

SENSIBILIDAD EN LA RESPUESTA SÍSMICA DE UN EDIFICIO DE ALBAÑILERÍA ARMADA POR EFECTOS DEL MODELAJE ESTRUCTURAL

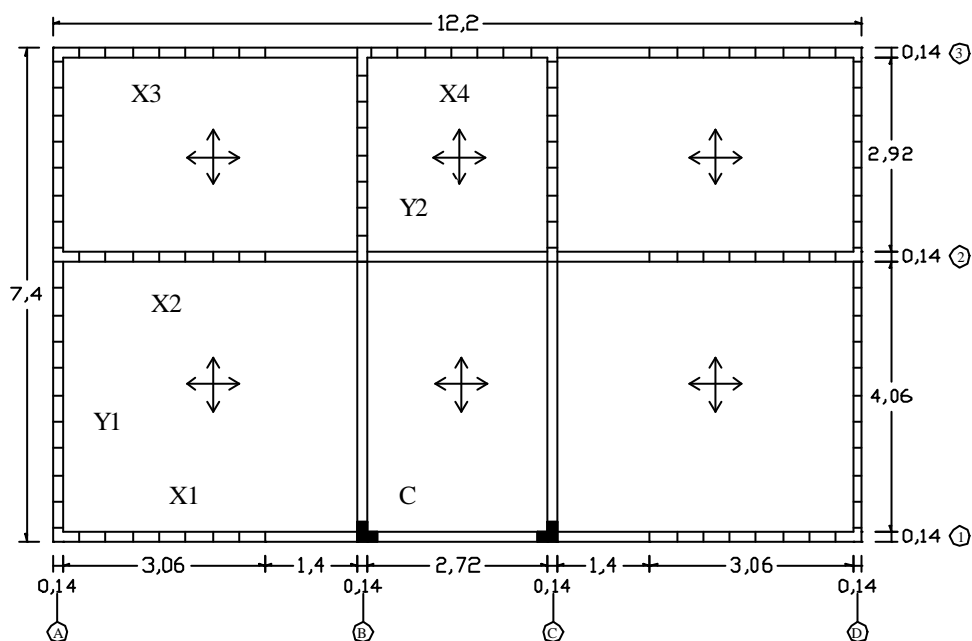
Por: **Enrique Lazo, Angel San Bartolomé y Alejandro Muñoz**
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

RESUMEN

La existencia de programas de cómputo como el SAP2000 que permiten modelar y realizar el análisis estructural de edificios mediante técnicas de modelaje simples y sofisticadas, llevó a desarrollar un estudio sobre la sensibilidad de la respuesta sísmica (variación de desplazamientos y fuerzas internas) proporcionada por cuatro técnicas de modelaje aplicadas sobre un edificio de albañilería armada.

1. CARACTERÍSTICAS DEL EDIFICIO

El edificio en estudio, destinado a oficinas, presenta una arquitectura muy simple, está ubicado en Lima sobre suelo duro, tiene cuatro pisos, y su estructura está compuesta por muros de albañilería armada.



Las características geométricas son:

- Altura libre de albañilería: $h = 2.40 \text{ m}$
- Espesor de muros: $t = 0.14 \text{ m}$
- Vigas soleras y dinteles: $0.14 \times 0.30 \text{ m}$
- Alféizar y parapetos de azotea: $h = 1.00 \text{ m}$
- Losa maciza: $t = 0.12 \text{ m}$

Los materiales presentan las siguientes características:

- Concreto: $f'c = 175 \text{ Kg/cm}^2$
- Acero: $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$
- Albañilería: $f'm = 120 \text{ Kg/cm}^2$
- Grout: $f'c = 140 \text{ Kg/cm}^2$
- Bloques: $f'b = 85 \text{ Kg/cm}^2$
- Mortero: 1:1:4 (cemento-cal-arena)
- E muros: $700 f'm$ $E / G = 2.5$
- E concreto: $2 \times 10^6 \text{ Ton/m}^2$ $E / G = 2.3$

2. METRADO DE CARGAS

Con la finalidad de obtener el peso de cada nivel de la edificación y por consiguiente su peso total, se realizó el metrado de cargas para posteriormente obtener la ubicación del centro de masa y la distribución de la fuerza sísmica en altura.

RESUMEN DE CARGAS GRAVITACIONALES POR NIVEL

| MURO | Piso Típico | | Azotea | |
|----------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| | PD + PL (Ton) | PD+0.25PL (Ton) | PD + PL (Ton) | PD+0.25PL (Ton) |
| X1 | 6.02 | 5.14 | 5.01 | 4.66 |
| X2 | 8.47 | 5.25 | 5.92 | 5.25 |
| X3 | 5.67 | 4.90 | 4.74 | 4.43 |
| X4 | 4.28 | 3.85 | 3.92 | 3.75 |
| Y1 | 10.33 | 9.16 | 8.72 | 8.25 |
| Y2 | 9.88 | 9.65 | 7.97 | 7.16 |
| COLUMNA | 4.74 | 3.74 | 3.67 | 3.27 |
| Peso de Nivel (Ton) | | 79.52 | | 69.80 |

3. CÁLCULO DE LOS CENTROS DE MASA

| MURO | X1 | X2 | X3 | X4 | Y1 | Y2 | C | Suma |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--------|
| Yi | 0.00 | 4.20 | 7.26 | 7.26 | 3.63 | 5.73 | 0.00 | |
| Pi | 5.14 | 5.25 | 4.90 | 1.93 | 9.16 | 9.65 | 3.74 | 39.77 |
| PYi | 0.00 | 22.05 | 35.57 | 13.98 | 33.25 | 55.29 | 0.00 | 160.14 |

$$Y_{cm} = 4.03 \text{ m}$$

$$X_{cm} = 6.03 \text{ m}$$

4. ANÁLISIS SÍSMICO

El método utilizado fue el Análisis Estático especificado en la Norma de Diseño Sismorresistente E-030, para lo cual las solicitaciones sísmicas fueron representadas mediante un conjunto de fuerzas horizontales actuando en cada nivel de la edificación. Las fuerzas estuvieron ubicadas en los centros de masa de cada nivel y no se consideró las excentricidades accidentales. Esta técnica de análisis fue empleada debido a que el edificio en estudio no presenta irregularidades y es de baja altura.

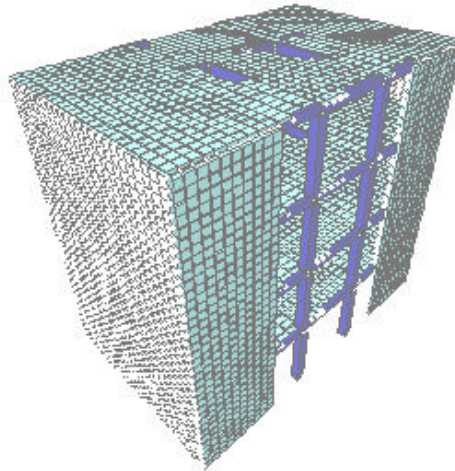
DISTRIBUCIÓN DE LA FUERZA SÍSMICA EN ALTURA

| Nivel | hi (m) | Pi (ton) | Pi hi (ton-m) | Fi (ton) | Vei(ton) |
|-------------|--------|----------|---------------|--------------|----------|
| 4 | 10.8 | 69.80 | 753.84 | 18.97 | 18.97 |
| 3 | 8.1 | 79.52 | 644.11 | 16.21 | 35.18 |
| 2 | 5.4 | 79.52 | 429.41 | 10.81 | 45.99 |
| 1 | 2.7 | 79.52 | 214.70 | 5.40 | 51.39 |
| Suma | | | 2042.06 | 51.39 | |

5. TÉCNICAS DE MODELAJE

Las técnicas de modelaje utilizadas en este estudio son las de mayor aceptación entre los profesionales dedicados al análisis estructural, siendo algunas mucho mas refinadas que las otras, por lo que se estudiará si los desplazamientos y las fuerzas de sección obtenidas presentan diferencias significativas entre ellas. Las cuatro técnicas de modelaje se describen a continuación:

Técnica 1 (Elementos Finitos): Esta técnica se tomó como patrón de comparación. Los muros y a las losas se modelan en forma espacial mediante una malla de elementos finitos (tipo “shell”), mientras que las vigas y columnas se modelan mediante barras.

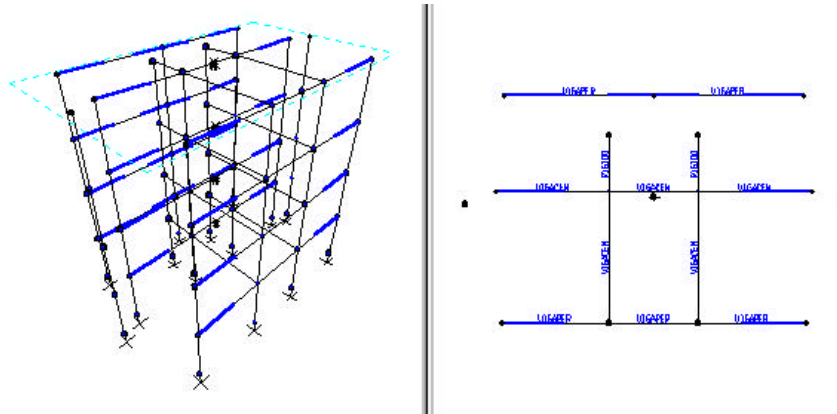


En esta técnica se tomaron en cuenta los siguientes puntos:

- En la intersección entre el muro (elemento tipo “shell”) y la viga (elemento tipo “frame”), se debe aplicar a los nudos adyacentes pertenecientes al muro y alineados en la dirección ortogonal a la viga, una restricción tipo “Beam”, tal que la longitud entre los nudos extremos sea mayor al peralte de la viga en aproximadamente 50%.
- Los nudos solo pueden tener un solo tipo de restricción (diafragma, beam, rod, etc.).
- A los nudos contenidos en la losa de un cierto nivel, se les aplicó una restricción tipo “diafragma”, con excepción de los nudos a los que ya se les había asignado la restricción tipo “beam”.
- Se debe seleccionar los nudos y los elementos “shell” del muro en cada nivel de entrepiso y asignarlos a un grupo (opción “Asign Group Name”) para obtener los valores de las fuerzas internas del muro en el entrepiso seleccionado.

Técnica 2 (Pórticos Planos): Esta técnica es la que tradicionalmente se usa en el modelaje estructural (Ref.2). Los muros son modelados como barras que en conjunto con las vigas forman una serie de pórticos planos interconectados por diafragmas rígidos (losas de techo).

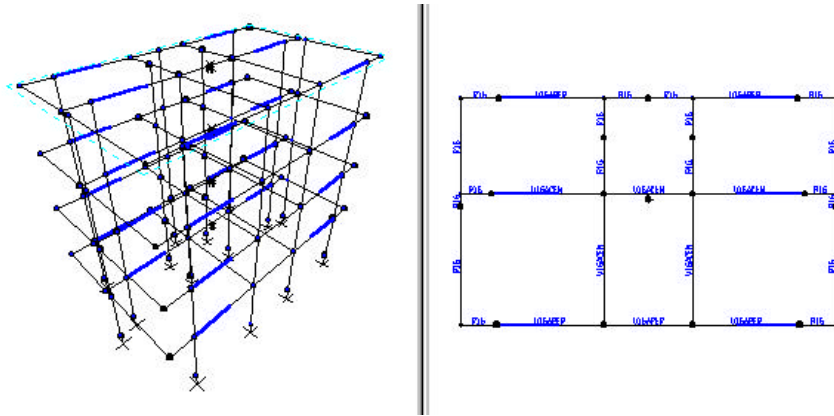
Las vigas dinteles se modelan como barras, cuya sección considera una porción de la losa con un ancho efectivo igual a 4 veces el espesor de la losa, lo que proporciona vigas de secciones L (vigas perimétricas) y T (vigas centrales), además se tomó en cuenta la porción de viga a considerar como brazo rígido como la distancia que existe entre el eje del muro hasta los extremos del mismo (Ref.2).



En esta técnica se tomaron en cuenta los siguientes puntos:

- A los nudos contenidos en la losa de un cierto nivel, se les aplicó la restricción tipo “diafragma”.
- La longitud del brazo rígido se obtiene seleccionando a la viga y mediante la opción “end offset” se especifica la longitud correspondiente y se establece un factor de zona rígida igual a 1 (de colocarse 0, la viga se comporta como si no existiese brazo rígido).
- La totalidad de los pórticos en las direcciones X, Y están contenidos en un sólo modelo estructural.
- Para obtener los resultados del análisis en una dirección, se debe seleccionar a los elementos que conforman pórticos planos en la otra dirección y modificar en la tabla correspondiente a los factores de las propiedades del elemento los valores que por defecto indican 1, por valores cercanos a cero.
- Se puede trabajar también con dos modelos, uno para cada dirección en análisis, es decir, sólo los pórticos contenidos en la dirección X-X y sólo los pórticos contenidos en la dirección Y-Y, obteniéndose así un análisis sólo por traslación.
- El criterio el cual indica que ante la existencia de un muro transversal a un muro en la dirección del análisis, se debe tomar un ancho efectivo iguala a $\frac{1}{4}$ de la longitud libre del muro transversal (Ref.2), sólo fue considerado en los muros ortogonales cuya relación de longitudes era del orden de 1. En el caso del análisis en la dirección Y-Y, para los muros extremos (sección E), se consideró un ancho efectivo igual a $\frac{3}{4}$ de la longitud libre del muro transversal, debido a que la relación entre las longitudes de los muros ortogonales era de 1:2.

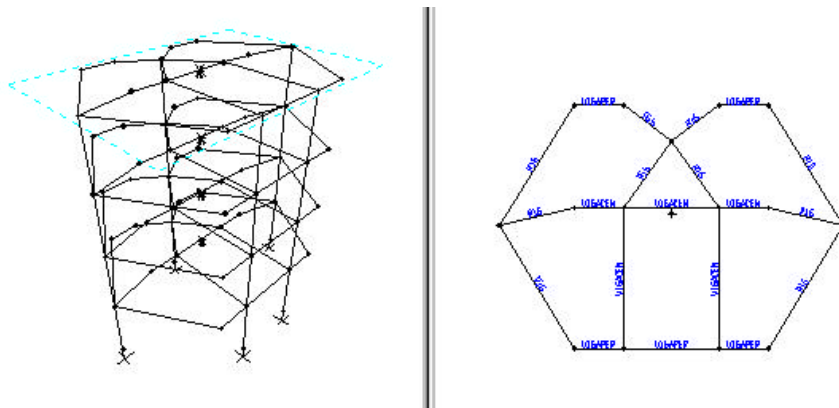
Técnica 3 (Pórticos Planos Interconectados): Esta técnica de modelaje es similar a la técnica 2, pero los pórticos planos ortogonales se les hizo compatibles en desplazamiento vertical en su punto de intersección. Esta compatibilidad se alcanzó mediante la unión de los extremos de los pórticos ortogonales con elementos rígidos, proporcionando secciones de 0.3 x 0.3 m con un módulo de elasticidad 100 veces mayor al módulo de elasticidad del concreto.



En esta técnica se consideró el siguiente punto (adicional a los contemplados en la técnica 2):

- Para obtener el valor de momento igual a cero en el nudo que representa la intersección de dos elementos rígidos, se consideró en las propiedades del elemento rígido, un valor cercano a cero en el casillero correspondiente a la torsión.

Técnica 4 (Pórtico Espacial): Bajo esta técnica, se modela al edificio como si fuese un sólo pórtico compuesto por barras espaciales agregando los diafragmas rígidos. Las vigas se modelan como barras cuya sección considera una porción de la losa con un ancho efectivo igual a 4 veces el espesor de la losa, lo que origina vigas de secciones L y T. Cada muro se modeló como una barra vertical (tipo “frame”) con secciones tipo E y U conectadas con vigas cuyos brazos rígidos fueron simulados a través de barras de sección 0.3 x 0.3 m y un módulo de elasticidad 100 veces mayor al módulo de elasticidad del concreto.

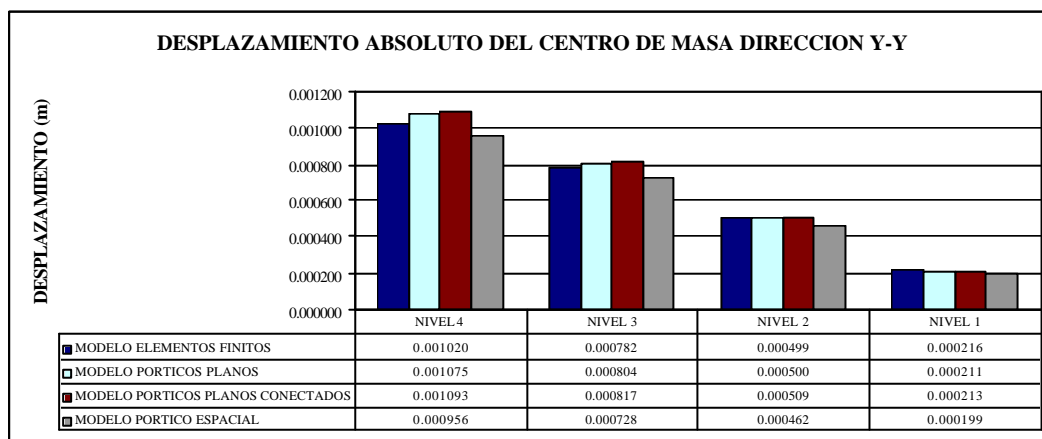
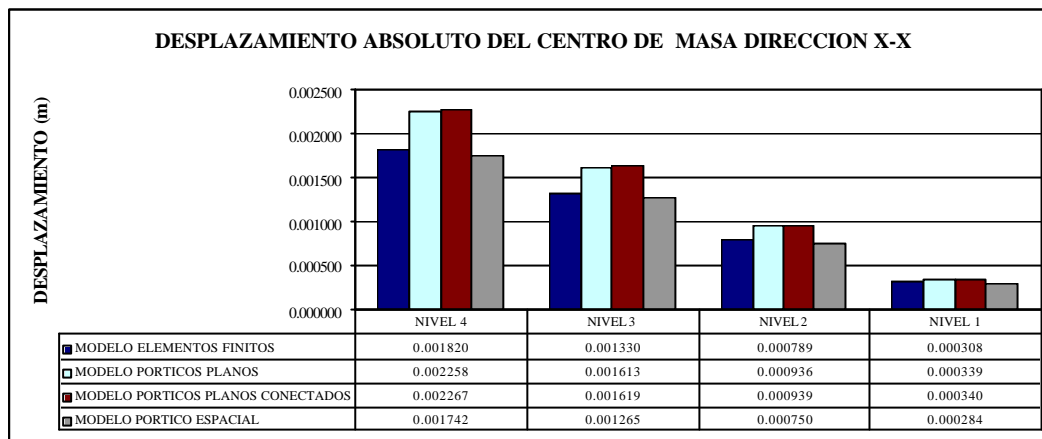


En esta técnica se tomaron en cuenta los siguientes puntos:

- A los nudos contenidos en la losa de un cierto nivel, se les aplicó la restricción tipo “diafragma”.
- Las barras verticales que simulan a los muros (con secciones E y U), fueron ubicadas en el centro de gravedad de cada muro.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Desplazamientos

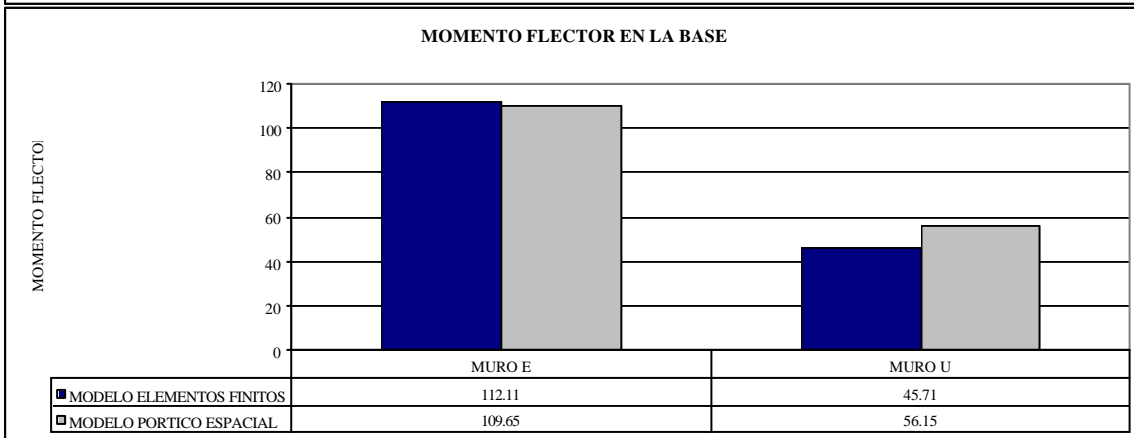
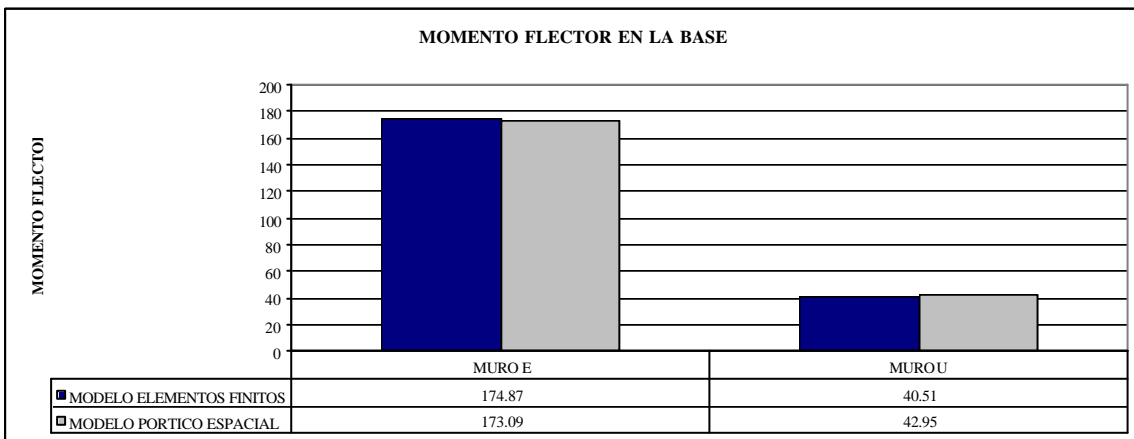
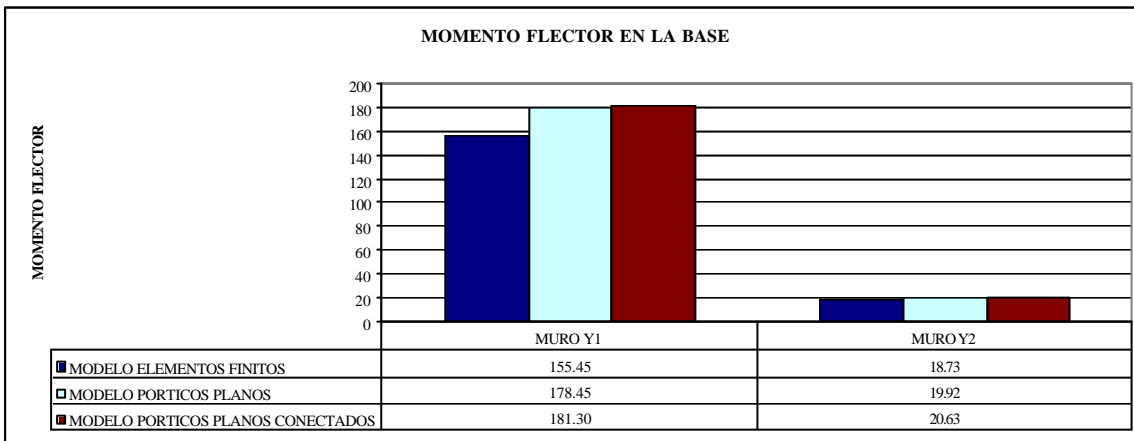
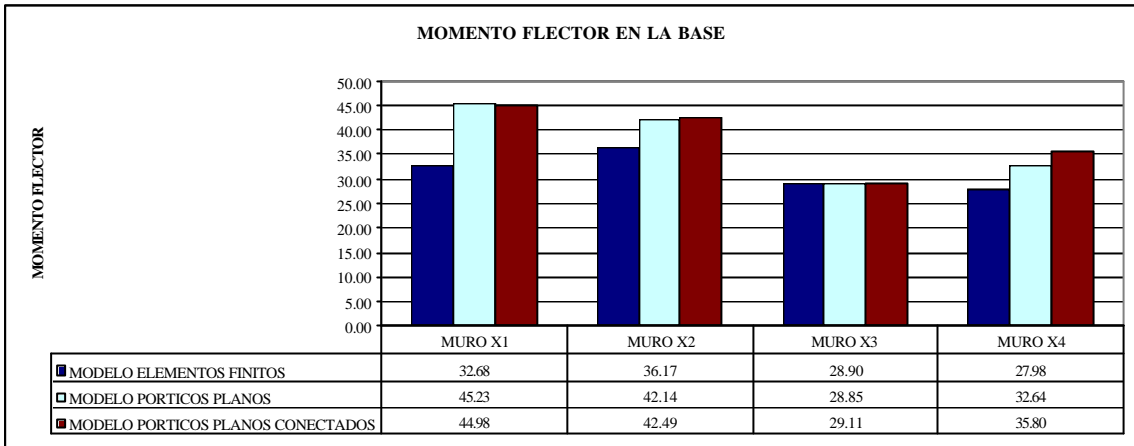


Con relación al modelo Patrón (Elementos Finitos), los valores de desplazamiento absoluto del centro de masa en las direcciones X e Y son mayores en el Modelo Tradicional de Pórticos Planos y en el Modelo de Pórticos Planos Conectados, mientras que estos desplazamientos son menores en el Modelo Espacial.

Momentos Flectores en la Base de los Muros

La comparación del Modelo Patrón (Elementos Finitos) con el modelo de Pórticos Planos, se ha realizado definiendo en el grupo de los elementos finitos (“shell”) pertenecientes al muro en análisis, los elementos correspondientes al ancho efectivo del muro transversal, para así lograr condiciones semejantes.

La comparación del Modelo Patrón con el modelo de Pórtico Espacial se ha realizado definiendo en el grupo de los elementos pertenecientes al muro en análisis, a todos los elementos del muro transversal, para así lograr condiciones semejantes.



Los valores de Momento Flector en la base de los muros en la dirección X-X y en la dirección Y-Y son mayores en el Modelo Tradicional de Pórticos Planos y en el Modelo de Pórticos Planos Conectados con relación al Modelo Patrón.

7. CONCLUSIONES

- En los modelos de Pórticos Planos, cuando se usó un ancho efectivo igual a $1/4$ de la longitud libre del muro transversal, se encontró que en la dirección Y-Y los desplazamientos obtenidos eran muy elevados con relación a los del modelo Patrón, por lo que en el muro Y1 se realizaron pruebas variando los anchos efectivos proporcionados por los muros X1, X2 y X3, llegándose a obtener buenos resultados cuando se usó un ancho efectivo igual a $3/4$ de la longitud libre del muro transversal. Desde el punto de vista físico, esto significa que cuando los muros de gran longitud giran por flexión, arrastran una gran proporción del muro transversal.
- La técnica de Pórticos Planos permite conocer en barras de sección transversal tipo U, E, F qué fuerzas internas son absorbidas por cada muro que conforman dicha sección, ya que la sección es descompuesta en varios muros y el programa proporciona un juego de fuerzas internas para cada uno de estos elementos.
- La técnica de Pórticos Planos permite analizar edificios con gran cantidad de muros y de alturas considerables, ya que al ser modelados los muros como elementos tipo barra, el procesamiento de datos es más rápido y los archivos de salida ocupan menos espacio en el disco de la computadora en comparación con el modelo Patrón.
- La técnica de Pórticos Planos permite modelar el caso de un muro con 2 materiales (albañilería confinada por columnas de concreto) como si fuese una barra de un sólo material (transformando el espesor de uno de los elementos a través de la relación de módulos de elasticidad), con lo cual, en una dirección la sección transformada es distinta a la que existe en la otra dirección; esto no puede efectuarse con la técnica del Pórtico Espacial, donde la sección transversal es única en las dos direcciones.
- La técnica del Pórtico Espacial es la que presenta menos dificultad en la definición del modelo para el caso de un muro con sección U, C, E, F, ya que éste se reduce al considerar un sólo elemento tipo barra con la sección total del muro, en lugar de considerar varios muros desdoblados para cada dirección, como sucede con la técnica de Pórticos Planos.
- La desventaja que presenta la técnica del Pórtico Espacial es que en elementos de sección U, C, E, F constituidos por muros que presentan dimensiones distintas entre sí, no es posible conocer que parte de las fuerzas internas es absorbida por cada uno de los muros que la conforman, ya que el programa proporciona un sólo juego de fuerzas internas para una determinada sección.
- Los valores del desplazamiento absoluto del centro de masa en la dirección X-X y en la dirección Y-Y son mayores en el modelo tradicional de Pórticos Planos y en el modelo de Pórticos Planos Conectados con relación al modelo Patrón, mientras que estos desplazamientos son menores en el modelo Espacial. La variación porcentual de los desplazamientos proporcionados por estas tres técnicas de modelaje respecto

al modelo Patrón, presentan diferencias máximas en la dirección asimétrica del edificio X-X, y diferencias mínimas en la dirección simétrica del edificio Y-Y.

| VARIACIÓN PORCENTUAL DE LOS DESPLAZAMIENTOS DEL CENTRO DE MASA DE LOS DISTINTOS MODELOS CON RELACION AL MODELO PATRÓN | | | | | |
|--|------------------|--------------|----------|----------|----------|
| MODELO | DIRECCION | NIVEL | | | |
| | | 4 | 3 | 2 | 1 |
| PÓRTICOS PLANOS | X-X | 24.07% | 21.28% | 18.63% | 10.06% |
| | Y-Y | 5.39% | 2.81% | 0.20% | -2.31% |
| PÓRTICOS PLANOS CONECTADOS | X-X | 24.56% | 21.73% | 19.01% | 10.39% |
| | Y-Y | 7.16% | 4.48% | 2.00% | -1.39% |
| PÓRTICO ESPACIAL | X-X | -4.29% | -4.89% | -4.94% | -7.79% |
| | Y-Y | -6.27% | -6.91% | -7.41% | -7.87% |

- Los valores de los momentos flectores en la base de los muros en la dirección X-X y en la dirección Y-Y son mayores en el modelo de Pórticos Planos y en el modelo de Pórticos Planos Conectados con relación al Modelo Patrón.

| VARIACIÓN PORCENTUAL DE LOS MOMENTOS FLECTORES EN LA BASE DE LOS MUROS DE LOS MODELOS DE PÓRTICOS PLANOS CON RELACIÓN AL MODELO PATRÓN | | |
|---|------------------------|-----------------------------------|
| DIRECCIÓN | MODELO | |
| X-X | PÓRTICOS PLANOS | PÓRTICOS PLANOS CONECTADOS |
| MURO X1 | 38.40 % | 37.64 % |
| MURO X2 | 16.51 % | 17.47 % |
| MURO X3 | -0.17 % | 0.73 % |
| MURO X4 | 16.65 % | 27.95 % |
| Y-Y | | |
| MURO Y1 | 14.50 % | 16.65 % |
| MURO Y2 | 6.35 % | 10.14 % |

- Como conclusión final se tiene que la técnica tradicional de Pórticos Planos, que es la que se ha venido usando hasta el momento para el análisis sísmico de edificios de albañilería, proporciona resultados no muy distintos a los generados por el modelo Patrón de elementos finitos, inclusive los resultados se encuentran del lado de la seguridad, por lo que dada su sencillez puede seguirse utilizando la técnica tradicional de modelaje estructural, sin la necesidad de interconectar a los pórticos.

8. REFERENCIAS

- 1) Wilson Edward L. SAP2000 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures. Versión 7.01. Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures. Computers and Structures, Inc. Berkeley 1998.
- 2) San Bartolomé A. Construcciones de Albañilería, Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural. Pontificia Universidad Católica del Perú, Fondo Editorial 1994.