

Métodos de análisis de estructuras de mampostería: teórico y experimental

Francisco Williams Linera M¹, MI Guadalupe Riquer Trujillo¹, MI Regino Leyva Soberanis¹

Resumen— La mampostería en México es uno de los materiales más usados en la construcción de viviendas, sin que exista a la fecha un criterio unificado para el modelado de estructuras confinadas, principalmente para el análisis sísmico. Este trabajo subraya las diferencias más importantes entre algunas de las metodologías más usadas como: la columna ancha, el método simplificado y el muro en voladizo, usando como referencia un edificio de departamentos. El edificio también fue instrumentado con acelerógrafos para obtener mediante vibración ambiental el primer modo de vibrar, aplicando el método de razones espectrales. Estos resultados fueron cotejados con los obtenidos por métodos analíticos, resaltando en cada uno de ellos la contribución de las diferentes variables que intervienen en la respuesta dinámica estructural. Lo anterior, confirma la importancia de un modelo matemático adecuado y enfatiza los problemas que representan las discordancias con la construcción final.

Palabras claves— Columna ancha, vibración ambiental, cocientes espectrales

Introducción

En México se recurre con mucha frecuencia al uso de las construcciones a base de muros de carga de mampostería, sobre todo en construcciones de baja y mediana altura. El desempeño de las construcciones de mampostería ante sollicitaciones gravitacionales casi siempre es satisfactorio, sin embargo los daños causados por el efecto de los sismos suele ser más impactante. Esto es en parte porque la mayoría de estas construcciones no fueron objeto de un diseño estructural, y muestran obvios defectos de estructuración, construcción y calidad en general. Las construcciones de mampostería tienen su principal aplicación en viviendas económicas y la normatividad vigente contempla muchos aspectos sobre el diseño y los materiales que las constituyen, así como su detallado, especialmente la confinada sujeta a fuerzas sísmicas. Sin embargo, en la práctica profesional, es en los diferentes criterios para determinar la magnitud y distribución de las acciones donde se identifican las mayores diferencias entre los resultados y en ocasiones hasta contradicciones. Existen esfuerzos con fines de investigación donde se han desarrollado modelos analíticos y de comportamiento no lineal, sin embargo el modelado de estas estructuras siguen resultando un problema complejo para fines prácticos (Taveras 2008, GAEM 2008). En este trabajo, se siguen las recomendaciones dadas por las Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, versión 2004 (NTCM-04) y los elementos mecánicos de diseño se obtienen aplicando los criterios más usados en la práctica como: el método simplificado, muro en voladizo y columna ancha. También se determinaron experimentalmente y con fines comparativos los períodos fundamentales de vibración de la estructura usando vibración ambiental. Para el análisis sísmico se usa el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad de 1993, Diseño por sismo (MDOC-CFE-93).

Descripción de la Estructura

Es un edificio de departamentos de dos niveles con planta tipo (figura 1), estructurado a base de muros de carga confinados de tabique de barro recocido, las losas de entrepiso y azotea son de concreto reforzado, apoyado en una losa de cimentación rigidizada con contratraveses.

Para su análisis y diseño se consideró una resistencia a la compresión de la mampostería de $f_m^* = 20 \text{ kg/cm}^2$ y a compresión diagonal de $v_m^* = 3.5 \text{ kg/cm}^2$; concreto con una resistencia a la compresión $f_c = 200 \text{ kg/cm}^2$ en losas, reforzadas con malla electro soldada 6x6 – 6/6 con un límite de fluencia $f_y = 5000 \text{ kg/cm}^2$. Los castillos de concreto con un $f_c = 150 \text{ kg/cm}^2$, reforzados con una armadura electro soldada de 15x20-4, con acero longitudinal con $f_y = 6000 \text{ kg/cm}^2$ y transversal $f_y = 5000 \text{ kg/cm}^2$.

De acuerdo al MDOC-CFE-93, para el análisis sísmico se consideró un coeficiente sísmico $c = 0.32$ con un factor de comportamiento sísmico $Q = 2.0$; por su destino la estructura pertenece al grupo B y se encuentra ubicada en la ciudad de Veracruz, Ver., México, en un terreno tipo II.

¹ Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana, Av. S. S. Juan Pablo II, s/n, Campus Mocambo, Fraccionamiento Costa Verde, C.P. 94294, Boca del Río, Ver., México, Tel. (52-229) 7752000 ext. 22214, 22215, 22216 franciscowilliamslinerar@yahoo.com.mx

Métodos de Análisis

Método Simplificado:

Se aplica a edificios cuyo sistema resistente principal es a base de muros que cumplen con los requisitos establecidos en la sección 3.2.3.3 de las normas NTCM-04, con una geometría regular tanto en planta como en elevación. Se asume que los muros se deforman solo por cortante y que el cortante último se alcanza en todos los muros, lo que supone que tienen la suficiente capacidad de deformación para redistribuir los esfuerzos y tener una distribución uniforme de estos y por lo tanto se considerara que la fuerza cortante que toma cada muro o segmento de muro es proporcional a su área transversal, ignorando los efectos de torsión, de momento de volteo y de flexibilidad de diafragma.

Los muros deberán tener una distribución sensiblemente simétrica con respecto a dos ejes ortogonales. Para ello, la excentricidad torsional calculada estáticamente e_s puede estimarse como el cociente del valor absoluto de la suma algebraica del momento de las áreas efectivas de los muros, con respecto al centro de cortante del entrepiso, entre el área efectiva total de los muros orientados en la dirección de análisis (figura 2). El área efectiva es el producto del área bruta de la sección transversal del muro A_t y el factor F_{AE} , dado por: $F_{AE} = 1$ si $H/L \leq 1.33$ y $F_{AE} \leq (1.33 H/L)^2$ si $H/L > 1.33$.

La estructura no cumple con la excentricidad torsional e_s en la dirección longitudinal, ya que se excede del diez por ciento de la dimensión en planta del entrepiso, medida paralelamente a dicha excentricidad, por lo que debe ser analizada con otro método.

Es conveniente la aplicación de este método como un paso previo a uno más detallado ya que permite estimar con poco esfuerzo la pertinencia de la densidad de muros existentes en cada dirección.

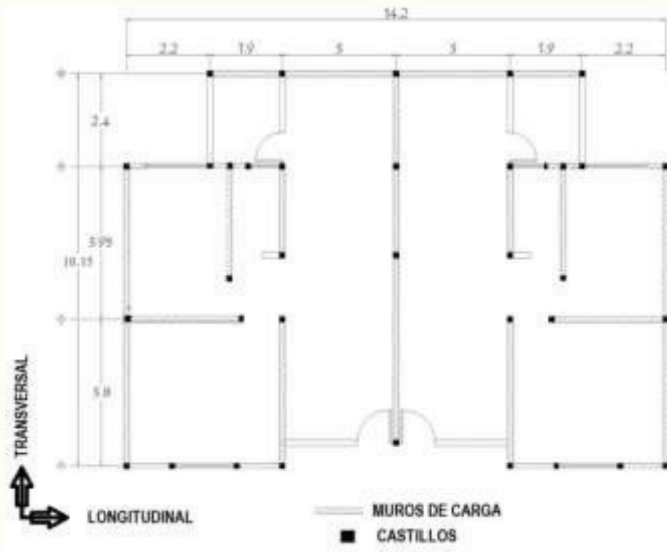


Figura 1. Planta tipo

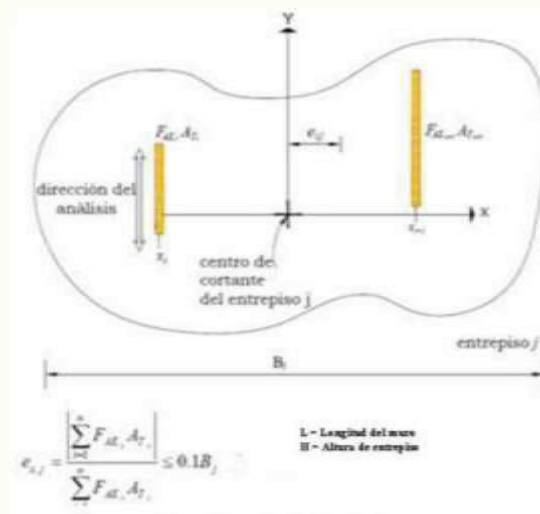


Figura 2. Excentricidad torsional

Método del muro en voladizo (MMV):

Aunque actualmente las NTCM-04 en la sección 3.2.3 referente al análisis de estructuras de mampostería sujetas a cargas laterales presenta el método de la columna ancha como el indicado para estos casos, la realidad es que en la práctica existen programas de cómputo de uso común basados en el método del voladizo, por este motivo se analizó la estructura aplicando este método.

El método (figura 3), idealiza a los muros como columnas en voladizo tomando en cuenta su rigidez a flexión y a cortante y despreciando el acoplamiento de las losas. Para muros con una relación altura/longitud pequeña (menor a 2) esta hipótesis es adecuada, sin embargo para muros con relaciones grandes (mayores a 2), la hipótesis es conservadora ya que para este caso las losas logran acoplar su comportamiento. La fuerza cortante se distribuyó en función de la rigidez K de los muros (Bazan, 2003). Es importante mencionar que para el cálculo del momento de inercia (I) se debe tener en cuenta que los muros que se están analizando en una dirección, forman tipos de secciones con los muros transversales.

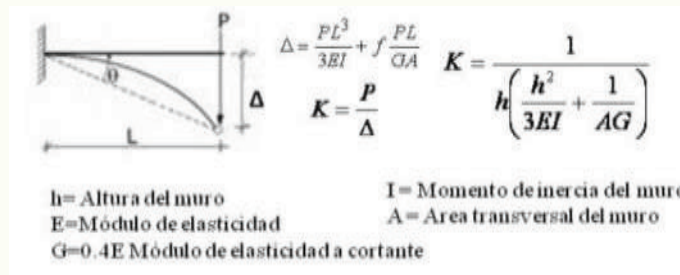
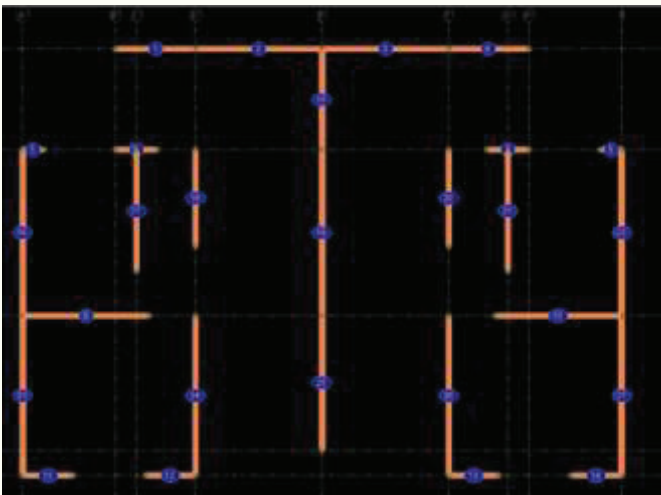
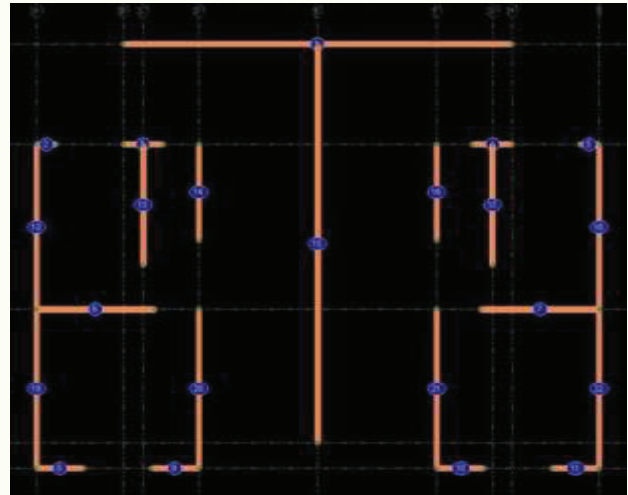


Figura 3. Método del Voladizo

La estructura se analizó considerando un modelo con los muros largos completos y otro modelo dividiendo los muros largos en muros cortos (figura 4). Esto último, permite tomar en cuenta las recomendaciones que se dan para estos casos al aplicar el método de la columna ancha con la finalidad de poder hacer comparaciones entre ellos con los resultados obtenidos.



Modelo 1, con muros cortos



Modelo 2, con muros largos

Figura 4. Modelos de análisis para el método del voladizo

Método de la columna ancha (MCA):

Este método recomendado en la sección 3.2.3 de las NTCM-04 para estructuras de mampostería confinada o reforzada interiormente, tiene como ventaja que los sistemas de muros se idealizan como sistemas de marcos, lo cual simplifica el modelado y el procedimiento de análisis se vuelve más práctico. Consiste en considerar un muro como una columna ancha, con todas sus propiedades mecánicas y geométricas concentradas en su eje centroidal (correspondiente a la columna) y se supone que las zonas de las vigas que se encuentren dentro de los muros son zonas infinitamente rígidas a flexión y cortante (figura 5).

En el caso de muros largos, se recomienda dividirlos en segmentos, cada uno de los cuales se debe considerar como una columna ancha independiente con sus respectivos momentos de inercia y áreas de cortante equivalente. De igual forma, se especifica que las columnas anchas estarán acopladas por vigas con el momento de inercia de la losa en un ancho equivalente, al cual deberá sumarse el momento de inercia de dinteles y pretilos.

Para el cálculo de la rigidez a flexión en losas, con o sin pretilos, se considera un ancho de cuatro veces el espesor de la losa a cada lado de la trabe o dala, o de tres veces el espesor de la losa cuando no se tiene trabe o dala o cuando la dala está incluida en el espesor de la losa.

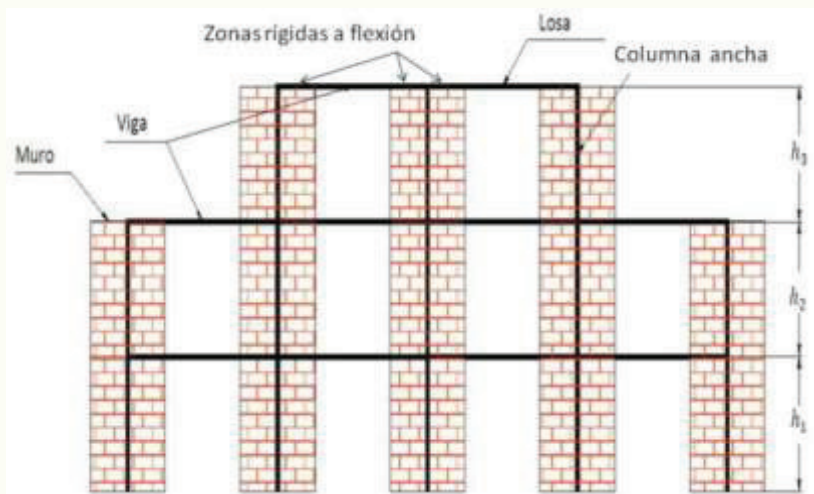


Figura 5. Método de la columna ancha

En la figura 6 se muestra el modelo de la estructura en estudio utilizando un programa de análisis estructural elástico lineal para marcos en el espacio, es importante para este tipo de modelos considerar las deformaciones por cortante en las columnas y si el programa no considera zonas infinitamente rígidas, se puede asumir una sección de peralte total equivalente a la altura del entrepiso. Para la determinación de los momentos de inercia y áreas, unos autores recomiendan que se considere la longitud total del muro con las propiedades de la mampostería únicamente y otros, que se obtengan la sección transformada, para así poder tomar en cuenta la contribución de los castillos en la rigidez de los muros, por lo anterior se hicieron dos modelos con la finalidad de poder comparar los resultados (modelos 1 y 2 respectivamente).

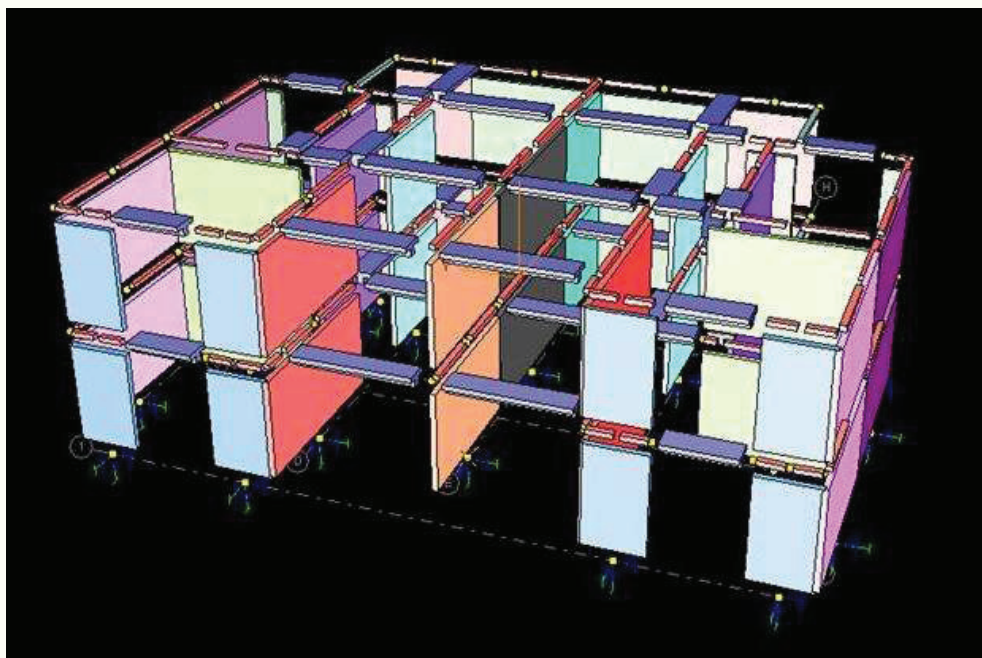


Figura 6. Edificio modelado con el método de la columna ancha (MCA)

Método Experimental

Prueba de vibración ambiental (PVA):

Este método experimental consiste en determinar los periodos fundamentales de vibración del edificio a partir de registros de vibración ambiental obtenidos en la azotea y en la base del edificio (figura 7) originadas por excitaciones de carácter ambiental, como lo son las producidas por el tránsito de vehículos, personas, viento, maquinaria, etc. Es un método simple y rápido en la obtención de datos, con la ventaja de no interferir en las actividades dentro del edificio.

La metodología consiste en determinar las funciones de transferencia empíricas (FTE) del sistema estructural relacionando los espectros de Fourier de las componentes horizontales en cada dirección del movimiento en la azotea respecto al movimiento en la base (cocientes espectrales).

Para determinar los periodos fundamentales de vibración en las direcciones transversal y longitudinal del edificio, el numerador de la función de transferencia es el espectro de Fourier de la señal registrada en su centro de masa (punto P01, figura 7), mientras que el denominador es el espectro de Fourier de la señal registrada en la base del edificio (punto P08, figura 7) para cada dirección. Para el periodo asociado a torsión, el numerador es el espectro de Fourier de la señal registrada en cada una de sus esquinas (puntos P02, P03, P04, P05, P06 y P07, figura 7), mientras que el denominador es el espectro de Fourier de la señal registrada en el centro de masa (punto P01, figura 7).

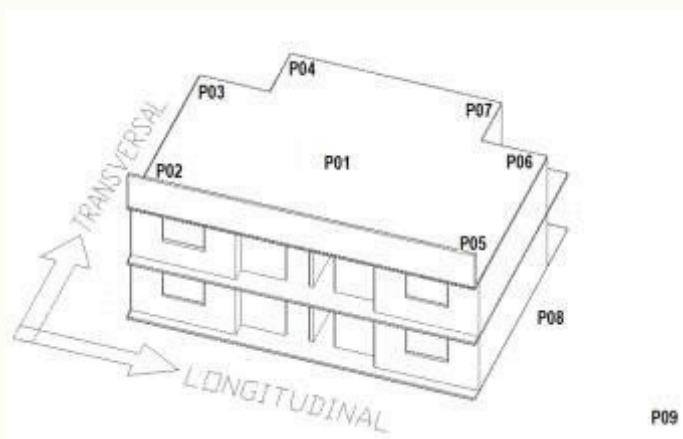


Figura 7. Puntos de medición de vibración ambiental

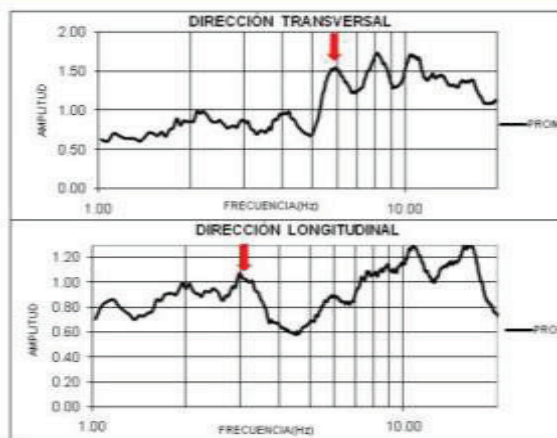


Figura 8. Funciones de transferencia

En la figura 8 se presentan las funciones de transferencia correspondientes al segundo nivel (punto P01, figura7) con respecto a la base (punto P08, figura7), para cada dirección, en donde se puede identificar las frecuencias de vibración asociadas al primer modo de vibración de la estructura. El modo de vibrar por torsión fue determinado, pero no fue posible relacionarlo con los obtenidos con los modelos matemáticos propuestos (método de la columna ancha).

Discusión de Resultados

Los resultados de la prueba de vibración ambiental se muestran en el cuadro 1, en donde se aprecia, que en la dirección longitudinal, la estructura es más flexible que en la dirección transversal, lo cual es lógico, debido a la distribución de muros, ya que en esta dirección se encuentra la mayoría de las aberturas de puertas y ventanas, por lo consiguiente tendremos muros de menor dimensión y rigidez (figura 1).

DIRECCION	FRECUENCIA (Hz)	PERIODO (Seg)
Longitudinal	3	0.333
Transversal	6	0.167

Cuadro 1. Periodos fundamentales de vibración

En el cuadro 2 se presentan las propiedades dinámicas de la estructura obtenidas con los tres métodos.

Periodo	Método Experimental (PVA)	Columna Ancha (MCA)		Muro en Voladizo (MMV)	
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 1	Modelo 2
Dirección longitudinal					
T1	0.33 seg (3 Hz)	0.373seg (2.68Hz)	0.231seg (4.33Hz)	0.22seg (4.5 Hz)	0.178seg (5.62Hz)
T4	0.08 seg (12 Hz)	0.083seg (12.05Hz)	0.065seg (15.38Hz)	0.09seg (11.24Hz)	0.07seg (14.29 Hz)
Dirección transversal					
T2	0.167 seg (6 Hz)	0.203seg (4.93Hz)	0.158seg (6.33Hz)	0.13seg (7.69Hz)	0.122seg (8.20Hz)
T5		0.05seg (20Hz)	0.046seg (21.74Hz)	0.13seg (19.61Hz)	0.048seg (20.83Hz)
Torsión					
T3	0.055 seg (18 Hz)	0.173seg (5.78Hz)	0.136seg (7.35Hz)		
T6	0.050 seg (20Hz)	0.043seg (23.25Hz)	0.039seg (25.64Hz)		

Cuadro 2. Comparación de resultados. Donde: T1, T2 y T3 son los periodos fundamentales y T4, T5 y T6 periodos superiores.

En el cuadro 3 se presenta una comparación de los elementos mecánicos obtenidos aplicando el MMV y el MCA (a) considerando en este último la contribución de los castillos en la rigidez de los muros mediante la sección transformada y para el MMV cuando se dividen los muros largos en muros cortos (b).

Elemento mecánico	Método muro en voladizo			Método de la columna ancha () considerando los castillos en los extremos		
	Muro 15	Muro 19	Muro 25	Muro 15 (6)	Muro 19 (5)	Muro 25 (4)
$M_u (T^m)$	3.30	8.63	6.19	8.64	9.05	15.66
$V_u (Ton)$	1.02	2.66	1.91	1.28	4.63	2.01
$P_u (Ton)$	14.45	23.71	19.54	16.05	25.47	25.28

a).- MMV vs MCA

Elemento mecánico	Considerando como un solo muro Modelo 2	Considerando 4 muros Modelo 1				Total	Porcentaje de diferencia (%)
		Muro 1	Muro 2	Muro 3	Muro 4		
$M_u (T^m)$	63.27	7.87	15.14	15.14	7.87	46.02	27.26
$V_u (Ton)$	23.20	2.83	5.45	5.45	2.83	16.56	28.62
$P_u (Ton)$	35.4	8.92	8.78	8.78	8.92	35.4	0

b). MMV modelo 2 vs Modelo 1

Cuadro 3. Elementos mecánicos

Como se puede observar existen diferencias en los valores obtenidos aplicando los diferentes métodos, aunque las NTCM-04 recomiendan la MCA como el más adecuado para el análisis de estructuras de mampostería, la realidad es que aún se viene aplicando el MMV, lo cual genera la incertidumbre de cuales resultados son los más apegados al comportamiento real de la estructura, ya que los criterios son diferentes, mientras que para el MCA las propiedades de los muros son las de la sección transformada, para el MMV las inercias son las de la mampostería considerando los muros perpendiculares a la dirección de análisis.

En general, es claro que se pueden identificar los dos primeros modos de vibrar que corresponde a la dirección longitudinal (T1) y la transversal (T4), considerando así los resultados de los métodos matemáticos en un rango aceptable, lo que no sucede en la torsión, donde el periodo es aproximadamente 3 veces mayor respecto al de los modelos matemáticos, es probable que la irregularidad de rigidez por la asimetría de los muros, así como el no considerar la flexibilidad del diafragma (losas de entrepiso y azotea) nos conduce a una variación de resultados, esta es una condición que debe revisarse pues la respuesta ante cargas laterales entre una estructura con diafragma rígido y otra con diafragma flexible puede ser muy diferente, aunado a las imprecisiones de las propiedades reales de los materiales. Por lo que será necesario utilizar un programa más refinado que tome

en cuenta este parámetro, como lo es el método de elementos finitos, el cual nos daría qué consideraciones adicionales hay que hacer en los modelos matemáticos para disminuir el margen de diferencia entre ellos.

Reconocimientos

A los estudiantes de la Facultad de Ingeniería, Región Veracruz de la Universidad Veracruzana: David Alegría Herrera, Guadalupe Lara Vega y Efraín Vázquez Pérez por su participación en la elaboración de este trabajo.

Referencias

Alegría, D. (2010), "Análisis sísmico de una estructura de mampostería por los métodos simplificado y muro en voladizo". Tesis para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Civil, campus Veracruz-Boca de Rio, México.

Bazán E. y R. Méli, (2003). "Diseño sísmico de edificios". Editorial Limusa S.A. de C.V. México DF. Sexta reimpresión.

Bernal, I. (2006). "Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala, México". Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra.

Fundación ICA, A.C. (2003). "Edificaciones de Mampostería para Vivienda". Tercera Edición, México D.F.

Gaceta Oficial del Distrito Federal, "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal". Octubre 6 del 2004.

"Guía para el Análisis de Estructuras de Mampostería" (GAEM - 2008). Comité de Mampostería de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.

Lara, G. (2010), "Análisis sísmico de un edificio de mampostería por el método de la columna ancha". Tesis para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Civil, campus Veracruz-Boca de Rio, México.

Muriá, D. et al (2002), "Edificios Instrumentados". Memorias del curso: Diseño y Construcción de Estructuras Sismorresistentes. CENAPRED-JICA. México D.F.

Taveras, M. (2008). "Revisión de las recomendaciones para modelar y analizar estructuras de mampostería confinada ante carga lateral". Tesis de Maestría, UNAM, Dirección de Estudio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería.

Vega, D. (2005). "Estimación del efecto de sitio y la vulnerabilidad sísmica en la ciudad de Acatlán, Puebla". Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería (Estructuras). Universidad Nacional Autónoma de México, Dirección de Estudio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, México, D.F.

Velázquez, E. (2010). "Determinación de los periodos naturales de vibrar de una estructura de mampostería experimentalmente". Tesis para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Civil, campus Veracruz-Boca de Rio, México.