

IMPORTANCE OF MESHING FINITE ELEMENTS OF CONFINED MASONRY WALLS IN THE SEISMIC ANALYSIS OF BUILDINGS

Gelacio Juárez-Luna ⁽¹⁾, Plácido Ortiz Gálvez ⁽²⁾

⁽¹⁾ Profesor-Investigador, Departamento de Materiales, Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Azcapotzalco, CP 02200, México D.F. gjl@azc.uam.mx

⁽²⁾ Estudiante Licenciatura, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, San Pablo No. 180, Col. Azcapotzalco, 02200, México, D.F. Teléfono: (55) 5318-9085; Fax: (55)5318-9085; gorpvez@gmail.com

Received: September 2021. Accepted: November 2021. Published: December 2021

ABSTRACT

In this paper, a suitable finite element meshing of walls is determined based on the strain energy in the linear-elastic range. 7 isolated confined masonry walls under lateral loads applied at the top of the walls were modelled. Besides, a five-level masonry building is analysed using static and dynamic seismic methods. In these models, the displacements and the maximum shear stresses variation versus the division per panel edge were assessed to provide advice for the mesh size in the modelling of masonry walls in buildings. From the computed results, a discretization of 8 elements per edge is recommended to reach reliable results.

Keywords: Meshing; finite elements; walls; masonry; confined

IMPORTANCIA DEL MALLADO DE ELEMENTOS FINITOS DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA EN EL ANÁLISIS SÍSMICO DE EDIFICIOS

RESUMEN

En este artículo se determina un mallado adecuado con los elementos finitos de muros de mampostería con base en la energía de deformación en el intervalo elástico-lineal. Se realiza el modelado de 7 muros aislados de mampostería confinada sujetos a cargas laterales en la parte superior. Además, se realiza el modelado de un edificio de mampostería de cinco niveles, el cual se analiza con los métodos sísmicos estático y dinámico. En estos modelos se realizó un estudio paramétrico de los desplazamientos y los esfuerzos cortantes máximos respecto al número de elementos finitos por borde de panel para proporcionar una recomendación del tamaño de malla en el modelado de muros de mampostería de edificios. De los resultados obtenidos, se recomienda mallar los muros con al menos 8 elementos finitos por borde para obtener resultados apropiados.

Palabras clave: Mallado; elementos finitos; muros; mampostería; confinada

1 INTRODUCCIÓN

Los muros de mampostería siguen siendo los elementos estructurales más empleados para resistir tanto las fuerzas verticales como las horizontales en edificios de vivienda, sea unifamiliar o multifamiliar en México (Meli, 1994). De ahí la importancia de realizar un análisis adecuado de los muros, seleccionando el método adecuado para cada situación y con el detallado necesario para obtener resultados suficientemente aproximados y con ello un buen diseño de la estructura. Para realizar análisis estructural de muros, se tienen aproximaciones simplificadas como el método de la columna ancha (MCA); así como métodos más sofisticados como el método de los elementos finitos. El MCA modela los muros con elementos viga-columna, al cual se le asigna el área y el momento de inercia. Por otra parte, el MEF modela más precisamente cada panel de muro y sus columnas, en caso de que el muro esté confinado, pues se tiene una mejor distribución de esfuerzos. El MCA tiene la ventaja que los modelos de los muros son simples de construir, los elementos mecánicos se obtienen directamente y se obtienen buenos resultados de cortante (Velázquez 2017); sin embargo, no es preciso en los momentos flexionantes y fuerzas normales. Por otra parte, el MEF tiene la ventaja de ser un método más preciso; aunque los modelos pueden ser más tediosos de construir y se requiere de técnicas de integración para calcular los elementos mecánicos, que están implementadas en los programas.

Entre los trabajos que modelan muros de mampostería con los MEF y MCA se tiene a Taveras (2008), quien realizó modelos de muros de mampostería confinada ante carga lateral, los cuales analizó con el MEF y el MCA, concluyendo que los mejores resultados con el MEF los proporcionan aquellos modelos con un menor mallado; además, recomienda mallar con elementos finitos del tamaño de la mitad de la altura de entepiso; sin embargo, no se validan estas recomendaciones. Carrillo (2009) evaluó ambos métodos, MEF y MCA, para determinar los periodos de vibración fundamental de vivienda típicas con muros de concreto. Los resultados numéricos se compararon con resultados de pruebas experimentales de vibración ambiental en edificaciones típicas de uno y dos niveles. Aunque ambas metodologías numéricas de modelado son apropiadas para la estimación de los periodos de vibración de este tipo de estructuras, los resultados obtenidos con el MEF son más aproximados a los resultados experimentales. En este estudio no se proporcionan detalles del mallado de los paneles de muros.

En las especificaciones de análisis y diseño de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM-17, 2017) se recomienda que la estructura podrá modelarse utilizando el MCA o con MEF con las especificaciones del Apéndice Normativo B de Normas o como diagonal equivalente en el caso de muros diafragma. Para determinar los elementos mecánicos que actúan en los muros, las estructuras de mampostería se podrán analizar mediante métodos dinámicos o estáticos que cumplan con el Capítulo 2 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCS-17). Se deberá considerar el efecto de aberturas en la rigidez y resistencia laterales.

En el apéndice B, de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM-17, 2017), se recomienda que los muros de mampostería podrán modelarse con elementos finitos lineales (cuatro

odos) tipo membrana (con rigidez sólo en su plano), siempre que la formulación de dichos elementos pueda representar adecuadamente la flexión en el plano del muro, o con elementos lineales tipo cascarón (con rigidez en su plano y fuera del plano). Los elementos tendrán las propiedades mecánicas de la mampostería y un espesor igual al espesor del muro. **Se utilizará un solo elemento por panel**, siendo un panel el área de muro delimitada por castillos y dalas, siempre que la relación de aspecto del elemento no sea mayor que 2; en caso contrario se propondrá una malla de elementos que cumplan este requisito. Los elementos contiguos tanto en el plano del muro como fuera de él deberán ser continuos en los nodos. Los castillos se modelarán con elementos prismáticos tipo barra localizados en el centroide de la sección transversal del castillo y las propiedades mecánicas del concreto de que están hechos. Los elementos barran deberán ser continuos en los nodos de todos los elementos finitos contiguos (Figura 1). Será admisible utilizar un modelo más detallado siempre que los castillos estén debidamente representados en el modelo. Además, Alcocer *et al.* (2012) concluyen que experimentos numéricos demostraron que el mallado más adecuado es aquella con el menor número de elementos finitos por panel, el cual en este contexto se considera como un muro de mampostería limitado por castillos y dalas, siempre y cuando cumpla con los requisitos de la Figura 2. Sin embargo, se debe tener un número de elementos que garanticen resultados fiables, pero sin tener mallas excesivamente finas que conlleven a costos computacionales grandes e innecesarios. Se ha propuesto modelar los castillos con elementos barra y solo el interior de los muros con elementos finitos. Las barras y los elementos sólo son compatibles en desplazamientos en los nodos, pero no a lo largo de los elementos. No modelar los castillos proporciona una estructura más flexible y, por lo tanto, el periodo dominante calculado es mayor al que podría esperarse. En consecuencia, los desplazamientos son considerablemente mayores.

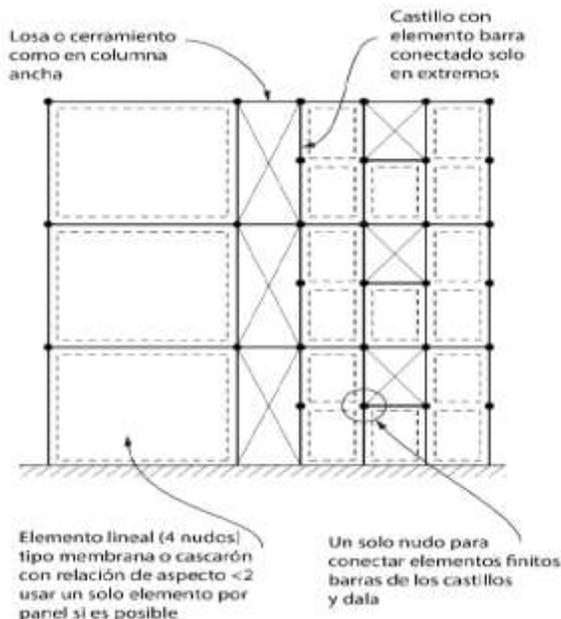


Figura 1. Modelado de muros con elementos finitos (Tomada de las NTCM-17, 2017)

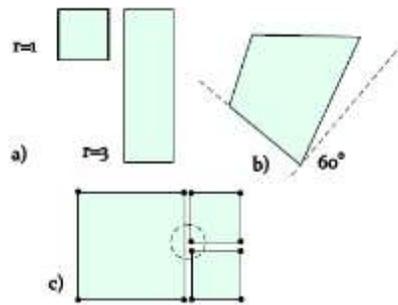


Figura 2. Elementos finitos a) relación de aspecto $0.5 < r < 2$, b) ángulos internos $45 < \theta < 135$, c) los nodos en elementos contiguos deben coincidir (tomada de Alcocer *et al.*, 2012)

El utilizar un solo elemento por panel no garantiza que los desplazamientos y, en consecuencia, que los elementos mecánicos sean lo suficientemente aproximados, pues existen concentración de rigideces en los nodos de esquina en los que se conectan los nodos del panel con los nodos de traveses y columnas. Además, que en una norma nacional se proponga que un análisis con elementos finitos sólo se necesita un elemento por entrepiso para modelar un muro sólido simplemente no tiene sentido (Tena, 2018). El MEF es un método numérico para determinar soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales. En particular, en mecánica de sólidos, el MEF aproxima las variables primarias como los desplazamientos o giros, con los cuales se obtienen otras variables secundarias, mediante derivadas, como las deformaciones, esfuerzos u elementos mecánicos. Como es bien sabido, el MEF proporciona soluciones aproximadas en el dominio del problema, las cuales siempre tendrán un error inherente que se reduce con el tamaño de la malla con el que se modele el dominio. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es proporcionar recomendaciones para el mallado adecuado de muros de mampostería confinada con elementos finitos, para garantizar resultados fiables de los desplazamientos y esfuerzos.

En este artículo se estudia la variación de los esfuerzos en el muro, al incrementar las divisiones de las mallas de EF en los bordes de los paneles de muros, hasta que las magnitudes de los esfuerzos se estabilizan, pues el error de la solución global con el MEF se minimiza. Se utiliza el criterio de la energía de deformación para determinar que una malla de elementos finitos proporciona resultados fiables. Los resultados se validan en análisis estáticos de muros de mampostería confinada; así como en análisis estáticos y dinámicos de un edificio de cinco niveles de mampostería. El contenido de este artículo se describe a continuación. En la sección 2 se determina un criterio de mallado con base en la energía de deformación, en el que se determina el número de elementos en el que se divide cada panel de muro para tener resultados fiables; además se revisa que los esfuerzos y desplazamientos se estabiliza al igual que la energía de deformación. En la sección 3 se realiza el análisis sísmico estático y dinámico de un edificio de 5 niveles, en los cuales se incrementan las divisiones de la malla borde de cada panel. Finalmente, las conclusiones derivadas de este estudio se presentan en la sección 4.

2 ANÁLISIS DEL TAMAÑO DE LA MALLA EN MUROS SUJETOS A CARGA LATERAL

2.1 Estrategia de mallado

La cantidad de energía de deformación que producen las cargas externas dentro de un sólido se utilizó como un criterio para determinar un mallado de los muros que proporcione resultados fiables. Cuando las cargas actúan sobre los muros, estas fuerzas externas realizan un trabajo que se transforma en energía de deformación interna, la cual se acumula en el muro al ser deformado. Si los esfuerzos no alcanzan los valores umbrales del material, el trabajo realizado por la fuerza exterior se transforma por completo en energía potencial de deformación, la cual utiliza el muro para recuperar su posición original. Esta energía de deformación interna es igual al trabajo externo inducido a los muros, que se calculó con las cargas aplicadas y con los desplazamientos en los nodos de la parte superior del muro. Esta energía de deformación interna, U , se determinó con la ecuación siguiente:

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n P_i d_i \quad (1)$$

donde P es la carga en el nodo i y d el desplazamiento correspondiente del nodo en la dirección de la carga.

2.2 Descripción de los muros

Los muros que se modelaron consisten de siete muros de mampostería confinada con distintas relaciones de aspecto, altura a longitud (H/L), los cuales fueron ensayados experimentalmente por Pérez *et al.* (2015). Los muros se construyeron sobre vigas de cimentación de concreto reforzado ancladas al piso del laboratorio. Los detalles geométricos de los especímenes se muestran en la Figura 3. Los primeros cinco especímenes, ME1 a ME5, tienen sólo un panel de muro; el espécimen ME6 tienen dos paneles y el espécimen ME7 tiene tres paneles. Los detalles de las dimensiones de los especímenes y las propiedades de los materiales se presentan detalladamente en la Tabla 1, en la cual se incluyen los valores calculados y medidos de las resistencias laterales. Note que la magnitud del cortante nominal, V_n , incrementa, pues está relacionada con el área de la sección transversal del muro.

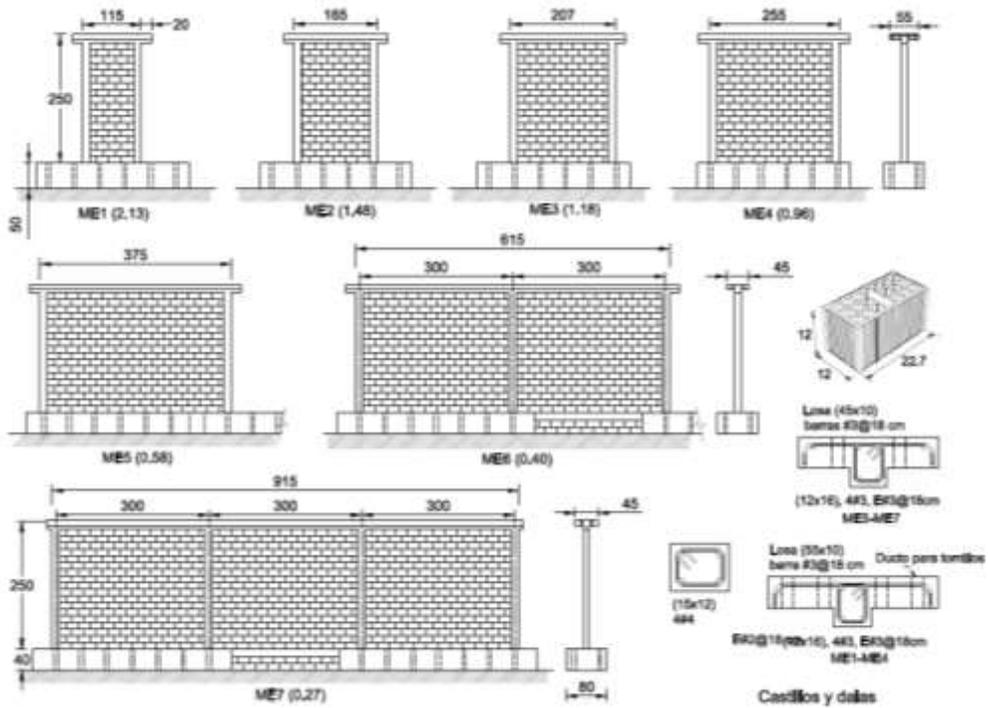


Figura 3. Características geométricas de los muros (tomado de Pérez *et al.*, 2015)

Tabla 1 Propiedades de los especímenes (tomado de Pérez *et al.*, 2015)

Muro	L (m)	H/L	G/E	v_m (MPa)	f'_m (MPa)	f'_c (MPa)	Calculado		Experimental	
							V_n (kN)	V_{max} (kN)	V_n^* (kN)	V_{max}^* (kN)
ME1	1.15	2.13	0.15	0.305	5.53	33.4	41.4	53.8	45.1	46.0
ME2	1.65	1.48	0.10	0.327	5.17	20.4	61.6	80.0	71.1	75.8
ME3	2.07	1.18	0.11	0.345	5.57	18.0	79.4	103.3	88.4	98.8
ME4	2.55	0.96	0.11	0.324	5.83	23.1	94.6	122.9	100.5	157.0
ME5	3.75	0.58	0.13	0.457	8.15	22.7	191.2	248.5	251.6	320.8
ME6	6.15	0.40	0.19	0.513	8.99	25.5	297.9	387.3	473.3	689.8
ME7	9.15	0.27	0.20	0.389	6.54	29.8	375.4	488.0	627.8	835.3

Nota: Las propiedades de los materiales G y v_m se obtuvieron de ensayos de muretes en compresión diagonal y f'_m de ensayos de muretes en compresión; son valores promedio de 4 probetas para los muros ME1 a ME5, y 6 probetas para los muros ME6 y ME7. f'_c se obtuvo del ensayo de cilindros de concreto a compresión, haciendo el promedio de los resultados de 4 probetas para ME1 a ME5, 8 probetas para ME6 y 12 probetas para ME7.

2.3 Análisis de resultados

Las propiedades geométricas y mecánicas se asignaron a los modelos numéricos, a los que se les impuso los valores respectivos de cortante nominal, V_n , reportado en la Tabla 1. Estos valores de cortantes se distribuyeron en los nodos localizados en la parte superior de los modelos. Para determinar el tamaño de la malla de los muros con elementos suficientes que proporcionen resultados fiables, se realizaron análisis elástico-lineales con particiones consecutivas de la malla con 1, 2, 4, 8, 16 y 32 divisiones por panel; es importante comentar que los castillos y las vigas también se dividieron para mantener continuidad de desplazamientos. En

la Figura 4 se muestran los modelos de los muros con mallas de elementos finitos de 8 divisiones por borde de panel.

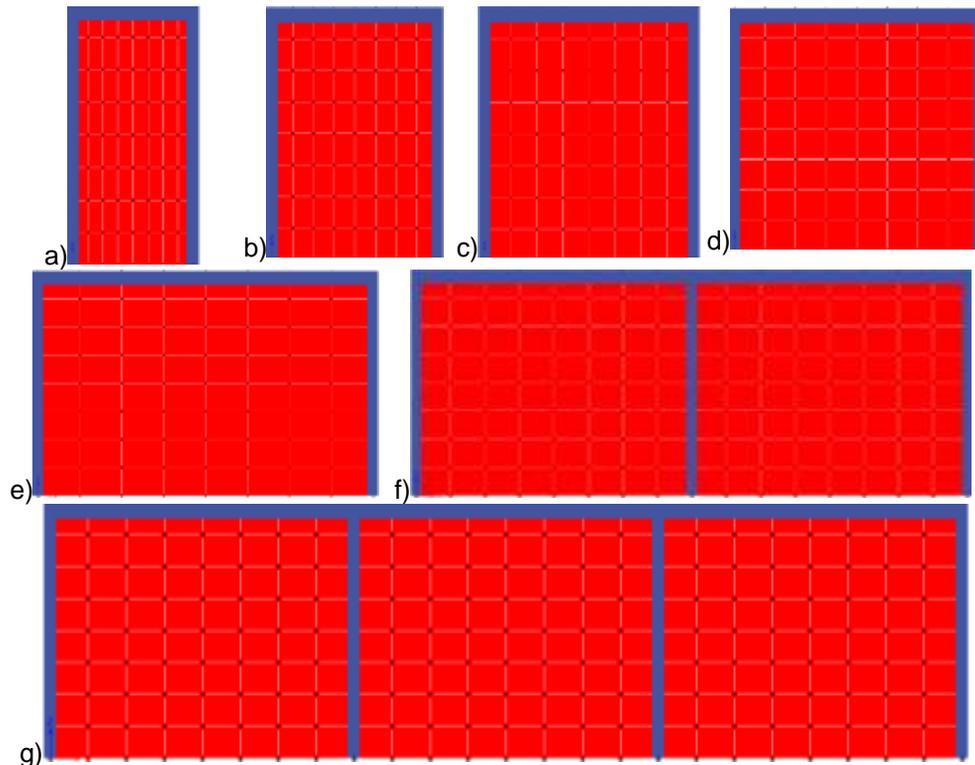


Figura 4. Modelos con 8 elementos por panel de los muros: a) ME1, b) ME2, c) ME3, d) ME4, e) ME5, f) ME6 y g) ME7

Las curvas la energía de deformación interna contra el número de elementos por borde se muestran en la Figura 5a, en la cual se observa que la energía de deformación se estabiliza a partir de 8 divisiones por borde de cada panel, con lo cual se concluye es suficiente el análisis de los muros con 8 elementos los borde. Es importante comentar que los muros presentan distinta energía de deformación, pues las cargas laterales aplicadas, V_n , tienen distintas magnitudes; particularmente, los muros ME6 y ME7 presentan mayor energía de deformación debido a que las magnitudes de las cargas laterales son mayores y a que tienen 2 y 3 paneles, respectivamente. Al normalizar la energía de deformación de cada modelo, se confirma que las curvas se estabilizan a partir de 8 elementos por borde de cada panel como se muestra en la Figura 5b. La energía de deformación se normalizó respecto a la energía calculada para los modelos con 32 elementos por borde.

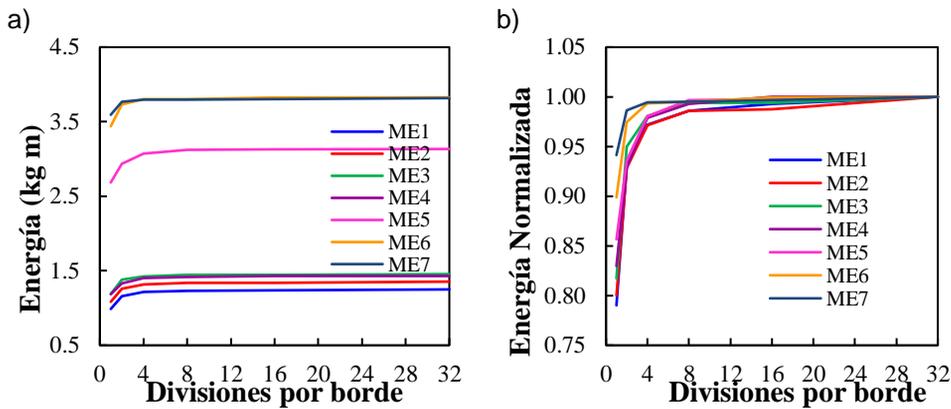


Figura 5. Curvas de las divisiones por borde contra: a) la energía de deformación y b) la energía normalizada

2.4 Análisis de esfuerzos cortantes

Los esfuerzos cortantes máximos, $\tau_{\text{máx}}$, son aquellos esfuerzos cortantes orientados a 45° con respecto a la dirección del esfuerzo principal. Los esfuerzos principales representan el esfuerzo normal máximo y mínimo en cada punto del sólido. Por otro lado, el esfuerzo de Von Mises, σ_{VM} , es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión, que puede calcularse a partir de los esfuerzos principales o esfuerzos cartesianos, respectivamente, como:

$$\sigma_{\text{VM}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{VM}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

Nótese que el esfuerzo σ_{VM} siempre es positivo, pues éste se calcula con la raíz cuadrada de esfuerzos elevados al cuadrado. Aunque el σ_{VM} se utiliza generalmente para evaluar el estado de esfuerzos en materiales dúctiles, en este trabajo se utilizó solamente para determinar las zonas más esforzadas de los muros. Aunque se está consciente que los esfuerzos principales son más adecuados para evaluar la resistencia de la mampostería y/o adherencia entre las columnas y el panel de muro. Considerando los esfuerzos cortantes en el muro al aplicar las cargas estáticas se observa el comportamiento de los muros para diferentes divisiones, determinando así otro parámetro para poder elegir la malla adecuada para estos elementos. En la Figura 6 se muestra el muro ME5 mallado con 1, 2, 4, 8, 16 y 32 elementos por borde, en los que el esfuerzo $\tau_{\text{máx}}$ ocurre en la esquina inferior izquierda de todos los modelos. La distribución de los esfuerzos en el muro presenta la misma tendencia en los modelos que tienen más de 4 elementos por borde.

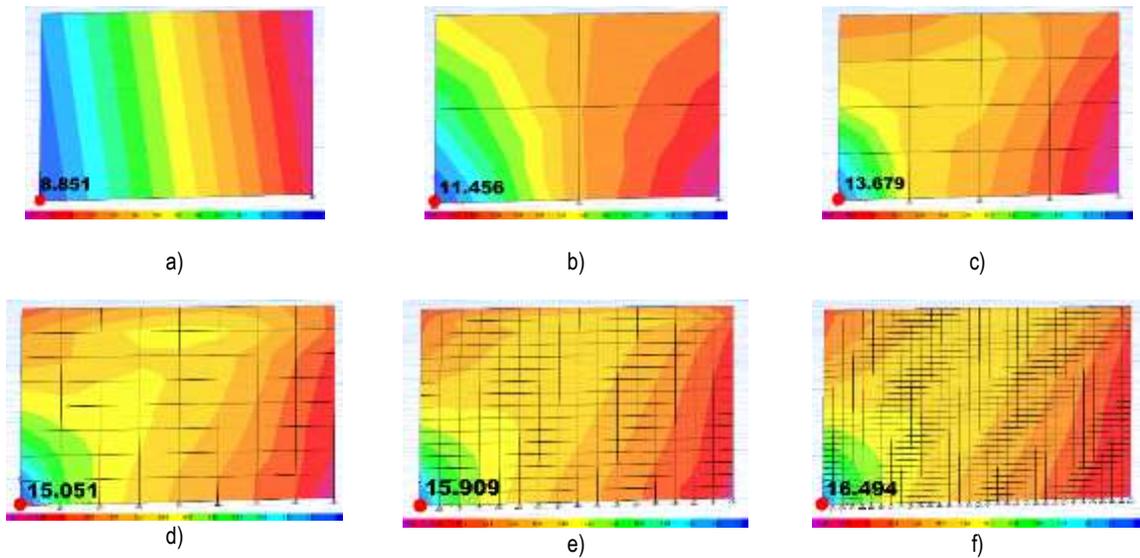


Figura 6. Distribución de esfuerzos τ_{\max} (kg/cm^2) en el muro ME5 mallas en sus bordes con las divisiones siguientes: a) 1, b) 2, c) 4, d) 8, e) 16 y f) 32.

Los resultados obtenidos para los siete modelos se muestran en la Tabla 2, donde se observa que la magnitud de los esfuerzos cortantes en los siete muros se estabiliza a partir de 8 divisiones por borde de cada panel, por lo que se ratifica una malla con 8 divisiones por borde como la adecuada para determinar resultados fiables. El tener una malla con más divisiones solo incrementaría el costo computacional, pues los resultados de desplazamientos, esfuerzos y otras variables secundarias serían casi las mismas. La variación los esfuerzos τ_{\max} y σ_{VM} contra el número de divisiones por borde de los siete modelos se muestra en la Figura 7, donde se observa que a partir de 4 divisiones por borde los esfuerzos cortantes comienzan a estabilizarse; sin embargo, se tienen mejores resultados para 8 divisiones por borde.

Tabla 2 Esfuerzos cortantes en los siete muros modelados en Etabs (CSI, 2015)

Muro	Divisiones	τ_{\max}	σ_{VM}	%error	%error
ME1	1	9.161	8.941		
	2	13.627	13.273	48.756	48.442
	4	15.303	14.518	12.299	9.383
	8	16.190	15.261	5.793	5.118
	16	16.793	15.730	3.729	3.071
	32	17.270	16.118	2.841	2.469
ME2	1	8.492	8.486		
	2	12.330	12.161	45.192	43.301
	4	13.970	13.373	13.296	9.969
	8	14.912	14.077	6.745	5.261
	16	15.546	14.610	4.254	3.793
	32	16.030	15.075	3.111	3.181
ME3	1	8.088	8.266		
	2	11.473	11.432	41.842	38.296
	4	13.124	12.663	14.397	10.765

	8	14.112	13.408	7.526	5.882
	16	14.760	13.958	4.590	4.106
	32	15.246	14.420	3.291	3.306
ME4	1	7.306	7.640		
	2	10.071	10.142	37.852	32.744
	4	11.666	11.318	15.837	11.604
	8	12.630	12.058	8.269	6.534
	16	13.261	12.579	4.990	4.320
	32	13.717	13.074	3.443	3.937
ME5	1	8.851	9.795		
	2	11.456	11.877	29.427	21.258
	4	13.679	13.476	19.401	13.460
	8	15.051	14.498	10.034	7.581
	16	15.909	15.184	5.699	4.734
	32	16.494	15.714	3.676	3.493
ME6	1	7.047	8.360		
	2	9.708	10.012	37.759	19.767
	4	11.458	11.294	18.023	12.803
	8	12.473	12.029	8.855	6.509
	16	13.135	12.552	5.309	4.343
	32	13.621	12.995	3.700	3.533
ME7	1	6.094	7.151		
	2	8.090	8.284	32.747	15.846
	4	9.391	9.233	16.088	11.460
	8	10.147	9.774	8.043	5.860
	16	10.652	10.172	4.980	4.073
	32	11.030	10.524	3.546	3.462

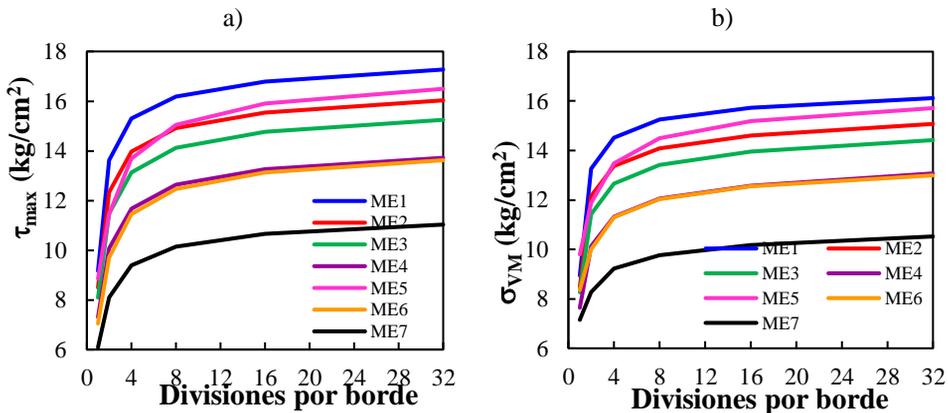


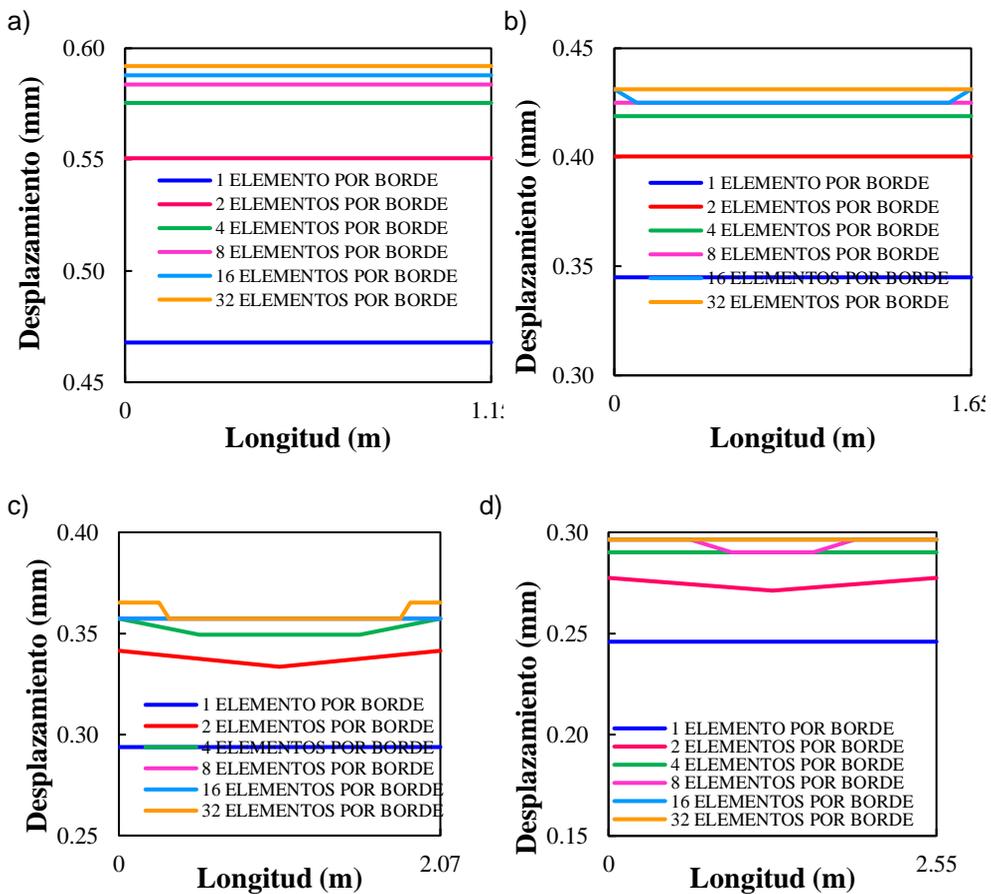
Figura 7. Curvas de las divisiones por borde contra: a) τ_{\max} y b) σ_{VM}

2.5 Análisis de desplazamientos

Las curvas de los desplazamientos de los nodos en la parte superior de los siete muros contra las divisiones por borde se muestran en

Figura 8, donde se observa que, al incrementar el número de elementos, los desplazamientos de los nodos en la parte superior de los muros también incrementan, pero sus magnitudes se estabilizan a partir de 8 divisiones. En el muro

ME1 los desplazamientos son constantes en la parte superior para todas particiones; sin embargo, el muro ME2 muestra variación de desplazamientos en sus nodos extremos con 16 particiones. En el caso del muro ME3 con 2, 4 y 32 particiones, los desplazamientos máximos ocurren en sus extremos, formando una curva simétrica. En el muro ME4, la variación de desplazamientos se observa cuando el muro tiene 2 y 8 elementos por borde, en los cuales los máximos se encuentran en los extremos. En el muro ME5, los desplazamientos menores ocurren en el nodo central de la malla y, al igual que los muros anteriores, los desplazamientos máximos ocurren en los extremos. Las curvas que se forman son simétricas, además, a partir de una partición de 8 elementos por borde, la variación de los desplazamientos es pequeña, mientras que las diferencias mayores de desplazamientos se presentan entre uno y cuatro particiones; esta misma tendencia se presenta en los muros ME6 y ME7. Comparando los resultados de los siete modelos, se puede concluir que realizando una serie de particiones del modelo se tienen mejores resultados, de lo que ocurre en la parte superior del muro si sólo se consideran los nodos extremos, obteniendo que los desplazamientos máximos ocurren en los extremos del muro, los cuales decrecen hacia el centro del muro. Lo cual se atribuye a la distribución equitativa de la magnitud de la carga en los nodos de los respectivos bordes superiores de los muros.



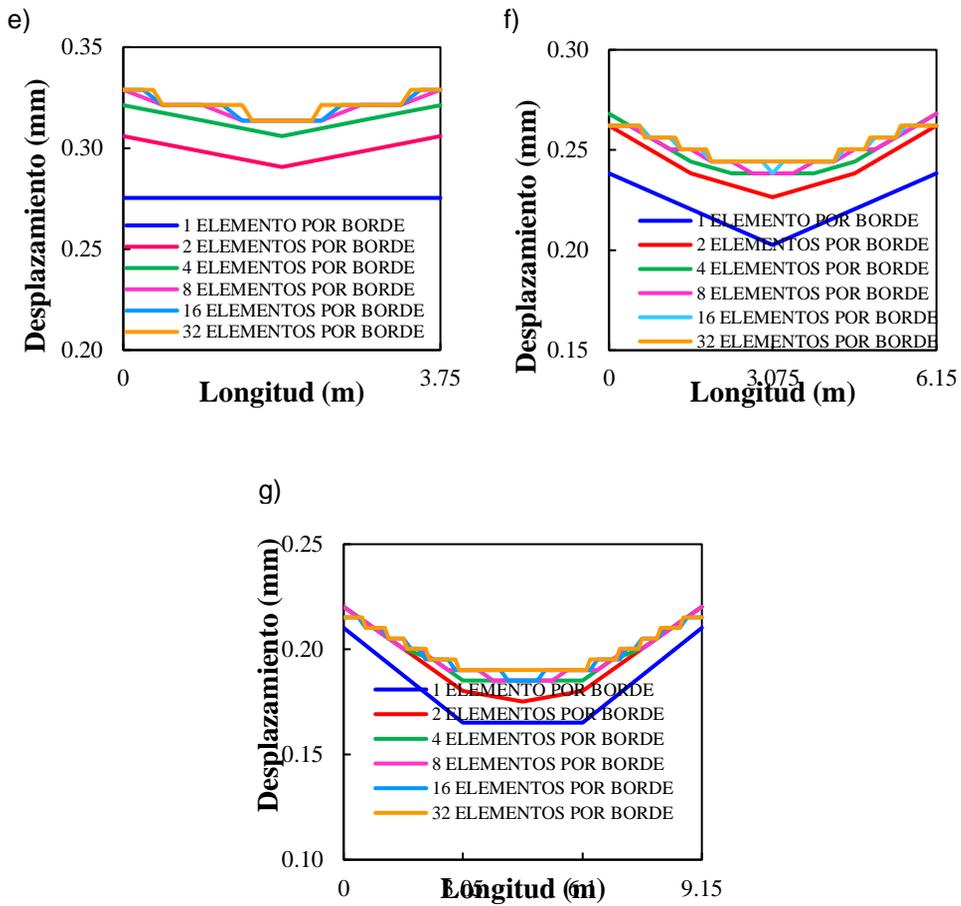


Figura 8. Curvas de desplazamientos en los nodos superiores contra las divisiones por borde de los muros: a) ME1, b) ME2, c) ME3, d) ME4, e) ME5, f) ME6 y g) ME7

3 ANÁLISIS DEL TAMAÑO DE LA MALLA EN UN EDIFICIO SUJETO A ACCIONES SÍSMICAS

3.1 Descripción del edificio

El ejemplo de aplicación consiste en una edificación multifamiliar de cinco niveles, construida en 1987 con muros de mampostería confinada, como se muestra en la Figura 9. De acuerdo con el mapa de zonificación sísmica de la Ciudad de México propuesta por el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF-04), la estructura se localiza entre la zona de suelo firme (zona I) y la zona de transición (zona II), al norte de la Ciudad, por lo que debido a la incertidumbre sobre la zona a la que realmente pertenece el edificio se considerará para los cálculos que se encuentra en la zona más crítica, esto es en la zona II.



Figura 9. Edificio de estudio (tomado de Rivera, 2015)

El edificio de estudio tiene cinco niveles con entrepisos de 2.25 m de altura, construido con muros de mampostería confinada con un espesor de 15 cm, con piezas de bloque de concreto y con castillos de sección transversal de 15 x 15 cm. El sistema de piso es vigueta y bovedilla de 18 cm de espesor. La resistencia de diseño a compresión de las piezas, f_p^* , se consideró de 100 kg/cm^2 , la resistencia a compresión del concreto, f_c , de los castillos de 150 kg/cm^2 , y la resistencia de diseño a compresión de la mampostería, f_m^* , igual a 20 kg/cm^2 (mortero tipo I). El esfuerzo de fluencia, f_y , del acero de refuerzo longitudinal es de 4200 kg/cm^2 . También se incluyó el peso de un aplanado de yeso de 1 cm por cada lado de los muros. La distribución de los departamentos en planta, así como sus dimensiones se muestra en la Figura 10. Cada planta tiene cuatro departamentos con un área de 63.2 m^2 cada uno; además, se identificaron 12 tipos de muro en la dirección X y 13 tipos en la dirección Y. Para analizar los esfuerzos cortantes debido a las cargas sísmicas, se eligieron los muros 1X, 11X, 12X, 1Y, 7Y al 10Y y 13Y sombreados en la Figura 10; el criterio que se empleó para elegir estos muros fue su ubicación, aquellos que se encuentran en el centro y en los extremos del edificio.

Las cargas vivas para una casa-habitación de acuerdo con la sección 6.1 de las NTCA-04 se enlistan en la Tabla 3. Por otra parte, la muestra las cargas muertas adicionales al peso propio de los elementos estructurales del edificio se enlistan en la

Tabla 4.

Tabla 3 Cargas vivas

Carga viva	Entrepiso (kg/m^2)	Azotea (kg/m^2)
Carga Viva máxima	170	100
Carga Viva accidental	90	70

Tabla 4 Cargas muertas

Carga muerta	Entrepiso (kg/m^2)	Azotea (kg/m^2)
Sobrecarga (NTCA-04)	40	40
Relleno		150

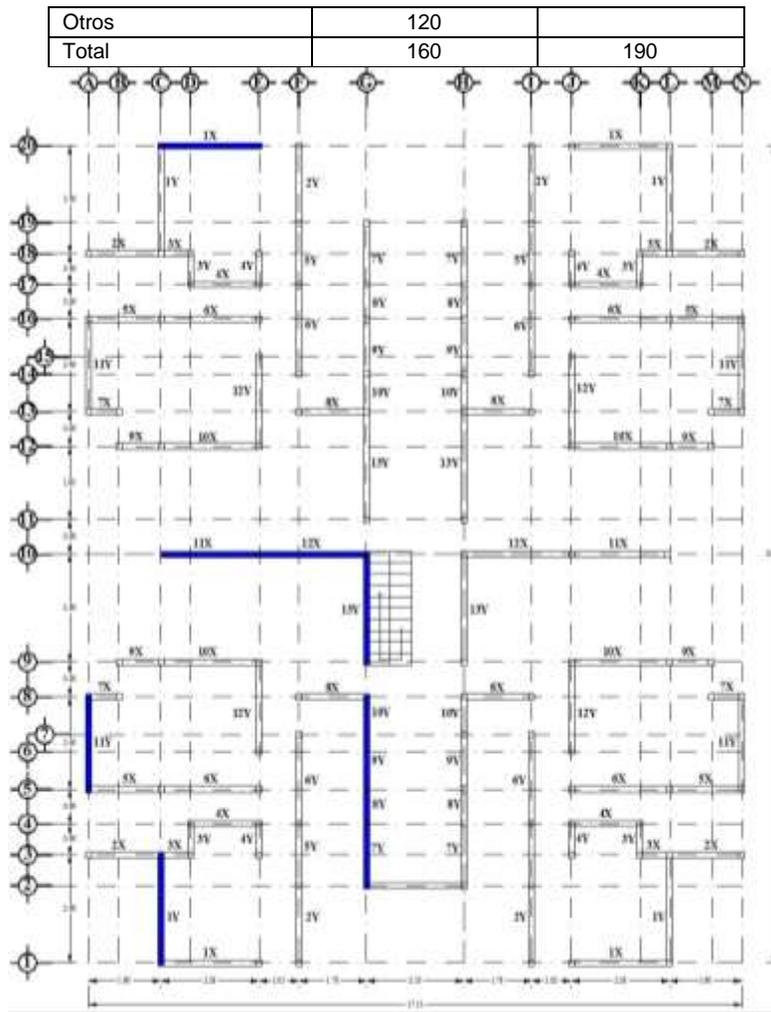


Figura 10. Vista en planta (cotas en m) (Adaptado de Rivera, 2015)

3.2 Análisis con el método sísmico estático

El método sísmico estático es una alternativa simplificada para el análisis de edificios, cuya altura no rebasa los 30 m en estructuras regulares y 20 m en estructuras irregulares, según las NTCS-04 del RCDF-04. La norma vigente establece que, para calcular las fuerzas cortantes a diferentes niveles de una estructura, se suponen un conjunto de fuerzas horizontales actuando sobre cada uno de los puntos donde se ubiquen las masas concentradas. Cada una de estas fuerzas se tomará igual al peso de la masa que corresponde, multiplicando por un coeficiente proporcional a la altura de la masa en cuestión sobre el desplante o nivel a partir del cual las deformaciones estructurales pueden ser apreciables. Si se considera el valor del periodo fundamental de vibración de la estructura podrán adoptarse fuerzas cortantes menores que las calculadas. El análisis estático será aplicable siempre que se tenga en cuenta el valor aproximado del periodo

fundamental de la estructura y con las limitaciones establecidas en la sección 2.2 vigente.

3.2.1 Parámetros del espectro sísmico

Los parámetros correspondientes del espectro de la zona II, de acuerdo con la sección 3 de las NTCS-04, son: coeficiente sísmico $c=0.32$, ordenada del espectro de diseño $a_0= 0.08$ (como fracción de la aceleración de la gravedad, que corresponde a $T=0$, periodos $T_a= 0.2$ y $T_b= 1.35$ y el radio de giro de la masa en péndulos invertidos $r= 1.33$. Debido a que la resistencia a fuerzas laterales es suministrada en todos los entresijos por muros de mampostería de piezas huecas confinados, se usará un factor de comportamiento sísmico, Q , igual a 1.5. Las NTCS-04 establecen en su sección 8.2 que el periodo fundamental de vibración, T , de la estructura puede calcularse con la ecuación. (3).

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum W_i x_i^2}{g \sum F_i x_i}} \quad (3)$$

donde W_i es el peso de la i -ésima masa, F_i la fuerza lateral que actúa en el i -ésimo nivel, x_i el desplazamiento del nivel i , relativo a la base de la estructura, en la dirección de la fuerza y g la aceleración de la gravedad (m/s^2). La Tabla 5 muestra el cálculo del periodo fundamental, T , para ambas direcciones, x y y .

Tabla 5 Periodo fundamental obtenido por el método estático

Nivel	x_i (m)	y_i (m)	W_{ixi}^2 (ton-m ²)	F_{ixi} (ton-m)	W_{iyi}^2 (ton-m ²)	F_{iyi} (ton-m)
N5	0.0041	0.0030	0.0031	0.3115	0.0017	0.2279
N4	0.0035	0.0026	0.0029	0.2749	0.0016	0.2068
N3	0.0026	0.0020	0.0017	0.1559	0.0010	0.1205
N2	0.0017	0.0013	0.0007	0.0663	0.0004	0.0529
N1	0.0007	0.0006	0.0001	0.0145	0.0001	0.0123
Σ			0.0085	0.8231	0.0048	0.6204

$$T_{sx} \text{ (s)} = 0.204$$

$$T_{sy} \text{ (s)} = 0.177$$

El modelo del edificio se realizó en el programa Etabs (CSI, 2015), al cual se le asignaron las propiedades geométricas de los elementos estructurales y las propiedades mecánicas de los materiales; así como las cargas. El periodo fundamental de vibración del Modo 1 para el modelo del edificio se muestra en la Figura 11, al cual tiene cuatro particiones por panel. En la Tabla 6 se enlistan los valores del periodo, T , para cada uno de los modos y para las cuatro particiones, así como la diferencia en porcentaje entre particiones, en la cual se observa que el valor del periodo en la mayoría de los modos se incrementa con las divisiones de la malla del modelo, cuyo porcentaje de error máximo registrado es del 3.13% correspondiente al modo 12. Es de interés mencionar que la partición n corresponde a que los muros se mallaron con n elementos por borde, como se muestra en la Figura 12, en la cual se observan los muros 7X Y 8X con 4 particiones en sus bordes superiores. Es de interés mencionar que los elementos de confinamiento, castillos

y vigas, también se dividieron al igual que los muros para mantener continuidad de desplazamientos en los nodos.

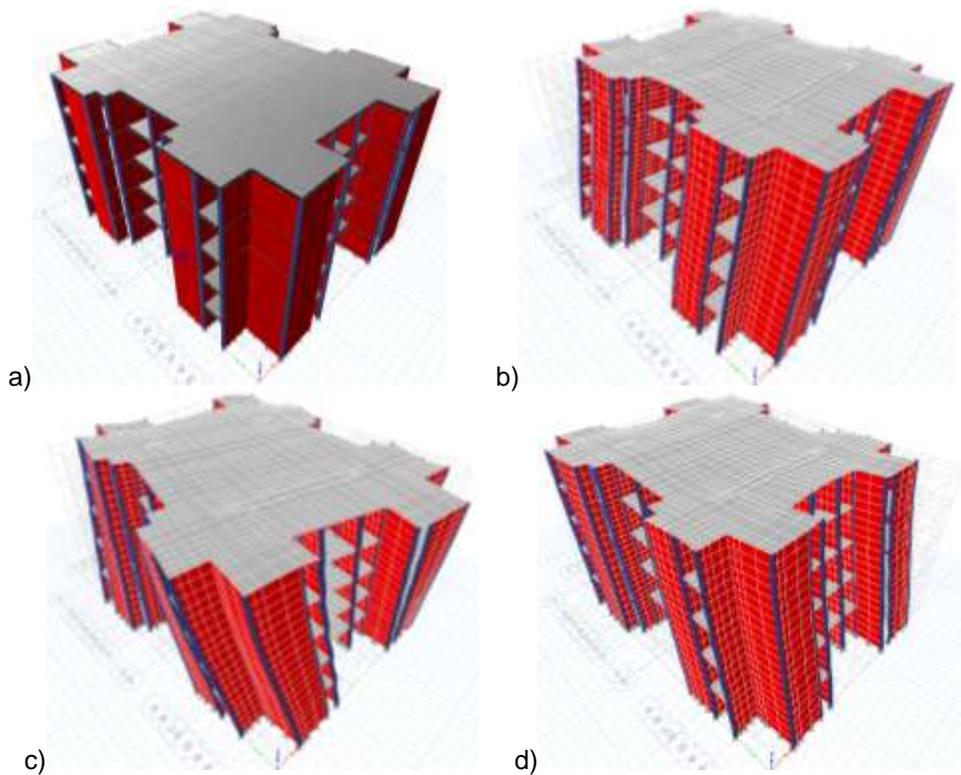


Figura 11. Modelo con 4 particiones del edificio: a) no deformado, b) modo 1 (0.238 s) c) modo 2 (0.228 s) y d) modo 3 (0.209 s)

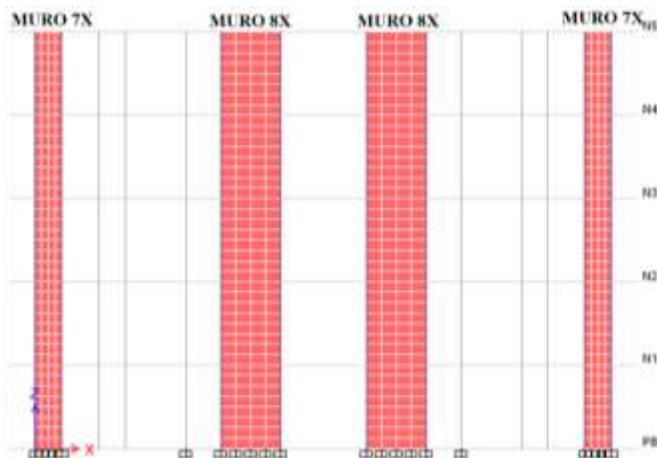


Figura 12. Modelo de muros 7X y 8X con 4 particiones por borde superior

Tabla 6 Periodos obtenidos por el programa Etabs (CSI, 2015)

Modo	Periodo (s)				% Error		
	Partición 1	Partición 2	Partición 3	Partición 4	Part. 1 y 2	Part. 2 y 3	Part. 3 y 4
1	0.237	0.238	0.239	0.241	0.42	0.42	0.84
2	0.228	0.228	0.230	0.231	0.00	0.88	0.43
3	0.208	0.209	0.210	0.211	0.48	0.48	0.48
4	0.075	0.075	0.076	0.076	0.00	1.33	0.00
5	0.073	0.073	0.074	0.074	0.00	1.37	0.00
6	0.068	0.068	0.069	0.069	0.00	1.47	0.00
7	0.042	0.043	0.043	0.043	2.38	0.00	0.00
8	0.042	0.042	0.042	0.043	0.00	0.00	2.38
9	0.039	0.040	0.040	0.04	2.56	0.00	0.00
10	0.032	0.032	0.032	0.033	0.00	0.00	3.13
11	0.032	0.032	0.032	0.032	0.00	0.00	0.00
12	0.030	0.030	0.030	0.031	0.00	0.00	3.33

La diferencia entre el valor del periodo, T , obtenido con el método estático y el obtenido con el programa Etabs (CSI, 2015), para el modo 1 y para la partición 1, es del 16%, por lo que se valida que el método estático proporciona una buena aproximación. La magnitud del periodo fundamental de vibración utilizado en el presente trabajo es el calculado con Etabs (CSI, 2015), el cual resultó ser de 0.237 s, y que corresponde al modo 1 de la primera división del modelo. Se hace esta elección debido a que el modelado en Etabs (CSI, 2015) del edificio considera todas las características geométricas de las secciones y propiedades mecánicas de los materiales. Como la magnitud del periodo fundamental es $T=0.237 \text{ s} < T_b=1.35 \text{ s}$, se procede como cuando no se calcula T , pero de tal forma que la relación $V_0/W_0 = a/Q'$.

3.2.2 Condiciones de regularidad

De acuerdo con la sección 6.2 de las NTCS-04, para que la estructura pueda considerarse regular debe satisfacer once condiciones. Para este ejemplo de aplicación, la estructura es irregular porque no cumple con la condición 4, debido a que en planta tiene una entrante cuya dimensión excede de 20% de la dimensión de la planta medida paralelamente a la dirección que se considera del entrante, por lo que el factor de reducción Q' debe multiplicarse por 0.9. Debido a que el valor del periodo $T=0.237 \text{ s} > T_a=0.2 \text{ s}$, $Q'=Q=1.5$, pero por ser irregular Q' se reduce a 1.3.

3.2.3 Fuerzas cortantes

En la Tabla 7 se muestra el cálculo de las fuerzas cortantes resultantes para el edificio, las cuales se determinaron empleando la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** W_i es el peso de la i -ésima masa, F_i la fuerza lateral que actúa en el i -ésimo nivel, h_i la altura de la i -ésima masa sobre el desplante, V_i la fuerza cortante horizontal en el nivel que se analiza, x_i el centro de masa y x_{vi} el centro de cortante.

$$F_i = \frac{c}{Q'} W_i h_i \frac{\sum W_i}{\sum W_i h_i} \tag{4}$$

Tabla 7 Fuerzas cortantes resultantes

DIRECCIÓN X										
Nivel de entrepiso	W _i (ton)	h _i (m)	W _i h _i	F _{ix} (ton)	V _{ix} (ton)	y _i (m)	F _{iy} y _i	∑F _{iy} y _i	y _{vi} (m)	
N5	185.20	12.15	2250.20	75.63	75.63	10.607	802.13	802.13	10.607	
N4	243.37	9.72	2365.56	79.50	155.13	10.610	843.53	1645.66	10.608	
N3	243.37	7.29	1774.17	59.63	214.76	10.610	632.65	2278.31	10.609	
N2	243.37	4.86	1182.78	39.75	254.51	10.610	421.76	2700.07	10.609	
N1	241.65	2.43	587.22	19.74	274.24	10.620	209.59	2909.67	10.610	
∑W _i =		1156.97	∑W _i h _i =	8159.94						

DIRECCIÓN Y										
Nivel de entrepiso	W _i (ton)	h _i (m)	W _i h _i	F _{iy} (ton)	V _{iy} (ton)	x _i (m)	F _{ix} x _i	∑F _{ix} x _i	x _{vi} (m)	
N5	185.20	12.15	2250.20	75.63	75.63	8.575	648.50	648.50	8.575	
N4	243.37	9.72	2365.56	79.50	155.13	8.575	681.75	1330.25	8.575	
N3	243.37	7.29	1774.17	59.63	214.76	8.575	511.31	1841.56	8.575	
N2	243.37	4.86	1182.78	39.75	254.51	8.575	340.87	2182.44	8.575	
N1	241.65	2.43	587.22	19.74	274.24	8.615	170.03	2352.46	8.578	
∑W _i =		1156.97	∑W _i h _i =	8159.94						

3.2.4 Combinación de cargas

Las excentricidades estáticas se determinaron por la diferencia entre el centro de cortante y centro de torsión tanto para la dirección x como para la dirección y, y las excentricidades de diseño se obtuvieron como lo establecen las NTCS-04 en su sección 8.5. Los resultados de ambas excentricidades se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8 Excentricidades estáticas y de diseño

Entrepiso	Centro de cortante		Centro de torsión		Excentricidad estática		Excentricidades de diseño			
	X _{cci} (m)	Y _{cci} (m)	X _{ct} (m)	Y _{ct} (m)	e _{sxi} (m)	e _{syi} (m)	e _{x1i} (m)	e _{x2i} (m)	e _{y1i} (m)	e _{y2i} (m)
5	8.575	10.607	8.576	10.582	-0.001	0.025	-1.717	1.714	2.157	-2.095
4	8.575	10.608	8.576	10.584	-0.001	0.025	-1.717	1.714	2.157	-2.095
3	8.575	10.609	8.576	10.586	-0.001	0.023	-1.716	1.714	2.154	-2.097
2	8.575	10.609	8.576	10.590	0.000	0.019	-1.716	1.715	2.149	-2.101
1	8.578	10.610	8.575	10.595	0.003	0.015	1.719	-1.712	2.142	-2.105

Los momentos de nivel (M_{Ni}) se obtienen de la diferencia entre los momentos de entrepisos (M_{ei}) sucesivos en la misma dirección de análisis, con las ecuaciones (4)-(7).

$$M_{Nx1_i} = M_{ex1_i} - M_{ex1_{i+1}} \tag{4}$$

$$M_{Nx2_i} = M_{ex2_i} - M_{ex2_{i+1}} \tag{5}$$

$$M_{Ny1_i} = M_{ey1_i} - M_{ey1_{i+1}} \tag{6}$$

$$M_{Ny2_i} = M_{ey2_i} - M_{ey2_{i+1}} \tag{7}$$

Donde los momentos de entrepisos se determinan con las ecuaciones (8)-(11), en la cual se incluye la excentricidad adicional (excentricidad de diseño) correspondiente.

$$M_{ex1_i} = V_{xi} (Y_{cci} + e_{dy1_i}) \quad (8)$$

$$M_{ex2_i} = V_{xi} (Y_{cci} + e_{dy2_i}) \quad (9)$$

$$M_{ey1_i} = V_{yi} (X_{cci} + e_{dx1_i}) \quad (10)$$

$$M_{ey2_i} = V_{yi} (X_{cci} + e_{dx2_i}) \quad (11)$$

donde V_i es el cortante sísmico en la dirección de análisis, X_{cci} y Y_{cci} son las coordenadas del centro de cortante para el i -ésimo entrepiso y e_{di} la excentricidad adicional (excentricidad de diseño). Así pues, los resultados de los momentos de diseño de nivel se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9 Momento de diseño de nivel

Nivel	M_{Nx1i} (ton-m)	M_{Nx2i} (ton-m)	M_{Ny1i} (ton-m)	M_{Ny2i} (ton-m)
5	963.388	641.802	518.762	778.202
4	1013.062	674.983	545.364	818.097
3	759.576	506.237	409.053	613.572
2	506.043	337.491	272.724	409.048
1	250.990	167.754	1077.271	-736.784

Debido a que en la edificación no sólo se tienen efectos traslacionales, sino que además se tienen efectos torsionales para cada uno de los casos de sismo en la dirección x y en la dirección y , las componentes sísmicas, S_x y S_y , tienen tanto fuerzas horizontales como momentos torsionantes, por lo que las componentes vectoriales resultantes son las siguientes:

$$Sx_1 = \begin{Bmatrix} F_x \\ 0 \\ Mx_1 \end{Bmatrix} \quad Sx_2 = \begin{Bmatrix} F_x \\ 0 \\ Mx_2 \end{Bmatrix} \quad Sy_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_y \\ My_1 \end{Bmatrix} \quad Sy_2 = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_y \\ My_2 \end{Bmatrix}$$

En la Tabla 10 se enlistan los vectores de fuerzas sísmicas de ambas direcciones, x y y . Los valores de las fuerzas y de los momentos corresponden a las Tablas 7 y 9, respectivamente.

Tabla 10 Fuerzas sísmicas

Nivel	Sismo dirección X		Sismo dirección Y	
	Sx_1	Sx_2	Sy_1	Sy_2
5	75.626	75.626	0	0
4	79.503	79.503	0	0
3	59.627	59.627	0	0
2	39.752	39.752	0	0
1	19.736	19.736	0	0
5	0	0	75.626	75.626
4	0	0	79.503	79.503
3	0	0	59.627	59.627
2	0	0	39.752	39.752
1	0	0	19.736	19.736
5	963.388	641.802	518.762	778.202
4	1013.062	674.983	545.364	818.097
3	759.576	506.237	409.053	613.572
2	506.043	337.491	272.724	409.048
1	250.990	167.754	1077.271	-736.784

En la sección 2.3 de las NTCA-04 se establece que las estructuras deben verificarse para el efecto combinado de todas las acciones, tanto permanentes como variables, que tengan probabilidad no despreciable de ocurrir simultáneamente. En la sección 8.7 de las NTCS-04 se enuncia que los efectos de ambos componentes horizontales del movimiento del terreno se combinarán tomando, en cada dirección en que se analice la estructura, el 100% de los efectos del componente que obra en esa dirección y el 30% de los efectos del que obra perpendicularmente a ella, con los signos que resulten desfavorables para cada concepto. Así pues, para el edificio de estudio resultan 33 combinaciones, en la cual para las acciones permanentes se tiene un factor de 1.4 y para las accidentales de 1.1. Una combinación extra es la 34, la cual es una envolvente con los valores más desfavorables de las 33 combinaciones, ver Tabla 11. Estas combinaciones se ingresan en el modelo del programa Etabs (CSI, 2015) obteniendo así los resultados que se muestran en las secciones siguientes.

Tabla 11. Combinaciones de análisis del método sísmico estático

Número	Combinación
1	$(1.4Wg+1.4Wv_{max})$
2-5	$1.1(Wg+Wv_{ins}\pm Sx_1\pm 0.3Sy_1)$
6-9	$1.1(Wg+Wv_{ins}\pm 0.3Sx_1\pm Sy_1)$
10-13	$1.1(Wg+Wv_{ins}\pm Sx_1\pm 0.3Sy_2)$
14-17	$1.1(Wg+Wv_{ins}\pm 0.3Sx_1\pm Sy_2)$
18-21	$1.1(Wg+Wv_{ins}\pm Sx_2\pm 0.3Sy_1)$
22-25	$1.1(Wg+Wv_{ins}\pm 0.3Sx_2\pm Sy_1)$
26-29	$1.1(Wg+Wv_{ins}\pm Sx_2\pm 0.3Sy_2)$
30-33	$1.1(Wg+Wv_{ins}\pm 0.3Sx_2\pm Sy_2)$
34	Envolvente

3.2.5 Desplazamientos

Los desplazamientos de nivel para 1, 2, 3 y 4 particiones consecutivas de los elementos estructurales se muestran en la Figura 13, en la cual se observa que los desplazamientos incrementan a medida que aumentan las divisiones. Sin embargo, estos incrementos son menores al 2% entre particiones consecutivas.

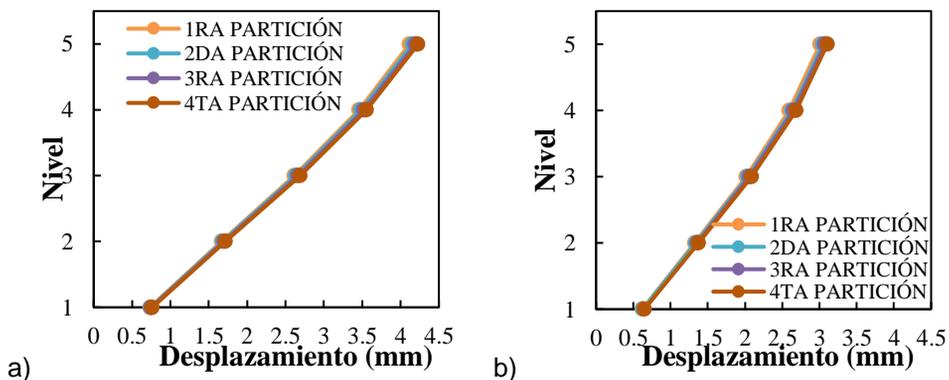
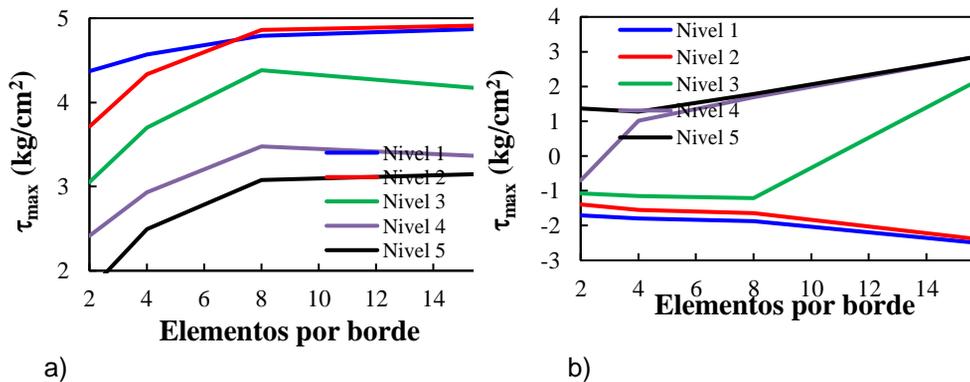


Figura 13. Desplazamiento de los niveles en la dirección: a) X y b) Y

La variación de los $\tau_{m\acute{a}x}$ varía de forma abrupta en la mayoría de los muros analizados en comparación de los σ_{VM} , lo cual se atribuye a que $\tau_{m\acute{a}x}$ es proporcional a los esfuerzos principal máximo y mínimo y a que σ_{VM} es una magnitud física

proporcional a la energía de distorsión. La variación de τ_{\max} de aquellos muros en los que se tienen particular atención se muestra en la Figura 14, los cuales se observan en planta en la Figura 10. En los muros ubicados en la periferia del edificio, los esfuerzos máximos ocurren en el nivel uno y los mínimos ocurren en el nivel cinco, mientras que en los muros ubicados al interior del edificio ocurre lo contrario, pues en la mayoría de los muros los esfuerzos mínimos y máximos se presentan en el nivel uno y cinco, respectivamente. Además, cabe resaltar que las magnitudes de los esfuerzos tienden a incrementar al tener un mallado más fino, los cuales en algunos muros llegan a estabilizarse como ocurre con el muro 1X y 11Y, mientras que, en los demás muros, la magnitud de los esfuerzos se duplica o triplica, como ocurre con el nivel dos de los muros 7Y, 8Y y 9Y. En algunos muros ocurre que los esfuerzos cambian de signo negativo a positivo, o viceversa, como ocurrió en los muros ubicados al interior del edificio. Aquellos muros que solo muestran cortantes positivos en todos sus niveles se deforman con curvatura simple, pero aquellos que muestran cortante negativo en los niveles inferiores y cortante positivo en los superiores se deforman con curvatura doble. En la Figura 14f, note que el muro 7Y tiene doble curvatura para 2 y 4 divisiones, pero tiene curvatura simple a partir de 8 divisiones.

Considerando lo expuesto anteriormente, se observa que en los muros mallados con 16 divisiones por borde, los τ_{\max} ya no incrementan significativamente en la mayoría de los niveles, puesto que entre la tercera y cuarta partición la variación entre las magnitudes de los esfuerzos máximos es del 20%, con lo cual se plantea que una malla de 8 particiones por borde es adecuada para modelar un edificio empleando el método estático, pues el tener una malla con más particiones sólo generaría un gasto computacional excesivo. Debido a que los nodos de las mallas de los muros y de la losa deben coincidir, para muros como el 8Y, 9Y, 10Y y 13Y, resultaron con menos particiones, para así garantizar la compatibilidad de los nodos.



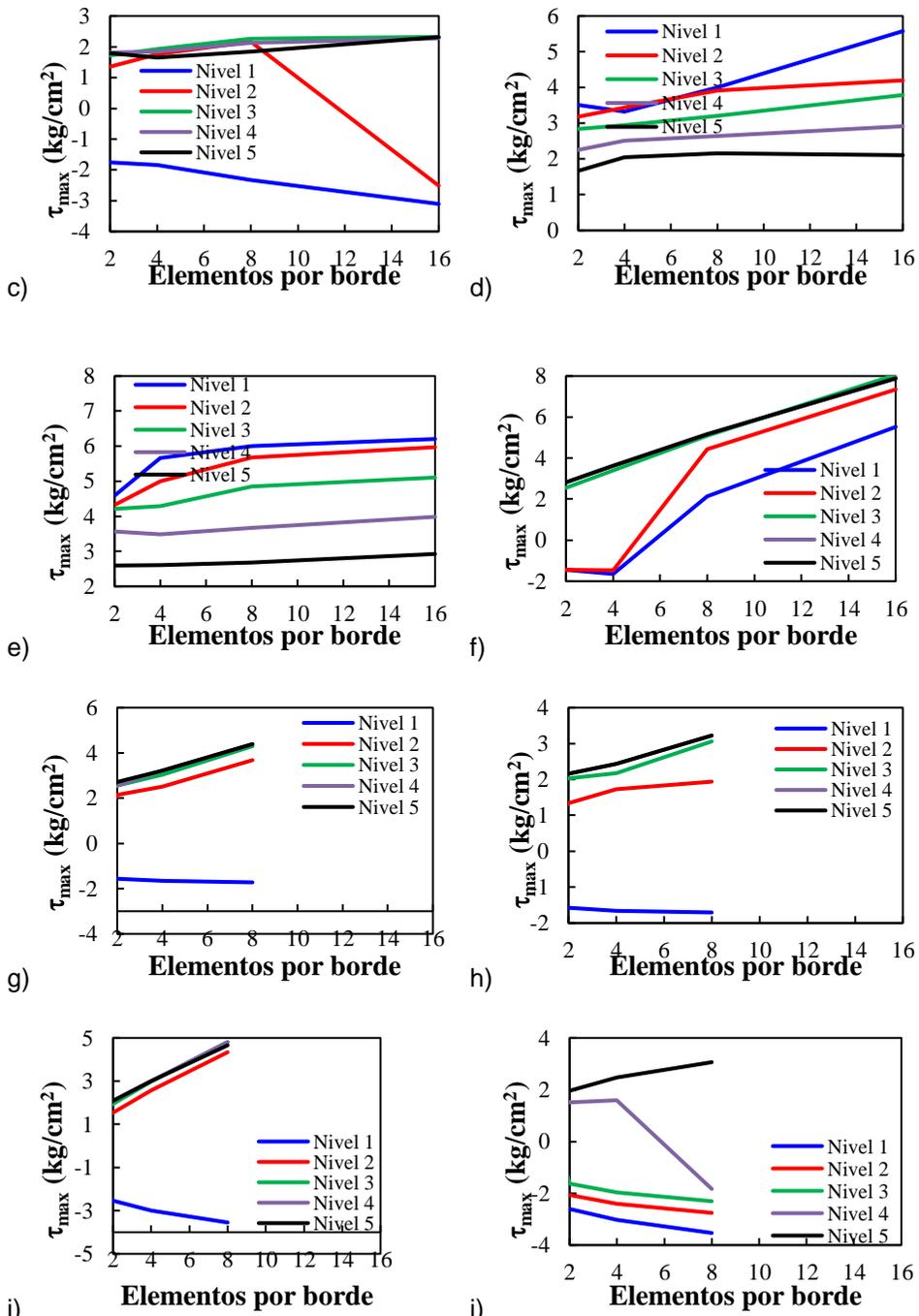
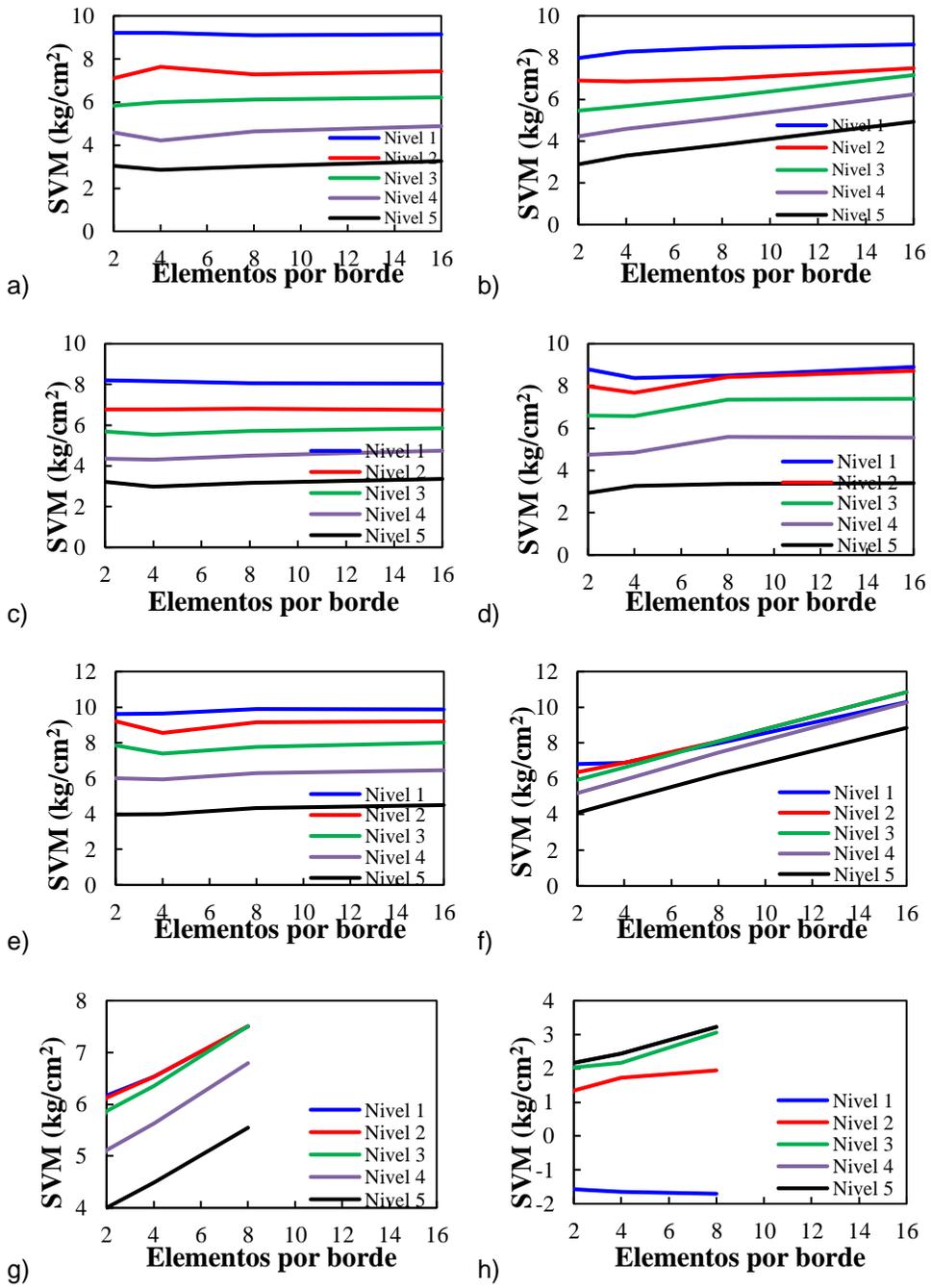


Figura 14. $\tau_{m\acute{a}x}$ en los muros: a) 1X, b) 11X, c) 12X, d) 1Y, e)11Y, f) 7Y, g) 8Y, h) 9Y, i) 10Y y j) 13Y



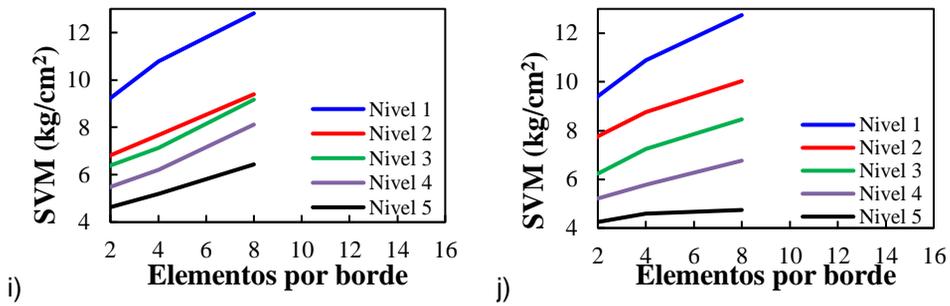
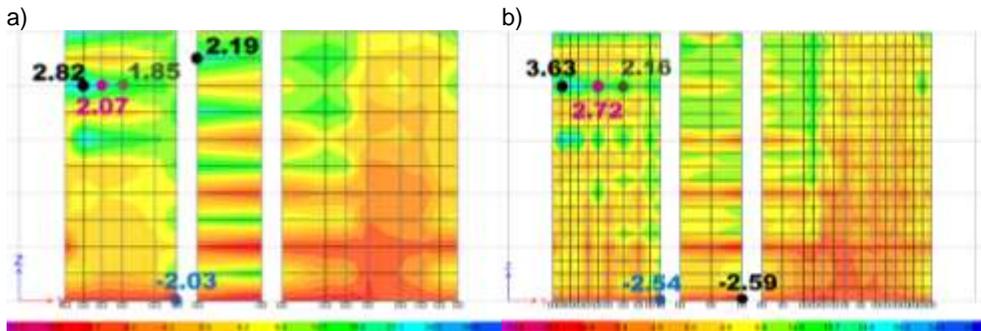


Figura 15. σ_{VM} en los muros: a) 1X, b) 11X, c) 12X, d) 1Y, e)11Y, f) 7Y, g) 8Y, h) 9Y, i) 10Y y j) 13Y

Las magnitudes de los σ_{VM} en los muros analizados presentan un comportamiento similar al de los $\tau_{m\acute{a}x}$, salvo que no presentan cambios de signo. En la mayoría de los muros, los incrementos de esfuerzos son sólo del 9%, mientras que en otros como los muros internos 7Y al 13Y varían hasta un 30%. En la mayoría de los muros analizados, los máximos valores de σ_{VM} se presentan en el nivel uno y los mínimos en el nivel cinco, como se muestra en la Figura 15. En resumen, los esfuerzos se estabilizan o en algunos casos se incrementan con un mallado de 8 particiones por borde, por lo que se recomienda esta partición para obtener resultados fiables, pues una malla con mayor número de elementos sólo incrementaría el costo computacional.

En la Figura 16 se muestra el mallado de los muros 7Y al 13Y, donde se observa una redistribución de los esfuerzos, pues $\tau_{m\acute{a}x}$ ocurren en distintos lugares al aumentar el número de particiones en los muros. En el muro 13Y, $\tau_{m\acute{a}x}=2.19$ kg/cm² ocurre en el nivel cinco en la primera partición, pero en la segunda partición el $\tau_{m\acute{a}x}=-2.59$ kg/cm² ocurre en la base del nivel uno, efecto que ocurre en la mayoría de los muros.



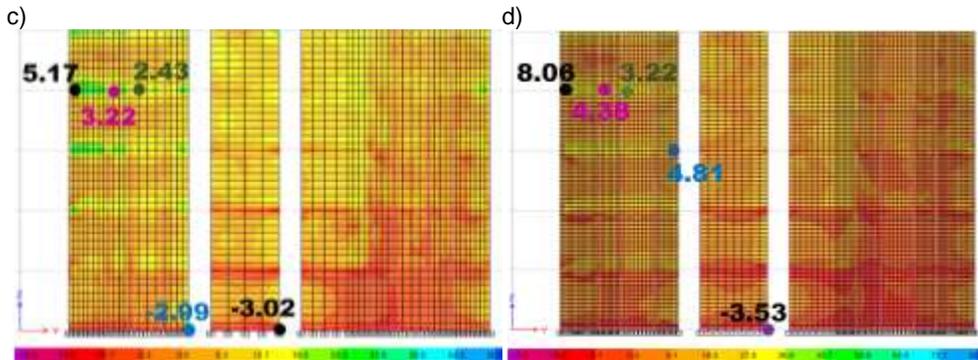


Figura 16. Esfuerzos τ_{\max} (kg/cm^2) de los muros 7Y al 13Y para a) 1, b) 2, c) 3 y d) 4 divisiones

3.3 Aplicación del método dinámico

Las NTCS-04 aceptan como métodos de análisis dinámicos el análisis modal y el cálculo paso a paso de respuestas a sismos específicos. Cuando en el análisis modal se desprecie el acoplamiento entre los grados de libertad de traslación horizontal y de rotación con respecto a un eje vertical, deberá incluirse el efecto de todos los modos naturales de vibración con periodo mayor o igual a 0.4 s, pero en ningún caso podrán considerarse menos de los tres primeros modos de vibrar en cada dirección de análisis, excepto para estructura de uno o dos niveles. Cuando se aplica el análisis dinámico modal, se supondrán las aceleraciones espectrales de diseño correspondientes a los periodos naturales de interés para calcular la participación de cada modo de vibrar en las fuerzas laterales que actúan sobre la estructura. Los resultados obtenidos a partir de un análisis del tipo modal espectral son superiores a los derivados de análisis estáticos, puesto que los primeros tienen una fundamentación teórica más sólida basada en teoría de probabilidades permitiendo incluir el efecto de acoplamiento entre los modos, aspectos que el método estático por ser simplista no contempla (Zárate *et al.*, 2003).

En el presente trabajo se emplea el método modal espectral, el cual considera los espectros de diseño para el cálculo de las respuestas estructurales, con lo cual se obtiene una mejor aproximación sobre el comportamiento real de la estructura ante cargas sísmicas, debido a que considera sus propiedades dinámicas como son la forma de vibrar y la contribución de cada modo de vibrar (Donobhan, 2007). El espectro de diseño resultante reducido y no reducido para el análisis dinámico modal se muestra en la Figura 17, los cuales fueron obtenidos como lo establecen las NTCS-04 en su sección 3. La reducción de la meseta del espectro debido al factor de reducción $Q=1.35$ es del 35%, con lo cual las fuerzas sísmicas que se plantean actúan sobre la estructura son menores.

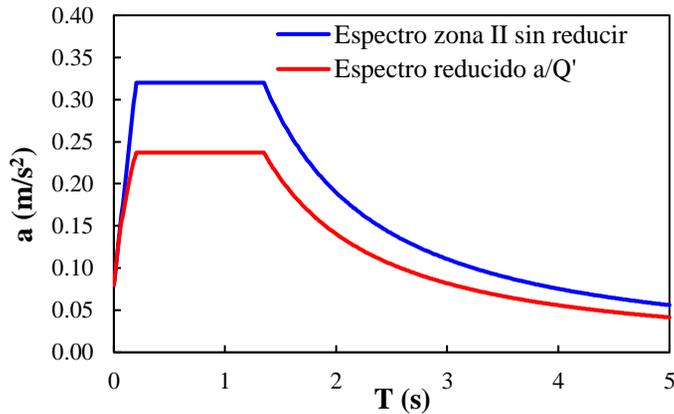


Figura 17. Espectro de diseño de la zona II y espectro de diseño reducido

3.3.1 Combinación de cargas

Las cargas vivas y muertas de servicio que se emplearon en el método dinámico modal son las mismas que se emplearon en el método estático y se combinaron de acuerdo con la sección 2.3 de las NTCA-04 y 8.7 de las NTCS-04 de la misma manera que se realizó para el método estático del presente trabajo, resultando así 10 combinaciones, las cuales se enumeran en la Tabla 12. La décima combinación corresponde a la envolvente de las 9 combinaciones, en la que se obtienen los valores más desfavorables.

Tabla 12. Combinaciones de análisis del método sísmico dinámico

Número	Combinación
1	1.4 CM + 1.4CV _{máx}
2-5	1.1 (CM + CV _{inst} ± 0.3Sx ± Sy)
6-9	1.1 (CM + CV _{inst} ± Sx ± 0.3Sy)
10	Envolvente

3.3.2 Desplazamientos

Los desplazamientos de nivel para 1, 2, 3 y 4 particiones consecutivas de los elementos estructurales en el método dinámico se muestran en la Figura 18, en la cual se observa que los niveles se desplazan en la dirección negativa del eje X, con magnitudes pequeñas. En la dirección Y los niveles también se desplazan en la dirección negativa con magnitudes de hasta 0.088 mm. La magnitud de los desplazamientos se incrementa a medida que aumenta el mallado del modelo; sin embargo, el cambio no es físicamente perceptible.

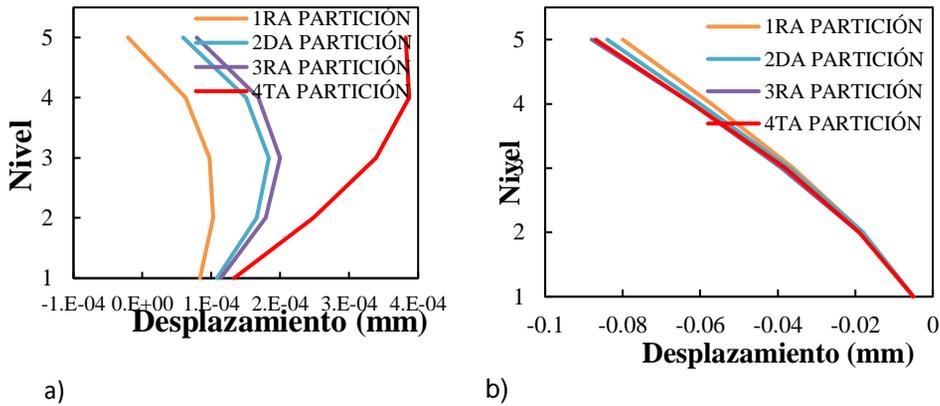
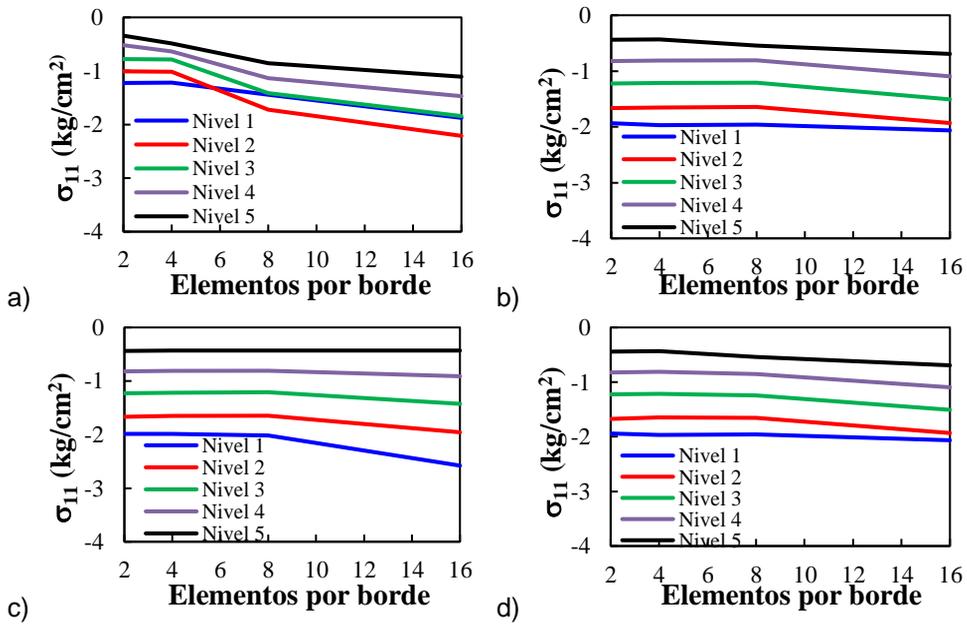


Figura 18. Desplazamiento de los niveles en las direcciones: a) X y b) Y

La magnitud de los esfuerzos normales σ_{11} , dirección horizontal en los muros, incrementa gradualmente en muros como 1X, 1Y, 11Y, 7Y, 10Y y 13Y, mientras que en el resto los esfuerzos se mantienen casi constantes. La variación de σ_{11} se muestran en la Figura 19, los cuales se observan en planta en la Figura 10. En los muros ubicados en la periferia del edificio, los σ_{11} máximos ocurren en el nivel dos y los mínimos ocurren en el nivel cinco, mientras que en los muros ubicados al interior del edificio los σ_{11} máximos y mínimos se presentan en el nivel uno y cinco, respectivamente.



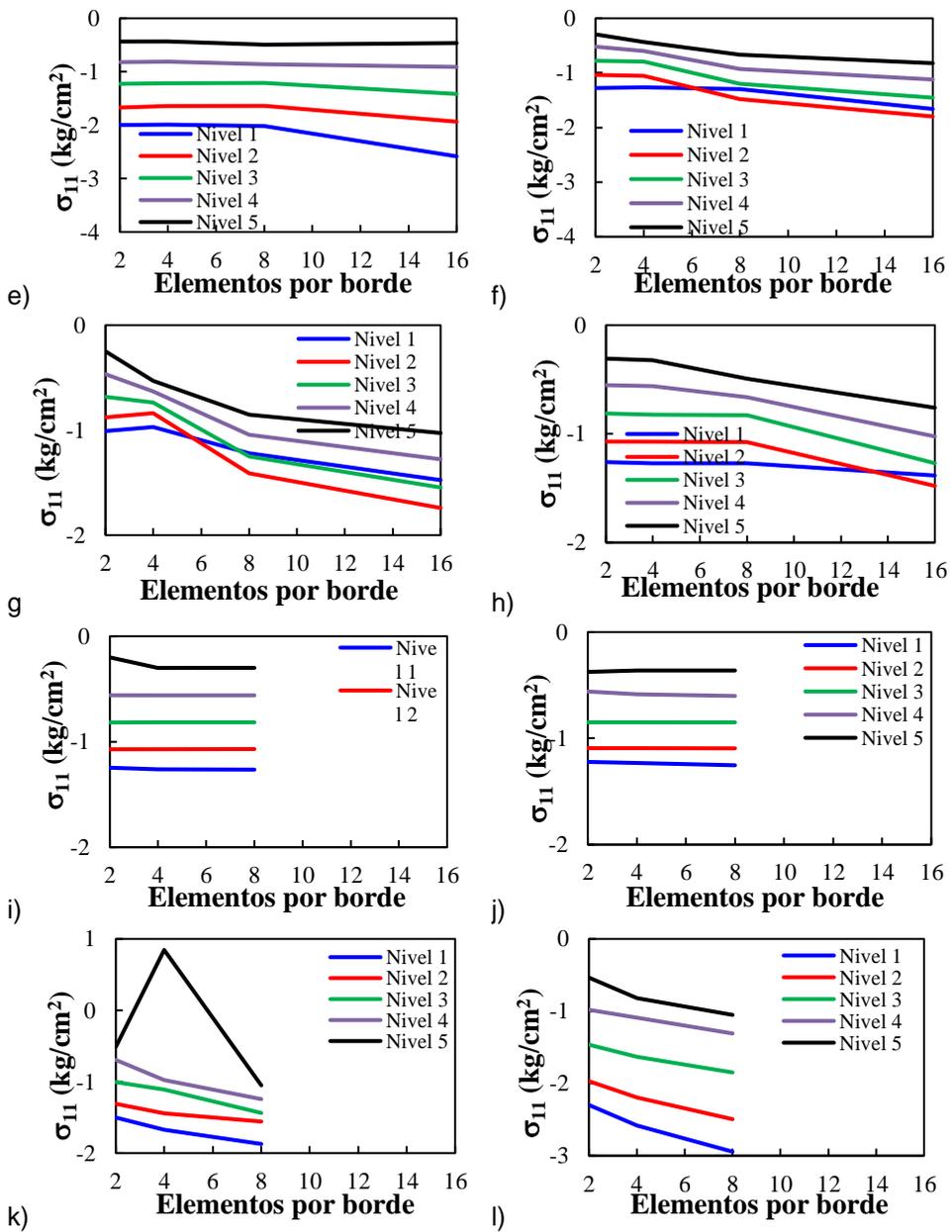


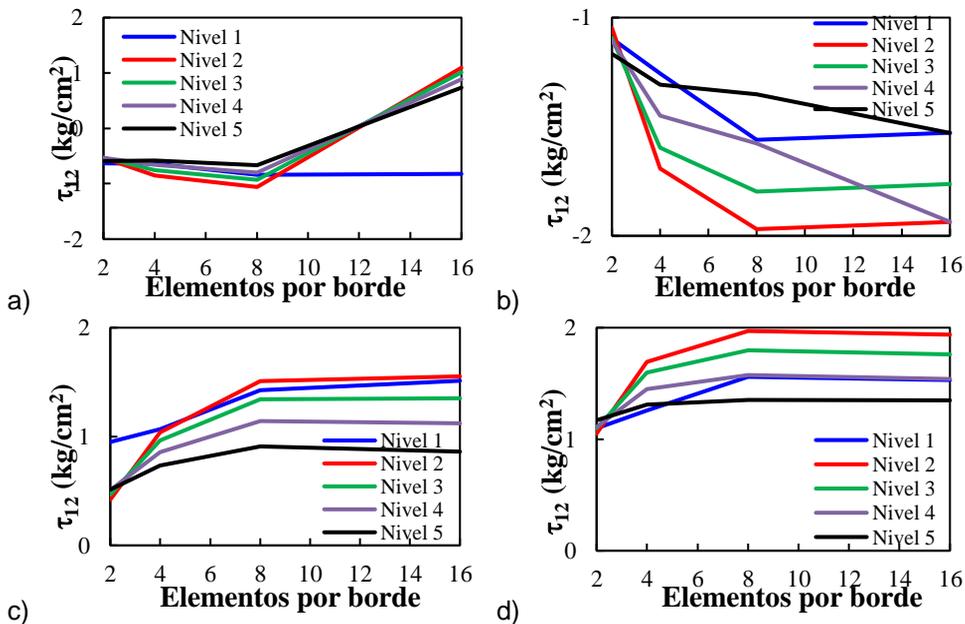
Figura 19. Esfuerzos σ_{11} en dirección horizontal de los muros: a) 1X, b) 11XA, c) 12XA, d) 11XB, e) 12XB, f) 1Y, g) 11Y, h) 7Y, i) 8Y, j) 9Y, k) 10Y y l) 13Y

Al igual que en el método estático, las magnitudes de los esfuerzos tienden a incrementar las divisiones del mallado, la cual llega a triplicarse como ocurre con el nivel cinco de los muros 1X, 1Y y 10Y, e inclusive a cuadruplicar su magnitud como ocurre con el nivel cinco del muro 11Y. Analizando la componente σ_{11} se observa que todos los esfuerzos son negativos, excepto en el nivel cinco de los muros 9Y y 10Y. Para el método dinámico se plantea que una malla de 8 particiones por borde es adecuada para modelar un edificio, puesto que entre la tercera (8

elementos por borde) y la cuarta (16 elementos por borde) la diferencia es del 20% en promedio en la mayoría de los muros, pues el tener una malla con más particiones sólo generaría un gasto computacional excesivo.

La magnitud de los esfuerzos cortantes, τ_{12} , en los muros incrementa abruptamente en los muros 1X y 1Y, mientras que, en el resto de los muros, aunque los esfuerzos τ_{12} incrementan gradualmente, la diferencia es menor entre la tercera y cuarta partición. La variación de esfuerzos τ_{12} de aquellos muros en los que se tiene particular atención se muestran en la

Figura 20, los cuales se observan en planta en la Figura 10. En los muros ubicados en la periferia del edificio, los esfuerzos τ_{12} máximos ocurren en el nivel dos y los mínimos ocurren en el nivel cinco, mientras que en los muros ubicados al interior del edificio los esfuerzos τ_{12} máximos y mínimos no se presentan en un muro en particular, sino que ocurren en diferentes niveles. La magnitud de los esfuerzos τ_{12} tiende a incrementar con el incremento del mallado, la cual llega a triplicarse como ocurre con el nivel dos del muro 12X. En algunos muros ocurre que los esfuerzos cambian de signo negativo a positivo, o viceversa, como ocurrió en los muros 1X, 1Y, 8Y, 9Y y 10Y. Bajo el criterio de la componente τ_{12} para el método dinámico se plantea que una malla de 8 particiones por borde es adecuada para modelar un edificio, puesto que entre la tercera (8 elementos por borde) y la cuarta (16 elementos por borde) la diferencia es del 30% en promedio en la mayoría de los muros. Sin embargo, puesto que para los otros criterios de mallado se ha propuesto uno de 8 elementos por borde se considerará también las mismas divisiones para este caso. Además, cabe recordar que el tener una malla con más particiones sólo generaría un gasto computacional excesivo.



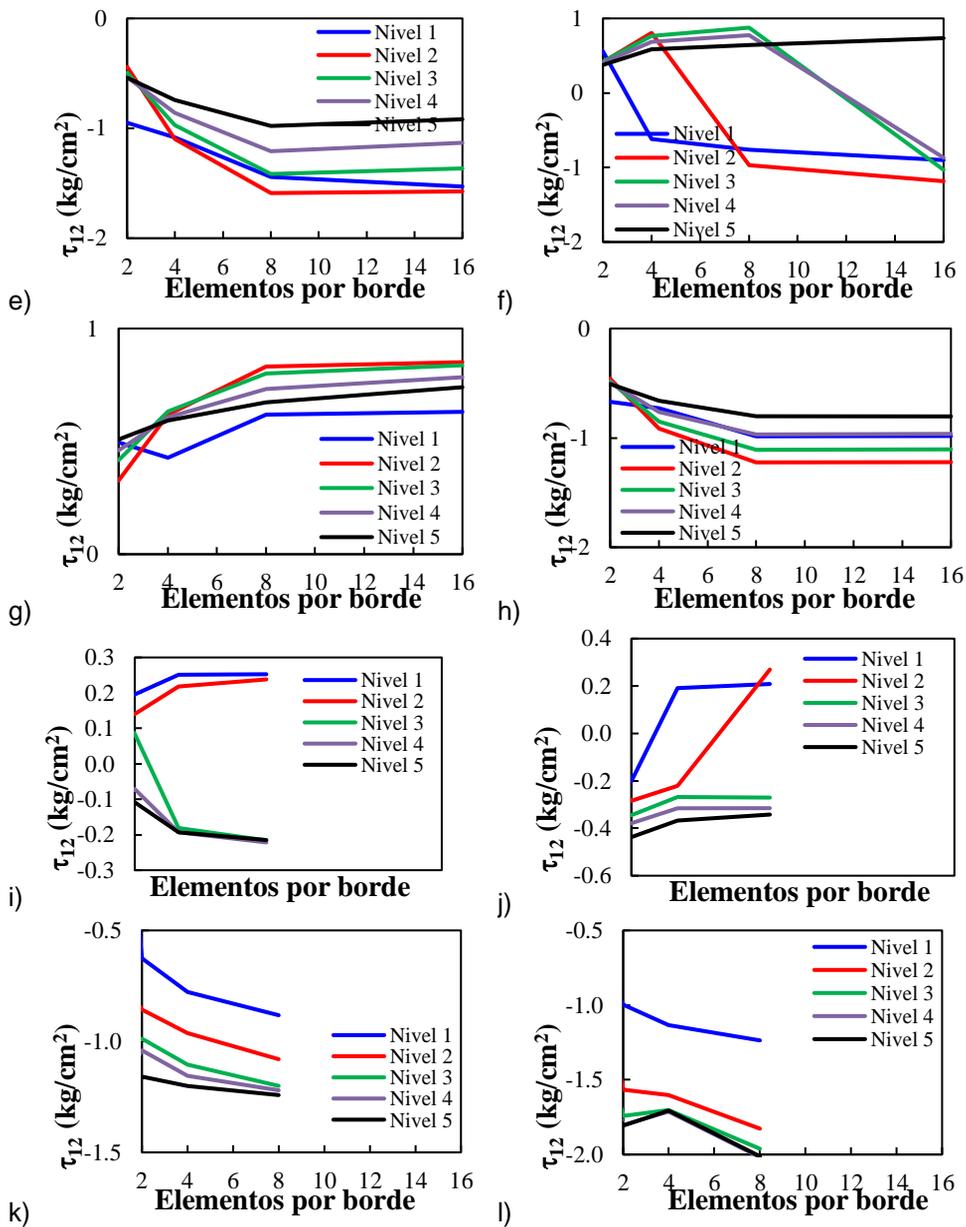


Figura 20 Esfuerzos τ_{12} en los muros a) 1X, b) 11XA, c) 12XA, d) 11XB, e) 12XB, f) 1Y, g)11Y, h) 7Y, i) 8Y, j) 9Y, k) 10Y y l) 13Y

En la Figura 21 se muestra el mallado de los muros 7Y al 13Y, donde se observa que en el muro 13Y el esfuerzo σ_{11} máximo ocurre en el mismo punto del nivel uno en las cuatro particiones, pero para los demás muros no ocurren exactamente en el mismo punto, siendo el muro 7Y en el que se observa más esta variación. También se observa que los esfuerzos se redistribuyen en los muros uniformemente con el aumento de la malla, lo cual reduce la concentración de esfuerzos.

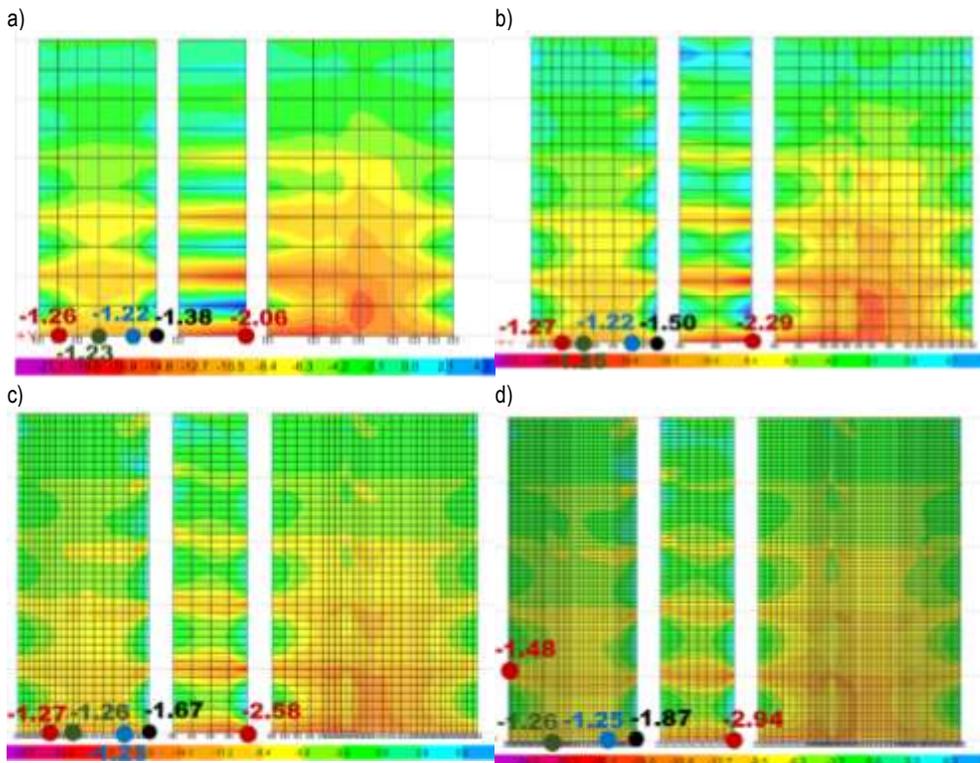


Figura 21. Esfuerzos σ_{11} máximos (kg/cm^2) de los muros 7Y al 13Y para divisiones por panel: a) 1, b) 2, c) 3 y d) 4

4 CONCLUSIONES

En los muros aislados, las magnitudes de la energía de deformación interna y de los esfuerzos $\tau_{\text{máx}}$ en los muros analizados se estabilizan a partir de 8 particiones por borde, pues la variación de la magnitud de la energía de deformación y los $\tau_{\text{máx}}$, entre 4 elementos por borde (segunda partición) y 8 elementos por borde (tercera partición), es menor al 2% y 10%, respectivamente. Consecuentemente, las magnitudes de los desplazamientos de los nodos en los muros aislados, entre un elemento por borde y 8 elementos por borde (tercera partición), las magnitudes varían hasta 24%; entre un elemento por borde y 16 elementos por borde (cuarta partición), las magnitudes varían hasta 25%; y entre un elemento por borde y 32 elementos por borde (quinta partición) varían hasta 26%, lo cual determina que con un mallado más fino no se obtienen variaciones significativas en las magnitudes de los desplazamientos de los nodos de los muros. Los desplazamientos máximos ocurren en los extremos del muro, los cuales decrecen en magnitud hacia el centro del mismo.

Mallar los muros de mampostería confinada con un solo elemento finito en el modelado de edificios conlleva a obtener magnitudes de esfuerzos menores a los que realmente ocurren, puesto que un mallado más fino en los elementos estructurales, redistribuye la magnitud de los esfuerzos, obteniendo magnitudes mayores en la mayoría de los casos, llegando a triplicar o hasta cuadruplicar su magnitud. De ahí la importancia de considerar el criterio de mallado con los

elementos finitos para el análisis de muros en edificios, pues una mejor mallado proporciona diseños seguros para sus ocupantes.

En análisis sísmico del edificio con el método estático, se muestra con la variación de las magnitudes de los esfuerzos $\tau_{\text{máx}}$ y σ_{VM} que una partición de 8 elementos por borde es adecuada para modelar los muros, ya que entre la tercera partición (8 elementos por borde) y cuarta partición (16 elementos por borde), la variación en las magnitudes de los $\tau_{\text{máx}}$ y σ_{VM} es en promedio del 20% y 9%, respectivamente.

Las magnitudes de los desplazamientos de nivel no presentan variaciones significativas entre una partición y otra, ya que en la dirección x la máxima diferencia que se obtuvo fue del 1.48%, mientras que en la dirección y fue del 1.72%, con lo cual se concluye que una malla más fina no contribuye en la magnitud de los desplazamientos de nivel.

En el caso del análisis sísmico del edificio con el método dinámico, también se determinó que una malla de 8 elementos por borde es adecuada, ya que en la mayoría de los muros analizados las magnitudes de los esfuerzos normales, entre la tercera partición (8 elementos por borde) y cuarta partición (16 elementos por borde), la diferencia es del 20% en promedio, mientras que, para los esfuerzos cortantes para la misma división, la diferencia es del 30%. Respecto a la magnitud de los desplazamientos, la máxima variación que se obtuvo fue del 5.55% en la dirección y , con lo cual se confirma que un mallado más fino no influye significativamente la variación de la magnitud de los desplazamientos. En la dirección x , los desplazamientos fueron pequeños, por lo que no se consideró en el presente trabajo.

Para el análisis dinámico se consideraron los esfuerzos normales y cortantes, debido a que los esfuerzos $\tau_{\text{máx}}$, calculados de los esfuerzos principales, y los esfuerzos σ_{VM} resultaron ser nulos. Esto se atribuye a que las respuestas máximas de las variables en estudio se determinan con el método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados, las cuales se determinan de las contribuciones modales. En el caso particular de los esfuerzos principales se obtienen magnitudes nulas debido a que los resultados siempre son positivos, por ser resultado de una raíz cuadrada, por lo que el cálculo de los esfuerzos principales no tendría sentido, ya que éstos dependen de direcciones principales asociadas a los estados de esfuerzos con sus signos negativos y positivos.

Se observa que la división de los paneles de muros tiene una mayor influencia en la distribución de los esfuerzos que en los desplazamientos laterales de los entresijos, lo cual se atribuye a que la distribución de esfuerzos ocurre localmente en cada panel. Por otra parte, el que la división de los paneles tenga menor influencia en los desplazamientos laterales se debe a que la rigidez lateral de los muros se incluye en los 3 grados de libertad correspondientes de cada entresijo, que es independientemente de las divisiones de los elementos.

En el caso de muros de mampostería confinada, los nodos de la malla de los castillos y las columnas coinciden con todas las divisiones de la malla del panel de muro, tal que se mantiene la continuidad de desplazamientos en ambos tipos de elementos y, consecuentemente, una adecuada distribución de los esfuerzos.

Un mallado con 8 elementos por borde de cada panel de muro es el adecuada para modelar edificios de mampostería confinada, tanto para el método sísmico estático como el método sísmico dinámico. Además, es importante mencionar que el tener una malla con más particiones sólo generaría un gasto computacional excesivo, con resultados ligeramente mejores. El análisis del modelo del edificio se realizó en un procesador Inter® Core™ i5-2310 CPU @ 2.90GHZ con una memoria RAM de 6.00 GB y sistema operativo de 64. El análisis del edificio con un mallado de 8 elementos por borde tardó más de 8 horas en realizar el análisis del modelo, por lo que sí es importante considerar el costo computacional que se genera al analizar la gran cantidad de elementos finitos en el modelo.

La recomendación de dividir en 8 elementos por borde es aplicable para realizar análisis elástico lineales, pues para análisis en el intervalo no lineal se tiene que hacer un mallado distinto, particularmente si se realiza un micromodelado de la mampostería en el que se modelan las juntas de mortero, lo cual está fuera del alcance de este trabajo.

Agradecimientos

Ambos autores agradecen a la Universidad Autónoma Metropolitana por las facilidades proporcionadas a la realización de este trabajo. Se agradece al Dr. Hans Israel Archundia Aranda por la información proporcionada para la realización de este trabajo. Se agradece al Ing. José Daniel Rivera Castro por proporcionar su tesis de licenciatura

REFERENCIAS

1. Alcocer S., Cesín J., Flores L., Hernández O., Pérez J.J., Jean R., Terán A., Zúñiga O., Rangel J. L. y Granados R. (2012), "Guía para el análisis de estructuras de mampostería", Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
2. Carrillo W. J. (2009), "Estimación de los periodos naturales de vibración de viviendas de baja altura con muros de concreto", *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, **19-1**, 39-54.
3. CSI (2015), ETABS Ultimate 15.2.0, Computers and Structures Inc., Berkeley, California.
4. Donobhan G. (2007), "Aplicación de los métodos estáticos y dinámico modal para el diseño sísmico de edificios con disipadores de energía", Tesis de Maestría, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
5. Meli R. (1994), "Mampostería estructural. La práctica, la investigación y el comportamiento sísmico observado en México", Cuaderno de Investigación, **17**, 3-23.
6. NTCA-04 (2004), Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones, Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal.
7. NTCM-17 (2017), Normas Técnicas Complementarias para Diseño y

- Construcción de Estructuras de Mampostería, Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal.
8. NTCS-04 (2004), Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal.
 9. Pérez J.J., Flores L.E., y Alcocer S.M. (2015), "An experimental study of confined masonry walls with varying aspect ratios", *Earthquake Spectra*, **31(2)**, 945-968.
 10. RCDF-04 (2004), Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal.
 11. Rivera J.D. (2015), "Resistencia sísmica de un edificio habitacional de mampostería confinada construido en la Ciudad de México en 1987 calculada con varias versiones del método simplificado", Proyecto Terminal de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.
 12. Tena A. (2018), "Algunos aspectos a considerar en el modelado de estructuras para el análisis y diseño por sismo", *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Campeche, Campeche, CDROM, Artículo de Conferencia Magistral, 1-100.
 13. Zárate G., Ayala G., y García O. (2003), "Método sísmico estático para edificios asimétricos: revisión de enfoques", *Revista de Ingeniería Sísmica*, **69**, 25-45.
 14. Velázquez L. J. (2017), "Evaluación del efecto de los muros en tensión en la respuesta sísmica de edificios de mampostería modelados con columnas anchas", Tesis de Maestría, Posgrado en Ingeniería Estructural, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.