero-pieza) de la mampostería. El puntal equivalente se asume para deflectarse lateralmente con derivas no lineales tal como se muestra en la Figura 3.

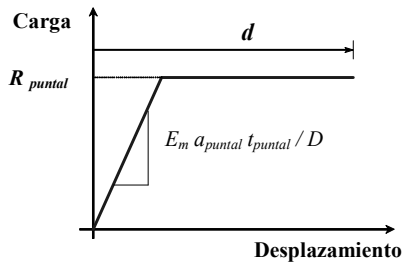


Figura 3. Comportamiento carga-deformación del puntal

Figure 3. Load-deformation strut behavior

El parámetro d , el cual representa la capacidad de deformación no lineal, es expresado en términos de la deriva lateral de piso y está definido en la Tabla 7-9 del FEMA 356.

2.2.4 Posición de las rótulas plásticas

El puntal equivalente sólo necesita rótulas que representen la carga axial. Esta rótula debe estar localizada en la luz media del elemento. En general, el mínimo número y tipo de rótulas plásticas necesarias para la modelación se muestran en la Figura 4.

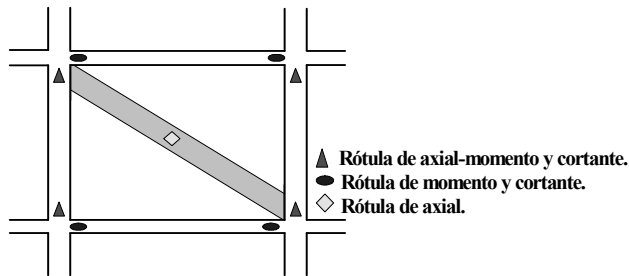


Figura 4. Localización de rótulas plásticas. Adaptada de Al-Chaar, 2002

Figure 4. Plastic hinge placement. Adapted from Al-Chaar, 2002

Adicionalmente se deben asignar zonas rígidas en los extremos de los elementos del pórtico que rodean el panel de relleno, con el fin de

incrementar la rigidez de los nudos. Para las vigas y las columnas, las zonas rígidas deben ser asignadas desde la unión viga/columna (intersección de ejes) hasta una distancia igual a la mitad de la mayor dimensión del elemento que llega al nudo.

2.2.5 Procedimiento general

El siguiente procedimiento es un esquema general de lo requerido en programas de análisis estructural para realizar un análisis estático inelástico (pushover) utilizando el método del puntal diagonal equivalente:

- Crear los elementos del pórtico con la geometría, apoyos y propiedades de los materiales.
- Crear los puntales equivalentes representando los paneles de relleno y ubicarlos excéntricamente respecto a las columnas. Esta distancia excéntrica es referida como $l_{columna}$ y se define por la Ecuación 5. El espesor del puntal (t_{puntal}) debe ser el mismo que el espesor transversal del mortero de pega (t_{pega}) si la falla está gobernada por la resistencia al cortante o a la adherencia, ó igual al espesor efectivo del panel de relleno (t_{efec}) si la falla está gobernada por la resistencia a la compresión. El ancho del puntal equivalente a_{puntal} debe ser calculado usando la Ecuación 4. Si el panel de relleno esta parcialmente relleno o tiene aberturas, se debe aplicar los factores de modificación para este tipo de rellenos. Además, se deben tener en cuenta los daños que existen en los rellenos. Las propiedades del material que deben ser asignadas al puntal consisten en R_{puntal} y E_m .
- Asignar zonas rígidas en las uniones del pórtico para representar la intersección real entre elementos viga y columna. Las zonas rígidas deben modelarse con un factor de rigidez de 0.5, es decir la mitad de la zona rígida se considera efectiva.
- Asignar rótulas plásticas a los elementos del pórtico con el comportamiento apropiado carga-deformación para la sección y material particular. Para vigas, la rotula plástica debe tener en cuenta el comportamiento no lineal a flexión y cortante. Para columnas, la rotula debe tener en cuenta la interacción entre la carga axial y la flexión, así como las

propiedades no lineales asociadas con el cortante. Las propiedades de las rótulas deben ser calculadas usando los parámetros establecidos en la Sección 6.4 del FEMA 273 y del FEMA 356 para elementos de concreto reforzado. Las rótulas en las columnas y las vigas deben estar localizadas en los extremos de cada uno de estos elementos teniendo en cuenta las zonas rígidas que se forman en sus intersecciones.

- Asignar rótulas plásticas en la mitad de la longitud del puntal equivalente excéntrico.
- Aplicar las cargas de gravedad como condiciones iniciales del análisis de pushover. Las combinaciones de carga recomendadas se encuentran en las ecuaciones 3-2 y 3-3 del FEMA 273 y en las ecuaciones 3-3 y 3-4 del FEMA 356. Las cargas laterales deben ser aplicadas en una manera tal que aproximen las fuerzas de inercia en el diseño sísmico. Las distribuciones de fuerza de inercia recomendadas están dadas en la Sección 3.3.3.2 del FEMA 273 y del FEMA 356.
- Realizar el análisis de pushover usando algún método de descarga de los elementos para obtener el equilibrio después de que una rótula plástica pierde capacidad debido a la excesiva deformación.

3 MODELACIÓN DE EDIFICIOS TÍPICOS

3.1 Parámetros de modelación

Con el fin de determinar la influencia de los rellenos de mampostería en el comportamiento de los pórticos de concreto reforzado, se realiza la modelación estática no lineal de 3 edificios típicos construidos en la Ciudad de Bogotá D.C, los cuales fueron diseñados de acuerdo con la Norma NSR-98 (AIS, 1998). Para realizar esta modelación se utilizó la ayuda del Programa SAP 2000 8.16 (Computers and Structures, 2003).

Los modelos se representan por elementos elásticos con rótulas y zonas rígidas en sus

extremos. El programa SAP 2000 8.16 tiene herramientas para operar de acuerdo al ATC-40, por lo tanto, la entrada sísmica se puede representar a partir de un espectro esqueleto definido por la normativa o un espectro de respuesta suavizado. Sin embargo, esto sólo se utiliza para el espectro del edificio de 7 pisos, ya que su espectro de diseño está de acuerdo con la NSR-98 (AIS, 1998). Para los otros edificios se calcula el punto de comportamiento con la ayuda de una hoja de cálculo, ya que sus espectros de diseño están con base a la Microzonificación de Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá DC, 2001) donde las coordenadas espectrales de las zonas 3, 4 y 5 dependen del periodo elevado a una potencia diferente de 1.0, además, los periodos base del espectro esqueleto utilizado por el Programa SAP 2000 8.16 no son iguales a los de la microzonificación; lo cual impide utilizar la herramienta propuesta por el ATC-40. A continuación se mencionan los parámetros generales que se utilizaron para las tres edificaciones:

3.1.1 Capacidad de la estructura

Las curvas pushover (curvas de capacidad) se construyeron hasta un desplazamiento igual al 2.0% de la altura de cada uno de los edificios. Las capacidades de las estructuras se calcularon para cada una de las 2 direcciones principales. Los modelos de distribución vertical de carga lateral utilizados en la modelación fueron los siguientes:

- Para el modelo del parámetro uniforme, se utilizó una carga lateral representada por fuerzas laterales proporcionales a la masa total de cada piso. Este modelo consistió en aplicar a la edificación un impulso de aceleración que se incrementa en el tiempo.
- Para el modelo modal, se utilizó una carga lateral proporcional a la distribución del cortante de piso calculado por combinación de respuesta modal (con análisis de espectro de respuesta de la estructura), usando el espectro del movimiento del suelo correspondiente para cada edificio.

Para obtener la capacidad inelástica de las vigas que conforman los edificios se utilizó una hoja de cálculo, la cual se fundamenta en los parámetros estipulados en los documentos ATC-40 y FEMA-356. La capacidad inelástica de las columnas se asignó en principio por defecto en el Programa SAP 2000 8.16, luego se calculó la capacidad de sus rótulas teniendo en cuenta la carga axial que soportan en su punto de comportamiento. La capacidad de rotulación plástica de los muros se calculó con el Programa X-TRACT 2.6.2 (Imbsen and Associates, 2004) con el fin de tener en cuenta su geometría específica y la carga axial que soporta en el punto de comportamiento.

3.1.2 Comportamiento

Para la evaluación del desplazamiento hasta el cual llegará cada una de las estructuras con el sismo de diseño, se empleó el Método del Espectro de Capacidad. Este es el método propuesto por el ATC-40. Para el cálculo del punto de comportamiento se escoge el caso más crítico, calculando la capacidad de la estructura con los parámetros uniforme y modal.

3.2 Modelación

Las Figuras 5 y 6 muestran los modelos y las curvas de capacidad (con y sin rellenos de mampostería) de los edificios analizados. El nivel inferior de estos edificios corresponde al sótano, por lo tanto, no se incluyen los puntales que representan la mamposterería.

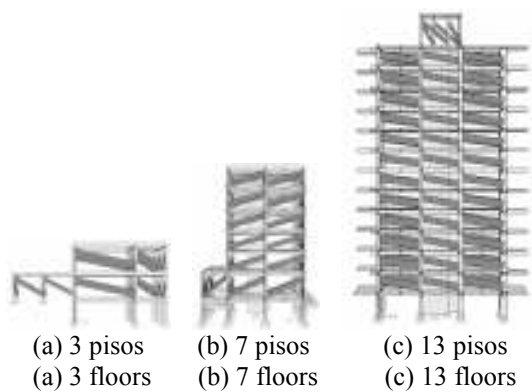


Figura 5. Geometría de los modelos con rellenos de mampostería
Figure 5. Models geometry with masonry infills

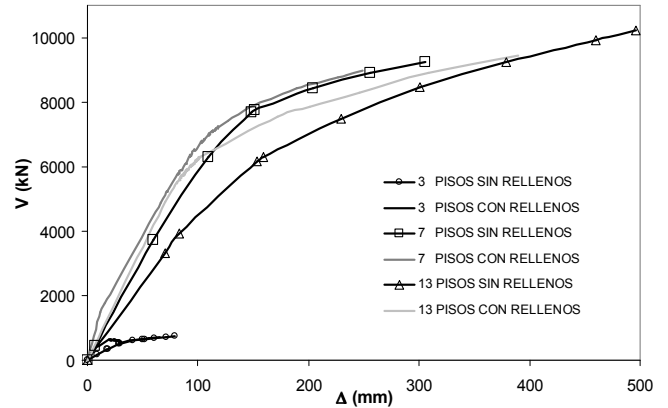
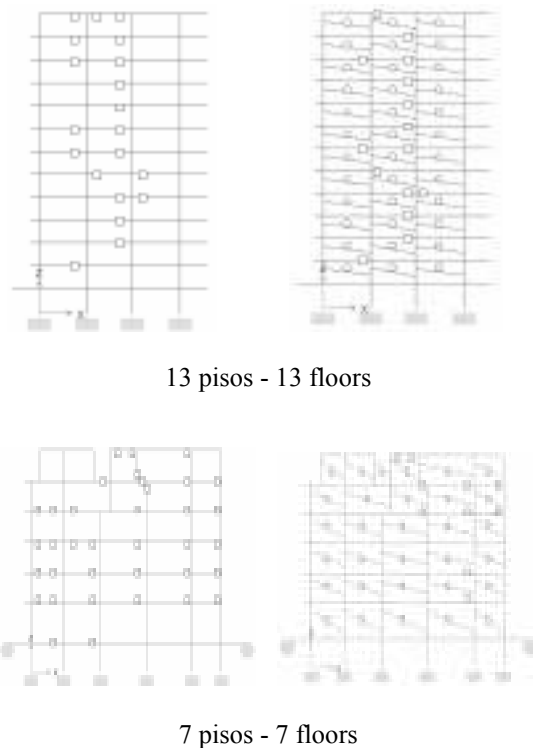


Figura 6. Capacidad de los edificios con y sin rellenos de mampostería
Figure 6. Buildings capacity with and without masonry infills

En las Figuras 7 y 8 se muestra la formación de rótulas de los edificios en el punto de comportamiento (sismo de diseño) y en un punto de igual desplazamiento (para la capacidad última del edificio con rellenos de mampostería) respectivamente.



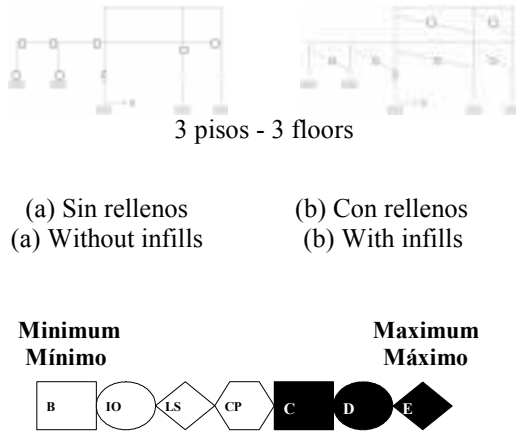


Figura 7. Formación de rotulas en los edificios en el punto de comportamiento (sismo de diseño)
Figure 7. Hinge pattern in the behavior point (design earthquake)

En las Figuras 7 y 8 una rótula en: B representa la fluencia, C y D representan la capacidad última y la resistencia residual del análisis de pushover, E representa la falla total; y una rótula en IO (Ocupación Inmediata), LS (Seguridad a la Vida) y CP (prevención al colapso) representa una medida de deformación adicional para los objetivos de comportamiento del diseño. En la Tabla 1 se muestran los parámetros estructurales calculados en el punto de comportamiento de los edificios analizados.

Tabla 1. Comparación de resultados para el punto de comportamiento
Table 1. Results comparison for the behavior point

Parám.	Edif 3 pisos		Edif 7 pisos		Edif 13 pisos	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
V kN	488	425	5439	4983	6705	6687
Δ mm	27.7	8.3	83.7	56.9	175.9	115.3
T_i seg	0.4	0.1	0.9	0.7	1.2	0.8
T_{efec} seg	0.4	0.3	1.0	0.8	1.5	1.2
Sa g	0.6	0.6	0.3	0.3	0.2	0.2
ξ_{efec} %	7.0	9.7	7.0	13.5	17.0	18.9
K_i kN/mm	18.8	48.4	63.8	127.7	47.3	97.6

(1) Sin rellenos y (2) Con rellenos de mampostería

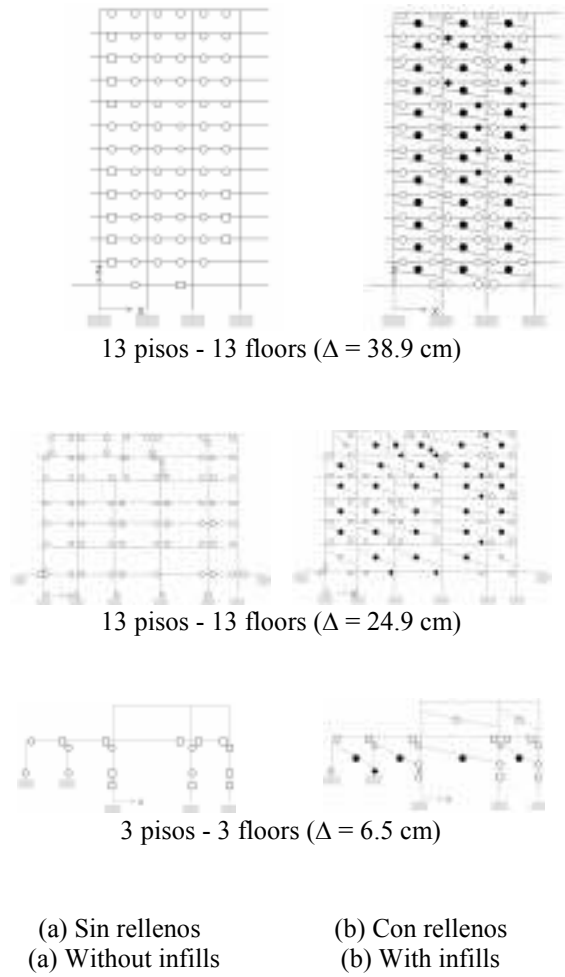


Figura 8. Formación de rotulas para iguales desplazamientos
Figure 8. Hinge pattern for equal displacements

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se puede apreciar en la Tabla 1, los rellenos de mampostería pueden afectar apreciablemente la resistencia, la rigidez, el amortiguamiento, el periodo, los desplazamientos, entre otros. Aunque la resistencia global de la estructura no es afectada apreciablemente, esta puede aumentar dependiendo de la densidad de muros en la

edificación. La rigidez inicial del sistema es un parámetro significativamente afectado por la presencia de los rellenos de mampostería. Al aumentar la rigidez disminuye el periodo de la estructura, causando cambios en las aceleraciones espectrales con las cuales se deben diseñar estos edificios. Los cambios en el periodo pueden aumentar ó disminuir la pseudoaceleración dependiendo del tipo de espectro de diseño y las características propias de la edificación. Para los edificios analizados, la presencia de los rellenos disminuye la pseudoaceleración, resultando en una ventaja para el diseño de la estructura. El amortiguamiento efectivo, puede aumentar drásticamente con la presencia de estos rellenos, ya que se presenta mayor daño, especialmente en los elementos no estructurales y de confinamiento. Los desplazamientos a que se ven sometidas las edificaciones, siempre disminuyen con la presencia de los rellenos, ya que la estructura aumenta apreciablemente su rigidez.

El nivel de daño que se presenta en el punto de comportamiento (ver Figura 7) disminuye sustancialmente con la presencia de los rellenos, especialmente en los elementos de confinamiento, resultando en una ventaja para el comportamiento de la estructura. Por lo tanto, no tener en cuenta los rellenos en el análisis y diseño estructural, podría resultar en un factor adicional de seguridad en el diseño de estructuras compuestas pórtico relleno. Sin embargo, para niveles superiores de demanda sísmica, es decir, para un sismo con un periodo de retorno superior al de diseño (ver Figura 8), la presencia de los rellenos puede ocasionar la pérdida de ductilidad debido a la falla prematura de algunos elementos estructurales como vigas y columnas, originando el colapso total o parcial de la edificación. Este desempeño es de gran importancia a nivel estructural, ya que en los diseños convencionales no se tiene en cuenta la interacción (en este caso desfavorable) que existe entre los elementos (pórtico-mampostería), lo que puede originar el colapso total o parcial de la estructura para un sismo con un periodo de retorno superior al de diseño. En este caso, no tener en cuenta estos elementos podría resultar en una desventaja para el comportamiento de la estructura. Teniendo en

cuenta lo anterior, siempre se deben incluir los rellenos de mampostería en los análisis y diseños de las estructuras, con el fin de cuantificar el daño real de los elementos, logrando diseños eficientes, seguros y económicos.

5 CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La práctica común del análisis y diseño de los pórticos de concreto con rellenos de mampostería ha sido siempre considerar estos muros como un elemento no estructural que aporta solo cargas verticales uniformes a la edificación. Contrario a esta concepción, en este artículo se establece que la mampostería puede alterar significativamente la resistencia, rigidez, ductilidad y amortiguamiento de estas edificaciones debido a la marcada interacción pórtico-mampostería. Estos cambios que se originan pueden favorecer el comportamiento inelástico de las estructuras para un sismo con un periodo de retorno no superior al de diseño, pues se disminuyen el daño y los desplazamientos en este nivel. Sin embargo, para demandas sísmicas elevadas cercanas al punto de capacidad última de la estructura, pueden llevar al colapso prematuro de las mismas, debido a fallas locales en los elementos como vigas o columnas ó debido al cambio de las propiedades dinámicas de las edificaciones.

Gran porcentaje del costo de la reparación de edificaciones sometidas a eventos sísmicos, debe ser destinado a la rehabilitación o reconstrucción de los elementos catalogados como no estructurales (muros divisorios y fachadas). La NSR-98 (AIS, 1998) especifica como criterio de diseño que los muros divisorios y fachadas deben, ó separarse de la estructura para que ésta al deformarse como consecuencia del sismo no los afecte adversamente ó disponer de elementos no estructurales que toquen la estructura y que por lo tanto, deben ser lo suficientemente flexibles para poder resistir las deformaciones que la estructura les impone. Sin embargo, en la práctica actual ninguno de los dos criterios se cumple a cabalidad, ya sea por insuficiente aislamiento de los elementos o por inadecuada capacidad de estos de resistir fuerzas dentro y fuera del plano. Adicionalmente, en este artículo se muestra la importancia que tiene para el

diseñador estructural la inclusión de los rellenos de mampostería en el análisis y diseño estructural.

La NSR-98 (AIS, 1998) clasifica los elementos no estructurales en 3 grados de desempeño (superior, bueno y bajo) según su comportamiento ante la ocurrencia de un sismo que los afecte. Sin embargo, esta metodología de clasificación es solo cualitativa y no permite cuantificar el desempeño que tendrán estos elementos durante un movimiento sísmico. Con la metodología inelástica del puntal diagonal equivalente es posible establecer y calificar claramente el comportamiento y el nivel de daño que presentarán los muros de mampostería no estructural en el plano y su posible afectación a los demás elementos estructurales. En la Figura 9 se realiza la comparación de las derivas laterales de los edificios analizados utilizando los modelos elásticos (secciones sin fisurar) sin rellenos de mampostería (práctica convencional) y los modelos inelásticos (secciones fisuradas) con y sin rellenos de mampostería. Como se puede observar en la Figura 9, los muros de mampostería disminuyen sustancialmente las derivas laterales de la edificación (lo que podría ser una ventaja). Sin embargo, aunque las derivas laterales disminuyen, para estos desplazamientos algunos de los muros de mampostería presentan un daño apreciable.

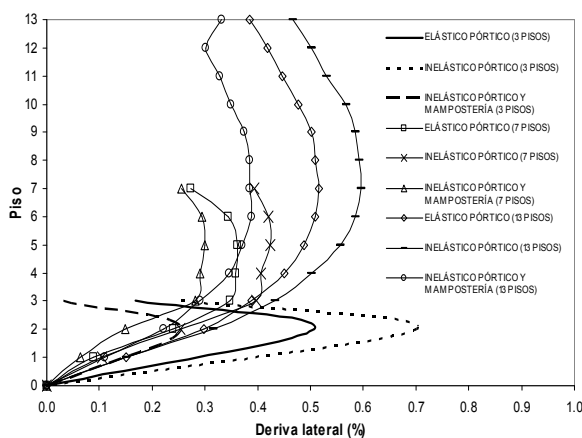


Figura 9. Comparación de derivas laterales elásticas e inelásticas

Figure 9. Elastic and inelastic lateral drifts comparison

REFERENCIAS

- [1] AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Normas Colombianas de diseño y construcción sismo resistente – NSR-98. Bogotá D.C., Colombia. 1998.
- [2] Alcaldía Mayor de Bogotá DC. Microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá D.C. Bogotá DC: Alcaldía Mayor de Bogotá. 2001.
- [3] AL-CHAAR, G. Evaluating strength and stiffness of unreinforced masonry infill structures. Washington DC: US Army Corps of Engineers. 2002.
- [4] Applied Technology Council. ATC-40: Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings – Volume 1. California, USA. 1996.
- [5] BAZÁN, E. & MELI, R. Diseño Sísmico de Edificios. Editorial Limusa S.A. Grupo Noriega Editores. Balderas, Mexico. 2003.
- [6] CARRILLO, W.J. Modelación del comportamiento inelástico de pórticos de concreto con mampostería no reforzada. Tesis Magíster en Ingeniería Civil. Bogotá DC: Universidad de Los Andes. 2004.
- [7] CARRILLO, W.J. & González, N.G. Modelación inelástica de pórticos de concreto con mampostería no reforzada. Artículo en revisión de pares académicos de la Revista DYNA, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 2006.
- [8] CARRILLO, W.J. & GONZÁLEZ, N.G. Evaluación de la demanda sísmica fuera del plano en edificios. Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina. No. 15. Bogotá D.C., Noviembre de 2005. ISSN 0124-8170. 2005.
- [9] Computers and Structures, SAP 2000 v8.16. “Integrated Finite Elements Analysis and Design of Structures”, Berkeley, CA. 2003.

- [10] FEMA. Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. Publicación 273. Washington DC: Federal Emergency Management Agency. 1997.
- [11] FEMA. Commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. Publicación 274. Washington DC: Federal Emergency Management Agency. 1997.
- [12] FEMA. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Publicación 356. Washington DC: Federal Emergency Management Agency. 2000.
- [13] GALLEGO, C. & MERA, N. Sistemas de aislamiento sísmico para muros no estructurales. Tesis Magíster en Ingeniería Civil. Bogotá DC: Universidad de Los Andes. 2001.
- [14] Imbsen and Associates. X-TRACT V2.6.2. Cross Sectional analysis program for structural engineers. 2004.
- [15] Ladrillera Santafé. Manual de diseño: Muros divisorios y de fachada en mampostería. Bogotá DC: Ladrillera Santafé. 2000.
- [16] REYES, J.C. Modelamiento sísmico no lineal de estructuras de concreto con disipadores de energía. Tesis Magíster en Ingeniería Civil. Bogotá DC: Universidad de Los Andes. 2001.
- [17] RODRÍGUEZ, M. E. & RESTREPO, J. I. Earthquake-induced floor horizontal accelerations in buildings. San Diego: Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2002.
- [18] SARRIA, ALBERTO. Ingeniería Sísmica. Ediciones Universidad de los Andes - UNIANDES. Bogotá D.C., Colombia. 1995.
- [19] SASANI, M.; BERTERO, V. & ANDERSON, J. Rehabilitation of nonductile RC frame building using encasement plates and energy-dissipating devices. Report 1999/12. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center – PEER, University of California. 1999.
- [20] ZAVALA, C. & HOMMA, C. Reconocimiento del daño estructural en estructuras de mampostería. Lima: CISMID - Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). 2003.