

## PROPUESTA DE MODIFICACIÓN A LA ESTIMACIÓN DE LAS FUERZAS CORTANTES DEL MÉTODO SIMPLIFICADO DE ANÁLISIS

Arturo Tena Colunga<sup>1</sup>, Miguel Ángel Pérez Osornio<sup>2</sup> y Jesús Cano Licona<sup>2</sup>

### RESUMEN

En el presente estudio se comparan las fuerzas cortantes que toman muros de mampostería si se utiliza el método simplificado con respecto a las obtenidas en método riguroso de análisis tridimensional, tomando en cuenta la propuesta actual del método simplificado de las NTCM-2001. El estudio muestra que para fuerzas cortantes de entrepiso idénticas, el método simplificado llega a subestimar de manera importante las fuerzas cortantes que absorben los muros más demandados (lado flexible), sobre todo para muros alargados o rectangulares ( $H/L < 1$ ), donde las deformaciones por cortante son muy importantes, a pesar que en función de la excentricidad estática calculada, pareciera ser que estos deberían ser donde se observaran menores diferencias. Se propone, con fines de análisis, definir un factor de área efectiva ( $F_{AE}$ ) más realista a como impactan las deformaciones por cortante en el análisis en todo el intervalo de relaciones de aspecto de los muros ( $H/L$ ), con base en un estudio paramétrico.

### SUMMARY

This paper presents a study where the shear forces obtained for masonry walls using the simplified method for analysis allowed by NTCM-2001 are compared to those obtained from rigorous three-dimensional analyses. It is shown that for the same lateral force distribution, the simplified method for analysis of NTCM-2001 underestimate substantially the shear forces attracted by walls of the flexible side, particularly for long walls ( $H/L < 1$ ), where shear deformations are important. In order to improve the simplified method of NTCM-2001, a new effective area factor ( $F_{AE}$ ) is proposed for analysis purposes to account in a closer manner the way shear deformations impact the distribution of forces among walls in terms of the aspect ratio ( $H/L$ ) for the walls, based upon a parametric study.

### INTRODUCCIÓN

El método simplificado de análisis se basa en la distribución de fuerzas laterales en estructuras con diafragmas rígidos donde la distribución de las rigideces laterales de sus elementos resistentes es totalmente simétrica y la carga lateral se aplica en una sola dirección. Bajo esta hipótesis, existen varios aspectos que se desprecian de manera importante, como son la flexibilidad de diafragma, la esbeltez, la torsión y los efectos bidireccionales.

En las normas vigentes (NTCM-95) la torsión no estaba acotada de manera ingenieril en función de una excentricidad estática, como se ha indicado en trabajos previos (Tena y Pérez, 2000a/b). En el anteproyecto de norma (NTCM-2001) se establece una excentricidad estática del 10%, en congruencia con la limitación a estructuras regulares (apartado 6), pero este valor no se sustenta en ningún estudio y se ignora si este 10% es mucho o es poco.

Las estructuras de mampostería son esencialmente a base de muros, por lo es importante evaluar el impacto específico que las deformaciones por cortante tienen tanto en la ubicación de los centros de torsión de los edificios, así como su impacto específico en las fuerzas cortantes que absorben cada muro con respecto a aquellas que se obtienen aplicando el método simplificado tal y como se establece en las normas.

<sup>1</sup> Profesor, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo # 180, Col. Reynosa Tamaulipas, 02200 México, D.F., e-mail: [atc@correo.azc.uam.mx](mailto:atc@correo.azc.uam.mx)

<sup>2</sup> Ayudante, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco y estudiante de la Maestría en Estructuras de la Facultad de Ingeniería, UNAM, e-mail: [jcano@correo.azc.uam.mx](mailto:jcano@correo.azc.uam.mx)

En el estudio previo (Tena y Pérez, 2000a/b) se comenzó a evaluar la importancia de las deformaciones por cortante de los muros en la ubicación de los centros de torsión de edificios mediante la determinación de excentricidades estáticas de cada entrepiso. Se compararon las diferencias que existen en las excentricidades estáticas si se consideran o no las deformaciones por corte, si se emplea la fórmula aproximada propuesta para el método simplificado por las NTCM-2001 y con las hipótesis sobre la matriz de rigidez lateral de muro conforme a las NTCM-2001. Se evaluó el caso común de edificios donde se tiene la misma distribución de muros en planta, pero en cada planta existen muros con distintas relaciones altura-longitud ( $H/L$ ), lo que ocasiona que el impacto de las deformaciones por cortante en la rigidez lateral de cada muro sea distinto.

Dicho estudio demuestra que las deformaciones por cortante tienen gran influencia en la ubicación de los centros de torsión de entrepiso de edificios que no sean totalmente simétricos en planta y en elevación. La ubicación de los centros de torsión puede variar notablemente entre los distintos entrepisos en edificios donde existan en planta muros con distintas relaciones  $H/L$ , a pesar de que dicha distribución de muros en planta sea idéntica en todos los niveles. Si dominan muros con  $H/L < 1$  (muros cortos), las excentricidades estáticas calculadas tienden a incrementarse del último al primer nivel. Si dominan muros con  $H/L > 1$  (muros esbeltos), las excentricidades estáticas calculadas tienden a incrementarse del primer al último nivel. Un estudio un poco más detallado del por qué sucede esto ilustra que son precisamente el impacto que tienen las deformaciones por cortante en los grados de libertad de rotación de los muros lo que origina el cambio en los centros de torsión de entrepiso (Tena y Pérez, 2000a/b).

El estudio previo también demuestra que la expresión aproximada propuesta por las NTCM-2001 para el cálculo de la excentricidad estática conforme al método simplificado da resultados razonables para modelos donde todos los muros tienen proporciones semejantes ( $H/L$ ). Para sistemas dominados por muros cortos ( $H/L < 1$ ), la expresión es conservadora, mientras que para sistemas dominados por muros esbeltos ( $H/L > 1$ ), la expresión no es conservadora. De esto resultados se desprende que quizá, para fines de análisis, debería calibrarse de mejor manera factor  $F_{AE}$  que propone ahora la NTCM-2001.

El presente estudio se concentra en comparar las fuerzas cortantes que toman los muros si se utiliza el método simplificado con respecto al método riguroso (método de Damy), tomando en cuenta la propuesta actual del método simplificado de las NTCM-2001. Se reportan los avances que se han realizado hasta la fecha para conseguir esta meta, mismos que se resumen en las siguientes secciones, y se concluye sobre el avance y los estudios que faltan por realizar para poder cumplir con los objetivos trazados en la investigación en curso.

### **MÉTODO DE ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL RIGUROSO: MÉTODO DE DAMY**

Como se comentó en el estudio previo (Tena y Pérez, 2000a/b), para poder estudiar la respuesta tridimensional ante carga lateral de edificios que presentan excentricidades que originen respuesta torsional, incluyendo el impacto de las deformaciones por cortante en la ubicación de los centros de torsión de entrepiso de edificios, se seleccionó el método que el Ing. Julio Damy Ríos propuso en 1985 en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, mismo que se documentó en Tena y Pérez (2000b), en particular cómo se calculan las coordenadas de los centros de torsión y las excentricidades existentes y cómo se modelan los muros como una columna ancha equivalente condensada suponiendo un comportamiento elástico lineal, homogéneo e isotrópico. En Tena y Pérez (2001) se define el procedimiento completo de análisis, incluyendo el cálculo de excentricidades de diseño, a partir de las cuales se definen los momentos torsionantes de diseño, y en la sección siguiente se resume la solución del sistema tridimensional incluyendo los efectos de torsión amplificados de acuerdo con las NTCS-2001.

### **SOLUCIÓN DEL SISTEMA TRIDIMENSIONAL INCLUYENDO LOS EFECTOS DE TORSIÓN AMPLIFICADOS CONFORME A LAS NTCS-2001**

Toda vez que se han definido las excentricidades estáticas y de diseño, y que a partir de ellas se pueden determinar los momentos torsionantes actuantes, la solución se reduce a resolver el sistema:

$$\begin{Bmatrix} \{F_x\} \\ \{F_y\} \\ \{M_0\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [K_{xx}] & [K_{xy}] & [K_{x\theta}] \\ [K_{yx}] & [K_{yy}] & [K_{y\theta}] \\ [K_{\theta x}] & [K_{\theta y}] & [K_{\theta\theta}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{D_x\} \\ \{D_y\} \\ \{\theta\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Para cada dirección, considerando exclusivamente la amplificación de los momentos torsionantes de acuerdo con las NTCS, así como el caso inicial que considera las excentricidades estáticas calculadas, se debe resolver este sistema tres veces, como se establece en la tabla 1 para las direcciones  $X$  e  $Y$ . En las tabla 1,  $M_0$  es el vector con los momentos torsionantes asociados a las excentricidades existentes calculadas,  $M_{01}$ , y  $M_{03}$  son los vectores de momentos torsionantes asociados a las excentricidades máximas de diseño en dirección  $X$  e  $Y$  respectivamente y  $M_{02}$ , y  $M_{04}$  son los vectores de momentos torsionantes asociados a las excentricidades mínimas de diseño en dirección  $X$  e  $Y$  respectivamente, conforme se define en Tena y Pérez (2001).

**Tabla 1. Casos de análisis por sismo, considerando efectos unidireccionales**

Sismo en dirección X			Sismo en dirección Y		
I	I	II	III	II	III
$\{F_x\} = \{F\}$	$\{F_x\} = \{0\}$	$\{F_x\} = \{0\}$	$\{F_x\} = \{0\}$	$\{F_x\} = \{F\}$	$\{F_x\} = \{F\}$
$\{F_y\} = \{0\}$	$\{F_y\} = \{F\}$	$\{F_y\} = \{F\}$	$\{F_y\} = \{F\}$	$\{F_y\} = \{0\}$	$\{F_y\} = \{0\}$
$\{M\} = \{M_0\}$	$\{M\} = \{M_0\}$	$\{M\} = \{M_{03}\}$	$\{M\} = \{M_{04}\}$	$\{M\} = \{M_{01}\}$	$\{M\} = \{M_{02}\}$

La sección 8.7 de las NTCS-2001 establece que cada sección crítica de un edificio debe resistir la suma vectorial de los efectos (desplazamiento y fuerzas internas) de un componente del movimiento del terreno con un 30 % de los del otro, en adicción a los efectos de fuerza gravitacionales. Por lo tanto, en este caso el sistema dado en la ecuación 1 se debe resolver para las siguientes dos condiciones en cada dirección, como se establece en la tabla 2. Adicionalmente, en un diseño riguroso se deben afectar las combinaciones identificadas en las tablas 1 y 2 por los factores de carga correspondientes. Para combinaciones con cargas laterales,  $F_c=1.1$  según las NTCS-2001.

**Tabla 2. Casos de análisis por sismo, considerando efectos bidireccionales**

Sismo en dirección X		Sismo en dirección Y	
I	II	I	II
$\{F_x\} = \{F\}$	$\{F_x\} = \{F\}$	$\{F_x\} = \{0.3F\}$	$\{F_x\} = \{0.3F\}$
$\{F_y\} = \{0.3F\}$	$\{F_y\} = \{0.3F\}$	$\{F_y\} = \{F\}$	$\{F_y\} = \{F\}$
$\{M\} = \{M_{01}\}$	$\{M\} = \{M_{02}\}$	$\{M\} = \{M_{03}\}$	$\{M\} = \{M_{04}\}$

Este es el procedimiento general utilizado en el presente trabajo para definir las fuerzas cortantes de diseño conforme al método de Damy con base en el programa de análisis que se presenta en detalle en Pérez (2000).

## COMPARACIÓN DE LAS FUERZAS CORTANTES QUE ABSORBEN LOS MUROS

### MODELOS EN ESTUDIO

En Tena y Pérez (2000b) se reportó la importancia que tienen las deformaciones por cortante de los muros en la ubicación de los centros de torsión de entrepiso de edificios estructurados completamente a base de muros, con base en el estudio de modelos de edificio que, aparentemente, cumplen satisfactoriamente con las limitantes impuestas actualmente por los reglamentos mexicanos para el empleo del método simplificado de análisis por sismo, el cual permite ignorar los efectos de torsión. En el presente trabajo se evalúa con detalle

cómo se distribuyen las fuerzas cortantes de cada entrepiso en los distintos muros, tomando en cuenta o no las deformaciones por cortante, considerando sistemas simétricos y asimétricos, pero que cumplen con las restricciones del método simplificado de análisis, y por tanto, se comparan con las fuerzas cortantes que dichos muros absorberían de acuerdo con el método simplificado, con la finalidad de evaluar que grado de aproximación se tiene con el método simplificado para varios sistemas que la propuesta de NTCM-2001 considera que cumplen con él.

Se seleccionaron nuevamente edificios de mampostería tipo de tres niveles, con altura típica de entrepiso de 2.50 m, cuyas plantas se presentan en las figuras 1 a 6 y los criterios empleados en su selección así como sus características más relevantes se enuncian a continuación. En todos los casos, los muros de mampostería tienen 14 cm de espesor, con  $E=19.2 \text{ ton/cm}^2$  y  $\nu=0.25$ , y  $\Phi_y$  se calculó considerando que su comportamiento es elástico lineal, homogéneo e isotrópico cuando se consideran deformaciones por cortante y se tomó  $\Phi_y=0$  cuando se despreciaron las deformaciones por cortante. Se estudió en todos los modelos el caso muy común de edificios donde se tiene la misma distribución de muros en cada planta, pero en cada planta existen muros con distintas relaciones altura-longitud ( $H/L$ ), lo que ocasiona que el impacto de las deformaciones por cortante en la rigidez lateral de cada muro sea distinto (Tena y Pérez, 2000a/b). En la dirección Y se emplearon tres muros largos dispuestos simétricamente siempre, mientras que en la dirección X se emplearon seis muros, cuatro perimetrales y dos centrales, donde los muros perimetrales siempre son iguales entre sí para cada caso de estudio y los muros centrales tienen las mismas dimensiones en todos los estudios.

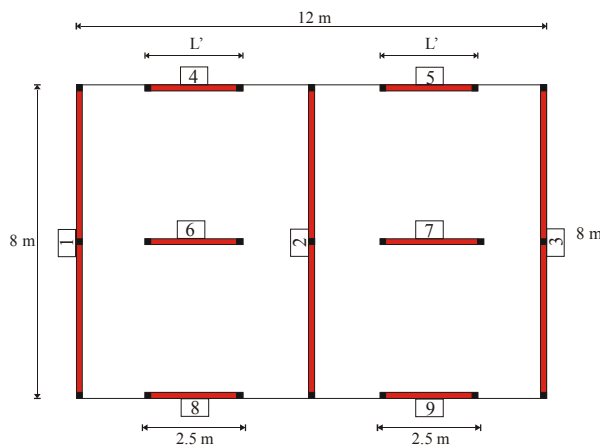


Figura 1. Planta tipo del modelo 1

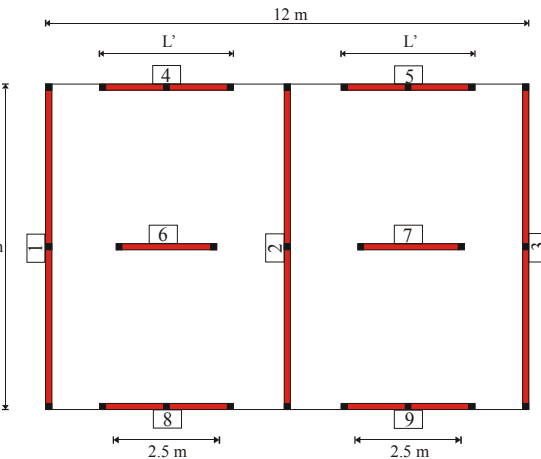


Figura 2. Planta tipo de los modelos 2 y 3

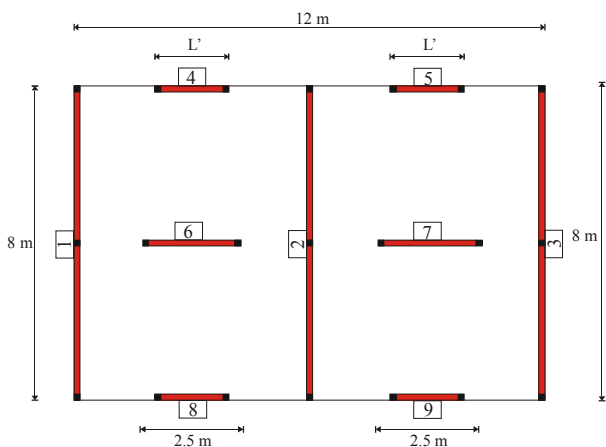


Figura 3. Planta tipo de los modelos 4 y 5

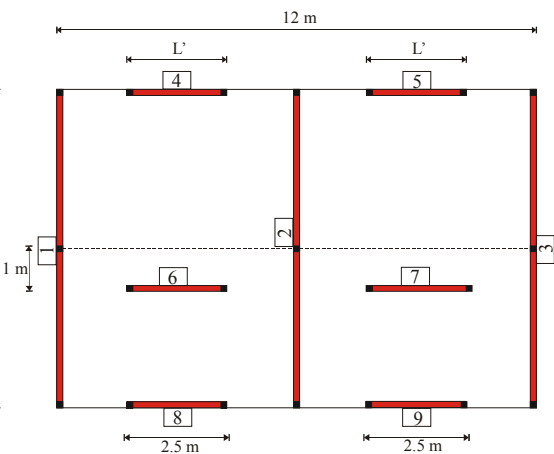


Figura 4. Planta tipo del modelo 6

Se estudiaron dos casos generales, (a) aquél donde la distribución de muros en planta es completamente simétrica con respecto a dos ejes ortogonales principales (figuras 1 a 3), que es la hipótesis en que se basa el

método simplificado permitido por las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo y, (b) se consideró también el caso donde la distribución de los muros es totalmente simétrica con respecto a un eje ortogonal (eje Y), pero es asimétrica con respecto al otro (figuras 4 a 6), con la finalidad de evaluar esta condición permitida por el método simplificado de análisis. Para cada caso general, se estudiaron las siguientes cinco alternativas que se pueden agrupar en tres, (1) los modelos de referencia (figuras 1 y 4), donde en todos lo entrepisos la relación de aspecto de todos los muros en dirección X (muros 4 a 9) es  $H/L=1$ , es decir, todos los muros son cuadrados, (2) dos modelos donde en la dirección X, los muros centrales (6 y 7) tienen una relación de aspecto  $H/L=1$ , pero los muros de los extremos (muros 4, 5, 8 y 9) son alargados, con relaciones de aspecto  $H/L=0.75$  y  $H/L=0.5$  (figuras 2 y 5) y, (3) dos modelos donde los muros centrales (6 y 7) tienen una relación de aspecto  $H/L=1$ , pero los muros de los extremos (muros 4, 5, 8 y 9) son esbeltos, con relaciones de aspecto  $H/L=1.33$  y  $H/L=2.0$  (figuras 3 y 6). Las características generales de cada modelo en estudio se resumen en la tabla 3.

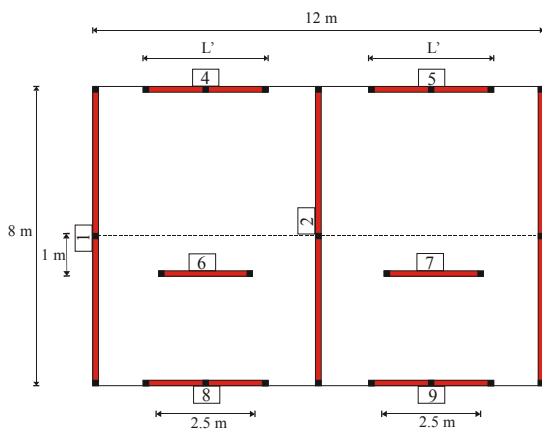


Figura 5. Planta tipo de los modelos 7 y 8

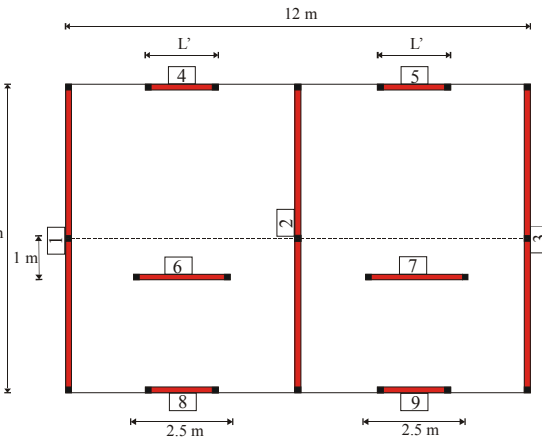


Figura 6. Planta tipo de los modelos 9 y 10

Tabla 3. Identificación de los modelos en estudio

Modelos simétricos			Modelos asimétricos		
Modelo	H/L muros 6 y 7	H/L' Muros 4, 5, 8 y 9	Modelo	H/L muros 6 y 7	H/L' muros 4, 5, 8 y 9
1	1.0	1.0	6	1.0	1.0
2	1.0	0.75	7	1.0	0.75
3	1.0	0.5	8	1.0	0.5
4	1.0	1.33	9	1.0	1.33
5	1.0	2.0	10	1.0	2.0

En el método de Damy se calcularon las fuerzas y cortantes sísmicos considerando que se trata de un edificio de oficinas donde puede emplearse el método simplificado y se incluyó además el peso propio de los muros, por lo que en la tabla 4 se resumen las fuerzas sísmicas utilizadas en los análisis para cada modelo. Las masas se consideraron uniformemente distribuidas en todos los entrepisos, por lo que el centro de masas de cada entrepiso coincide con el centro geométrico de cada planta, es decir  $x_{Mi}=6m$  y  $y_{Mi}=4m$ .

Tabla 4. Fuerzas sísmicas utilizadas en los modelos en estudio

Nivel	Modelos 1 y 6		Modelos 2 y 7		Modelos 3 y 8		Modelos 4 y 9		Modelos 5 y 10	
	$F_i$ (Ton)	$V_i$ (Ton)	$F_i$ (Ton)	$V_i$ (Ton)	$F_i$ (Ton)	$V_i$ (Ton)	$F_i$ (Ton)	$V_i$ (Ton)	$F_i$ (Ton)	$V_i$ (Ton)
3	17.63	17.63	17.93	17.93	18.55	18.55	17.40	17.40	17.17	17.17
2	15.49	33.12	15.89	33.82	16.69	35.23	15.19	32.59	14.89	32.06
1	7.75	40.86	7.94	41.76	8.34	43.57	7.59	40.18	7.45	39.5

Las relaciones de aspecto de los muros ( $H/L$ ) seleccionadas tienen que ver con aquéllas especificadas actualmente en el método simplificado de análisis propuesto en el anteproyecto de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM-2001, 2001). En este respecto, también se evaluó la propuesta de dicho anteproyecto de norma para calcular de manera aproximada, la excentricidad torsional calculada estáticamente,  $e_s$ , 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 dado por la expresión:

$$e_{sj} = \frac{\left| \sum_{i=1}^n x_i F_{AEi} A_{Ti} \right|}{\sum_{i=1}^n F_{AEi} A_{Ti}} \leq 0.1 B_j \quad (2)$$

donde el área efectiva es el producto del área bruta de la sección transversal del muro  $i$ ,  $A_{Ti}$ , y el factor  $F_{AEi}$ , donde  $H$  es la altura libre del muro y  $L$  es la longitud efectiva del muro, y el factor  $F_{AEi}$  se calcula como:

$$F_{AEi} = 1, \text{ si } \frac{H}{L} \leq 1.33 \quad (3)$$

$$F_{AEi} = \left( 1.33 \frac{L}{H} \right)^2, \text{ si } \frac{H}{L} > 1.33 \quad (4)$$

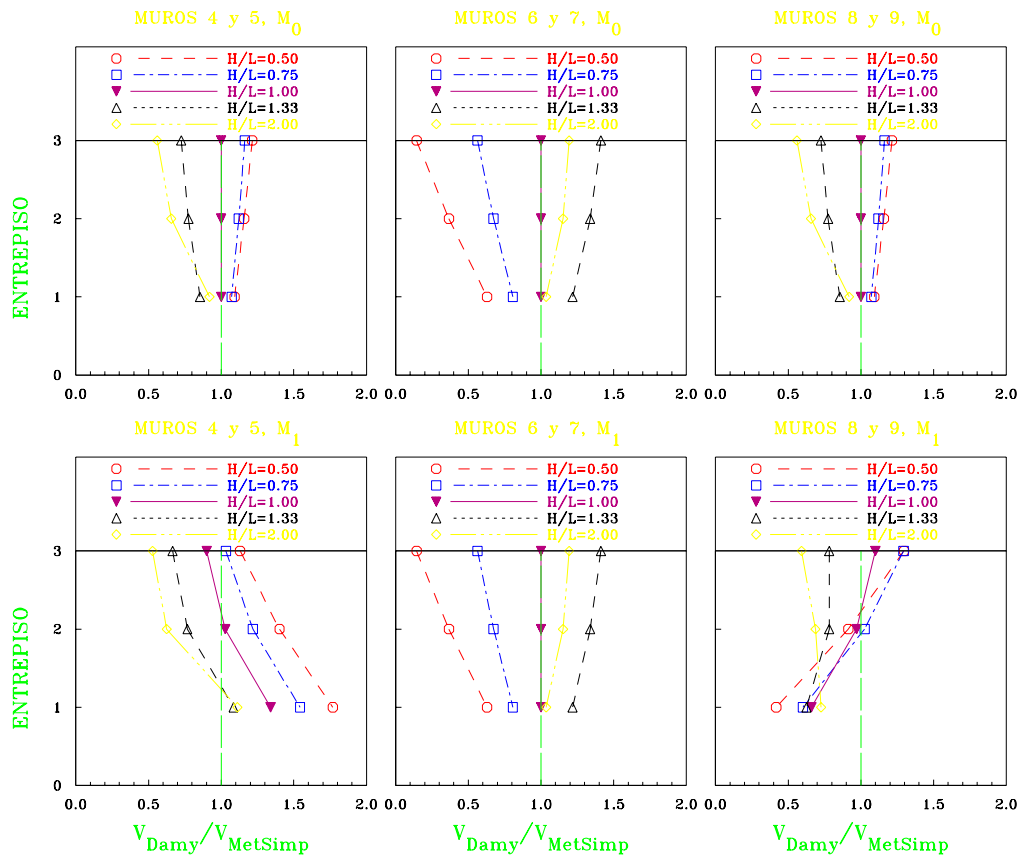
Por lo tanto, para cada modelo se determinaron las excentricidades estáticas utilizando: 1) el método de Damy, incluyendo deformaciones por cortante ( $\Phi_y \neq 0$ ), 2) el método de Damy, ignorando las deformaciones por cortante ( $\Phi_y = 0$ ) y, 3) el método simplificado propuesto en las NTCM-2001. Para todos los modelos simétricos (modelos 1 a 5, figs 1 a 3), como se esperaba *a-priori*, se obtuvo por los tres métodos que no existe excentricidad estática en planta en ningún nivel y en ninguna dirección, es decir,  $e_{xt} = e_{yt} = 0$ . Sin embargo, esto no significa que el nivel de fuerzas asociadas a los análisis realizados conforme a estas tres hipótesis sean iguales, como se ilustra en las figuras 7 a 10, lo que se discuten a continuación.

En la figura 7 se comparan las diferencias entre los cortantes de entrepiso que absorben los muros 4 a 9 de los modelos 1 a 5 (figs 1 a 3, tabla 3), cuando se analizan rigurosamente con el método de Damy, incluyendo deformaciones por cortante ( $\phi = \Phi_y > 0$ ) o ignorando las deformaciones por cortante ( $\phi = \Phi_y = 0$ ), cuando en ambos análisis se consideran la misma distribución de fuerzas laterales conforme al método de análisis estático establecido por propuesta de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCS-2001, 2001). En estas figuras se normalizan las fuerzas cortantes de los análisis que no incluyen las deformaciones por cortante ( $V_{\phi=0}$ ) con respecto a aquellas que se obtienen de los análisis donde si se incluyen las deformaciones por cortante ( $V_{\phi>0}$ ), correspondiente al mejor modelado para sistemas a base de muros. En este marco de referencia, todo cociente menor a la unidad ( $V_{\phi=0}/V_{\phi>0} < 1$ ) indicaría subestimaciones en los cortantes de análisis con respecto al mejor modelado.

En esta figura y las siguientes,  $M_0$  indica que se utilizó el momento torsionante asociada a la excentricidad calculada sin amplificar, que para este caso en particular es cero pues el sistema es simétrico, mientras que  $M_1$  identifica los resultados de los análisis donde la excentricidad se amplificó conforme lo estipulan las NTCS-2001. Asimismo, UNI identifica los resultados de los análisis ante acción unidireccional de las fuerzas sísmicas conforme a las NTCS-2001, según se resume en la tabla 1, mientras que BID identifica la acción bidireccional de las fuerzas sísmicas conforme a la regla del 100%+30% establecida por las NTCS-2001, según se identifica en la tabla 2.

Al tratarse de sistemas totalmente simétricos, los resultados más representativos que se resumen en la fig 7 son aquellos asociados a  $M_0$  y UNI, que se discuten a continuación. De la fig 7 se observa que los cortantes de diseño sólo coinciden en todos los muros para el modelo 1 ( $H/L=1$ , símbolo triángulo invertido lleno), donde todos los muros tienen la misma relación de aspecto (tabla 3). También se observa en la fig 7 que para los modelos donde existen muros con distintas relaciones de aspecto (modelos 2 a 5, tabla 3), existen diferencias en las fuerzas obtenidas entre un análisis y otro a pesar de no existir excentricidades, debido al impacto de las deformaciones por cortante. En particular, se observa en la fig 7 que cuando se tienen muros más alargados o

cortos en la periferia (modelos 2 y 3, fig 2), el no tomar en cuenta las deformaciones por cortante llevaría, en general, a sobreestimar las fuerzas cortantes en los muros (alargados) de la periferia, a costa de subestimar notablemente las fuerzas cortantes en los muros centrales, sobre todo en los niveles más demandados (niveles inferiores). En contraste, se observa lo contrario cuando se tienen muros más esbeltos en la periferia (modelos 4 y 5, fig 3), donde el no incluir las deformaciones por cortante lleva a subestimar en los niveles inferiores las fuerzas cortantes en los muros (esbeltos) de la periferia, a costa de sobreestimar las fuerzas cortantes en los muros centrales. Se observa que las diferencias más notables entre ambos análisis se presentan para los sistemas donde predominan los muros cortos u alargados ( $H/L < 1$ ), lo que es de esperarse, pues es en este tipo de elementos donde impactan más las deformaciones por cortante. También se observa en la fig 7 que no hay un patrón definido de subestimación y/o sobreestimación definido en elevación, pues para todos los casos, excepto el modelo 1, en algunos niveles se subestiman las fuerzas y en otros se sobrestiman. Lo que sí resulta claro, aún para estos modelos simples, es que si no se incluyen las deformaciones por cortante en sistemas a base de muros, se obtienen imprecisiones difíciles de cuantificar aún para sistemas simétricos, y que esta imprecisión se debe incrementar mientras mayor complejidad exista en las relaciones de aspecto de los muros, por lo que resulta claro una vez más que deben tomarse en cuenta.

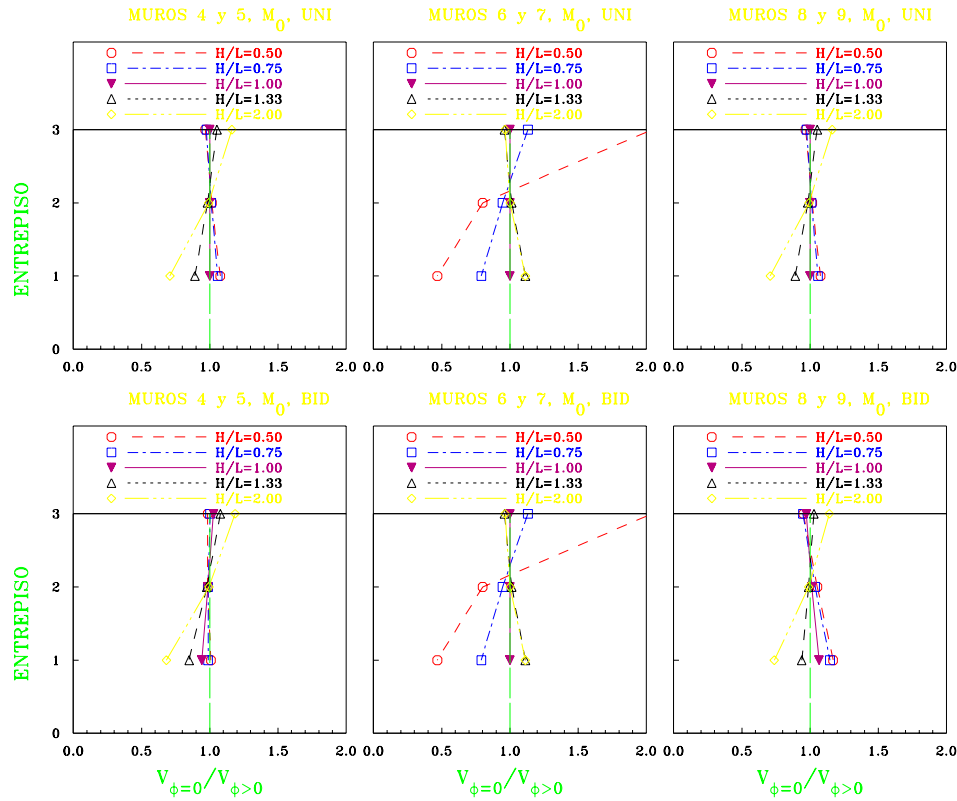


**Figura 7. Relación entre los cortantes de análisis de sistemas simétricos, con ( $\phi > 0$ ) o sin ( $\phi = 0$ ) deformaciones de cortante, para los modelos 1 a 5 de las figuras 1 a 3 (tabla 3)**

En la figura 8 se comparan los cortantes de entrepiso que absorben los muros 4 a 9 de los modelos 1 a 5 (figs 1 a 3, tabla 3) ante acción unidireccional de las fuerzas sísmicas, cuando se analizan rigurosamente con el método de Damy incluyendo deformaciones por cortante ( $\phi = \Phi_y > 0$ ), con respecto a los obtenidos conforme al método simplificado de análisis establecido en las NTCM-2001, cuando en ambos análisis se consideran la misma distribución de fuerzas laterales (tabla 4). En estas figuras se normalizan las fuerzas cortantes de los análisis del Método de Damy que incluyen las deformaciones por cortante ( $V_{Damy}$ ) con respecto a aquellas que se obtienen de los análisis del método simplificado ( $V_{MetSimp}$ ). Se puede demostrar que el cortante que absorbe cada muro conforme al método simplificado ( $V_{MetSimp}$ ) es:

$$V_{MetSimp_i} = V_u \frac{F_{AE_i} A_{T_i}}{\sum F_{AE_i} A_{T_i}} \tag{5}$$

donde  $V_u$  es el cortante actuante en el entrespacio y los demás términos ya han sido previamente definidos. En este marco de referencia, todo cociente mayor a la unidad ( $V_{Damy}/V_{MetSimp}>1$ ) indicaría subestimaciones en los cortantes obtenidos de los análisis con el método simplificado con respecto al modelado más preciso, que es con el Método de Damy incluyendo deformaciones por cortante.



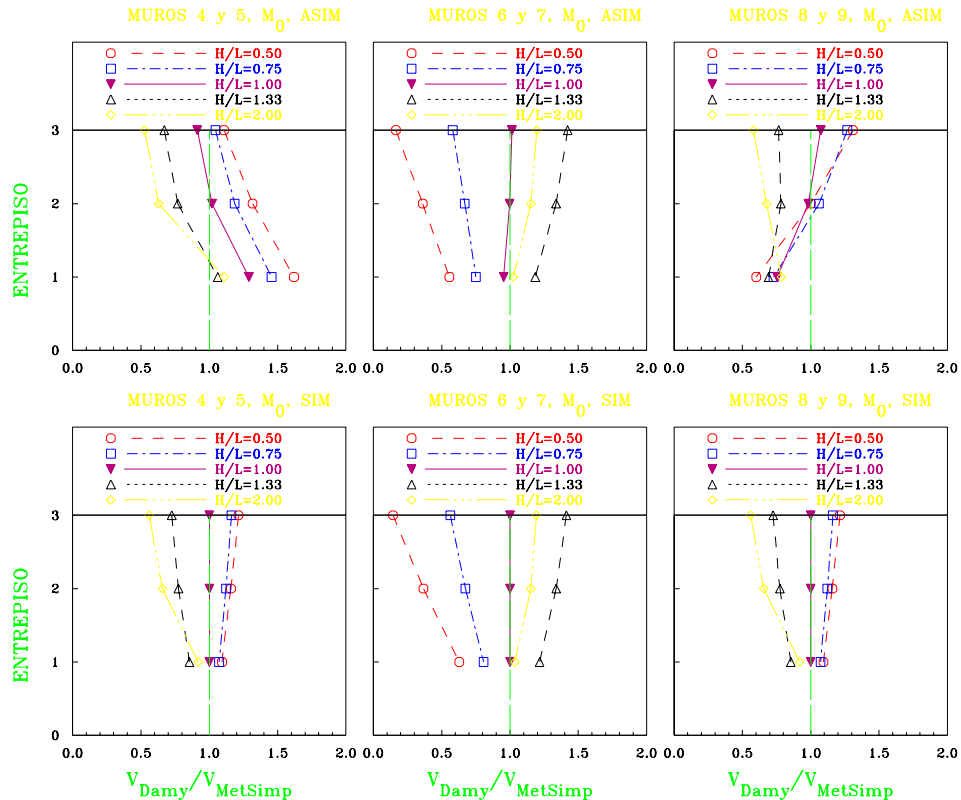
**Figura 8. Relación entre los cortantes de análisis de sistemas simétricos (riguroso vs método simplificado) ante acción unidireccional para los modelos 1 a 5 de las figuras 1 a 3 (tabla 3)**

De la observación de la figura 8 se aprecia que los cortantes de diseño asociados al método simplificado sólo coinciden en todos los muros para el modelo 1 ( $H/L=1$ , símbolo triángulo invertido lleno), donde todos los muros tienen la misma relación de aspecto (tabla 3). También se observa que para los modelos donde existen muros con distintas relaciones de aspecto (modelos 2 a 5, tabla 3), existen diferencias en las fuerzas obtenidas entre un análisis y otro a pesar de no existir excentricidades, debido al impacto de las deformaciones por cortante. En particular, se observa en la fig 8 que cuando se tienen muros más alargados o cortos en la periferia (modelos 2 y 3, fig 2), el método simplificado subestima las fuerzas cortantes en los muros (alargados) de la periferia, a costa de sobreestimar notablemente las fuerzas cortantes en los muros centrales, sobre todo en los niveles superiores. En contraste, se observa lo contrario cuando se tienen muros más esbeltos en la periferia (modelos 4 y 5, fig 3), donde el método simplificado lleva a sobreestimar las fuerzas cortantes en los muros (esbeltos) de la periferia, a costa de subestimar las fuerzas cortantes en los muros centrales, sobre todo en los niveles superiores. Con respecto a los muros esbeltos, se observa que la aproximación entre el método simplificado y el análisis riguroso es mejor para los muros con  $H/L=2$ , y no para  $H/L=1.33$ , lo que sugiere que tal vez el haber tomado un factor de área efectiva que depende de la relación  $H/L$  contribuyó a que en el primer caso la aproximación fuera mejor.

Se observa también en la fig 8 que cuando se consideran las excentricidades con fines de diseño establecidas por las NTCS-2001 ( $M_1$ ), se aprecian diferencias notables en la estimación de las fuerzas cortantes entre el



método simplificado y un análisis riguroso, particularmente para los edificios con muros periféricos con  $H/L < 1$ . De hecho, esto se aprecia mejor cuando se comparan los resultados de las fuerzas cortantes obtenidas de los análisis de los modelos totalmente simétricos (modelos 1 a 5, figs 1 a 3) con los modelos asimétricos (modelos 6 a 10, figs 4 a 6) en la figura 9, donde se observa que para las excentricidades calculadas de los análisis (sin amplificar) para cada modelo asimétrico (tabla 5), se notan diferencias apreciables entre el método simplificado y un análisis riguroso, sobre todo para los modelos con muros periféricos con  $H/L < 1$ . De hecho, se observa que la subestimación del cortante basal en los muros exteriores 4 y 5 es de 29% cuando  $H/L=1$ , 46% para  $H/L=0.75$  y hasta 62% para  $H/L=0.5$ . Para los sistemas con muros periféricos esbeltos ( $H/L > 1.33$ ), en general el método simplificado sobreestima las fuerzas cortantes en dichos muros periféricos, salvo en PB donde se subestima hasta en un 10%, a cambio de que se subestime las fuerzas cortantes en los entrepisos superiores de los muros centrales 6 y 7, con relación de aspecto  $H/L=1$  hasta en un 42% para el caso en que la relación de aspecto de los muros exteriores es  $H/L=1.33$  (modelo 9).



**Figura 9. Relación entre los cortantes de análisis (riguroso vs método simplificado) para sistemas simétricos ( $e_s=0$ ) y asimétricos ( $e_s>0$ ) ante acción unidireccional para los modelos 1 a 10 de las figuras 1 a 6 (tabla 3)**

Si uno trata de correlacionar las diferencias que existen entre los cocientes de las fuerzas cortantes del método riguroso entre el método simplificado presentados en la fig 9 con las diferencias que existen entre las excentricidades estáticas calculadas que se resumen en la tabla 5 para el método simplificado (NTCM-2001) y el análisis riguroso ( $Damy, \Phi_y \neq 0$ ), la única relación lógica se daría en el modelo 6, donde  $H/L=1$  para todos los muros y la diferencia entre las excentricidades calculadas es constante para todos los entrepisos, lo que redundaría en que las variaciones que existen entre uno y otro caso sean menores. En cambio, es muy difícil entender los resultados para los sistemas con muros alargados ( $H/L < 1$ , modelos 7 y 8), pues resulta que las máximas diferencias entre los cortantes de análisis (fig 9) se obtienen en los entrepisos donde existe una mejor predicción de la excentricidad estática (tabla 5); en contraste, para los sistemas con muros periféricos esbeltos si se aprecia una cierta correlación, ya que las máximas diferencias en los cocientes mostrados en la fig 9 se observan precisamente en los entrepisos donde existen mayores diferencias entre las excentricidades calculadas con el método riguroso y las estimadas con el método simplificado (tabla 5). Si se comparan los

resultados obtenidos para sistemas simétricos con los sistemas asimétricos en la misma fig 9, uno puede concluir que, en general, en ambos casos se obtienen mayores imprecisiones para los sistemas con muros periféricos alargados ( $H/L < 1$ ), donde la imprecisión aumenta conforme la relación  $H/L$  disminuye, mientras que para muros periféricos esbeltos ( $H/L \geq 1.33$ ), la imprecisión disminuye a medida que  $H/L$  se incrementa.

Tabla 5. Excentricidades estáticas en la dirección y ( $e_y$ ) de los modelos asimétricos en estudio (en %)

Nivel	Modelo 6			Modelo 7		
	Damy ( $\Phi_v \neq 0$ )	Damy ( $\Phi_v = 0$ )	NTCM-2001	Damy ( $\Phi_v \neq 0$ )	Damy ( $\Phi_v = 0$ )	NTCM-2001
3	4.17	4.17	4.13	1.92	2.18	3.38
2	4.17	4.17	4.13	2.30	2.18	3.38
1	4.17	4.17	4.13	3.09	2.18	3.38
Nivel	Modelo 8			Modelo 9		
	Damy ( $\Phi_v \neq 0$ )	Damy ( $\Phi_v = 0$ )	NTCM-2001	Damy ( $\Phi_v \neq 0$ )	Damy ( $\Phi_v = 0$ )	NTCM-2001
3	0.36	0.74	2.50	7.07	6.78	5
2	0.92	0.74	2.50	6.69	6.78	5
1	2.07	0.74	2.50	5.73	6.78	5
Nivel	Modelo 10			Nota: Las excentricidades estáticas están indicadas como un porcentaje de la dimensión máxima en planta en la dirección y, es decir, $B=8m$ .		
	Damy ( $\Phi_v \neq 0$ )	Damy ( $\Phi_v = 0$ )	NTCM-2001			
3	10.35	10	8.66			
2	9.98	10	8.66			
1	8.63	10	8.66			

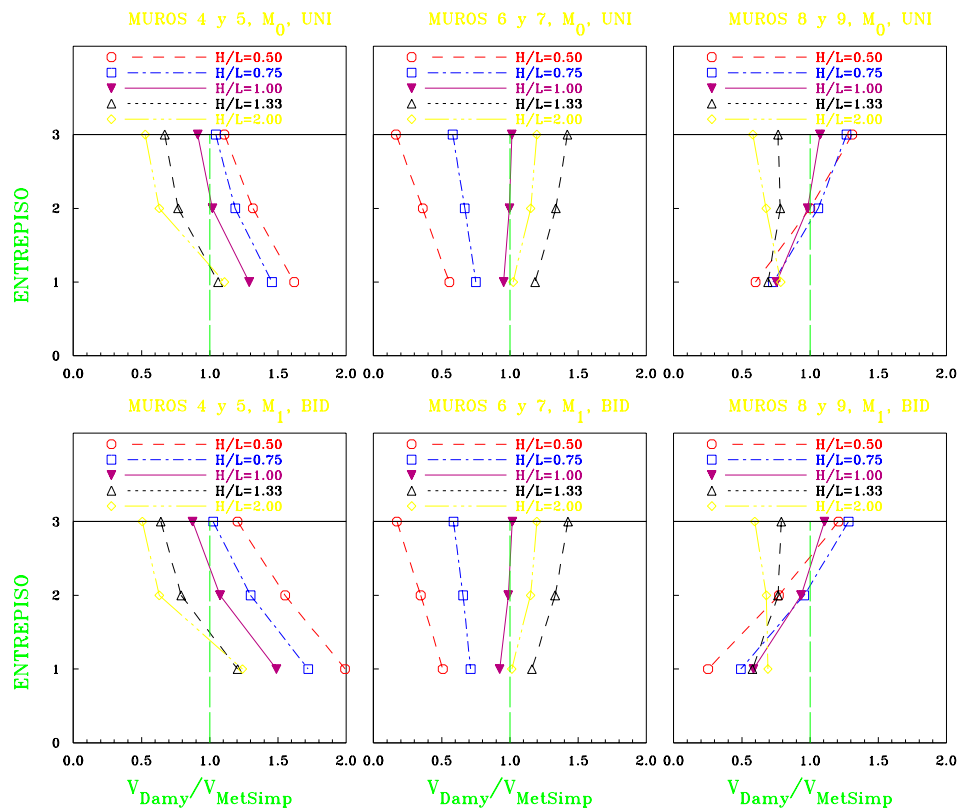


Figura 10. Relación entre los cortantes de análisis (riguroso vs método simplificado) para sistemas asimétricos ( $e_s > 0$ ) ante acción unidireccional y bidireccional para los modelos 8 a 10 de las figs 4 a 6

Esto es muy claro si se comparan directamente los resultados para sistemas con muros con  $H/L=0.5$  (círculos) con los muros esbeltos donde  $H/L=2$  (diamantes). En opinión del primer autor esto parece deberse a que, mientras para muros con relaciones de aspecto  $H/L \leq 1.33$ , en el método simplificado no se corrige el área efectiva por relación de aspecto, para muros con  $H/L \geq 1.33$  si se corrige el área efectiva en función de la relación de aspecto ( $H/L$ ), y esto parece redundar en una mejor aproximación tanto para sistemas simétricos como asimétricos. Esta hipótesis está siendo estudiada en detalle actualmente, y en trabajos futuros se presentará la mejor propuesta de modificación, con fines prácticos, del factor de área efectiva en función de un análisis paramétrico, donde ya podemos adelantar que con ella se mejoran ostensiblemente las aproximaciones del método simplificado con respecto a métodos rigurosos para un mayor número de casos de estudio.

De acuerdo con las NTCM-2001 y NTCS-2001, una estructura que no cumpla con los requisitos para aplicar el método simplificado deberá diseñarse considerando los efectos bidireccionales de los movimientos del terreno conforme a la regla del 100%+30%, además de amplificar las excentricidades con fines de diseño. Estos análisis están identificados como  $M_1$ , BID en la figura 10, donde se comparan los resultados de las fuerzas cortantes obtenidas de los análisis de los modelos asimétricos (modelos 6 a 10, figs 4 a 6) que consideran dicha amplificación con respecto a los de método simplificado de análisis. Como era de esperarse, se aprecian diferencias aún mayores entre el método simplificado y un análisis riguroso que cuando no se amplifican las excentricidades ( $M_0$ ) y se considera únicamente acción unidireccional (UNI). Para los análisis identificados como “ $M_1$ , BID”, se observa que la subestimación del cortante basal en los muros exteriores 4 y 5 aumenta a 49% cuando  $H/L=1$ , 72% para  $H/L=0.75$  y hasta 99% para  $H/L=0.5$ .

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

El presente estudio se concentró en comparar las fuerzas cortantes que toman los muros si se utiliza el método simplificado con respecto al método riguroso (método de Damy), tomando en cuenta la propuesta actual del método simplificado de las NTCM-2001. El estudio muestra que para fuerzas cortantes de entrepiso idénticas, el método simplificado llega a subestimar de manera importante las fuerzas cortantes que absorben los muros más demandados (lado flexible), sobre todo para muros alargados o rectangulares ( $H/L < 1$ ), donde las deformaciones por cortante son muy importantes, a pesar que en función de la excentricidad estática calculada, pareciera ser que éstos deberían ser donde se observarían menores diferencias. La subestimación incrementa si se toma en cuenta que conforme al Reglamento, en estos sistemas se deben amplificar las excentricidades calculadas, además de considerar efectos bidireccionales.

Como la imprecisión entre el método simplificado y un análisis tridimensional riguroso es menor para muros esbeltos ( $H/L=2$ ) en la estimación de cortantes con respecto a los muros muy rectangulares ( $H/L < 0.8$ ), se propone, con fines de análisis, un factor de área efectiva ( $F_{AE}$ ) más realista a como impactan las deformaciones por cortante en el análisis en todo el intervalo de relaciones de aspecto de los muros ( $H/L$ ), con base en un estudio paramétrico, el que actualmente está en curso y cuyos resultados más relevantes serán difundidos en trabajos futuros de los los autores. Se puede adelantar, sin embargo, que la modificación en estudio si propicia que existan menos diferencias en la estimación de fuerzas cortantes en el método simplificado con respecto a métodos rigurosos de análisis tridimensional para el intervalo de relaciones de aspecto de los muros ( $H/L$ ) más comúnmente utilizadas en estructuras de mampostería.

Toda vez que a partir del estudio paramétrico se obtenga un  $F_{AE}$  que permita mejorar las estimaciones del método simplificado para sistemas simétricos, entonces si se podrá determinar con mayor certidumbre el valor límite (máximo) de la excentricidad torsional calculada estáticamente ( $e_s$ ) para la aplicación del método simplificado de análisis para estructuras de mampostería, a partir de comparar los resultados de análisis rigurosos que incluyan los efectos de torsión con los del método simplificado para distintos valores de ( $e_s$ ), comparando tanto las fuerzas de análisis como los requisitos de diseño estipulados por el Anteproyecto de Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM-2001, 2001).

En las NTCM-2001 se propone actualmente limitar esta excentricidad al 10% de la dimensión paralela en planta, con base en la limitación que se impone a edificios que cumplen las condiciones de regularidad en el

Anteproyecto de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCS-2001, 20001 pero no existen estudios específicos que avalen el valor propuesto. Los resultados presentados en este estudio sugieren que este valor es muy alto para estructuras con muros con relaciones de aspecto ( $H/L < 1.33$ ), pues la subestimación en las fuerzas cortantes que absorben los muros más demandados pueden ser del orden del 100% para valores de  $e_s < 3\%$ , mientras que para estructuras con muros con relaciones de aspecto ( $H/L > 1.33$ ), la subestimación en los muros más demandados es del orden del 40% para valores de  $e_s$  hasta de 10%, y como se comentó, la diferencia básica parece estar directamente relacionada con el factor  $F_{AE}$ . Se observan diferencias aún mayores para excentricidades más grandes cuando se tiene una gran variedad de muros, donde las fuerzas cortantes obtenidas con el método simplificado pueden subestimar a las de un análisis riguroso hasta ocho veces y hasta diez veces si se consideran efectos bidireccionales y ampliificaciones a las excentricidades calculadas conforme a los criterios establecidos en las NTCS-2001 (Tena y Pérez, 2001).

Los autores consideran que si se mejora la estimación del factor  $F_{AE}$ , es probable que no se tenga un valor muy restrictivo para el valor límite (máximo) de la excentricidad torsional calculada estáticamente ( $e_s$ ) para la aplicación del método simplificado de análisis para estructuras de mampostería. Es por ello que se están encauzando los esfuerzos en esta dirección.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo complementario de la Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno del Distrito Federal para el desarrollo de la investigación en curso.

### REFERENCIAS

NTCM-95 (1995), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería", *Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal*, febrero.

NTCM-2001 (2001), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería", *Anteproyecto del Comité de Normas*, mayo.

NTCS-2001 (2001), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo", *Anteproyecto del Comité de Normas*, mayo.

Pérez M. A. (2000), "Estudio de la excentricidad estática máxima para el diseño de estructuras de mampostería conforme al método simplificado", *Proyecto Terminal de Licenciatura*, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma de Metropolitana, mayo.

Tena Colunga A. y Pérez Osornio M. A. (2000a), "Definición de la excentricidad estática máxima permisible para el empleo del método simplificado en el diseño de estructuras de mampostería conforme al Reglamento vigente", *Reporte UAM-A/DMAE-2000/02*, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, octubre.

Tena Colunga A. y Pérez Osornio M. A. (2000b), "Importancia de las deformaciones por cortante en la ubicación de los centros de torsión de entrepiso en edificios estructurados con base en muros", *Memorias, XII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, León, CDROM, noviembre.

Tena Colunga A y Pérez Osornio M. A. (2001), "Definición de la excentricidad estática máxima permisible para el empleo del método simplificado en el diseño de estructuras de mampostería conforme al Reglamento vigente (segunda etapa)", *Reporte UAM-A/DMAE-2001/01*, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, diciembre.