

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**LA CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL COMO
VARIABLE EN LA RESPUESTA SÍSMICA
DE EDIFICACIONES**

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

HOLGUER CANALES VARGAS

Promoción 1995-I

LIMA - PERÚ

1998

ÍNDICE

| | Pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN | vii |
| | |
| CAPÍTULO 1. INFLUENCIA DE LA CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL EN EL COMPORTAMIENTO SÍSMICO | |
| 1.1 Introducción | 2 |
| 1.2 Escala | 3 |
| 1.3 Altura | 3 |
| 1.4 Tamaño Horizontal | 4 |
| 1.5 Proporción | 5 |
| 1.6 Simetría | 5 |
| 1.7 Distribución y Concentración | 6 |
| 1.8 Densidad de la Estructura en Planta | 7 |
| 1.9 Esquinas | 8 |
| 1.10 Resistencia Perimetral | 9 |
| 1.11 Redundancia | 9 |
| | |
| CAPÍTULO 2. PROBLEMAS DE CONFIGURACIÓN COMUNES EN NUESTRO MEDIO | |
| 2.1 Introducción | 12 |
| 2.2 El Piso Blando | 12 |
| 2.3 Variaciones de Resistencia y Rigidez Perimetrales | 14 |
| 2.4 La Falsa Simetría por Ubicación del Núcleo. | 16 |
| | |
| CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL DE EDIFICIOS | |
| 3.1 Generalidades | 19 |
| 3.2 Procedimiento para el Análisis Estático Seudo Tridimensional | 19 |
| 3.3 Análisis Dinámico Tridimensional | 23 |
| 3.4 Ensamble de las Matrices de la Estructura y el Método de Almacenamiento de Columna Activa | 24 |
| 3.5 Modelo de Cómputo Tridimensional | 27 |

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS CON EL ESPECTRO DE RESPUESTA

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1 | Introducción | 31 |
| 4.2 | Definición del Método del Espectro de Respuesta | 31 |
| 4.3 | Cálculo de la Respuesta Modal | 33 |
| 4.4 | El Método CQC para Combinación Modal | 34 |
| 4.5 | Ejemplo Numérico de Combinación Modal | 35 |
| 4.5.1 | Factores de Participación Modal | 37 |
| 4.5.2 | Factores de Dirección Modal | 37 |
| 4.5.3 | Factores Modales de Masa Efectiva | 38 |
| 4.6 | Efectos Ortogonales en el Análisis Espectral | 47 |
| 4.6.1 | Ecuaciones Básicas para el Cálculo de Fuerzas Espectrales | 48 |
| 4.6.2 | El Método General CQC3 | 50 |
| 4.6.3 | Recomendaciones sobre Efectos Ortogonales | 51 |

CAPÍTULO 5. ESTUDIO DEL EFECTO SÍSMICO EN EDIFICACIONES CON UN PISO BLANDO

| | | |
|-----|--|-----|
| 5.1 | Descripción General | 53 |
| 5.2 | Características de los Modelos Estructurales | 55 |
| 5.3 | Espectros de Respuesta de Seudoaceleraciones | 67 |
| 5.4 | Análisis Dinámico de Modelos Estructurales de 4 Pisos | 70 |
| 5.5 | Análisis Dinámico de Modelos Estructurales de 8 Pisos | 80 |
| 5.6 | Análisis Dinámico de Modelos Estructurales de 12 Pisos | 94 |
| 5.7 | Discusión de Resultados | 109 |

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

| | | |
|-----|-----------------|-----|
| 6.1 | Conclusiones | 113 |
| 6.2 | Recomendaciones | 115 |

ANEXO A. CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA ETABS

| | |
|--|------|
| I. Introducción | A-1 |
| II. Terminología, Convenciones y Modelaje en ETABS | A-3 |
| A. Los Pórticos ETABS | A-3 |
| B. Los Diafragmas de Piso ETABS | A-6 |
| C. Sistemas Coordinados de Referencia | A-6 |
| D. Datos de los Pórticos | A-7 |
| E. Condiciones de Carga y Sistemas de Cargas | A-7 |
| F. Zona Rígida | A-9 |
| G. Características Especiales de los Elementos Estructurales ETABS | A-13 |
| H. Comprobación Estática | A-17 |
| I. Efecto P-Delta | A-17 |

ANEXO B. FÓRMULAS DE PREDIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

| | |
|---|-----|
| I. Predimensionamiento de Losas Macizas Reforzadas en Dos Direcciones | B-1 |
| II. Predimensionamiento de Vigas | B-2 |
| III. Predimensionamiento de Columnas | B-3 |

BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

La experiencia ha demostrado que estructuras aparentemente similares tuvieron un comportamiento muy diferente frente a cargas sísmicas. Muchas sufrieron pérdidas cuantiosas, mientras otras permanecieron en pie y experimentaron leves daños, debido a una mejor distribución de sus elementos resistentes a fuerzas sísmicas. Este aspecto que va desde la simple geometría exterior del edificio hasta la ubicación de elementos estructurales y no estructurales dentro de él se ha denominado “configuración estructural”, y constituye una variable posible de manejar desde etapas previas al diseño estructural.

En el Capítulo 1 se presenta una descripción de los principales aspectos que influyen en la configuración estructural de un edificio.

En el Capítulo 2 se incluye algunos problemas de configuración comunes en nuestro medio.

Debido a la complejidad estructural de algunos edificios, resulta ineficiente y poco práctico examinar su comportamiento sísmico en base a un análisis bidimensional. Por esta razón se incluye en el Capítulo 3 algunos puntos importantes para el análisis pseudo tridimensional y tridimensional de sistemas de edificios.

Para llevar a cabo el análisis dinámico se puede usar el Método del Espectro de Respuesta. Además, es importante trabajar con una técnica de combinación modal que resulte apropiada para los valores de frecuencias de vibración de las formas de modo asociadas al sistema estructural. Es así que en el Capítulo 4, se hace una descripción detallada del Análisis con el Espectro de Respuesta, y se incluye un método de combinación modal relativamente nuevo que se basa en teorías de vibración aleatoria y produce resultados más reales.

En el Capítulo 5 se desarrolla el estudio de un problema muy frecuente de configuración: “la presencia del piso blando”, el cual se produce por una discontinuidad significativa de resistencia y rigidez en un piso de la edificación.

El Capítulo 6 contiene las conclusiones de esta investigación y las recomendaciones para que las nuevas edificaciones con “piso blando en el primer nivel” cumplan con la Norma Técnica de Edificación E 0.30 de Diseño Sismorresistente del año 1997.

Finalmente se incluyen dos anexos: el Anexo A, que presenta las características del programa ETABS, usado para el análisis dinámico tridimensional de los modelos planteados; y el Anexo B, que incluye fórmulas de predimensionamiento de elementos estructurales empleadas en la primera etapa del Capítulo 5.

CAPÍTULO 1

INFLUENCIA DE LA CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL EN EL COMPORTAMIENTO SÍSMICO

1.1 INTRODUCCIÓN

Son muchas las variables que influyen en la respuesta sísmica de una estructura, las cuales están relacionadas básicamente a las siguientes causas:

- Movimiento del terreno
- Geología del sitio
- Impacto de los métodos de análisis
- Configuración estructural
- Sistema estructural
- Materiales
- Componentes no estructurales
- Calidad de la construcción

De las anteriormente mencionadas la “configuración estructural” desempeña un papel importante dentro de las edificaciones, puesto que contribuye a mejorar el comportamiento mediante una adecuada distribución de esfuerzos y deformaciones de las diferentes partes que componen una estructura.

El término “configuración” se refiere tanto a la forma de conjunto del edificio, como al tamaño, naturaleza y localización de los elementos resistentes y componentes no estructurales dentro de él.

En este capítulo se hace una descripción general de los aspectos de la configuración que afectan el comportamiento sísmico.

1.2 ESCALA

En una casa con estructura de madera es posible transgredir ciertos principios de configuración, ya que debido a su peso ligero las fuerzas de inercia serán bajas. Además, cuenta con luces cortas; en relación al área de piso, habrá mayor número de muros para distribuir las cargas, y las medidas correctivas, si se diseñan adecuadamente, pueden ser de pequeña escala.

En un edificio de mayor tamaño, la transgresión de los principios básicos de distribución y proporción implica un costo crecientemente alto, además, a medida que crecen las fuerzas, no se puede confiar en el buen funcionamiento como en el caso de un edificio equivalente de mejor configuración. Sin embargo, esto no implica que los edificios pequeños no tengan inconvenientes significativos.

Se debe evitar comparar un tamaño de un edificio con otro aplicando simplemente la hipótesis de que todas las variables excepto una pueden permanecer constantes, más aún si se quiere analizar los efectos del tamaño sobre las fuerzas sísmicas, ya que a medida que aumenta el tamaño absoluto de una estructura, decrece el número de alternativas para su solución estructural.

1.3 ALTURA

A medida que un edificio se hace más alto, por lo general aumenta su período, esto implica un cambio del nivel de respuesta y magnitud de las fuerzas. Sin embargo, el período de un edificio no es sólo función de su altura, sino también de otros factores como la relación altura/ancho, altura de los pisos, materiales involucrados, sistemas estructurales, y la cantidad y distribución de la masa.

De modo que, muy raras veces la altura por sí sola constituye una variable que se deba controlar para atenuar el problema sísmico.

Hace varias décadas, se establecieron en los reglamentos de algunos países, límites en la altura de los edificios ubicados en zonas de alto riesgo sísmico. Dichos límites se fueron modificando con el transcurso del tiempo. En la actualidad, el enfoque no consiste en legislar sobre límites sísmicos para la altura, sino establecer criterios más específicos de diseño y comportamiento sísmicos.

1.4 TAMAÑO HORIZONTAL

Cuando una planta es extremadamente grande, incluso si es de una forma sencilla y simétrica, el edificio puede tener dificultad para responder como una unidad a las sollicitaciones sísmicas.

Al determinar fuerzas sísmicas, usualmente se supone que la estructura vibra como un sistema en el que todos los puntos de una planta en el mismo nivel y en el mismo instante están en la misma fase de desplazamiento, velocidad y aceleración, y además tienen la misma amplitud. En realidad, como la propagación de las ondas sísmicas no es instantánea sino que tiene una velocidad final (finita) que depende de la densidad del suelo y de las características de los elementos estructurales, las diversas partes del edificio a todo lo largo de éste vibran asincrónicamente con aceleraciones diferentes, causando esfuerzos longitudinales de tracción-compresión y desplazamientos horizontales adicionales. Con las otras condiciones permaneciendo constantes, mientras más largo sea el edificio, mayor será la probabilidad de ocurrencia de estos esfuerzos y mayor será su efecto.

Como el aumento en la longitud de un edificio incrementa los esfuerzos en un piso que funciona como un diafragma horizontal, la rigidez de éste puede ser insuficiente para redistribuir la carga horizontal, durante un sismo, de elementos portantes más débiles o dañados del edificio hacia los elementos más fuertes o hacia aquéllos que sufren menor daño.

A menos que haya numerosos elementos resistentes a fuerzas laterales, por lo general los edificios de planta grande imponen severos requerimientos sobre sus diafragmas, que tienen grandes luces y pueden tener que transmitir grandes fuerzas que serán resistidas por muros de corte o pórticos.

1.5 PROPORCIÓN

Cuanto más esbelto sea un edificio peores serán los efectos de volteo de un sismo y mayores los esfuerzos sísmicos en las columnas exteriores.

El equivalente en planta de la relación altura/ancho, o de esbeltez, es la relación de aspecto. Las formas largas y esbeltas son inconvenientes. Si el arriostramiento está localizado sólo en la periferia, la dirección longitudinal será muy rígida, pero la dirección transversal teniendo sólo dos muros de corte o pórticos en los extremos, muy separados entre sí, será muy flexible. En este caso el diafragma actuaría como una viga larga y esbelta, mientras que las hipótesis empleadas para analizar diafragmas suponen un comportamiento de viga de corte de pequeña longitud.

1.6 SIMETRÍA

Cuando en una configuración, el centro de masa coincide con el centro de rigidez, se dice que existe simetría estructural.

Existen dos razones importantes para preferir las formas simétricas en una configuración: la primera es que, en términos puramente geométricos, la asimetría tiende a producir excentricidad entre el centro de masa y el centro de rigidez, y por tanto, provocará torsión; aunque ésta puede deberse a causas no geométricas (por ejemplo, variación en la distribución de masa en una estructura simétrica). La segunda

razón es que la asimetría tiende a concentrar esfuerzos, como por ejemplo, en una esquina interior.

A medida que el edificio se vuelve más simétrico, se reducirá su tendencia a sufrir concentraciones de esfuerzos y torsión, y su comportamiento ante cargas sísmicas será menos difícil de analizar y más predecible. Es decir, se puede mantener la seguridad con economía de diseño y construcción con el empleo de formas simétricas. Sin embargo, esto no quiere decir que un edificio simétrico no sufrirá torsión.

Los efectos de la simetría no sólo se refieren a la forma del conjunto del edificio sino también a los detalles de su diseño y construcción. Según investigaciones, el comportamiento sísmico de edificios es sensible a variaciones muy pequeñas de la simetría.

Es común encontrar elementos principales, como los núcleos de servicio, dispuestos asimétricamente dentro de una configuración simétrica, esto da lugar a una situación denominada “falsa simetría”. La simetría va desde la simple geometría de la forma exterior hasta las distribuciones internas de elementos resistentes y componentes no estructurales.

1.7 DISTRIBUCIÓN Y CONCENTRACIÓN

En un edificio con resistencia bien distribuida, los elementos compartirán igualmente las cargas. Cuando hay muchos elementos, y un miembro empieza a fallar, habrá muchos otros elementos que proporcionen la resistencia necesaria (ver Figura 1.1). Por lo tanto tienen una obvia desventaja las configuraciones que concentran fuerzas sísmicas, de tal manera que acumulan fuerzas sucesivamente más grandes aplicadas en un número decreciente de elementos.

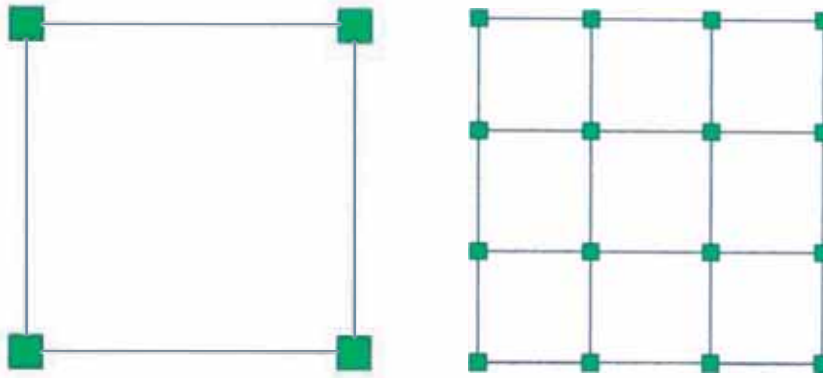


Figura 1.1 Distribución de cargas.

1.8 DENSIDAD DE LA ESTRUCTURA EN PLANTA

En los edificios construidos en siglos pasados el tamaño y la densidad de los elementos estructurales son de manera sorprendente mayores que los de los edificios actuales.

En los edificios altos y flexibles, las fuerzas sísmicas son generalmente mayores al nivel del suelo. De esta forma se requiere que la planta inferior soporte su propia carga lateral además de las fuerzas cortantes de todos los pisos superiores. Paradójicamente, es en este mismo nivel donde a menudo se imponen ciertos criterios arquitectónicos que exigen eliminar tanto material como sea posible.

La densidad de la estructura en planta, a nivel del terreno, es una medida estadística frente a casos opuestos a una configuración sísmica eficiente; y se define como el área total de todos los elementos estructurales verticales (columnas, muros, arriostres) dividida entre el área bruta del piso.

El factor principal que da a los edificios antiguos cierto grado de resistencia sísmica, usualmente es su configuración. Debido a que en ellos se lleva hasta el terreno una gran cantidad de material por rutas regulares y directas, no hay razón para que las fuerzas sigan trayectorias más cortas y destructivas.

1.9 ESQUINAS

Las esquinas exteriores también pueden tener problemas debidos a efectos de ortogonalidad. Un movimiento de tierra orientado diagonalmente puede esforzar las esquinas en mayor medida que un movimiento a lo largo de los ejes principales.

Las columnas en esquina de los pórticos deben diseñarse conservadoramente; una forma sería, tomando en consideración los movimientos simultáneos en dirección tanto vertical como horizontal en planta.

En las esquinas de un edificio ocurre que la deflexión de un muro en un plano debe interactuar con la deflexión incompatible de otro muro ubicado en un plano perpendicular. Este problema es más grave si no se cuenta con un muro sólido en la esquina (ver Figura 1.2).



Figura 1.2 Daño producido en la esquina débil de un edificio en el sismo que sacudió la ciudad de Nazca en noviembre de 1996.

1.10 RESISTENCIA PERIMETRAL

Para resistir la torsión en un edificio simétrico, con el centro de giro situado exactamente en el centro geométrico, cuanto más distante del centro se coloque el material, mayor será el brazo de momento respecto al cual actúe, y por tanto, mayor será el momento resistente que pueda generar (ver Figura 1.3). Esto conlleva a establecer que, geoméricamente, la distribución más eficiente es la circular, aunque se pueden emplear muchas otras configuraciones con una adecuada eficiencia.

Es conveniente, entonces, colocar elementos resistentes en el perímetro, ya sea que los elementos sean muros, pórticos, o pórticos arriostrados, y que tengan que resistir fuerzas laterales directas, de torsión, o ambas.

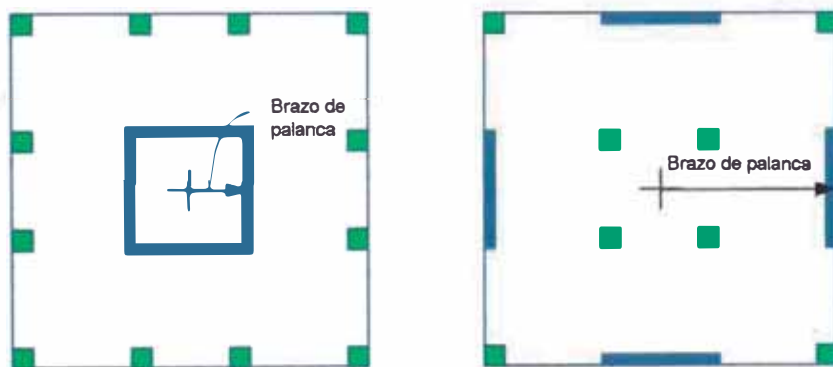


Figura 1.3 Ubicación de muros de corte para resistir los movimientos de volteo y torsión.

1.11 REDUNDANCIA

Los miembros redundantes son elementos estructurales que en condiciones normales de diseño no desempeñan una función estructural o están subesforzados con respecto a su resistencia, pero que son capaces de resistir fuerzas laterales si es necesario. Proporcionan un medio útil para obtener un factor de seguridad donde pueda haber incertidumbres analíticas en el diseño.

Se puede aducir que suministrar redundancia representa una violación de los conceptos de economía y elegancia de la ingeniería, puesto que implica que una parte del material, estará ocioso o subesforzado. Sin embargo, el concepto reconoce la necesidad de diseñar en función de desastres no calculados, así como para las condiciones diarias de servicio.

La redundancia en el diseño sísmico tiene importancia en varios aspectos. A menudo se cita el detallado de las conexiones como un factor clave, ya que cuanto más integrada e interconectada esté una estructura, habrá más posibilidades de redistribución de carga. La configuración también participa, ya que el número y la localización de los elementos resistentes se originan en el diseño arquitectónico y establecen un potencial de redistribución que puede ser efectivo mediante el adecuado detallado estructural.

CAPÍTULO 2

PROBLEMAS DE CONFIGURACIÓN COMUNES EN NUESTRO MEDIO

2.1 INTRODUCCIÓN

En nuestro medio se observa a menudo diferentes construcciones que van desde pequeñas viviendas unifamiliares, centros de abastecimiento, talleres, hasta los grandes edificios de departamentos u oficinas, y es frecuente que en muchos de ellos se encuentren problemas de configuración estructural. Es importante que una edificación reúna ciertas condiciones a fin de mejorar su comportamiento frente a un sismo. La condición principal relacionada con la configuración estructural es que dicha edificación debe contar con una adecuada distribución de masas y rigideces tanto en planta como en elevación. Cuando tal condición no se cumple, se presenta un problema de configuración que debe ser estudiado y, en base a una coordinación entre ingenieros y arquitectos, buscar alternativas de solución para modificar las irregularidades estructurales y obtener una mejor respuesta sísmica.

Dentro de los problemas de configuración estructural que se presentan en las edificaciones ejecutadas en nuestro medio destacan los tres siguientes: el piso blando, variaciones de resistencia y rigidez perimetrales y la falsa simetría por ubicación del núcleo. Estas irregularidades se describen a continuación.

2.2 EL PISO BLANDO

Este nombre se aplica por lo general a edificios cuya planta baja es menos rígida que las plantas superiores. Sin embargo, un piso blando en cualquier nivel crea problemas, pero como las fuerzas son mayores en la base del edificio, una discontinuidad de rigidez entre el primer y segundo piso tiende a provocar la condición más grave.

El piso blando se genera cuando hay una discontinuidad significativa de resistencia y rigidez entre la estructura vertical de un piso y el resto de la estructura. Esta discontinuidad se puede presentar debido a que un piso, por lo general el primero, es significativamente más alto que el resto, produciéndose así una disminución de rigidez.



Figura 2.1 Daño sísmico en una configuración con el piso blando en el primer nivel. Las grandes aberturas generan grandes distorsiones en ese piso.



Figura 2.2 Colapso total producido por un sismo, en una edificación de dos niveles con un primer piso blando.

También puede haber discontinuidad debido a un concepto de diseño muy común, en el cual no todos los elementos verticales se proyectan hacia la cimentación, sino que algunos terminan en el segundo piso para aumentar las luces de la planta baja. Esta condición crea una trayectoria de carga discontinua que produce una variación de resistencia y rigidez en el punto de cambio.

Finalmente, el piso blando se puede producir por un piso abierto que soporta muros superiores estructurales o no estructurales pesados. Esta situación es más grave cuando el muro superior es un muro de corte y actúa como elemento principal resistente de la fuerza lateral.

El problema principal del piso blando es que la mayor parte de las fuerzas sísmicas de un edificio, y cualquier deformación estructural consecuente, tenderán a concentrarse en el piso menos rígido o en el punto de discontinuidad, en lugar de distribuirse de manera más uniforme entre todos los pisos.

En la condición de piso blando, las deflexiones en éste serán mucho mayores que las de otros pisos, y por tanto, este piso experimentará esfuerzos y daños mayores.

En las Figuras 2.1 y 2.2 se muestran daños producidos por sismos en edificaciones cuya configuración presenta el piso blando en el primer nivel.

2.3 VARIACIONES DE RESISTENCIA Y RIGIDEZ PERIMETRALES

Si existe una amplia variación de resistencia y rigidez alrededor del perímetro, el centro de masa no coincidirá con el centro de resistencia. Ver Figura 2.3.

El efecto de torsión se explica mejor por medio de una de las construcciones más comunes en nuestro país y quizá en el mundo. Los muros laterales y posterior, sin aberturas, están en los límites de propiedad, y la fachada frontal, con ventanas hacia la

calle, está esencialmente abierta. Ante la presencia de un sismo, los muros posterior y laterales son muy rígidos, pero el frontal es muy flexible y el techo tiende a torcerse. Algunos estudios indican que las columnas de la fachada frontal estarán sujetas a grandes esfuerzos debidos a la fuerza cortante de torsión, además de las cargas y esfuerzos normales debidos al desplazamiento.

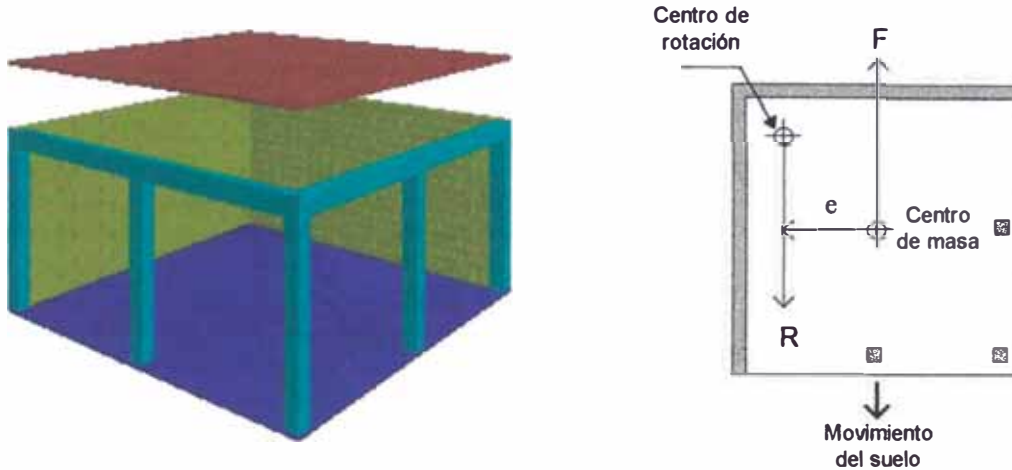


Figura 2.3 Torsión en planta por resistencia horizontal desequilibrada. La fuerza resistente R y la fuerza de inercia F actúan excéntricamente en vez de encontrarse alineadas.

En la Figura 2.4 se muestra las plantas de tres edificios similares con elementos de corte uniformes. Considerando sólo deformaciones de corte, es fácil demostrar que la deflexión torsional del extremo abierto varía con el cuadrado de la longitud del edificio.

En la Figura 2.5 se ilustra el aumento de desplazamiento causado por un incremento de la luz de un voladizo.

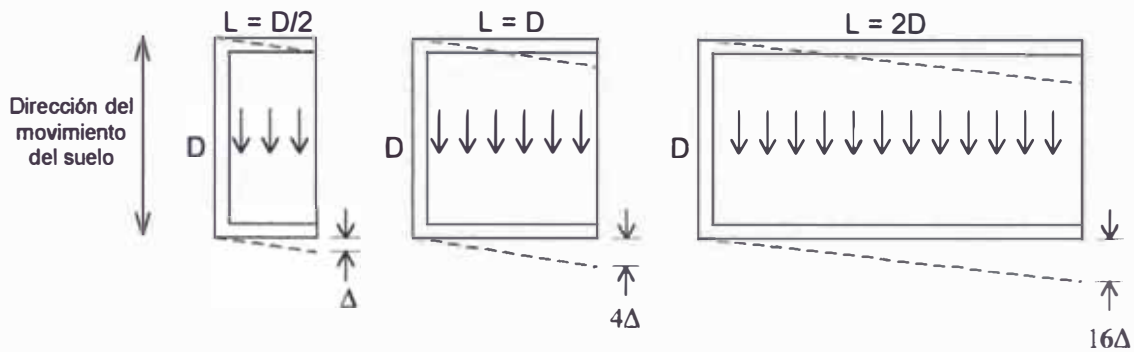


Figura 2.4 Deflexión por torsión de un edificio con muro frontal muy flexible.

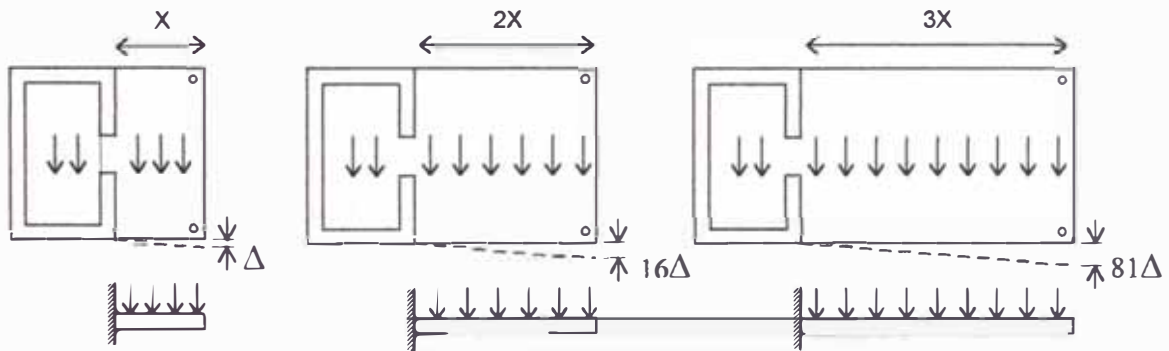


Figura 2.5 Deflexión por torsión de diafragma que funciona como voladizo lateral. Se supone que las columnas en el extremo libre tienen una rigidez lateral mínima. La deflexión varía con la cuarta potencia de la luz.

2.4 LA FALSA SIMETRÍA POR UBICACIÓN DEL NÚCLEO

En cuanto a su propia función, el núcleo (elevadores, escaleras, ductos de servicio) es un conjunto de agujeros en el diafragma.

En particular, la ubicación del núcleo en relación con la simetría de conjunto del edificio es crítica porque las ubicaciones asimétricas del núcleo tenderán a incrementar la posibilidad de torsión. De modo que, al determinar la simetría de la configuración de

un edificio, no sólo se debe tomar en cuenta la forma general del edificio, sino también se debe investigar la ubicación de todos los elementos resistentes significativos.

El término “falsa simetría” se usa para identificar edificios que teniendo una configuración aparentemente sencilla, regular y simétrica, son estructuralmente asimétricos debido a la distribución de los elementos resistentes.

Si el núcleo o núcleos se sitúan al centro o en la periferia de un edificio simétrico, se reducirá la posibilidad de torsión y se atenuará el movimiento de aquellas partes de la estructura más alejadas del núcleo. Si el núcleo no se puede ubicar simétricamente, se debe agregar algunos elementos resistentes para equilibrar.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL DE EDIFICIOS

3.1 GENERALIDADES

En muchos casos es posible idealizar el edificio como un ensamble de pórticos y muros de corte interconectados por sistemas de piso indeformables en su plano, es decir, que funcionan como diafragmas infinitamente rígidos en planta. Esto implica que los desplazamientos laterales de cualquier punto en los pisos del edificio se pueden expresar en términos de dos desplazamientos horizontales y un giro alrededor de un eje vertical de un punto cualquiera de cada piso, de modo que, cuando las cargas laterales están aplicadas en los pisos, el problema se reduce a uno de sólo tres grados de libertad por nivel.

3.2 PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS ESTÁTICO SEUDO TRIDIMENSIONAL

El análisis sísmico estático seudo tridimensional de un edificio se puede efectuar con el siguiente procedimiento:

- A. Calcular la matriz de rigidez de cada sistema plano j . Para esto se asigna al sistema dos grados de libertad por nudo (desplazamiento vertical y giro en el plano del sistema) además de un grado de libertad por nivel correspondiente a su desplazamiento lateral, como se ilustra en la Figura 3.1. Si se tiene N nudos y L niveles la matriz de rigidez para ese sistema es cuadrada de orden $2N+L$. Mediante condensaciones estáticas se expresa la matriz en términos de sólo los grados de libertad lateral, obteniendo la denominada matriz de rigidez lateral del sistema \mathbf{K}_j' de orden $L \times L$.
- B. Expresar la matrices \mathbf{K}_j' en términos de los grados de libertad del edificio completo (globales), es decir de dos desplazamientos y el giro en planta de un punto de cada piso. El centro de masas es el punto elegido por conveniencia.

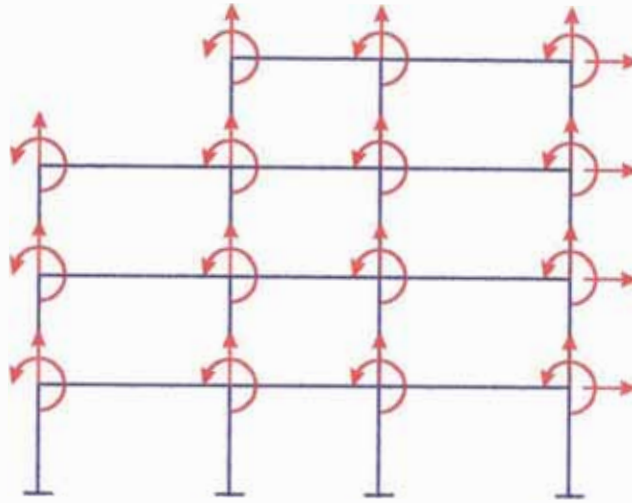


Figura 3.1 Sistema plano y grados de libertad asociados.

$$d_{ji} = u_i \cos \phi_j + v_i \operatorname{sen} \phi_j + r_{ji} \theta_i$$

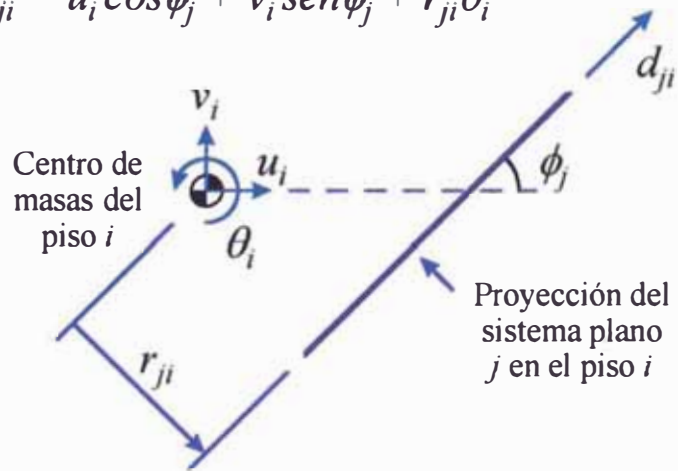


Figura 3.2 Relación entre los desplazamientos en planta del piso rígido i y el desplazamiento lateral del sistema plano j en dicho piso.

De la Figura 3.2, sean u_i , v_i y θ_i los desplazamientos y el giro del centro de masas del piso i , donde el sistema plano j tiene en el piso i un desplazamiento lateral d_{ji} , el cual, considerando que el ángulo θ_i es pequeño, se puede expresar de la siguiente manera:

$$d_{ji} = \begin{Bmatrix} \cos\phi_j & \text{sen}\phi_j & r_{ji} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ \theta_i \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

es decir:

$$d_{ji} = \mathbf{b}_{ji}^T \mathbf{u}_i \quad (3.2)$$

donde:

$$\mathbf{b}_{ji} = \begin{Bmatrix} \cos\phi_j \\ \text{sen}\phi_j \\ r_{ji} \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{u}_i = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ \theta_i \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

Considerando los L niveles del sistema plano se tiene:

$$\mathbf{D}_j = \mathbf{B}_j \mathbf{u}_i \quad (3.4)$$

donde:

$$\mathbf{D}_j = \begin{bmatrix} d_{j1} \\ d_{j2} \\ \vdots \\ d_{jL} \end{bmatrix}_{L \times 1}; \quad \mathbf{U}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{u}_L \end{bmatrix}_{3L \times 1}; \quad \mathbf{B}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{j1}^T & & & \\ & \mathbf{b}_{j2}^T & & \\ & & \ddots & \\ & & & \mathbf{b}_{jL}^T \end{bmatrix}_{L \times 3L} \quad (3.5)$$

La matriz de rigidez \mathbf{K}_j' (local) expresada en términos de los desplazamientos de los pisos (globales) es:

$$\mathbf{K}_j = \mathbf{B}_j^T \mathbf{K}_j' \mathbf{B}_j \quad (3.6)$$

\mathbf{K}_j es una matriz cuadrada de orden $3L$.

- C. Ensamblar la matriz \mathbf{K} del edificio sumando todas las matrices \mathbf{K}_j puesto que están referidas a los mismos grados de libertad. Si el edificio tiene n pisos \mathbf{K} es cuadrada de orden $3n$.

$$\mathbf{K} = \sum \mathbf{K}_j \quad (3.7)$$

- D. Para un conjunto dado de fuerzas laterales \mathbf{F} que actúan en los niveles de piso, calcular los desplazamientos \mathbf{U} de los pisos resolviendo el sistema de ecuaciones:

$$\mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (3.8)$$

\mathbf{F} está formada en general por dos fuerzas propiamente dichas y un momento torsor por cada piso, en correspondencia con los grados de libertad de dicho piso.

Conociendo \mathbf{U} se determina \mathbf{D}_j de cada pórtico y con ello los otros desplazamientos y fuerzas en los miembros.

3.3 ANÁLISIS DINÁMICO TRIDIMENSIONAL

Al idealizar un edificio como un ensamble de pórticos planos, como se hace en el ítem 3.2, se está despreciando la rigidez a la torsión de vigas, columnas y muros, lo cual es inaceptable en estructuras complejas, como las que cuentan con muros de forma tubular. Por otro lado, pueden presentarse casos en que los pórticos no son planos, como en edificios de planta circular.

Además, al considerar los sistemas planos independientes entre sí se pierde la compatibilidad de desplazamientos verticales en columnas que en cierta dirección pertenecen a un pórtico y en otra dirección a otro pórtico. Del mismo modo, no se garantiza la compatibilidad de los giros de las vigas que llegan a la intersección de los pórticos cuando el ángulo que forman éstos es muy agudo en planta.

Los problemas citados anteriormente se pueden resolver si se considera que el edificio está formado por sistemas no planos sino tridimensionales unidos por sistemas rígidos de piso. Este es el tratamiento que se da a los sistemas estructurales en el programa ETABS, el cual fue elegido para usarse como herramienta de análisis en los Capítulos 4 y 5 de esta investigación.

El análisis dinámico tridimensional de un edificio puede hacerse tomando en cuenta todos los grados de libertad estáticos y dinámicos que resulten relevantes. Así, el método de los elementos finitos resulta una poderosa herramienta para determinar no sólo las características de rigidez sino también las de inercia. Sin embargo, el tiempo y esfuerzo de cómputo es elevado aunque se trate de un edificio de pocos pisos. En análisis dinámico, la dificultad aumenta porque la solución de un problema de valores y vectores característicos es bastante más lenta y costosa que la de problemas estáticos del mismo número de grados de libertad.

Al igual que en el análisis estático, en el análisis dinámico tridimensional es posible emplear la hipótesis de diafragmas rígidos. De esta manera se reduce el problema

global a uno de tres grados de libertad por nivel (dos desplazamientos laterales y un giro alrededor de un eje vertical). La obtención de la matriz de rigidez para sistemas tridimensionales requerirá más esfuerzo que para sistemas pseudo tridimensionales. En la matriz de masas, a los desplazamientos laterales les corresponde la masa traslacional del nivel en cuestión, y al giro alrededor del eje vertical le corresponde la inercia rotacional de la masa con respecto a dicho eje. Aquí también es conveniente que este eje pase por el centro de masas del nivel.

Debido a que resolver un problema estructural tridimensional requiere, en la fase inicial, almacenar un considerable número de coeficientes de rigideces o de masas asociados a los grados de libertad del sistema, es preciso contar con un método de almacenamiento eficaz que haga más simple el proceso de solución. Un método muy usado en los programas de cómputo más conocidos es el método de almacenamiento de columna activa, el mismo que se describe a continuación.

3.4 ENSAMBLE DE LAS MATRICES DE LA ESTRUCTURA Y EL MÉTODO DE ALMACENAMIENTO DE COLUMNA ACTIVA

El proceso de obtención de la matriz de rigidez \mathbf{K} de la estructura se puede escribir simbólicamente como:

$$\mathbf{K} = \sum_i \mathbf{K}_i \quad (3.9)$$

donde la matriz \mathbf{K}_i es la matriz de rigidez del i -ésimo elemento y la sumatoria involucra todos los elementos de la estructura. De manera similar se realiza el ensamble de la matriz de masas de la estructura y de los vectores de carga a partir de las matrices de masa y vectores de carga de los elementos, respectivamente. Las matrices de rigidez \mathbf{K}_i de los elementos en la ecuación (3.9) son del mismo orden que la matriz de rigidez \mathbf{K} de la estructura. Sin embargo, en las matrices \mathbf{K}_i los elementos distintos de cero sólo se encuentran en aquellas filas y columnas que corresponden a los grados de libertad de

los elementos (en un contexto local) asociados con los grados de libertad de la estructura (en un contexto global). Por lo tanto sólo se necesita almacenar una matriz de rigidez local compacta, la cual es de un orden igual al número de grados de libertad del elemento, junto con un arreglo que relaciona cada grado de libertad dado en un contexto local con el correspondiente grado de libertad dado en un contexto global.

Un método de almacenamiento para la matriz de rigidez global es guardar sólo los elementos que están por debajo del perfil de la matriz \mathbf{K} , es decir, las columnas activas de \mathbf{K} , en un arreglo unidimensional \mathbf{A} . Además se necesita un procedimiento de direccionamiento a la hora que los elementos de \mathbf{K} sean almacenados en \mathbf{A} . Así, antes de proceder con el ensamble de las matrices de rigidez locales es necesario establecer las direcciones o posiciones que tendrán los elementos de la matriz de rigidez global en el arreglo unidimensional \mathbf{A} .

En la Figura 3.3 se muestra una distribución típica de elementos en una matriz de rigidez.

Debido a que la matriz es simétrica sólo se necesita almacenar y trabajar en la parte superior incluyendo la diagonal principal. Se observa que los elementos k_{ij} son cero para $j > i + m_k$. El valor m_k se conoce como la mitad del ancho de banda de la matriz. Definiendo m_i como el número de fila del primer elemento distinto de cero en la columna i , las variables $m_i, i=1, \dots, n$, definen el perfil de la matriz, y las variables $(i - m_i)$ son las alturas de las columnas. Además, la mitad del ancho de banda m_k de la matriz de rigidez es igual a la máxima diferencia $(i - m_i), i=1, \dots, n$. En muchas ocasiones, las alturas de las columnas son muy diferentes y será importante que todos los elementos que son cero y están fuera del perfil no sean incluidos en la solución de las ecuaciones. No obstante, debe incluirse los elementos que son cero y se encuentran dentro del perfil de la matriz, ya que por lo general, adquieren un valor diferente de cero durante el proceso de reducción de la matriz.

cual almacena las direcciones que tienen los elementos de la diagonal principal de \mathbf{K} en \mathbf{A} . Así, la dirección del i -ésimo elemento de \mathbf{K} , k_{ii} , en \mathbf{A} es $\text{MAXA}(I)$. De acuerdo a la figura se observa que $\text{MAXA}(I)$ es igual a la suma de las alturas de columnas hasta la $(i-1)$ -ésima columna más I . El número de elementos distintos de cero en la columna i de \mathbf{K} es igual a $\text{MAXA}(I+1) - \text{MAXA}(I)$, y las direcciones de los elementos son $\text{MAXA}(I)$, $\text{MAXA}(I) + 1$, $\text{MAXA}(I) + 2$, ..., $\text{MAXA}(I+1) - 1$. Con este método de almacenamiento de \mathbf{K} en \mathbf{A} junto con el arreglo de direcciones MAXA cada elemento puede ser ubicado fácilmente.

El método de almacenamiento de columna activa descrito arriba es y ha sido empleado por los programas más comerciales de análisis estructural. La efectividad del método radica esencialmente en que los elementos fuera del perfil no son almacenados ni procesados durante la etapa de solución.

3.5 MODELO DE CÓMPUTO TRIDIMENSIONAL

Ya que los efectos de torsión real y accidental deben ser considerados en todas las estructuras, éstas deben ser tratadas como sistemas tridimensionales. Las estructuras con plantas irregulares, escalonamiento vertical y pisos blandos no causarán mayores problemas si se analizan con un modelo tridimensional. Este modelo debe ser desarrollado desde la primera etapa del diseño ya que puede ser usado tanto para cargas estáticas como para cargas dinámicas.

En la Figura 3.4 se muestra el ejemplo de un modelo estructural tridimensional empleado para el análisis dinámico de un edificio de once pisos ubicado en el distrito de La Molina.

Sólo deben modelarse los elementos estructurales con rigidez y ductilidad significativas. Pueden despreciarse las componentes no estructurales frágiles. No obstante, deformaciones axiales y de corte así como luces libres pueden ser

consideradas en todos los elementos sin un gran incremento en el esfuerzo de cómputo, tal como lo hacen los programas actuales. La aproximación de que una losa puede ser rígida en su plano ha sido aceptada para la mayoría de edificios. Además, para un análisis dinámico elástico es común considerar la sección bruta de concreto despreciando la rigidez del acero.

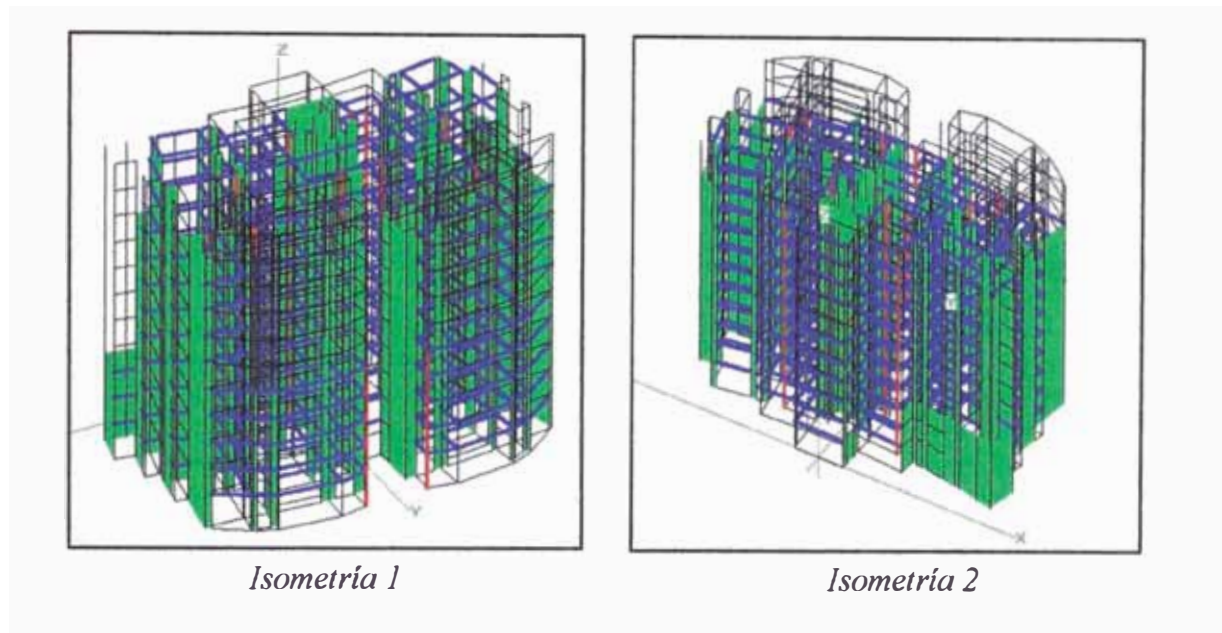


Figura 3.4 Modelo estructural tridimensional de un edificio de 11 pisos.

Los efectos P-Delta deben ser incluidos en todos los modelos estructurales. Estos efectos pueden ser considerados, sin necesidad de hacer iteraciones, tanto para cargas estáticas como para cargas dinámicas. Al incluir el efecto P-Delta en el análisis dinámico el periodo de vibración de cada modo sufre un pequeño incremento.

La masa de la estructura puede ser estimada con un alto grado de precisión. La suposición principal es que la carga viva debe ser incluida como una masa adherida. Para ciertos tipos de estructuras puede ser necesario llevar a cabo varios análisis con diferentes valores de masa. La suposición de usar masas concentradas ha demostrado ser muy precisa. En el caso de la aproximación del diafragma rígido, debe calcularse el momento de inercia rotacional de la masa.

La rigidez en la región de cimentación de la mayoría de estructuras puede ser modelada mediante elementos estructurales sin masa. Es importante también, modelar la rigidez de pilotes y la rigidez rotacional en la base de los muros de corte.

Debe ejecutarse primero un modelo de cómputo sólo con cargas estáticas, de modo que pueda verificarse las diferentes aproximaciones en el modelo mediante el equilibrio de simples patrones de carga estática. Los resultados de un análisis dinámico son generalmente complejos y las fuerzas obtenidas de un análisis con el método del espectro de respuesta son siempre positivas; por lo tanto, el equilibrio dinámico es casi imposible de verificar.

Un examen cuidadoso de las propiedades direccionales de las formas de modo tridimensionales en la fase inicial del diseño preliminar puede servir de mucha ayuda para mejorar el diseño sismorresistente de una estructura. Muchos códigos actuales definen una estructura irregular como aquella que tiene una geometría especial o aquella en la que existe discontinuidad de masa y/o rigidez. Una definición más racional es que una estructura regular es aquella en la que existe un acoplamiento mínimo entre los desplazamientos laterales y las rotaciones torsionales para las formas de modo asociadas con las frecuencias más bajas del sistema. Por consiguiente, si el modelo es modificado mediante el estudio de las formas de modo de la fase de diseño preliminar, es posible transformar una estructura geoméricamente irregular en una estructura dinámicamente regular desde un punto de vista de diseño sismorresistente.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS CON EL ESPECTRO DE RESPUESTA

4.1 INTRODUCCIÓN

El método básico de superposición modal, el cual está restringido a un análisis elástico lineal, produce la respuesta tiempo-historia completa de los desplazamientos de los nudos y fuerzas en los miembros debido a un movimiento del terreno específico. Existen dos desventajas importantes en el empleo de esta aproximación. Primero, el método produce una gran cantidad de información de salida la cual requiere un enorme incremento en el esfuerzo de cómputo para realizar todas las verificaciones posibles como función del tiempo. Segundo, el análisis debe ser repetido para varios movimientos sísmicos para garantizar que todas las frecuencias sean excitadas, ya que el espectro de respuesta para un sismo dado en una dirección específica no es una función suavizada.

Existen significativas ventajas de cómputo al usar el método del espectro de respuesta para la predicción de desplazamientos y fuerzas en los miembros en sistemas estructurales. El método involucra el cálculo sólo de los máximos valores de desplazamientos y fuerzas en los miembros para cada modo usando un espectro de diseño suavizado, el cual es el promedio de varios movimientos sísmicos.

El método del espectro de respuesta tiene muchas aproximaciones y limitaciones. Por ejemplo, no puede ser usado para aproximar la respuesta no lineal de sistemas estructurales tridimensionales complejos.

4.2 DEFINICIÓN DEL MÉTODO DEL ESPECTRO DE RESPUESTA

Para un movimiento sísmico tridimensional la ecuación es la siguiente:

$$\ddot{y}(t)_n + 2\xi_n \omega_n \dot{y}(t)_n + \omega_n^2 y(t)_n = p_{nx} \ddot{u}(t)_{gx} + p_{ny} \ddot{u}(t)_{gy} + p_{nz} \ddot{u}(t)_{gz} \quad (4.1)$$

donde los 3 Factores de Participación Modal son definidos por $p_{ni} = -\Phi_n^T M_i$ en la que $i=x,y,z$.

Dos problemas importantes deben ser resueltos para obtener una solución del espectro de respuesta. Primero, para cada dirección del movimiento sísmico deben estimarse las máximas fuerzas y desplazamientos. Segundo, después que la respuesta para las tres direcciones ortogonales es resuelta es necesario estimar la máxima respuesta debido a las tres componentes del movimiento sísmico actuando al mismo tiempo.

Para la entrada en una sola dirección la ecuación anterior se puede escribir así:

$$\ddot{y}(t)_n + 2\xi_n \omega_n \dot{y}(t)_n + \omega_n^2 y(t)_n = p_m \ddot{u}(t)_g \quad (4.2)$$

Dado un movimiento sísmico $\ddot{u}(t)_g$, el coeficiente de amortiguamiento y suponiendo $p_m = -1.0$ es posible resolver la ecuación (4.2) para varios valores de ω y plotear una curva de la respuesta máxima $y(\omega)_{MAX}$. Para esta entrada de aceleración, la curva es por definición *el espectro de respuesta de desplazamientos* para ese movimiento sísmico. Habrá una curva diferente para cada valor de amortiguamiento.

Un ploteo de $\omega y(\omega)_{MAX}$ es definido como el espectro de pseudovelocidades y un ploteo de $\omega^2 y(\omega)_{MAX}$ es definido como el espectro de pseudoaceleraciones. Estas tres curvas se grafican normalmente en un papel trilogarítmico. Sin embargo, estas pseudoaceleraciones tienen un mínimo significado físico y no son una parte esencial en un análisis con el método del espectro de respuesta. Los valores máximos reales de velocidad y aceleración deben ser calculados a partir de la solución de la ecuación (4.2).

Hay una relación matemática, sin embargo, entre el espectro de pseudoaceleración y el espectro de la aceleración absoluta. La aceleración absoluta de la masa unitaria, del sistema de un grado de libertad, gobernado por la ecuación (4.2) está dada por:

$$\ddot{u}(t)_T = \ddot{y}(t) + \ddot{u}(t)_g \quad (4.3)$$

La ecuación (4.2) puede ser resuelta para $y(t)$ y sustituirla en la ecuación (4.3) que conduce a:

$$\ddot{u}(t)_T = -\omega^2 y(t) - 2\xi\omega\dot{y}(t) \quad (4.4)$$

Por lo tanto, para el caso especial de amortiguamiento cero, la aceleración total del sistema es igual a $\omega^2 y(t)$. Por esta razón, la curva del espectro de respuesta de desplazamientos normalmente no es ploteada como el desplazamiento modal $y(\omega)_{MAX}$ vs. ω . Es mejor presentar la curva en términos de $S(\omega)$ vs. un período T en segundos. Donde:

$$S(\omega)_a = \omega^2 y(\omega)_{MAX} \quad (4.5)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (4.6)$$

La curva del espectro de pseudoaceleraciones $S(\omega)_a$ tiene unidades de aceleración vs. período la cual tiene significado físico sólo para amortiguamiento cero. Es evidente que todas las curvas de espectros de respuesta representan las propiedades del sismo en un lugar específico y no son función de las propiedades del sistema estructural. Después de hacer una estimación de las propiedades de amortiguamiento viscoso lineal de la estructura, se selecciona una curva específica de espectro de respuesta.

4.3 CÁLCULO DE LA RESPUESTA MODAL

El máximo desplazamiento modal, para un modelo estructural, puede ser calculado para un modo n con período T_n y valor espectral correspondiente $S(\omega_n)$. La máxima respuesta modal asociada al período T_n está dada por:

$$y(T_n)_{MAX} = \frac{S(\omega_n)}{\omega_n^2} \quad (4.7)$$

La respuesta máxima del desplazamiento modal del modelo estructural es calculada mediante:

$$u_n = y(T_n)_{MAX} \phi_n \quad (4.8)$$

Las correspondientes fuerzas modales internas, f_{kn} , pueden ser calculadas a partir del análisis matricial de estructuras empleando las mismas ecuaciones requeridas para el análisis estático.

4.4 EL MÉTODO CQC PARA COMBINACIÓN MODAL

El método más conservador que se usa para estimar un valor pico de desplazamiento o fuerza en una estructura es la Suma de los Valores Absolutos (Sum Abs) de las respuestas modales. Esta aproximación supone que los máximos valores modales, para todos los modos, ocurren al mismo instante.

Otra aproximación muy común es la Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (SRSS) de los máximos valores modales para determinar los valores de desplazamientos o fuerzas. El método SRSS supone que todos los máximos valores modales son estadísticamente independientes. Para estructuras tridimensionales, en las cuales un gran número de frecuencias son casi idénticas, esta suposición no está bien justificada.

Un método relativamente nuevo para combinación modal es la Combinación Cuadrática Completa (CQC), método publicado por primera vez en 1981. Está basado en teorías de vibración aleatoria y ha encontrado una amplia aceptación por muchos ingenieros, de modo tal que ha sido incorporado como una opción en los más recientes programas de cómputo para el análisis sísmico.

El valor pico de una fuerza puede estimarse de los máximos valores modales, con el método CQC, mediante la siguiente ecuación:

$$F = \sqrt{\sum_n \sum_m f_n \rho_{nm} f_m} \quad (4.9)$$

donde f_n es la fuerza modal asociada al modo n . La doble sumatoria es realizada a lo largo de todos los modos. Ecuaciones similares pueden ser aplicadas a desplazamientos nodales, desplazamientos relativos, cortantes en la base y momentos de volteo.

Los coeficientes ρ_{nm} con amortiguamiento constante son:

$$\rho_{nm} = \frac{8\xi^2(1+r)r^{3/2}}{(1-r^2)^2 + 4\xi^2r(1+r^2)} \quad (4.10)$$

donde $r = \omega_n / \omega_m$ y debe ser igual o menor que 1.0. Es importante notar que el arreglo de coeficientes ρ_{nm} es simétrico y que todos los términos son positivos.

4.5 EJEMPLO NUMÉRICO DE COMBINACIÓN MODAL

El ejemplo del edificio de 4 pisos planteado a continuación muestra los problemas asociados al uso de la Suma de Valores Absolutos (Sum Abs) y de la Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (SRSS) para combinación modal. Se trata de un edificio geoméricamente simétrico, en el cual, el centro de masas, en todos los niveles, está ubicado 75 cm del centro geométrico del edificio (ver Figura 4.1). El análisis es efectuado sólo para una dirección de excitación.

Datos adicionales comunes a los 4 pisos:

Material: Concreto armado
 $f_c = 280 \text{ kg/cm}^2$, $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$

Secciones: Columnas $0.60 \times 0.60 \text{ m}^2$
Vigas $0.30 \times 0.60 \text{ m}^2$

Masas: $M = 25,000 \text{ kg-s}^2/\text{m}$
 $I_0 = 937,500 \text{ kg-m-s}^2$

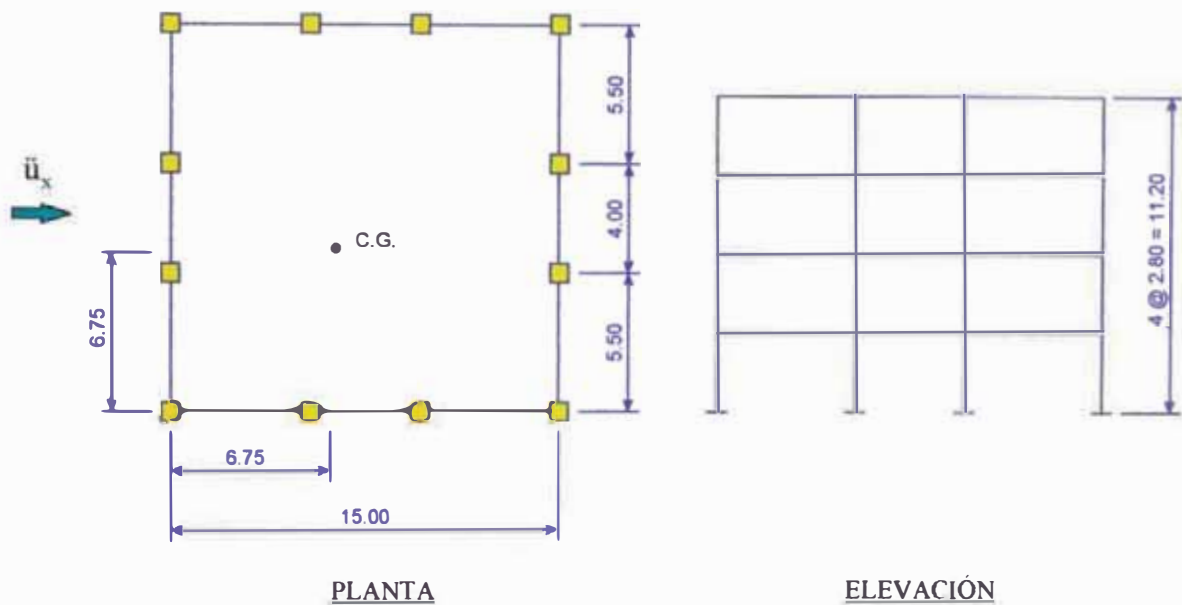


Figura 4.1 Esquema del edificio de 4 pisos para el ejemplo de combinación modal.
Las dimensiones están en metros.

Las propiedades dinámicas de la estructura fueron evaluadas con ayuda del programa ETABS. Los resultados se muestran en las Tablas 4.1 a 4.5. Sin embargo, hay otras cantidades calculadas por el programa como factores de participación modal, factores de dirección modal y factores modales de masa efectiva, también útiles para examinar a priori el comportamiento dinámico de una estructura. A continuación se describe el significado, uso y obtención de estos factores.

4.5.1 FACTORES DE PARTICIPACIÓN MODAL

Cuando las formas de modo están normalizadas con la matriz de masas, los factores de participación modal correspondientes a las direcciones X, Y y Θ_Z para un modo cualquiera se definen como:

$$FPM_X = \sum M\Phi_X \quad (4.11)$$

$$FPM_Y = \sum M\Phi_Y \quad (4.12)$$

$$FPM_{\Theta_Z} = \sum M_{\Theta}\Phi_{\Theta_Z} \quad (4.13)$$

donde M representa las masas traslacionales, Φ_X representa las componentes traslacionales X de la forma de modo, Φ_Y representa las componentes traslacionales Y de la forma de modo, M_{Θ} representa los momentos de inercia de las masas, y Φ_{Θ_Z} representa las componentes rotacionales de la forma de modo.

Las sumatorias se efectúan sobre todos los pisos.

4.5.2 FACTORES DE DIRECCIÓN MODAL

A través de los factores de dirección modal se identifica la dirección predominante de excitación relacionada con cada modo. Los factores son porcentajes asociados a las direcciones traslacionales X e Y y rotacional Z. La suma de los 3 valores siempre sumará 100%.

Los factores para un modo cualquiera están dados por:

$$\%X = 100 \sum M\Phi_X^2 \quad (4.14)$$

$$\%Y = 100 \sum M\Phi_Y^2 \quad (4.15)$$

$$\%Z = 100 \sum M_{\Theta} \Phi_{\Theta Z}^2 \quad (4.16)$$

Además:

$$\sum M\Phi^2 = \sum M\Phi_X^2 + \sum M\Phi_Y^2 + \sum M\Phi_{\Theta Z}^2 \quad (4.17)$$

Aquí también, las sumatorias se efectúan sobre todos los pisos.

4.5.3 FACTORES MODALES DE MASA EFECTIVA

Por medio de los factores modales de masa efectiva se identifica el porcentaje de la masa total que es movilizada por cada uno de los modos cuando una estructura está sujeta a un espectro de respuesta unitario constante aplicado en una dirección global determinada.

Estos factores, para un modo cualquiera, son calculados a partir de los factores de participación modal como sigue:

$$FME_X = 100 \frac{(FPM_X)^2}{\sum M} \quad (4.18)$$

$$FME_Y = 100 \frac{(FPM_Y)^2}{\sum M} \quad (4.19)$$

$$FME_{\Theta Z} = 100 \frac{(FPM_{\Theta Z})^2}{\sum M_{\Theta Z}} \quad (4.20)$$

Esta información es de gran ayuda para determinar el número de modos que debe ser incluido en la implementación de un análisis dinámico. Se recomienda que el porcentaje acumulado de masa efectiva de todos los modos incluidos en el análisis no debe ser menor de 90% para cualquier dirección de excitación. Si se incluyen todos los modos, la suma de los porcentajes de masa para cada dirección será igual a 100%.

| Modo | Período T (s) | Frecuencia ω (rad/s) |
|------|------------------|--------------------------------|
| 1 | 0.4643 | 13.534 |
| 2 | 0.4607 | 13.640 |
| 3 | 0.2686 | 23.391 |
| 4 | 0.1336 | 47.023 |
| 5 | 0.1325 | 47.427 |
| 6 | 0.0797 | 78.855 |
| 7 | 0.0645 | 97.459 |
| 8 | 0.0638 | 98.421 |
| 9 | 0.0404 | 155.563 |
| 10 | 0.0401 | 156.766 |
| 11 | 0.0399 | 157.434 |
| 12 | 0.0257 | 244.482 |

Tabla 4.1 Periodos y Frecuencias de vibración.

| Modo | FPM _x | FPM _y | FPM _{ez} |
|------|------------------|------------------|-------------------|
| 1 | 200.709 | -200.709 | 156.524 |
| 2 | 201.473 | 201.473 | 0.000 |
| 3 | 17.431 | -17.431 | -1755.545 |
| 4 | -78.560 | 78.560 | -54.025 |
| 5 | -78.877 | -78.877 | 0.000 |
| 6 | -6.702 | 6.702 | 654.890 |
| 7 | 49.144 | -49.144 | 31.625 |
| 8 | 49.345 | 49.345 | 0.000 |
| 9 | -23.233 | 23.233 | -173.043 |
| 10 | -15.161 | 15.161 | 364.370 |
| 11 | -27.424 | -27.424 | 0.000 |
| 12 | -3.291 | 3.291 | 219.207 |

Tabla 4.2 Factores de Participación Modal.

| Modo | Dirección | | |
|------|-----------|--------|------------|
| | %X | %Y | % Θ |
| 1 | 49.605 | 49.605 | 0.790 |
| 2 | 50.000 | 50.000 | 0.000 |
| 3 | 0.396 | 0.396 | 99.207 |
| 4 | 49.522 | 49.522 | 0.955 |
| 5 | 50.000 | 50.000 | 0.000 |
| 6 | 0.495 | 0.495 | 99.010 |
| 7 | 49.351 | 49.351 | 1.299 |
| 8 | 50.000 | 50.000 | 0.000 |
| 9 | 42.602 | 42.602 | 14.797 |
| 10 | 7.288 | 7.288 | 85.425 |
| 11 | 50.000 | 50.000 | 0.000 |
| 12 | 0.741 | 0.741 | 98.518 |

Tabla 4.3 Factores de Dirección Modal.

| Modo | FME _x | | FME _y | | FME _{θz} | |
|------|------------------|-----------|------------------|-----------|--------------------------------------|-----------|
| | Parcial | Acumulado | Parcial | Acumulado | Parcial | Acumulado |
| 1 | 40.28 | 40.30 | 40.28 | 40.30 | 0.65 | 0.70 |
| 2 | 40.59 | 80.90 | 40.59 | 80.90 | 0.00 | 0.70 |
| 3 | 0.30 | 81.20 | 0.30 | 81.20 | 82.19 | 82.80 |
| 4 | 6.17 | 87.40 | 6.17 | 87.40 | 0.08 | 82.90 |
| 5 | 6.22 | 93.60 | 6.22 | 93.60 | 0.00 | 82.90 |
| 6 | 0.04 | 93.60 | 0.04 | 93.60 | 11.44 | 94.40 |
| 7 | 2.42 | 96.00 | 2.42 | 96.00 | 0.03 | 94.40 |
| 8 | 2.43 | 98.50 | 2.43 | 98.50 | 0.00 | 94.40 |
| 9 | 0.54 | 99.00 | 0.54 | 99.00 | 0.80 | 95.20 |
| 10 | 0.23 | 99.20 | 0.23 | 99.20 | 3.54 | 98.70 |
| 11 | 0.75 | 100.00 | 0.75 | 100.00 | 0.00 | 98.70 |
| 12 | 0.01 | 100.00 | 0.01 | 100.00 | 1.28 | 100.00 |

Tabla 4.4 Factores de Masa Efectiva.

| Nivel | Dirección | Modo | | | | | |
|-------|-----------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 4to | X | 0.00319 | 0.00321 | 0.00030 | 0.00259 | 0.00260 | 0.00028 |
| | Y | -0.00319 | 0.00321 | -0.00030 | -0.00259 | 0.00260 | -0.00028 |
| | ⊖ | 0.00006 | 0.00000 | -0.00072 | 0.00006 | 0.00000 | -0.00060 |
| 3ro | X | 0.00256 | 0.00257 | 0.00022 | -0.00086 | -0.00087 | -0.00014 |
| | Y | -0.00256 | 0.00257 | -0.00022 | 0.00086 | -0.00087 | 0.00014 |
| | ⊖ | 0.00005 | 0.00000 | -0.00059 | -0.00001 | 0.00000 | 0.00016 |
| 2do | X | 0.00165 | 0.00165 | 0.00013 | -0.00294 | -0.00296 | -0.00028 |
| | Y | -0.00165 | 0.00165 | -0.00013 | 0.00294 | -0.00296 | 0.00028 |
| | ⊖ | 0.00004 | 0.00000 | -0.00040 | -0.00006 | 0.00000 | 0.00067 |
| 1ro | X | 0.00063 | 0.00063 | 0.00004 | -0.00192 | -0.00193 | -0.00013 |
| | Y | -0.00063 | 0.00063 | -0.00004 | 0.00192 | -0.00193 | 0.00013 |
| | ⊖ | 0.00001 | 0.00000 | -0.00016 | -0.00004 | 0.00000 | 0.00047 |

| Nivel | Dirección | Modo | | | | | |
|-------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 4to | X | 0.00157 | 0.00158 | 0.00069 | 0.00008 | 0.00068 | 0.00008 |
| | Y | -0.00157 | 0.00158 | -0.00069 | -0.00008 | 0.00068 | -0.00008 |
| | ⊖ | 0.00005 | 0.00000 | -0.00012 | 0.00036 | 0.00000 | -0.00017 |
| 3ro | X | -0.00287 | -0.00289 | -0.00203 | -0.00046 | -0.00207 | -0.00026 |
| | Y | 0.00287 | -0.00289 | 0.00203 | 0.00046 | -0.00207 | 0.00026 |
| | ⊖ | -0.00008 | 0.00000 | 0.00019 | -0.00063 | 0.00000 | 0.00049 |
| 2do | X | 0.00027 | 0.00027 | 0.00269 | 0.00104 | 0.00291 | 0.00035 |
| | Y | -0.00027 | 0.00027 | -0.00269 | -0.00104 | 0.00291 | -0.00035 |
| | ⊖ | -0.00001 | 0.00000 | 0.00007 | 0.00005 | 0.00000 | -0.00067 |
| 1ro | X | 0.00300 | 0.00301 | -0.00228 | -0.00127 | -0.00261 | -0.00031 |
| | Y | -0.00300 | 0.00301 | 0.00228 | 0.00127 | -0.00261 | 0.00031 |
| | ⊖ | 0.00007 | 0.00000 | -0.00032 | 0.00062 | 0.00000 | 0.00058 |

Tabla 4.5 Formas de Modo de vibración. Se observa que cada forma de modo tiene tres componentes por piso.

En los resultados presentados anteriormente se identifica frecuencias de vibración muy cercanas entre sí, lo cual es típico en la mayoría de estructuras de edificios que serán diseñadas para resistir por igual el sismo actuando en ambas direcciones principales. Debido a la excentricidad del sistema, lo cual es común en estructuras reales, las formas de modo fundamentales tienen componentes X, Y además de una torsional. Asimismo se observa que no existe una forma de modo en una dirección particular dada como se especifica en muchos códigos de edificaciones.

El edificio estuvo sujeto a la componente N82W del sismo de Lima-Perú, de 1974. El registro de aceleraciones se presenta en la Figura 4.2, y los espectros de respuesta de desplazamientos y pseudoaceleraciones, para tal registro sísmico, se muestran en las Figuras 4.3 y 4.4, respectivamente. Se llevó a cabo un análisis tiempo-historia (ATH) con los 12 modos de vibración, y un análisis con el espectro de respuesta. En la Tabla 4.6 se muestra los cortantes basales para los primeros 5 modos.

La Tabla 4.7 resume los resultados obtenidos para el cortante basal máximo luego de emplear diferentes técnicas de combinación modal. Los cortantes basales del análisis tiempo-historia (ATH) son “exactos”. El método SRSS subestima los valores de cortantes en la dirección de las cargas y sobrestima los cortantes en la dirección perpendicular a la aplicación de las cargas. La Suma de los Valores Absolutos (Sum Abs) sobrestima severamente ambos resultados. El método CQC produce valores más reales que se acercan a la solución tiempo-historia.

REGISTRO SÍSMICO DE ACELERACIONES
COMP. N82W, LIMA-PERÚ, 1974. $A_{MAX} = 192.5$ GALS, $\Delta t = 0.02$ s.

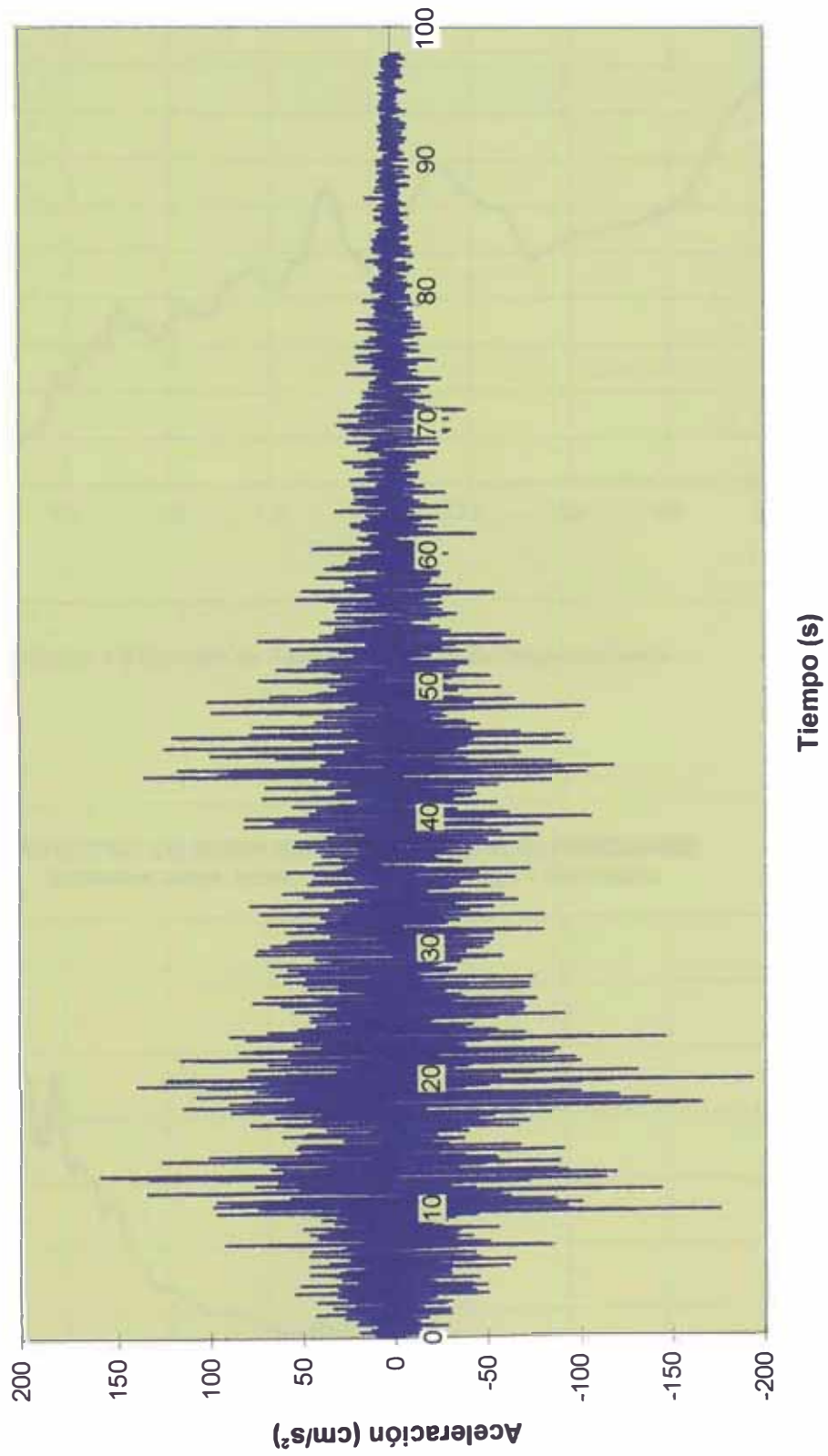


Figura 4.2



Figura 4.3 Espectro de Respuesta Elástico de Desplazamientos.

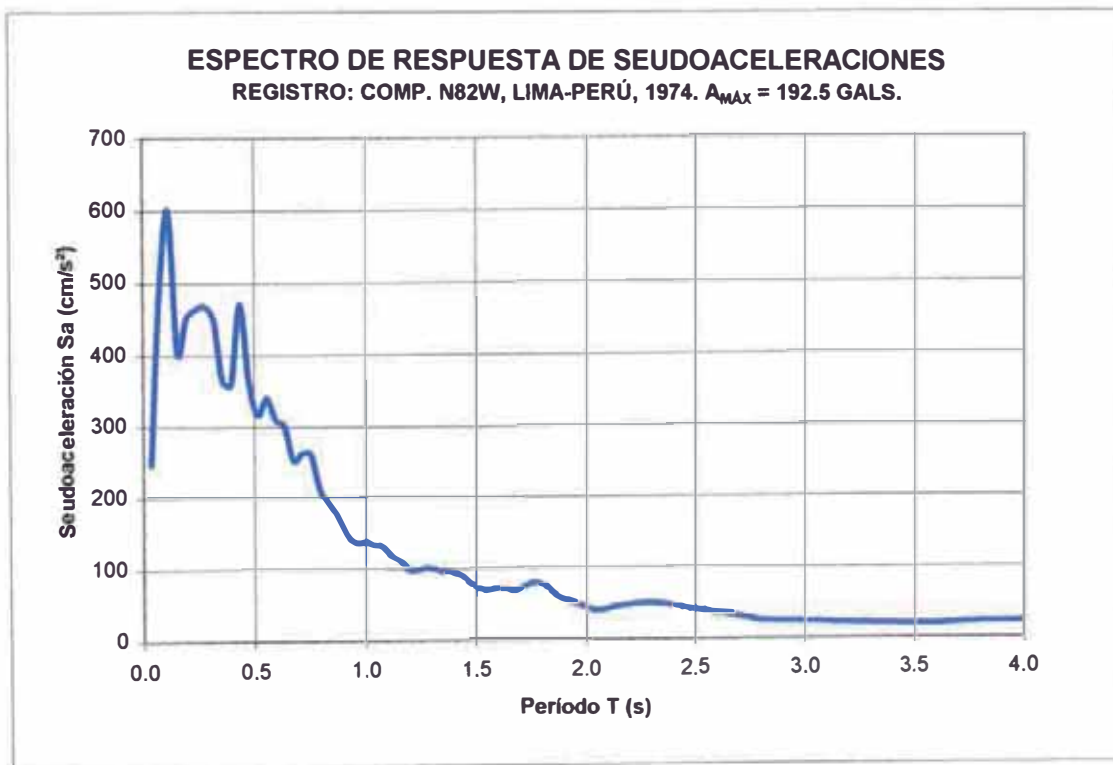


Figura 4.4 Espectro de Respuesta Elástico de Seudoaceleraciones.

| Modo | Cortante Basal (ton) | |
|------|----------------------|-------------|
| | Dirección X | Dirección Y |
| 1 | 169.9 | -169.9 |
| 2 | 174.3 | 174.3 |
| 3 | 1.5 | -1.5 |
| 4 | 26.8 | -26.8 |
| 5 | 27.8 | 27.8 |

Tabla 4.6 Cortantes Basales para los primeros cinco modos.

| Método | Cortante Basal Máximo (ton) | |
|---------|-----------------------------|-------------|
| | Dirección X | Dirección Y |
| ATH | 315.3 | 15.1 |
| SRSS | 246.4 | 246.4 |
| Sum Abs | 400.4 | 400.4 |
| CQC | 348.3 | 19.7 |

Tabla 4.7 Comparación entre Cortantes Basales Máximos obtenidos mediante diferentes métodos de combinación modal.

Ya que el Reglamento Peruano de Diseño Sismorresistente no contemplaba el uso del método de la Combinación Cuadrática Completa (CQC) sino hasta su última versión, en 1997, es posible encontrar cierta dificultad al emplear dicho método. Aquí se pretende detallar el procedimiento de la técnica de combinación modal CQC para la obtención de los cortantes basales de la Tabla 4.7. Las fórmulas empleadas fueron incluidas en el ítem 4.4.

La sumatoria, de las Tablas 4.9 y 4.10, involucra los 25 valores (en fondo blanco) asociados a los 5 modos. El valor del cortante basal máximo se obtiene de la raíz cuadrada de dicha sumatoria.

| Modo | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | ω_n (rad/s) | 13.534 | 13.640 | 23.391 | 47.023 | 47.427 |
| 1 | 13.534 | 1.000 | 0.994 | 0.030 | 0.005 | 0.005 |
| 2 | 13.640 | 0.994 | 1.000 | 0.031 | 0.005 | 0.005 |
| 3 | 23.391 | 0.030 | 0.031 | 1.000 | 0.018 | 0.018 |
| 4 | 47.023 | 0.005 | 0.005 | 0.018 | 1.000 | 0.993 |
| 5 | 47.427 | 0.005 | 0.005 | 0.018 | 0.993 | 1.000 |

Tabla 4.8 Coeficientes de correlación modal (ρ_{nm}) obtenidos para un coeficiente de amortiguamiento constante $\xi=5\%$.

| Modo | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------|------------|----------|---------|-----|-------|-------|
| | V_{Bx_n} | 169.9 | 174.3 | 1.5 | 26.8 | 27.8 |
| 1 | 169.9 | 28872.9 | 29430.1 | 7.8 | 21.4 | 21.9 |
| 2 | 174.3 | 29430.1 | 30363.1 | 8.2 | 22.3 | 22.8 |
| 3 | 1.5 | 7.8 | 8.2 | 2.3 | 0.7 | 0.7 |
| 4 | 26.8 | 21.4 | 22.3 | 0.7 | 719.8 | 741.7 |
| 5 | 27.8 | 21.9 | 22.8 | 0.7 | 741.7 | 775.6 |
| Σ | | 121288.9 | | | | |
| V_{Bx} (ton) | | 348.3 | | | | |

Tabla 4.9 Cálculo del cortante basal máximo en la dirección X.

| Modo | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------|------------|----------|----------|------|--------|--------|
| | V_{By_n} | -169.9 | 174.3 | -1.5 | -26.8 | 27.8 |
| 1 | -169.9 | 28872.9 | -29430.1 | 7.8 | 21.4 | -21.9 |
| 2 | 174.3 | -29430.1 | 30363.1 | -8.2 | -22.3 | 22.8 |
| 3 | -1.5 | 7.8 | -8.2 | 2.3 | 0.7 | -0.7 |
| 4 | -26.8 | 21.4 | -22.3 | 0.7 | 719.8 | -741.7 |
| 5 | 27.8 | -21.9 | 22.8 | -0.7 | -741.7 | 775.6 |
| Σ | | 389.2 | | | | |
| V_{By} (ton) | | 19.7 | | | | |

Tabla 4.10 Cálculo del cortante basal máximo en la dirección Y.

4.6 EFECTOS ORTOGONALES EN EL ANÁLISIS ESPECTRAL

Una estructura bien diseñada debe ser capaz de resistir movimientos sísmicos provenientes de todas las direcciones posibles. Una opción en los códigos de edificación y de puentes existentes señala que los miembros deben ser diseñados para resistir el 100% de las fuerzas sísmicas prescritas actuando en una dirección más el 30% de las fuerzas prescritas actuando en la dirección perpendicular. Otros códigos y organizaciones requieren el uso del 40% en vez del 30%. Sin embargo, ellos no indican la forma en que se determinan tales direcciones para estructuras complejas.

Para estructuras de forma rectangular y que tienen claramente definidas sus direcciones principales estas reglas de porcentaje conducen aproximadamente a los mismos resultados que el método SRSS.

Para estructuras tridimensionales complejas tales como edificios no rectangulares, puentes curvos, presas de arco o sistemas de tuberías, la dirección del sismo que produce los máximos esfuerzos, en un miembro en particular o en un punto específico, no es muy obvio. Para una entrada tiempo-historia, es posible realizar un gran número de análisis dinámicos con varios ángulos de entrada para verificar todos los puntos bajo las direcciones sísmicas críticas. Ese estudio tan elaborado podría producir una dirección crítica diferente para cada esfuerzo evaluado. Además, el costo de tal estudio sería excesivo.

Es razonable suponer que los movimientos que tienen lugar durante un sismo tienen una dirección principal. O que, durante un período finito de tiempo, cuando la máxima aceleración del terreno ocurre, existe una dirección principal. Para la mayoría de estructuras esta dirección no es conocida y, para la mayor parte de las localidades geográficas, no puede ser estimada. No obstante, el único criterio racional de diseño sísmico es que la estructura debe resistir un sismo de una magnitud dada actuando en cualquier dirección posible. Además del movimiento en la dirección principal, existe la probabilidad que un movimiento normal a tal dirección ocurra simultáneamente.

Debido a la naturaleza compleja de la propagación de ondas tridimensionales, es válido suponer que estos movimientos normales son estadísticamente independientes.

Bajo estas suposiciones, un criterio de diseño es “una estructura debe resistir un movimiento sísmico principal de magnitud S_1 para todos los ángulos θ posibles y, al mismo instante, resistir movimientos sísmicos de magnitud S_2 a 90° del ángulo θ ”.

4.6.1 ECUACIONES BÁSICAS PARA EL CÁLCULO DE FUERZAS ESPECTRALES

El criterio de diseño planteado implica que deben efectuarse un gran número de análisis para determinar las máximas fuerzas de diseño y esfuerzos. En esta parte se mostrará que los máximos valores para todos los miembros pueden ser exactamente determinados con una sola corrida de un programa de cómputo en la cual se aplican dos cargas dinámicas globales. Además las fuerzas máximas en los miembros serán invariantes con respecto al sistema elegido.

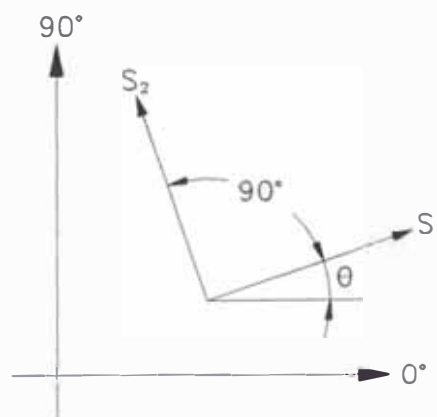


Figura 4.5 Definición del Espectro Sísmico de Entrada.

La Figura 4.5 muestra la aplicación de dos espectros básicos de entrada S_1 y S_2 bajo un ángulo arbitrario θ . En un punto de la estructura, una fuerza, esfuerzo o desplazamiento F es producido por esta entrada. Para simplificar el análisis se supondrá que el espectro secundario de entrada es una fracción del espectro principal de entrada. Es decir:

$$S_2 = aS_1 \quad (4.21)$$

donde “a” es un número entre 0 y 1.

Una solución general a este problema fue presentada en 1985 por Smeby y Der Kiureghian. Recientemente, Menun y Der Kiureghian presentaron el método CQC3 para la combinación de los efectos de espectros ortogonales.

La ecuación CQC3 fundamental para la estimación de un valor pico es:

$$F = [F_0^2 + a^2 F_{90}^2 - (1 - a^2)(F_0^2 - F_{90}^2)\text{sen}^2\theta - 2(1 - a^2)F_{0-90}\text{sen}\theta \cos\theta + F_Z^2]^{1/2} \quad (4.22)$$

donde:

$$F_0^2 = \sum_n \sum_m f_{0n} \rho_{nm} f_{0m} \quad (4.23)$$

$$F_{90}^2 = \sum_n \sum_m f_{90n} \rho_{nm} f_{90m} \quad (4.24)$$

$$F_{0-90} = \sum_n \sum_m f_{0n} \rho_{nm} f_{90m} \quad (4.25)$$

$$F_Z^2 = \sum_n \sum_m f_{zn} \rho_{nm} f_{zm} \quad (4.26)$$

en las cuales f_{0n} y f_{90n} son los valores modales producidos por el 100% del espectro lateral aplicado a 0° y 90° respectivamente y f_{zn} es la respuesta modal del espectro vertical el cual puede ser diferente del espectro lateral.

Es importante notar que para espectros iguales ($a=1$) el valor F no es función de θ y la elección del sistema de referencia para el análisis es arbitraria. Es decir:

$$F_{MAX} = \sqrt{F_0^2 + F_{90}^2 + F_z^2} \quad (4.27)$$

Esto indica que es posible realizar sólo un análisis, con cualquier sistema de referencia, y la estructura resultante tendrá todos sus miembros diseñados para resistir igualmente movimientos sísmicos provenientes de todas las direcciones posibles.

4.6.2 EL MÉTODO GENERAL CQC3

Para $a=1$ el método CQC3 se reduce al método SRSS. Sin embargo, esto puede ser muy conservador ya que no han sido registrados movimientos reales del terreno del mismo valor en todas las direcciones. Normalmente, el valor θ en la ecuación (4.22) no es conocido; por lo tanto es necesario calcular el ángulo crítico que produzca la máxima respuesta. Derivando la ecuación (4.22) e igualando a cero el resultado se obtiene:

$$\theta_{cr} = -\frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2F_{0-90}}{F_0^2 - F_{90}^2}\right) \quad (4.28)$$

Existen dos raíces para la ecuación (4.28) las cuales deben verificarse para que la siguiente ecuación sea máxima:

$$F_{MAX} = [F_0^2 + a^2 F_{90}^2 - (1 - a^2)(F_0^2 - F_{90}^2) \sin^2 \theta_{cr} - 2(1 - a^2) F_{0-90} \sin \theta_{cr} \cos \theta_{cr} + F_z^2]^{1/2} \quad (4.29)$$

Sin embargo, hasta el momento no se han sugerido valores específicos para “a”.

4.6.3 RECOMENDACIONES SOBRE EFECTOS ORTOGONALES

Para el análisis con el método del espectro de respuesta tridimensional el diseño de elementos para el 100% de las fuerzas sísmicas prescritas en una dirección más el 30% ó 40% de las fuerzas prescritas aplicadas en la dirección perpendicular depende del sistema de referencia elegido. Estas reglas de combinación de porcentajes son empíricas y pueden subestimar las fuerzas de diseño en ciertos miembros por tanto producir un diseño relativamente débil en una dirección. El método mejorado, en el que una combinación SRSS del análisis de dos espectros al 100% con respecto a dos ejes ortogonales cualquiera, produce fuerzas de diseño que no son función del sistema de referencia, por lo tanto el diseño estructural tiene igual resistencia a movimientos sísmicos actuantes en cualquier dirección.

El método CQC3 debe ser usado si un valor de “a” menor que 1.0 es justificado. Esto producirá resultados reales que no dependan del sistema de referencia elegido.

CAPÍTULO 5

ESTUDIO DEL EFECTO SÍSMICO EN EDIFICACIONES CON UN PISO BLANDO

5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Como se mencionó en el Capítulo 2, el piso blando se genera cuando hay una discontinuidad significativa de resistencia y rigidez entre la estructura vertical de un piso y el resto de la estructura. El problema principal del piso blando es que la mayor parte de las fuerzas sísmicas de un edificio, y cualquier deformación estructural consecuente, tienden a concentrarse en el piso menos rígido en vez de distribuirse de manera más uniforme entre todos los pisos. El objetivo de este estudio es: primero, investigar en qué medida, este problema de configuración, influye en el comportamiento sísmico de edificaciones comunes (uso de oficinas o departamentos) ubicadas en zonas de alto riesgo sísmico y, segundo, encontrar alternativas para atenuar los efectos negativos originados por tal discontinuidad.

Como primer paso se planteó realizar el estudio de tres grupos de modelos tridimensionales, que se definieron de la siguiente manera: modelos de 4 pisos, modelos de 8 pisos y modelos de 12 pisos.

El análisis sísmico realizado para todos los modelos fue del tipo dinámico tridimensional, con el método del espectro de respuesta, y para la obtención de los desplazamientos espectrales se empleó la Combinación Cuadrática Completa (CQC) de las formas de modo de vibración.

Como herramienta de análisis se utilizó el programa de cómputo ETABS, creado en la Universidad de California, Berkeley. En lo que a ejecución del programa se refiere, todo el trabajo se realizó en el Centro de Cómputo del CISMID.

Esta investigación tomó en cuenta las consideraciones establecidas en la Norma Técnica de Edificación E.030 de Diseño Sismorresistente de 1997 (NTE E.030). En algunos casos se realizó el análisis sísmico de acuerdo al Reglamento Nacional de Construcciones de 1977 (RNC77).

En una primera fase, luego de haber predimensionado los elementos de 3 estructuras netamente aporticadas y sin discontinuidades, de 4, 8 y 12 pisos, se efectuó el análisis dinámico para verificar que los desplazamientos de entrepisos se encuentren dentro de los límites tolerables por el reglamento. Como las secciones de los elementos resultaban insuficientes se fue alterando gradualmente sus dimensiones hasta conseguir un modelo, de cada grupo, que cumpla con los requerimientos del nuevo reglamento. Este modelo fue denominado *modelo patrón*. Es decir, hasta aquí, se tenían 3 modelos patrón: uno de 4 pisos, otro de 8 pisos y el último de 12 pisos. Todos conformaban sistemas netamente aporticados y no presentaban, aún, el problema del piso blando.

Para estudiar el efecto sísmico del piso blando se le impuso una menor rigidez a uno de los pisos de cada modelo patrón. Se eligió el primer piso, por considerarse el más crítico en contribuir a la falla total de la edificación. Esta disminución de rigidez se podía lograr de muchas maneras. En este trabajo se planteó conseguirla mediante un exagerado incremento en la altura del primer nivel.

Se consideró que la nueva altura llegaría a ser como máximo el doble de la altura original del primer nivel. Nuevamente se debía proveer de una mayor rigidez a las estructuras ante la presencia de grandes desplazamientos en los primeros niveles. Colocar muros de corte en los vanos resultaba exagerado, de modo que se pretendió rigidizar sólo algunas columnas con el uso de *alas de concreto*. Estas alas fueron ubicadas en los modelos según la dirección en que contribuirían a un mayor *perímetro resistente*.

Se construyeron grupos de modelos con piso blando, de 4, 8 y 12 pisos con diferentes longitudes de alas, a fin de hallar la dimensión más adecuada de dichas alas para que los desplazamientos laterales se encuentren dentro de límites tolerables.

Estas alas se extendían desde el primer hasta el último piso. Se seleccionó un modelo estructural del grupo de modelos de 4 pisos, al cual se le suprimió las alas de concreto

de los dos últimos niveles a fin de examinar la variación de desplazamientos laterales entre pisos consecutivos. Se hizo lo propio con el grupo de modelos de 8 pisos y con el de 12 pisos, suprimiendo en cada uno, las alas de concreto cada dos niveles. Es decir, se tenían estructuras con alas que se proyectaban hasta el segundo piso, cuarto piso, sexto piso, y así sucesivamente.

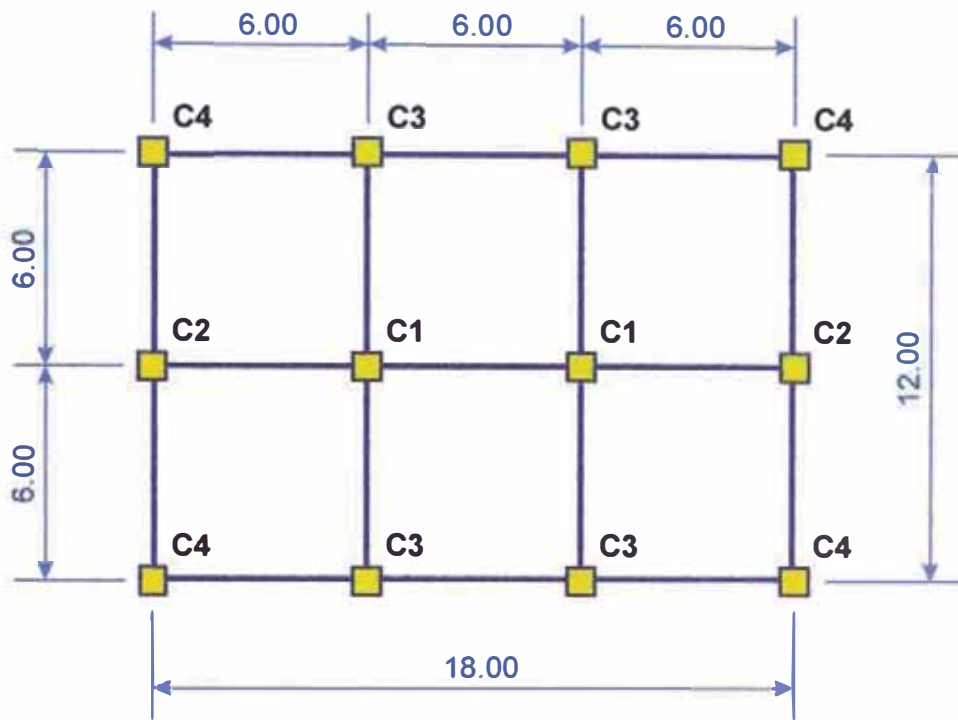
Por otro lado, se llevó a cabo una evaluación de desplazamientos laterales y de rigideces, esta vez, en modelos estructurales de 4, 8 y 12 pisos, con presencia del piso blando y alas de concreto sólo en el primer nivel. Este último análisis pretendía obviar el uso de alas de concreto en los pisos sin irregularidades.

5.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES

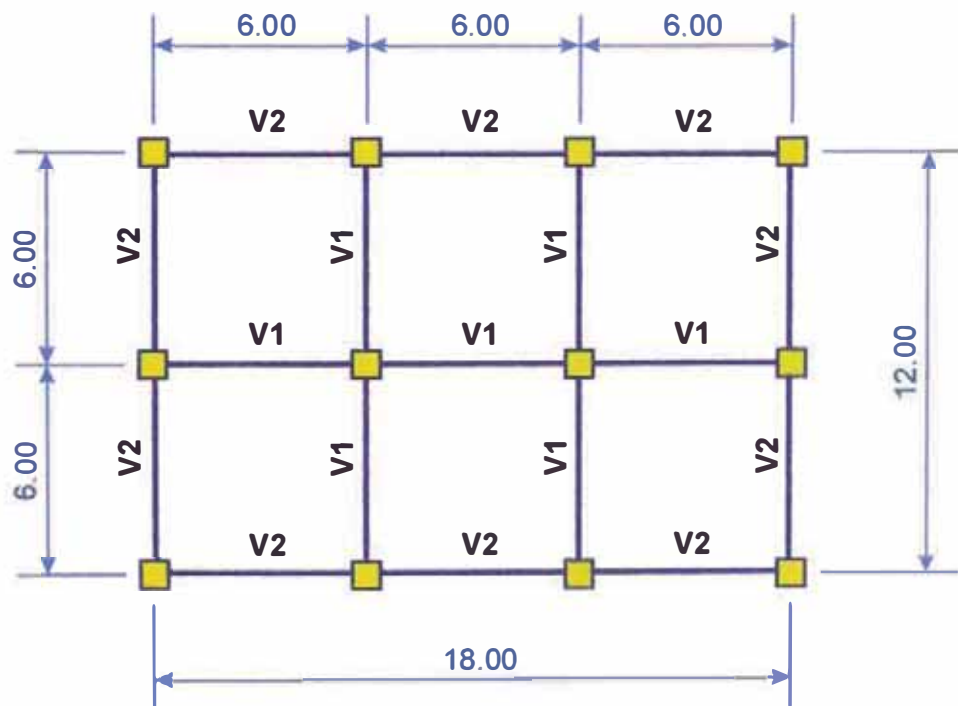
Los modelos analizados están formados por un solo pórtico de tres vanos en una dirección y dos vanos en la dirección perpendicular. La luz de vanos es de 6.00 metros. Los elementos verticales están conectados por diafragmas horizontales, los cuales se suponen infinitamente rígidos en su plano.

El predimensionamiento de elementos para las “estructuras regulares” se realizó con las fórmulas dadas en el Anexo B. En la Figura 5.1 se muestra una planta típica para los grupos de modelos de 4, 8 y 12 pisos, así como la distribución de los tipos de columnas y vigas.

Los elementos verticales, aún los que incluían alas de concreto, fueron modelados con el elemento “columna” de ETABS, y los elementos horizontales con el elemento “viga”. En ningún caso se empleó el elemento “panel”. La formulación del elemento “columna” toma en cuenta deformación axial, de corte, de flexión y de torsión. La flexión y el corte se dan en las direcciones principal y secundaria de la sección del elemento. La formulación del elemento “viga” incluye deformación de flexión y de corte, en la dirección principal, y de torsión.



a) Denominación de columnas.



b) Denominación de vigas.

Figura 5.1 Planta típica y distribución de tipos de columnas y vigas. Las dimensiones están en metros.

Se ha considerado un 75% de longitud de brazos rígidos, tanto en vigas como en columnas. Todas las columnas del primer piso se suponen empotradas en su extremo inferior.

La losa típica del techo es de concreto, de 16 cm de espesor, armada en dos sentidos. El empleo de este tipo de losa permite una distribución más uniforme de esfuerzos y deformaciones hacia los elementos que llegan a ella. Además, tiene aproximadamente el mismo peso que una losa aligerada de 25 cm de espesor necesaria para cubrir las luces dadas.

Material

Todos los modelos son de concreto armado. En vigas y losas se ha empleado concreto $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$. En columnas, dependiendo del número de pisos del modelo, se ha incrementado la calidad del concreto en los pisos inferiores en vez de hacer reducciones de sección en los pisos más altos. Sólo para efectos de predimensionamiento de losas, el esfuerzo de fluencia del acero es de 4200 kg/cm^2 . En la Tabla 5.1 se muestra la variación de la calidad de concreto para los tres grupos de modelos.

| N° de Pisos | Niveles | f'_c (kg/cm ²) |
|-------------|----------|---------------------------------|
| 4 | 1° - 4° | 210 |
| 8 | 5° - 8° | 210 |
| | 1° - 4° | 280 |
| 12 | 8° - 12° | 210 |
| | 5° - 8° | 280 |
| | 1° - 4° | 350 |

Tabla 5.1 Variación de la resistencia a la compresión simple del concreto de columnas según el número de pisos del modelo. Válido también para columnas con alas de concreto.

Geometría

En la etapa inicial se trabajó con tres grupos de modelos. Éstos constituían sistemas netamente aporticados y no presentaban problemas de configuración, de modo que de acuerdo al reglamento, se clasificaban como estructuras regulares. Los grupos se conformaron de la siguiente manera:

- **Grupo 1-1** (modelos de 4 pisos): M-40, M-41, M-42 y M-43.
- **Grupo 1-2** (modelos de 8 pisos): M-80, M-81, M-82 y M-83.
- **Grupo 1-3** (modelos de 12 pisos): M-120, M-121, M-122 y M-123.

Las vigas y columnas de M-40, M-80 y M-120 fueron predimensionadas con las fórmulas del Anexo B. Para los otros modelos, las dimensiones de algunos elementos sufrieron pequeñas modificaciones para cumplir con el nuevo código. En las Tablas 5.2, 5.3 y 5.4, se muestra las dimensiones de elementos para los sistemas aporticados. Es preciso incluir, en esta parte, el código de Diseño Sismorresistente con el que se analizó cada modelo.

Para el análisis de edificios cuya altura de piso es típica, es conveniente trabajar con la altura del primer piso ligeramente mayor que la de pisos superiores, esto debido a la incertidumbre del lugar en que ocurre el “empotramiento perfecto”. Así, considerando valores promedio de niveles de fondo de cimentación y de altura de zapatas, se fijó la altura del primer piso, para los grupos anteriores de 4, 8 y 12 pisos, en 4.00 m, 4.20 m y 4.50 m, respectivamente. Esto se cumple para una altura de piso típico de 3.00 m común a todos los grupos.

En la siguiente etapa se elaboraron tres nuevos grupos, de 4, 8 y 12 pisos, esta vez, con alturas del primer piso de 8.00 m, 8.40 m y 9.00 m, respectivamente. Los grupos de estas estructuras irregulares, se definieron así:

| Modelo | Código de Diseño | Dimensiones de Vigas, cm | | Dimensiones de Columnas, cm | | |
|--------|------------------|--------------------------|---------|-----------------------------|---------|---------|
| | | V1 | V2 | C1 | C2, C3 | C4 |
| M-40 | RNC77 | 30 x 45 | 25 x 45 | 50 x 50 | 45 x 45 | 40 x 40 |
| M-41 | NTE E.030 | 30 x 45 | 25 x 45 | 50 x 50 | 45 x 45 | 40 x 40 |
| M-42 | NTE E.030 | 30 x 55 | 25 x 55 | 50 x 50 | 45 x 45 | 40 x 40 |
| M-43 | NTE E.030 | 30 x 55 | 25 x 55 | 50 x 50 | 45 x 45 | 45 x 45 |

Tabla 5.2 Estructuras regulares aporticadas de 4 pisos.

| Modelo | Código de Diseño | Dimensiones de Vigas, cm | | Dimensiones de Columnas, cm | | |
|--------|------------------|--------------------------|---------|-----------------------------|---------|---------|
| | | V1 | V2 | C1 | C2, C3 | C4 |
| M-80 | RNC77 | 30 x 45 | 25 x 45 | 60 x 60 | 55 x 55 | 50 x 50 |
| M-81 | NTE E.030 | 30 x 45 | 25 x 45 | 60 x 60 | 55 x 55 | 50 x 50 |
| M-82 | NTE E.030 | 30 x 55 | 25 x 55 | 60 x 60 | 55 x 55 | 50 x 50 |
| M-83 | NTE E.030 | 30 x 55 | 25 x 55 | 60 x 60 | 55 x 55 | 55 x 55 |

Tabla 5.3 Estructuras regulares aporticadas de 8 pisos.

| Modelo | Código de Diseño | Dimensiones de Vigas, cm | | Dimensiones de Columnas, cm | | |
|--------|------------------|--------------------------|---------|-----------------------------|---------|---------|
| | | V1 | V2 | C1 | C2, C3 | C4 |
| M-120 | RNC77 | 30 x 45 | 25 x 45 | 65 x 65 | 60 x 60 | 55 x 55 |
| M-121 | NTE E.030 | 30 x 45 | 25 x 45 | 65 x 65 | 60 x 60 | 55 x 55 |
| M-122 | NTE E.030 | 30 x 55 | 25 x 55 | 65 x 65 | 60 x 60 | 55 x 55 |
| M-123 | NTE E.030 | 30 x 55 | 25 x 55 | 65 x 65 | 60 x 60 | 60 x 60 |

Tabla 5.4 Estructuras regulares aporticadas de 12 pisos.

Grupo 2-1 (modelos de 4 pisos): PB-4A, PB-4B y PB-4C.

Grupo 2-2 (modelos de 8 pisos): PB-8A, PB-8B y PB-8C.

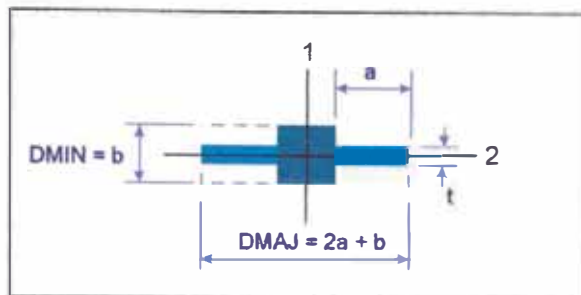
Grupo 2-3 (modelos de 12 pisos): PB-12A, PB-12B y PB-12C.

Al presentarse el problema del piso blando, fue necesario proveer de mayor rigidez a la estructura. Se añadió *alas de concreto* a las columnas tipo C2 y C3, en todos los pisos. Estas alas tenían un ancho estándar de 20 cm (lo mínimo para incorporar 2 capas de acero estructural). La longitud de alas se fijó en función a un porcentaje de la dimensión del lado de la edificación. Por ejemplo, PB-4B tiene una longitud total de alas de concreto en la dirección X de 10%. Esto significa que si un lado del edificio orientado según la dirección X tiene 18 metros, deberá haber 1.80 metros de alas de concreto en ese lado. A su vez, en ese lado existen dos columnas tipo C3, cada una de las cuales debe llevar dos alas de concreto, es decir, 1.80 m se reparten en 4 alas de 0.45 m cada una. Como PB-4B también tiene 10% de longitud total de alas de concreto en la dirección Y, cada ala orientada según esa dirección tendrá 0.60 m. Notar que la dimensión de ese lado es 12 metros y hay sólo una columna tipo C2.

Al añadir alas de concreto a una columna se forma un elemento vertical de sección más compleja. Para modelar con el elemento “columna” de ETABS esta fusión de tres elementos en uno solo, se determinaron propiedades adicionales para la geometría resultante. En ese sentido, se calculó para una sección, el área total (A), áreas de corte en las dos direcciones principales (A_{s1} y A_{s2}), momentos de inercia alrededor del eje fuerte y del eje débil (I_1 y I_2), y el momento polar de inercia (J). Para no sobrestimar la deflexión de vigas, adicionalmente se encontró los parámetros DMAJ y DMIN que se usaron en ETABS.

En las Tablas 5.5, 5.6 y 5.7 se muestran las propiedades de secciones de elementos “columna” para los Grupos 2-1, 2-2 y 2-3. El valor “p” representa el porcentaje de alas de concreto en un lado del edificio.

PROPIEDADES DE SECCIONES DE ELEMENTOS COLUMNA A USARSE EN "ETABS"



| Modelo | p | | a (m) | b (m) | A (m ²) | As ₁ (m ²) | As ₂ (m ²) | I ₁ (m ⁴) | I ₂ (m ⁴) | J (m ⁴) | DMAJ (m) | DMIN (m) |
|--------|---|-----|-------|-------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|----------|----------|
| PB-4A | X | 5% | 0.225 | 0.45 | 0.293 | 0.269 | 0.161 | 0.01405 | 0.00372 | 0.01777 | 0.90 | 0.45 |
| | Y | 5% | 0.30 | 0.45 | 0.323 | 0.293 | 0.175 | 0.02119 | 0.00382 | 0.02501 | 1.05 | 0.45 |
| PB-4B | X | 10% | 0.45 | 0.45 | 0.383 | 0.337 | 0.200 | 0.04290 | 0.00402 | 0.04692 | 1.35 | 0.45 |
| | Y | 10% | 0.60 | 0.45 | 0.443 | 0.381 | 0.224 | 0.07677 | 0.00422 | 0.08098 | 1.65 | 0.45 |
| PB-4C | X | 15% | 0.675 | 0.45 | 0.473 | 0.404 | 0.237 | 0.09910 | 0.00432 | 0.10342 | 1.80 | 0.45 |
| | Y | 15% | 0.90 | 0.45 | 0.563 | 0.473 | 0.273 | 0.19174 | 0.00462 | 0.19636 | 2.25 | 0.45 |

Tabla 5.5 Modelo estructural de 4 pisos, con piso blando y alas de concreto en todos los niveles.

| Modelo | p | | a (m) | b (m) | A (m ²) | As ₁ (m ²) | As ₂ (m ²) | I ₁ (m ⁴) | I ₂ (m ⁴) | J (m ⁴) | DMAJ (m) | DMIN (m) |
|--------|---|-----|-------|-------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|----------|----------|
| PB-8A | X | 5% | 0.225 | 0.55 | 0.393 | 0.361 | 0.217 | 0.02152 | 0.00793 | 0.02944 | 1.00 | 0.55 |
| | Y | 5% | 0.30 | 0.55 | 0.423 | 0.386 | 0.229 | 0.03020 | 0.00803 | 0.03823 | 1.15 | 0.55 |
| PB-8B | X | 10% | 0.45 | 0.55 | 0.483 | 0.425 | 0.250 | 0.05566 | 0.00823 | 0.06389 | 1.45 | 0.55 |
| | Y | 10% | 0.60 | 0.55 | 0.543 | 0.463 | 0.269 | 0.09418 | 0.00843 | 0.10260 | 1.75 | 0.55 |
| PB-8C | X | 15% | 0.675 | 0.55 | 0.573 | 0.482 | 0.278 | 0.11917 | 0.00853 | 0.12769 | 1.90 | 0.55 |
| | Y | 15% | 0.90 | 0.55 | 0.663 | 0.545 | 0.304 | 0.22115 | 0.00883 | 0.22998 | 2.35 | 0.55 |

Tabla 5.6 Modelo estructural de 8 pisos, con piso blando y alas de concreto en todos los niveles.

| Modelo | p | | a (m) | b (m) | A (m ²) | As ₁ (m ²) | As ₂ (m ²) | I ₁ (m ⁴) | I ₂ (m ⁴) | J (m ⁴) | DMAJ (m) | DMIN (m) |
|--------|---|-----|-------|-------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|----------|----------|
| PB-12A | X | 5% | 0.225 | 0.60 | 0.450 | 0.414 | 0.252 | 0.02649 | 0.01110 | 0.03759 | 1.05 | 0.60 |
| | Y | 5% | 0.30 | 0.60 | 0.480 | 0.440 | 0.263 | 0.03600 | 0.01120 | 0.04720 | 1.20 | 0.60 |
| PB-12B | X | 10% | 0.45 | 0.60 | 0.540 | 0.476 | 0.284 | 0.06345 | 0.01140 | 0.07485 | 1.50 | 0.60 |
| | Y | 10% | 0.60 | 0.60 | 0.600 | 0.510 | 0.302 | 0.10440 | 0.01160 | 0.11600 | 1.80 | 0.60 |
| PB-12C | X | 15% | 0.675 | 0.60 | 0.630 | 0.527 | 0.310 | 0.13078 | 0.01170 | 0.14248 | 1.95 | 0.60 |
| | Y | 15% | 0.90 | 0.60 | 0.720 | 0.585 | 0.334 | 0.23760 | 0.01200 | 0.24960 | 2.40 | 0.60 |

Tabla 5.7 Modelo estructural de 12 pisos, con piso blando y alas de concreto en todos los niveles.

Tomando como base los modelos PB-4B, PB-8B y PB-12B, es decir, con 10% de alas de concreto, se elaboró los siguientes grupos de modelos suprimiendo el uso de alas cada 2 niveles:

Grupo 3-1 (modelos de 4 pisos): PB-4B0 y PB-4B1.

Grupo 3-2 (modelos de 8 pisos): PB-8B0, PB-8B1, PB-8B2 y PB-8B3.

Grupo 3-3 (modelos de 12 pisos): PB-12B0, PB-12B1, PB-12B2, PB-12B3, PB-12B4 y PB-12B5.

El primer modelo de cada grupo (PB-4B0, PB-8B0 y PB-12B0) no tiene alas de concreto. En el segundo modelo de cada grupo (PB-4B1, PB-8B1 y PB-12B1) las alas se proyectan hasta el segundo piso. En PB-8B2 y PB-12B2, las alas de concreto se extienden hasta el cuarto piso; y así sucesivamente.

En la etapa final, se consideró estructuras con piso blando y alas de concreto sólo en el primer nivel:

Grupo 4-1 (modelos de 4 pisos): PBF-41, PBF-42, PBF-43 y PBF-44.

Grupo 4-2 (modelos de 8 pisos): PBF-81, PBF-82, PBF-83 y PBF-84.

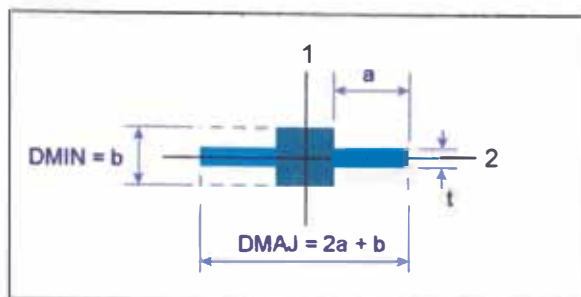
Grupo 4-3 (modelos de 12 pisos): PBF-121, PBF-122, PBF-123 y PBF-124.

El porcentaje de alas de concreto es variable de acuerdo al modelo estructural, y es de 10%, 20%, 25% y 30%, tal como se muestra en las Tablas 5.8, 5.9 y 5.10 de propiedades de secciones de columnas para los Grupos 4-1, 4-2 y 4-3, respectivamente.

Cargas

En las Tablas 5.11, 5.12 y 5.13, se presenta un resumen del metrado de cargas para el análisis sísmico de tres modelos estructurales elegidos de la sección anterior. El procedimiento de cálculo de las cargas actuantes para los otros modelos es el mismo.

PROPIEDADES DE SECCIONES DE ELEMENTOS COLUMNA A USARSE EN “ETABS”



| Modelo | p | | a (m) | b (m) | A (m ²) | As ₁ (m ²) | As ₂ (m ²) | I ₁ (m ⁴) | I ₂ (m ⁴) | J (m ⁴) | DMAJ (m) | DMIN (m) |
|--------|---|-----|-------|-------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|----------|----------|
| PBF-41 | X | 10% | 0.45 | 0.45 | 0.383 | 0.337 | 0.200 | 0.04290 | 0.00402 | 0.04692 | 1.35 | 0.45 |
| | Y | 10% | 0.60 | 0.45 | 0.443 | 0.381 | 0.224 | 0.07677 | 0.00422 | 0.08098 | 1.65 | 0.45 |
| PBF-42 | X | 20% | 0.9 | 0.45 | 0.563 | 0.473 | 0.273 | 0.19174 | 0.00462 | 0.19636 | 2.25 | 0.45 |
| | Y | 20% | 1.20 | 0.45 | 0.683 | 0.569 | 0.322 | 0.38772 | 0.00502 | 0.39273 | 2.85 | 0.45 |
| PBF-43 | X | 30% | 1.35 | 0.45 | 0.743 | 0.617 | 0.347 | 0.52283 | 0.00522 | 0.52805 | 3.15 | 0.45 |
| | Y | 30% | 1.80 | 0.45 | 0.923 | 0.764 | 0.425 | 1.10907 | 0.00582 | 1.11488 | 4.05 | 0.45 |
| PBF-44 | X | 25% | 1.125 | 0.45 | 0.653 | 0.544 | 0.310 | 0.32995 | 0.00492 | 0.33487 | 2.70 | 0.45 |
| | Y | 25% | 1.50 | 0.45 | 0.803 | 0.666 | 0.373 | 0.68629 | 0.00542 | 0.69171 | 3.45 | 0.45 |

Tabla 5.8 Modelo estructural de 4 pisos, con piso blando y alas de concreto en el primer nivel.

| Modelo | p | | a (m) | b (m) | A (m ²) | As ₁ (m ²) | As ₂ (m ²) | I ₁ (m ⁴) | I ₂ (m ⁴) | J (m ⁴) | DMAJ (m) | DMIN (m) |
|--------|---|-----|-------|-------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|----------|----------|
| PBF-81 | X | 10% | 0.45 | 0.55 | 0.483 | 0.425 | 0.250 | 0.05566 | 0.00823 | 0.06389 | 1.45 | 0.55 |
| | Y | 10% | 0.60 | 0.55 | 0.543 | 0.463 | 0.269 | 0.09418 | 0.00843 | 0.10260 | 1.75 | 0.55 |
| PBF-82 | X | 20% | 0.9 | 0.55 | 0.663 | 0.545 | 0.304 | 0.22115 | 0.00883 | 0.22998 | 2.35 | 0.55 |
| | Y | 20% | 1.20 | 0.55 | 0.783 | 0.634 | 0.338 | 0.43273 | 0.00923 | 0.44195 | 2.95 | 0.55 |
| PBF-83 | X | 30% | 1.35 | 0.55 | 0.843 | 0.680 | 0.354 | 0.57699 | 0.00943 | 0.58641 | 3.25 | 0.55 |
| | Y | 30% | 1.80 | 0.55 | 1.023 | 0.823 | 0.404 | 1.19608 | 0.01003 | 1.20610 | 4.15 | 0.55 |
| PBF-84 | X | 25% | 1.125 | 0.55 | 0.753 | 0.611 | 0.330 | 0.37072 | 0.00913 | 0.37984 | 2.80 | 0.55 |
| | Y | 25% | 1.50 | 0.55 | 0.903 | 0.727 | 0.371 | 0.75050 | 0.00963 | 0.76013 | 3.55 | 0.55 |

Tabla 5.9 Modelo estructural de 8 pisos, con piso blando y alas de concreto en el primer nivel.

| Modelo | p | | a (m) | b (m) | A (m ²) | As ₁ (m ²) | As ₂ (m ²) | I ₁ (m ⁴) | I ₂ (m ⁴) | J (m ⁴) | DMAJ (m) | DMIN (m) |
|---------|---|-----|-------|-------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|----------|----------|
| PBF-121 | X | 10% | 0.45 | 0.60 | 0.540 | 0.476 | 0.284 | 0.06345 | 0.01140 | 0.07485 | 1.50 | 0.60 |
| | Y | 10% | 0.60 | 0.60 | 0.600 | 0.510 | 0.302 | 0.10440 | 0.01160 | 0.11600 | 1.80 | 0.60 |
| PBF-122 | X | 20% | 0.9 | 0.60 | 0.720 | 0.585 | 0.334 | 0.23760 | 0.01200 | 0.24960 | 2.40 | 0.60 |
| | Y | 20% | 1.20 | 0.60 | 0.840 | 0.670 | 0.363 | 0.45720 | 0.01240 | 0.46960 | 3.00 | 0.60 |
| PBF-123 | X | 30% | 1.35 | 0.60 | 0.900 | 0.715 | 0.377 | 0.60615 | 0.01260 | 0.61875 | 3.30 | 0.60 |
| | Y | 30% | 1.80 | 0.60 | 1.080 | 0.855 | 0.419 | 1.24200 | 0.01320 | 1.25520 | 4.20 | 0.60 |
| PBF-124 | X | 25% | 1.125 | 0.60 | 0.810 | 0.648 | 0.356 | 0.39302 | 0.01230 | 0.40532 | 2.85 | 0.60 |
| | Y | 25% | 1.50 | 0.60 | 0.960 | 0.761 | 0.391 | 0.78480 | 0.01280 | 0.79760 | 3.60 | 0.60 |

Tabla 5.10 Modelo estructural de 12 pisos, con piso blando y alas de concreto en el primer nivel.

MODELO:

PBF-41

CARGA MUERTA DE ELEMENTOS

| Nivel | Altura (m) | Columnas (kg) | Vigas (kg) | Alas (kg) | Losa (kg) |
|-------|---------------|------------------|---------------|--------------|--------------|
| 4to | 3.00 | 9090 | 33620 | 0 | 117821 |
| 3ro | 3.00 | 18180 | 33620 | 0 | 117821 |
| 2do | 3.00 | 18180 | 33620 | 0 | 117821 |
| 1ro | 8.00 | 33330 | 33620 | 9936 | 117821 |

CARGA MUERTA, CARGA VIVA Y CARGA SÍSMICA

| Nivel | P _D (kg) | P _L (kg) | P _{SISMO} (kg) |
|-------|------------------------|------------------------|----------------------------|
| 4to | 160531 | 29455 | 167895 |
| 3ro | 169621 | 49092 | 181894 |
| 2do | 169621 | 49092 | 181894 |
| 1ro | 194707 | 49092 | 206980 |

MASA TRASLACIONAL Y MOMENTO DE INERCIA ROTACIONAL

| Nivel | m _{SISMO} (kg·s ² /m) | m _{SISMO} / Area (kg·s ² /m /m ²) | I _o (kg·m·s ²) |
|-------|--|--|--|
| 4to | 17132 | 79.315 | 668152 |
| 3ro | 18561 | 85.929 | 723863 |
| 2do | 18561 | 85.929 | 723863 |
| 1ro | 21120 | 97.780 | 823695 |

Tabla 5.11 Resumen del metrado de cargas para el análisis sísmico del Modelo PBF-41.

MODELO:

PBF-81

CARGA MUERTA DE ELEMENTOS

| Nivel | Altura (m) | Columnas (kg) | Vigas (kg) | Alas (kg) | Losa (kg) |
|-------|---------------|------------------|---------------|--------------|--------------|
| 8vo | 3.00 | 12726 | 33079 | 0 | 117821 |
| 7mo | 3.00 | 25452 | 33079 | 0 | 117821 |
| 6to | 3.00 | 25452 | 33079 | 0 | 117821 |
| 5to | 3.00 | 25452 | 33079 | 0 | 117821 |
| 4to | 3.00 | 25452 | 33079 | 0 | 117821 |
| 3ro | 3.00 | 25452 | 33079 | 0 | 117821 |
| 2do | 3.00 | 25452 | 33079 | 0 | 117821 |
| 1ro | 8.40 | 48359 | 33079 | 10512 | 117821 |

CARGA MUERTA, CARGA VIVA Y CARGA SÍSMICA

| Nivel | P_D (kg) | P_L (kg) | P_{SISMO} (kg) |
|-------|---------------|---------------|---------------------|
| 8vo | 163626 | 29455 | 170989 |
| 7mo | 176352 | 49092 | 188625 |
| 6to | 176352 | 49092 | 188625 |
| 5to | 176352 | 49092 | 188625 |
| 4to | 176352 | 49092 | 188625 |
| 3ro | 176352 | 49092 | 188625 |
| 2do | 176352 | 49092 | 188625 |
| 1ro | 209771 | 49092 | 222043 |

MASA TRASLACIONAL Y MOMENTO DE INERCIA ROTACIONAL

| Nivel | m_{SISMO} (kg·s ² /m) | $m_{SISMO} / Area$ (kg·s ² /m /m ²) | I_0 (kg·m·s ²) |
|-------|---------------------------------------|---|---------------------------------|
| 8vo | 17448 | 80.777 | 680468 |
| 7mo | 19247 | 89.108 | 750649 |
| 6to | 19247 | 89.108 | 750649 |
| 5to | 19247 | 89.108 | 750649 |
| 4to | 19247 | 89.108 | 750649 |
| 3ro | 19247 | 89.108 | 750649 |
| 2do | 19247 | 89.108 | 750649 |
| 1ro | 22657 | 104.896 | 883642 |

Tabla 5.12 Resumen del metrado de cargas para el análisis sísmico del Modelo PBF-81.

MODELO:

PBF-121

CARGA MUERTA DE ELEMENTOS

| Nivel | Altura (m) | Columnas (kg) | Vigas (kg) | Alas (kg) | Losa (kg) |
|-------|---------------|------------------|---------------|--------------|--------------|
| 12vo | 3.00 | 15174 | 26816 | 0 | 117821 |
| 11vo | 3.00 | 30348 | 26816 | 0 | 117821 |
| 10mo | 3.00 | 30348 | 26816 | 0 | 117821 |
| 9no | 3.00 | 30348 | 26816 | 0 | 117821 |
| 8vo | 3.00 | 30348 | 26816 | 0 | 117821 |
| 7mo | 3.00 | 30348 | 26816 | 0 | 117821 |
| 6to | 3.00 | 30348 | 26816 | 0 | 117821 |
| 5to | 3.00 | 30348 | 26816 | 0 | 117821 |
| 4to | 3.00 | 30348 | 26816 | 0 | 117821 |
| 3ro | 3.00 | 30348 | 26816 | 0 | 117821 |
| 2do | 3.00 | 30348 | 26816 | 0 | 117821 |
| 1ro | 9.00 | 60696 | 26816 | 11664 | 117821 |

CARGA MUERTA, CARGA VIVA Y CARGA SÍSMICA

| Nivel | P_D (kg) | P_L (kg) | P_{SISMO} (kg) |
|-------|---------------|---------------|---------------------|
| 12vo | 159811 | 29455 | 167175 |
| 11vo | 174985 | 49092 | 187258 |
| 10mo | 174985 | 49092 | 187258 |
| 9no | 174985 | 49092 | 187258 |
| 8vo | 174985 | 49092 | 187258 |
| 7mo | 174985 | 49092 | 187258 |
| 6to | 174985 | 49092 | 187258 |
| 5to | 174985 | 49092 | 187258 |
| 4to | 174985 | 49092 | 187258 |
| 3ro | 174985 | 49092 | 187258 |
| 2do | 174985 | 49092 | 187258 |
| 1ro | 216997 | 49092 | 229270 |

MASA TRASLACIONAL Y MOMENTO DE INERCIA ROTACIONAL

| Nivel | m_{SISMO} (kg·s ² /m) | $m_{SISMO} / Area$ (kg·s ² /m / m ²) | I_o (kg·m·s ²) |
|-------|---------------------------------------|--|---------------------------------|
| 12vo | 17059 | 78.975 | 665287 |
| 11vo | 19108 | 88.463 | 745210 |
| 10mo | 19108 | 88.463 | 745210 |
| 9no | 19108 | 88.463 | 745210 |
| 8vo | 19108 | 88.463 | 745210 |
| 7mo | 19108 | 88.463 | 745210 |
| 6to | 19108 | 88.463 | 745210 |
| 5to | 19108 | 88.463 | 745210 |
| 4to | 19108 | 88.463 | 745210 |
| 3ro | 19108 | 88.463 | 745210 |
| 2do | 19108 | 88.463 | 745210 |
| 1ro | 23395 | 108.310 | 912400 |

Tabla 5.13 Resumen del metrado de cargas para el análisis sísmico del Modelo PBF-121.

5.3 ESPECTROS DE RESPUESTA DE SEUDOACELERACIONES

Los espectros de respuesta inelásticos de pseudoaceleraciones empleados para el análisis sísmico dinámico de los sistemas estructurales “regulares” son los mostrados en las Figuras 5.2 y 5.3. El primero está definido por el Reglamento Nacional de Construcciones de 1977 (RNC77), y el segundo, definido por la Norma Técnica de Edificación de Diseño Sismorresistente de 1997 (NTE E.030).

Estos espectros fueron determinados para las mismas condiciones de estructuración, categoría de la edificación, zonificación y condiciones locales. Hay un tercer espectro que se empleó para los sistemas con piso blando. Éste no se muestra ya que se deriva del segundo espectro al considerar, para estructuras “irregulares”, un 75% del factor de reducción (R) usado para estructuras “regulares”, tal como indica el reglamento.

El espectro de respuesta S_a , según RNC77 está definido por:

$$S_a = \frac{ZUSC}{R_d} g \quad (5.1)$$

donde g es la aceleración de la gravedad y C es el coeficiente sísmico que se determina mediante la siguiente expresión:

$$0.16 \leq C = \frac{0.8}{1 + \frac{T}{T_s}} \leq 0.40 \quad (5.2)$$

Para las otras variables de las ecuaciones (5.1) y (5.2) se han adoptado los valores mostrados en la Tabla 5.14.

| Descripción | Valor | Observación |
|--|-------|-------------------------------------|
| Factor de zona (Z) | 1.0 | Zona 1. |
| Factor de uso e importancia (U) | 1.0 | Categoría C, edificaciones comunes. |
| Factor de suelo (S) | 1.0 | Suelo firme. |
| Período fundamental del suelo (T_s) | 0.3 | Segundos. |
| Factor de reducción por ductilidad (R_d) | 4.0 | Pórticos de concreto armado. |

Tabla 5.14 Parámetros que definen el espectro de respuesta de pseudoaceleraciones de la Figura 5.2.

De manera similar, el espectro de respuesta S_a , según NTE E.030 se define como:

$$S_a = \frac{ZUSC}{R} g \quad (5.3)$$

donde g es la aceleración de la gravedad y C es el coeficiente de amplificación sísmica que se determina mediante la siguiente expresión:

$$C = 2.5 \cdot \left(\frac{T_p}{T} \right)^{1.25} \leq 0.25 \quad (5.4)$$

Para las otras variables de las ecuaciones (5.3) y (5.4) se han adoptado los valores mostrados en la siguiente tabla:

| Descripción | Valor | Observación |
|---|-------|-------------------------------------|
| Factor de zona (Z) | 0.4 | Zona 3. |
| Factor de uso e importancia (U) | 1.0 | Categoría C, edificaciones comunes. |
| Factor de suelo (S) | 1.0 | Suelo muy rígido. |
| Período fundamental del suelo (T_p) | 0.4 | Segundos. |
| Factor de reducción (R) | 10.0 | Pórticos de concreto armado. |

Tabla 5.15 Parámetros que definen el espectro de respuesta de pseudoaceleraciones de la Figura 5.3.

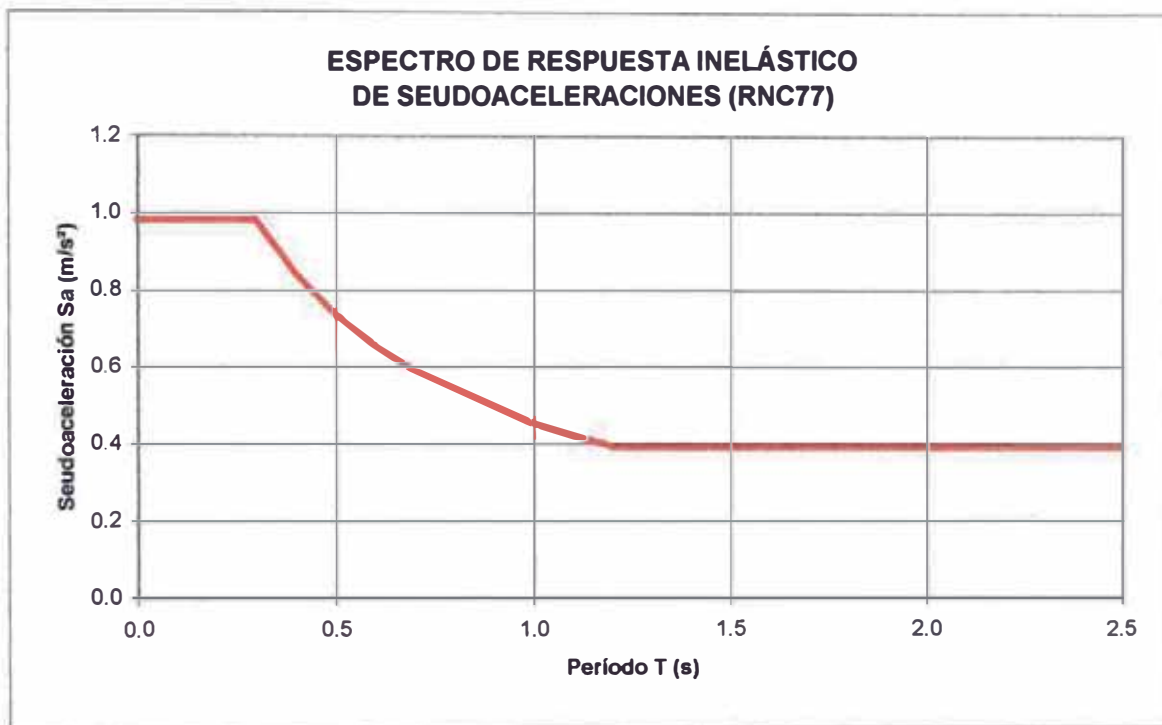


Figura 5.2 Espectro de respuesta de pseudoaceleraciones según el Reglamento Nacional de Construcciones de 1977 (RNC77).

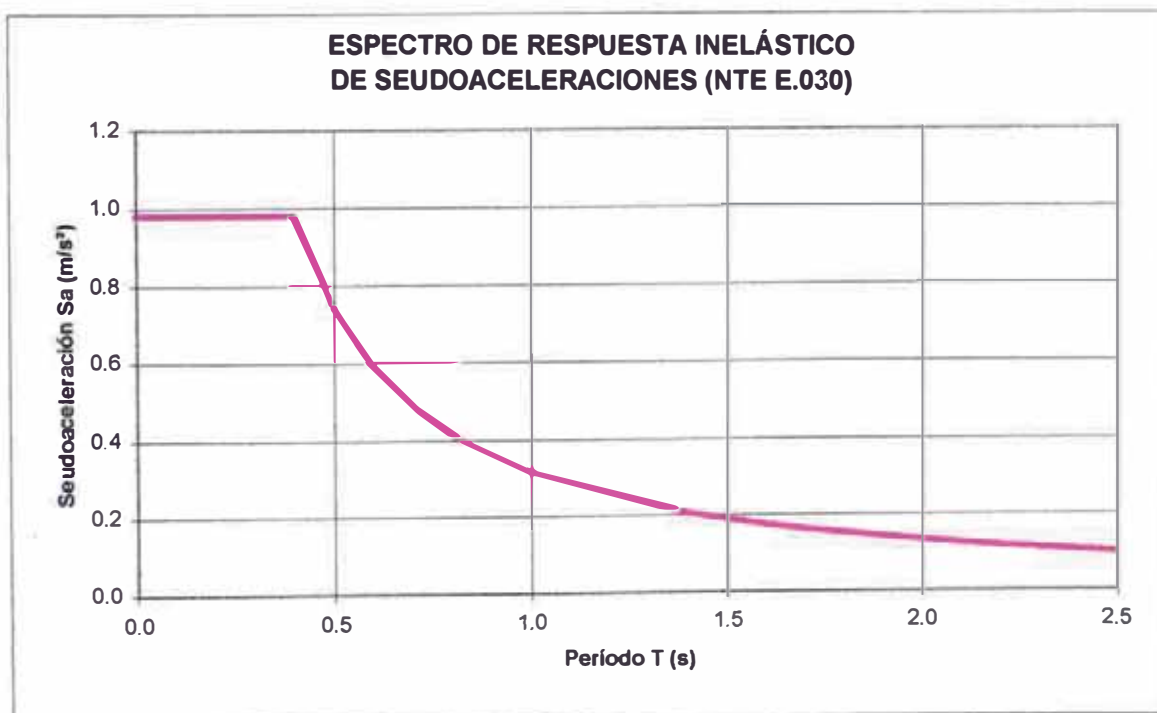


Figura 5.3 Espectro de respuesta de pseudoaceleraciones según la Nueva Norma Técnica de Edificación de Diseño Sismorresistente (NTE E.030).

5.4 ANÁLISIS DINÁMICO DE MODELOS ESTRUCTURALES DE 4 PISOS

En esta sección se presentan los resultados del análisis sísmico dinámico de los modelos estructurales que conforman los Grupos 1-1, 2-1, 3-1 y 4-1, definidos en el ítem 5.2. El modelo tridimensional M-43, elegido como *modelo patrón* de los edificios de 4 pisos, se presenta en la Figura 5.2.

El análisis se ha efectuado según la Norma Técnica de Edificación E.030 de Diseño Sismorresistente (salvo se indique lo contrario) para dos direcciones de entrada del espectro: 0° y 90° . Como las estructuras son simétricas, los desplazamientos laterales sólo tienen componente en la dirección del sismo.

Para el cálculo de la respuesta (desplazamientos y fuerzas) se ha considerado el número total de las formas de modo de vibración, que en el caso de modelos de 4 pisos es de 12.

Los desplazamientos laterales, de todos los modelos de 4 pisos, se muestran en las Tablas 5.16 a 5.28. Las rigideces laterales, de los modelos del Grupo 4-1, aparecen en las Tablas 5.29 a 5.32. Adicionalmente se presentan gráficos de desplazamientos y de rigideces obtenidos de las tablas anteriores (ver Figuras 5.3 a 5.8).

Es muy importante tener en cuenta que los desplazamientos laterales que se muestran en las tablas siguientes se encuentran divididos en dos grupos. El primer grupo, al que se ha denominado **Desplazamiento Lateral (D)**, se refiere al desplazamiento lateral del centro de masas de un entrepiso cualquiera con relación a la base del modelo. El segundo grupo, denominado **Desplazamiento de Entrepiso (Δ)**, se refiere al desplazamiento del centro de masas de un entrepiso cualquiera con relación al del entrepiso inmediato inferior. Éste último, se encuentra en la literatura con el nombre de *desplazamiento relativo de entrepiso* o “*drift*”.

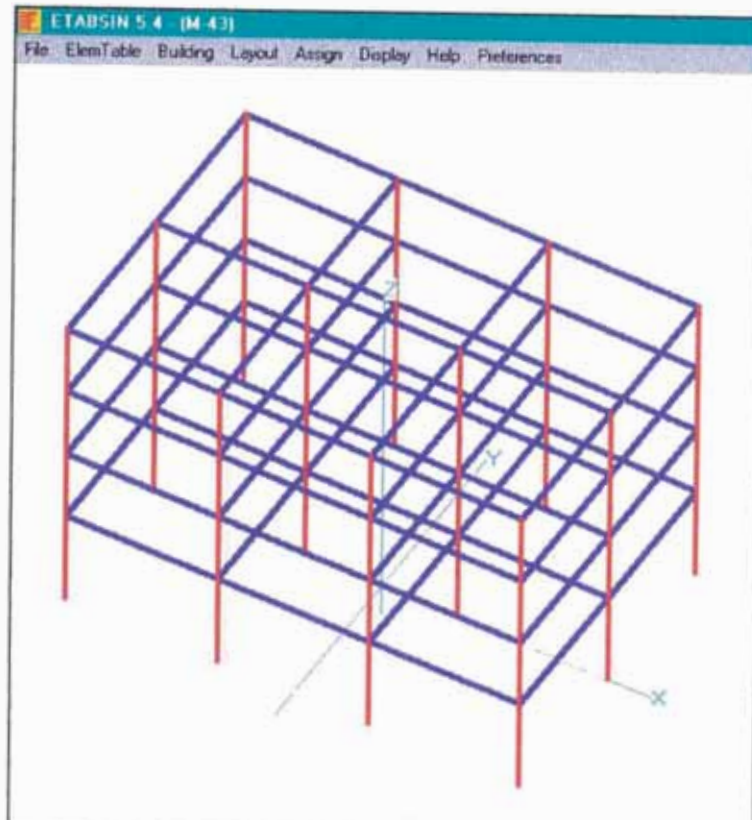


Figura 5.2 Modelo Patrón para el Análisis Dinámico Tridimensional de Estructuras de 4 Pisos.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | | Δ Permisible (cm) |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|--------------------------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 4to | 3.27 | 3.40 | 0.44 | 0.47 | 3.00 |
| 3ro | 2.83 | 2.93 | 0.73 | 0.77 | 3.00 |
| 2do | 2.10 | 2.16 | 0.96 | 1.00 | 3.00 |
| 1ro | 1.14 | 1.16 | 1.14 | 1.16 | 4.00 |

Tabla 5.16 Modelo M-40. Resultados del análisis dinámico según RNC77.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | | Δ Permisible (cm) |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|--------------------------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 4to | 8.42 | 8.65 | 1.14 | 1.21 | 2.10 |
| 3ro | 7.28 | 7.44 | 1.87 | 1.94 | 2.10 |
| 2do | 5.41 | 5.50 | 2.45 | 2.53 | 2.10 |
| 1ro | 2.96 | 2.97 | 2.96 | 2.97 | 2.80 |

Tabla 5.17 Modelo M-41. Resultados del análisis dinámico según NTE E.030.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | | Δ Permisible (cm) |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|--------------------------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 4to | 7.38 | 7.52 | 0.86 | 0.91 | 2.10 |
| 3ro | 6.52 | 6.61 | 1.50 | 1.55 | 2.10 |
| 2do | 5.02 | 5.06 | 2.07 | 2.12 | 2.10 |
| 1ro | 2.95 | 2.94 | 2.95 | 2.94 | 2.80 |

Tabla 5.18 Modelo M-42. Resultados del análisis dinámico según NTE E.030.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | | Δ Permisible (cm) |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|--------------------------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 4to | 7.31 | 7.45 | 0.89 | 0.93 | 2.10 |
| 3ro | 6.42 | 6.52 | 1.51 | 1.57 | 2.10 |
| 2do | 4.91 | 4.95 | 2.07 | 2.12 | 2.10 |
| 1ro | 2.84 | 2.83 | 2.84 | 2.83 | 2.80 |

Tabla 5.19 Modelo M-43. Resultados del análisis dinámico según NTE E.030.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | | Δ Permisible (cm) |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|--------------------------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 4to | 9.17 | 9.56 | 0.45 | 0.49 | 2.10 |
| 3ro | 8.72 | 9.07 | 0.80 | 0.86 | 2.10 |
| 2do | 7.93 | 8.21 | 1.34 | 1.42 | 2.10 |
| 1ro | 6.59 | 6.80 | 6.59 | 6.80 | 5.60 |

Tabla 5.20 Modelo PB-4A. Estructura con piso blando y 5% de alas de concreto en todos los niveles.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | | Δ Permisible (cm) |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|--------------------------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 4to | 8.09 | 8.57 | 0.65 | 0.74 | 2.10 |
| 3ro | 7.44 | 7.82 | 1.00 | 1.11 | 2.10 |
| 2do | 6.44 | 6.71 | 1.47 | 1.58 | 2.10 |
| 1ro | 4.97 | 5.14 | 4.97 | 5.14 | 5.60 |

Tabla 5.21 Modelo PB-4B. Estructura con piso blando y 10% de alas de concreto en todos los niveles.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | | Δ Permisible (cm) |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|--------------------------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 4to | 7.34 | 7.83 | 0.85 | 0.99 | 2.10 |
| 3ro | 6.49 | 6.84 | 1.14 | 1.28 | 2.10 |
| 2do | 5.35 | 5.57 | 1.46 | 1.58 | 2.10 |
| 1ro | 3.89 | 3.99 | 3.89 | 3.99 | 5.60 |

Tabla 5.22 Modelo PB-4C. Estructura con piso blando y 15% de alas de concreto en todos los niveles.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 4to | 11.69 | 12.05 | 0.40 | 0.44 |
| 3ro | 11.29 | 11.62 | 0.73 | 0.81 |
| 2do | 10.55 | 10.81 | 1.33 | 1.43 |
| 1ro | 9.23 | 9.38 | 9.23 | 9.38 |

Tabla 5.23 Modelo PB-4B0. Estructura con piso blando y sin alas de concreto.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 4to | 8.26 | 8.62 | 0.66 | 0.67 |
| 3ro | 7.60 | 7.95 | 1.19 | 1.22 |
| 2do | 6.41 | 6.74 | 1.53 | 1.66 |
| 1ro | 4.88 | 5.08 | 4.88 | 5.08 |

Tabla 5.24 Modelo PB-4B1. Estructura con piso blando y alas de concreto hasta el 2do nivel.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 4to | 8.37 | 8.73 | 0.61 | 0.62 |
| 3ro | 7.76 | 8.11 | 1.11 | 1.08 |
| 2do | 6.65 | 7.03 | 1.60 | 1.55 |
| 1ro | 5.05 | 5.48 | 5.05 | 5.48 |

Tabla 5.25 Modelo PBF-41. Estructura con piso blando y 10% de alas de concreto en el primer nivel.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 4to | 7.24 | 7.46 | 0.94 | 0.96 |
| 3ro | 6.30 | 6.50 | 1.56 | 1.58 |
| 2do | 4.74 | 4.92 | 1.82 | 1.79 |
| 1ro | 2.93 | 3.13 | 2.93 | 3.13 |

Tabla 5.26 Modelo PBF-42. Estructura con piso blando y 20% de alas de concreto en el primer nivel.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 4to | 6.60 | 6.77 | 1.18 | 1.23 |
| 3ro | 5.42 | 5.54 | 1.88 | 1.93 |
| 2do | 3.54 | 3.62 | 1.93 | 1.95 |
| 1ro | 1.61 | 1.67 | 1.61 | 1.67 |

Tabla 5.27 Modelo PBF-43. Estructura con piso blando y 30% de alas de concreto en el primer nivel.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 4to | 6.87 | 7.01 | 1.07 | 1.10 |
| 3ro | 5.80 | 5.90 | 1.74 | 1.77 |
| 2do | 4.06 | 4.13 | 1.88 | 1.87 |
| 1ro | 2.18 | 2.27 | 2.18 | 2.27 |

Tabla 5.28 Modelo PBF-44. Estructura con piso blando y 25% de alas de concreto en el primer nivel.

| Nivel | Rigidez Lateral K (ton/cm) | |
|-------|-------------------------------|-------|
| | En X | En Y |
| 4to | 138.8 | 125.5 |
| 3ro | 144.1 | 135.5 |
| 2do | 137.5 | 129.6 |
| 1ro | 54.7 | 46.4 |

Tabla 5.29 Rigideces Laterales del Modelo PBF-41.

| Nivel | Rigidez Lateral K (ton/cm) | |
|-------|-------------------------------|-------|
| | En X | En Y |
| 4to | 142.9 | 132.8 |
| 3ro | 154.9 | 146.0 |
| 2do | 175.4 | 168.7 |
| 1ro | 131.8 | 117.7 |

Tabla 5.30 Rigideces Laterales del Modelo PBF-42.

| Nivel | Rigidez Lateral K (ton/cm) | |
|-------|-------------------------------|-------|
| | En X | En Y |
| 4to | 147.2 | 136.6 |
| 3ro | 159.4 | 150.2 |
| 2do | 198.9 | 189.0 |
| 1ro | 278.7 | 260.9 |

Tabla 5.31 Rigideces Laterales del Modelo PBF-43

| Nivel | Rigidez Lateral K (ton/cm) | |
|-------|-------------------------------|-------|
| | En X | En Y |
| 4to | 145.2 | 135.5 |
| 3ro | 158.1 | 148.5 |
| 2do | 189.1 | 181.5 |
| 1ro | 194.8 | 179.1 |

Tabla 5.32 Rigideces Laterales del Modelo PBF-44

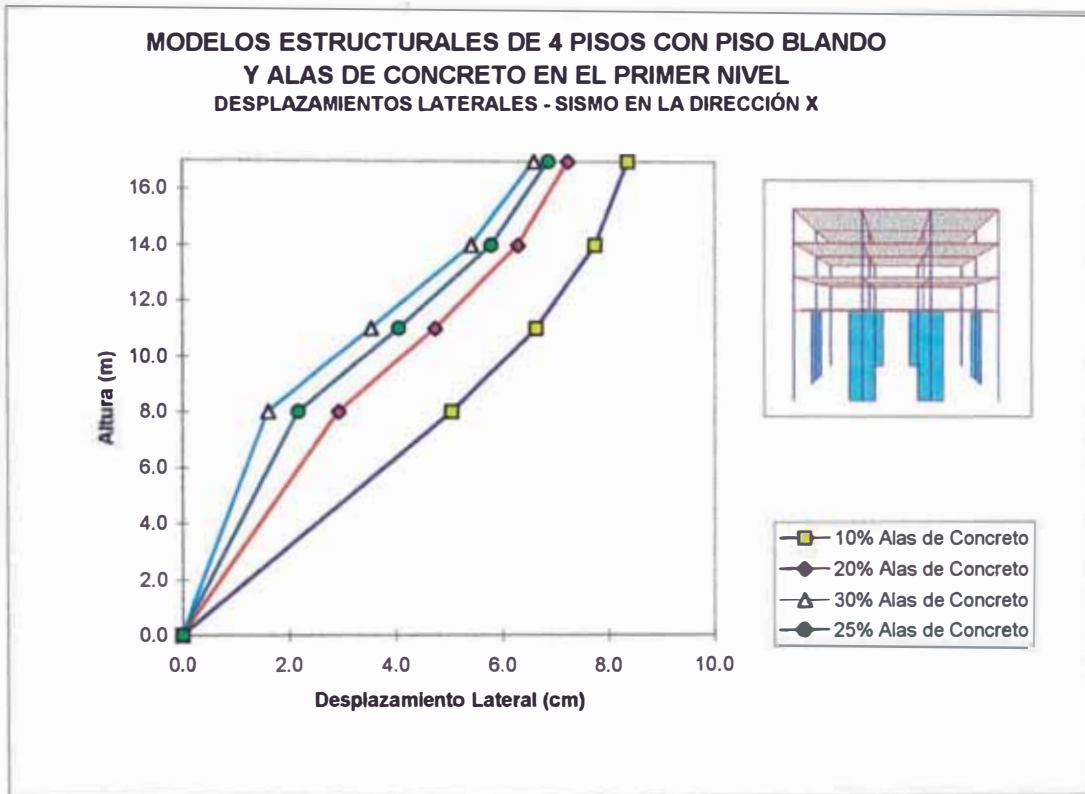


Figura 5.3

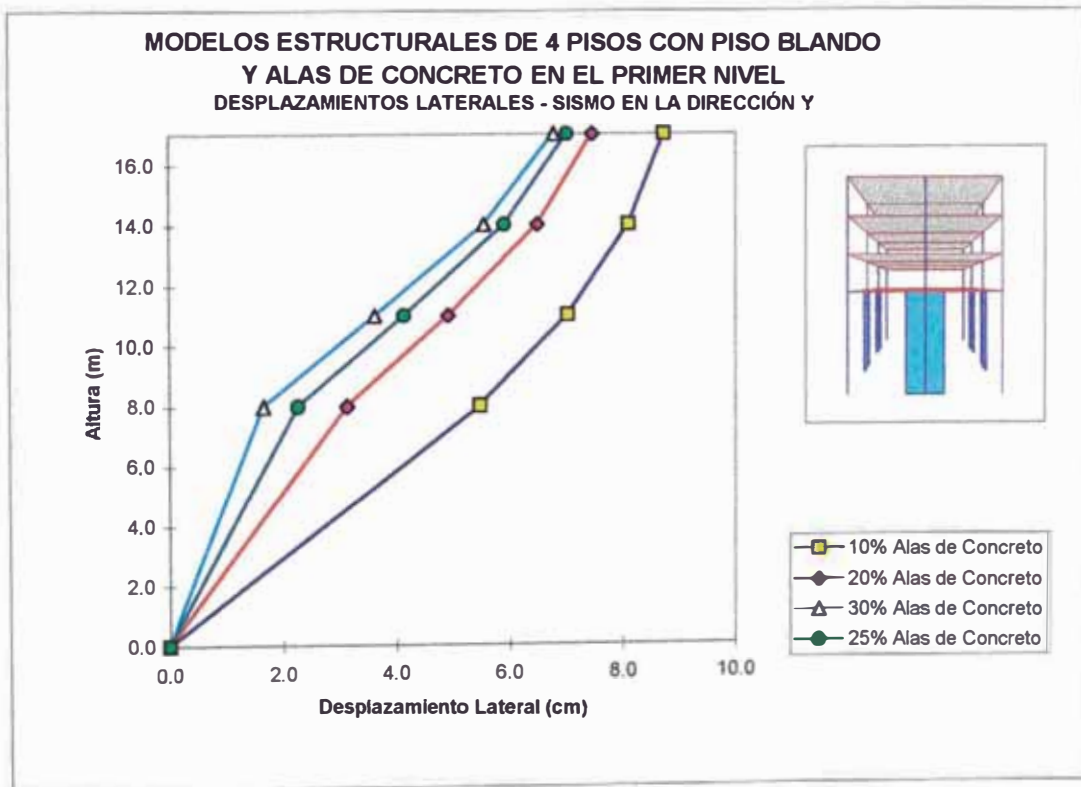


Figura 5.4

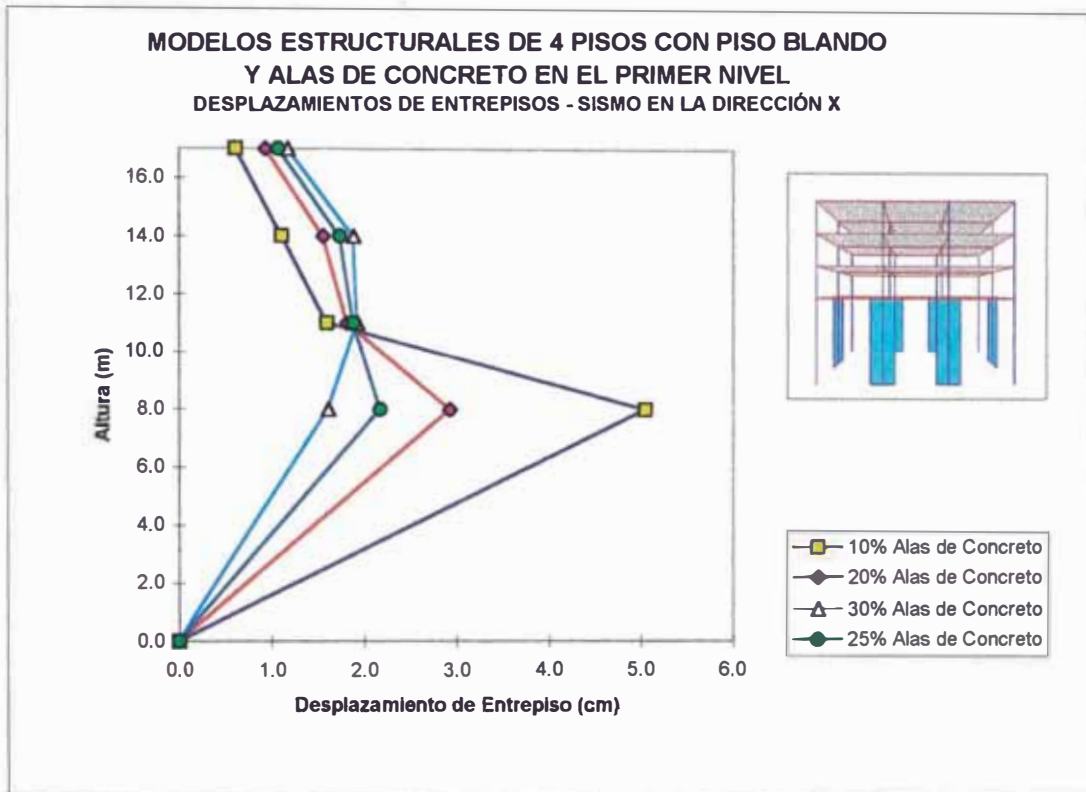


Figura 5.5

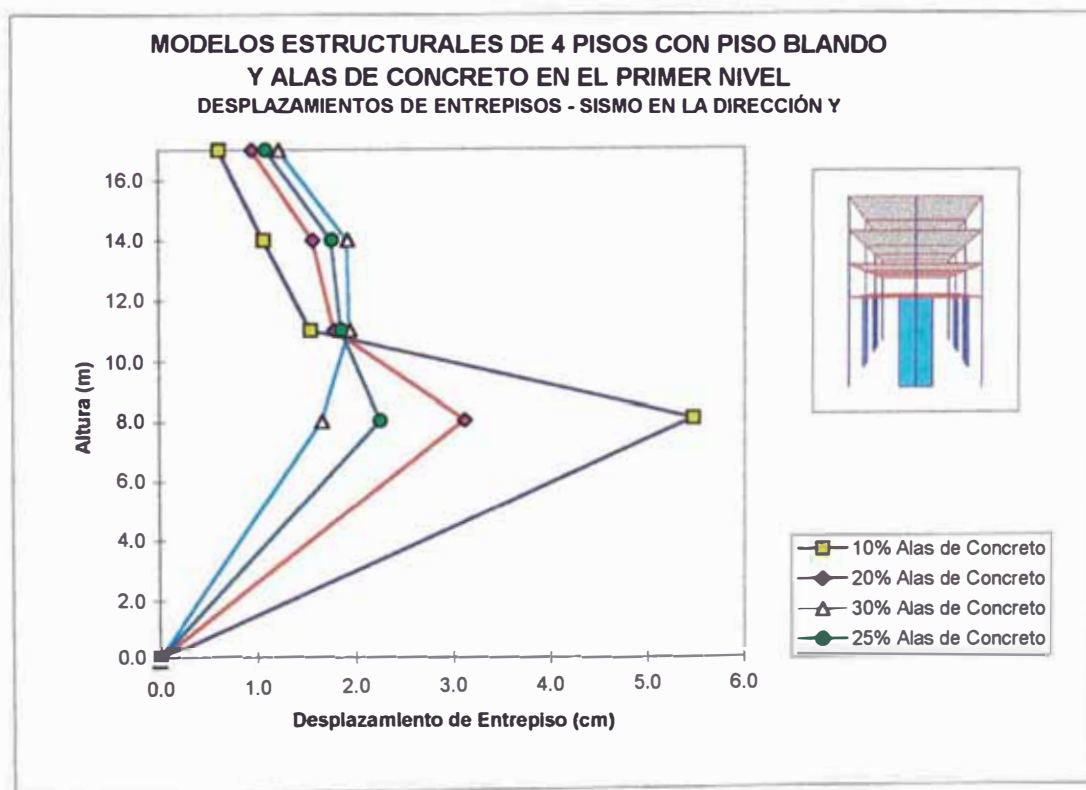


Figura 5.6

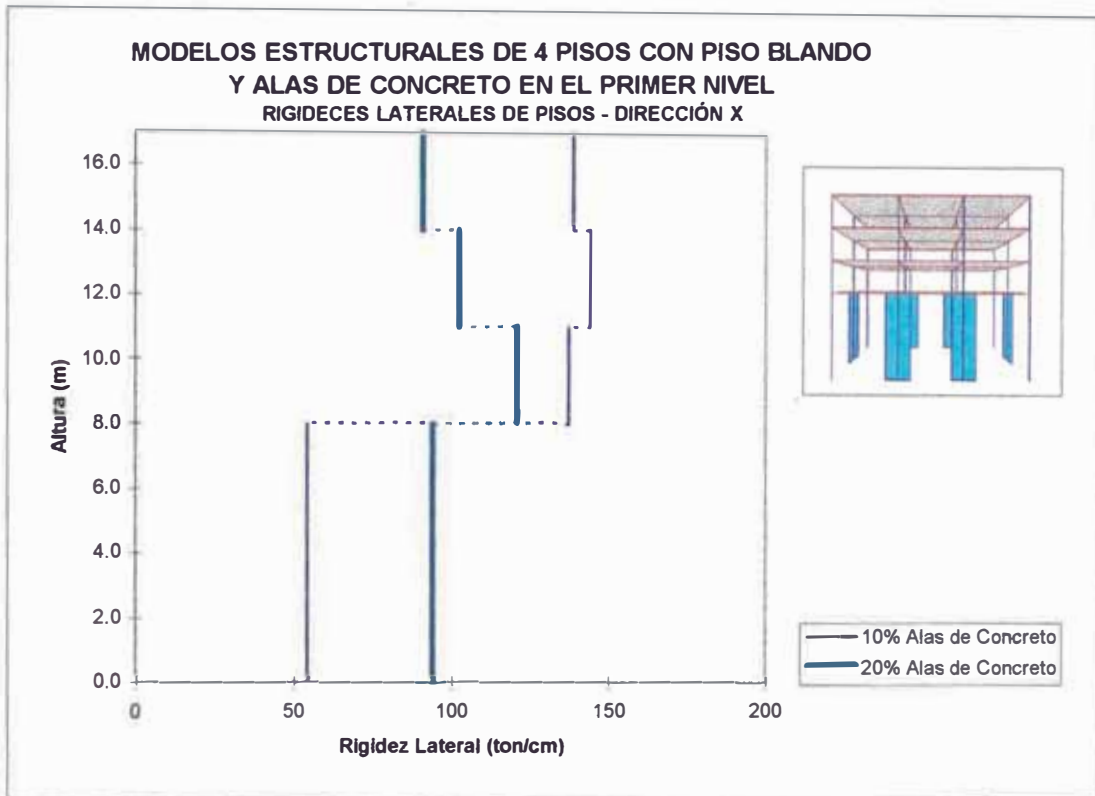


Figura 5.7

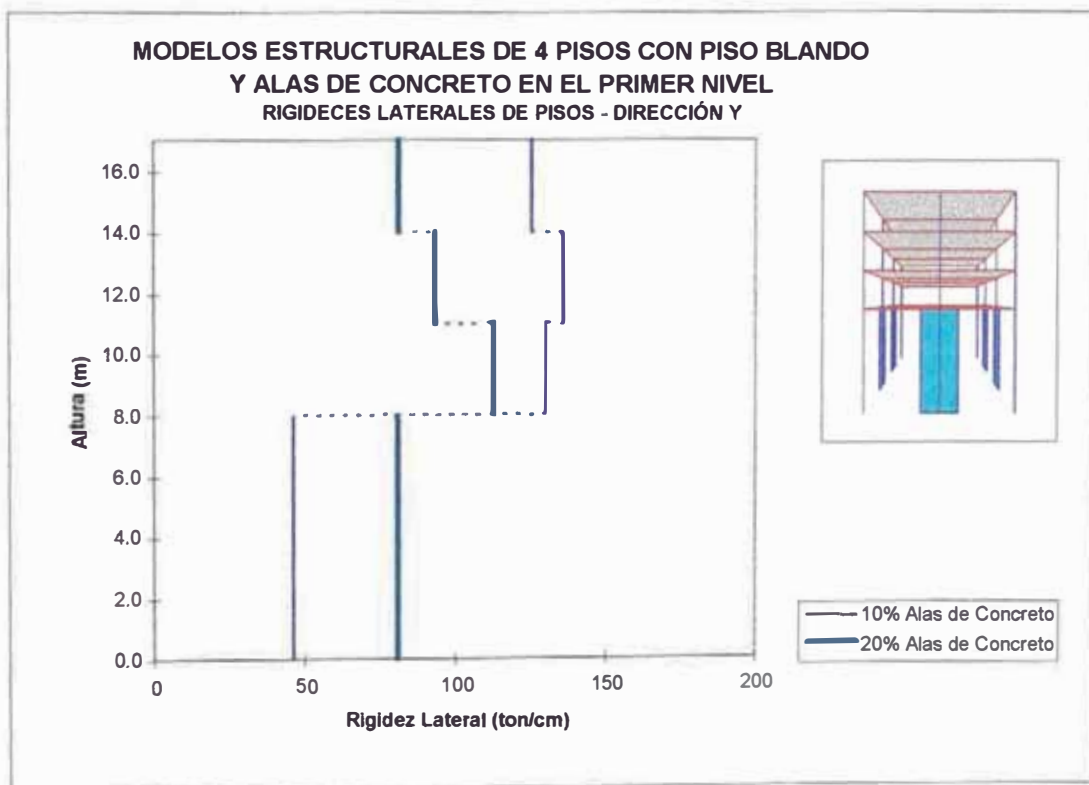


Figura 5.8

5.5 ANÁLISIS DINÁMICO DE MODELOS ESTRUCTURALES DE 8 PISOS

En esta sección se presentan los resultados del análisis sísmico dinámico de los modelos estructurales que conforman los Grupos 1-2, 2-2, 3-2 y 4-2, definidos en el ítem 5.2. El modelo tridimensional M-82, elegido como *modelo patrón* de los edificios de 8 pisos, se presenta en la Figura 5.9.

Al igual que en los modelos de 4 pisos, el análisis se ha efectuado según la Norma Técnica de Edificación E.030 de Diseño Sismorresistente (salvo se indique lo contrario) para dos direcciones de entrada del espectro: 0° y 90° . Como las estructuras son simétricas, los desplazamientos laterales sólo tienen componente en la dirección del sismo.

Para el cálculo de la respuesta (desplazamientos y fuerzas) se ha considerado el número total de las formas de modo de vibración, que en el caso de modelos de 8 pisos es de 24.

Los desplazamientos laterales, de todos los modelos de 8 pisos, se muestran en las Tablas 5.33 a 5.47. Las rigideces laterales, de los modelos del Grupo 4-2, aparecen en las Tablas 5.48 a 5.51. Adicionalmente se presentan gráficos de desplazamientos y de rigideces obtenidos de las tablas anteriores (ver Figuras 5.10 a 5.15).

Las denominaciones sobre *desplazamientos laterales* dadas en el ítem 5.4 también son válidas para esta parte.

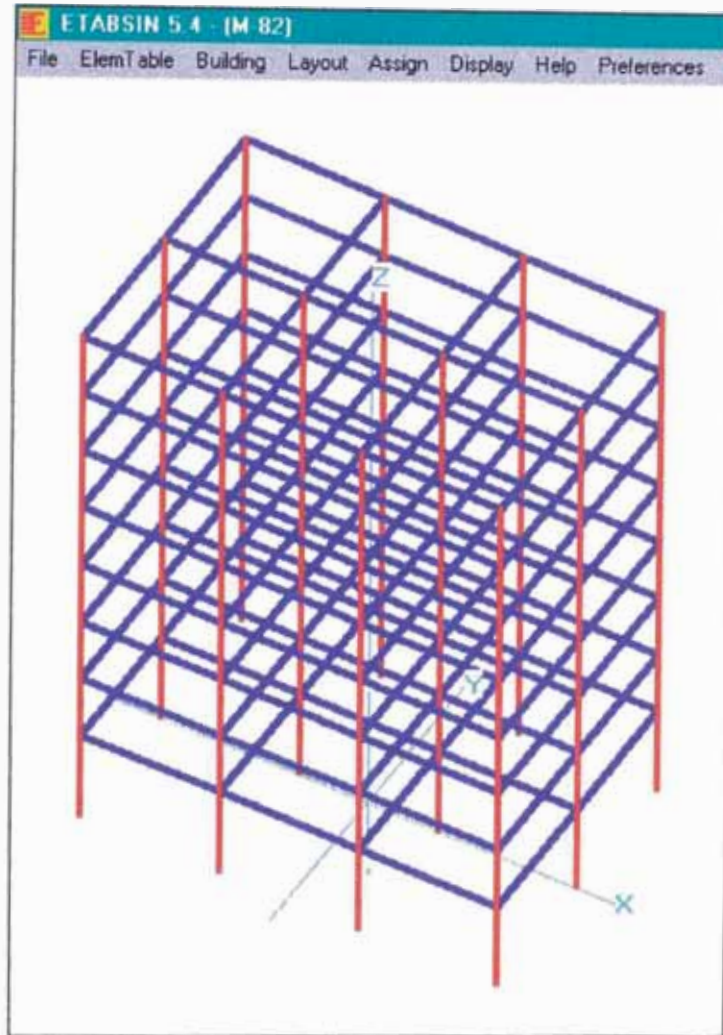


Figura 5.9 Modelo Patrón para el Análisis Dinámico Tridimensional de Estructuras de 8 Pisos.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | | Δ Permisible (cm) |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|--------------------------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 8vo | 7.58 | 8.19 | 0.38 | 0.43 | 3.00 |
| 7mo | 7.20 | 7.76 | 0.58 | 0.65 | 3.00 |
| 6to | 6.62 | 7.11 | 0.80 | 0.88 | 3.00 |
| 5to | 5.82 | 6.24 | 1.00 | 1.09 | 3.00 |
| 4to | 4.82 | 5.15 | 1.15 | 1.24 | 3.00 |
| 3ro | 3.68 | 3.91 | 1.25 | 1.34 | 3.00 |
| 2do | 2.43 | 2.57 | 1.25 | 1.34 | 3.00 |
| 1ro | 1.18 | 1.23 | 1.18 | 1.23 | 4.20 |

Tabla 5.33 Modelo M-80. Resultados del análisis dinámico según RNC77.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | | Δ Permisible (cm) |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|--------------------------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 8vo | 13.53 | 13.88 | 0.75 | 0.80 | 2.10 |
| 7mo | 12.78 | 13.08 | 1.07 | 1.13 | 2.10 |
| 6to | 11.71 | 11.95 | 1.38 | 1.44 | 2.10 |
| 5to | 10.33 | 10.51 | 1.68 | 1.73 | 2.10 |
| 4to | 8.65 | 8.78 | 1.93 | 1.99 | 2.10 |
| 3ro | 6.72 | 6.79 | 2.19 | 2.23 | 2.10 |
| 2do | 4.53 | 4.56 | 2.29 | 2.32 | 2.10 |
| 1ro | 2.24 | 2.24 | 2.24 | 2.24 | 2.94 |

Tabla 5.34 Modelo M-81. Resultados del análisis dinámico según NTE E.030.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | | Δ Permisible (cm) |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|--------------------------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 8vo | 11.30 | 11.67 | 0.53 | 0.59 | 2.10 |
| 7mo | 10.77 | 11.08 | 0.83 | 0.89 | 2.10 |
| 6to | 9.94 | 10.19 | 1.12 | 1.17 | 2.10 |
| 5to | 8.82 | 9.02 | 1.36 | 1.41 | 2.10 |
| 4to | 7.46 | 7.61 | 1.57 | 1.62 | 2.10 |
| 3ro | 5.89 | 5.99 | 1.79 | 1.84 | 2.10 |
| 2do | 4.10 | 4.15 | 1.94 | 1.98 | 2.10 |
| 1ro | 2.16 | 2.17 | 2.16 | 2.17 | 2.94 |

Tabla 5.35 Modelo M-82. Resultados del análisis dinámico según NTE E.030.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | | Δ Permisible (cm) |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|--------------------------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 8vo | 11.23 | 11.61 | 0.54 | 0.60 | 2.10 |
| 7mo | 10.69 | 11.01 | 0.83 | 0.89 | 2.10 |
| 6to | 9.86 | 10.12 | 1.12 | 1.17 | 2.10 |
| 5to | 8.74 | 8.95 | 1.37 | 1.42 | 2.10 |
| 4to | 7.37 | 7.53 | 1.57 | 1.63 | 2.10 |
| 3ro | 5.80 | 5.90 | 1.79 | 1.84 | 2.10 |
| 2do | 4.01 | 4.06 | 1.92 | 1.97 | 2.10 |
| 1ro | 2.09 | 2.09 | 2.09 | 2.09 | 2.94 |

Tabla 5.36 Modelo M-83. Resultados del análisis dinámico según NTE E.030.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | | Δ Permisible (cm) |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|--------------------------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 8vo | 12.92 | 13.71 | 0.35 | 0.41 | 2.10 |
| 7mo | 12.56 | 13.30 | 0.54 | 0.60 | 2.10 |
| 6to | 12.02 | 12.70 | 0.73 | 0.80 | 2.10 |
| 5to | 11.30 | 11.90 | 0.92 | 1.00 | 2.10 |
| 4to | 10.37 | 10.90 | 1.10 | 1.19 | 2.10 |
| 3ro | 9.27 | 9.71 | 1.33 | 1.43 | 2.10 |
| 2do | 7.94 | 8.28 | 1.70 | 1.81 | 2.10 |
| 1ro | 6.24 | 6.47 | 6.24 | 6.47 | 5.88 |

Tabla 5.37 Modelo PB-8A. Estructura con piso blando y 5% de alas de concreto en todos los niveles.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | | Δ Permisible (cm) |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|--------------------------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 8vo | 12.17 | 12.94 | 0.45 | 0.53 | 2.10 |
| 7mo | 11.72 | 12.41 | 0.63 | 0.71 | 2.10 |
| 6to | 11.09 | 11.69 | 0.82 | 0.91 | 2.10 |
| 5to | 10.27 | 10.79 | 1.03 | 1.11 | 2.10 |
| 4to | 9.24 | 9.68 | 1.22 | 1.30 | 2.10 |
| 3ro | 8.03 | 8.38 | 1.43 | 1.53 | 2.10 |
| 2do | 6.60 | 6.85 | 1.71 | 1.79 | 2.10 |
| 1ro | 4.89 | 5.06 | 4.89 | 5.06 | 5.88 |

Tabla 5.38 Modelo PB-8B. Estructura con piso blando y 10% de alas de concreto en todos los niveles.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | | Δ Permisible (cm) |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|--------------------------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 8vo | 11.26 | 12.13 | 0.56 | 0.67 | 2.10 |
| 7mo | 10.70 | 11.46 | 0.71 | 0.83 | 2.10 |
| 6to | 10.00 | 10.64 | 0.89 | 1.01 | 2.10 |
| 5to | 9.11 | 9.63 | 1.08 | 1.19 | 2.10 |
| 4to | 8.03 | 8.45 | 1.25 | 1.36 | 2.10 |
| 3ro | 6.79 | 7.09 | 1.42 | 1.52 | 2.10 |
| 2do | 5.37 | 5.57 | 1.58 | 1.67 | 2.10 |
| 1ro | 3.80 | 3.90 | 3.80 | 3.90 | 5.88 |

Tabla 5.39 Modelo PB-8C. Estructura con piso blando y 15% de alas de concreto en todos los niveles.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 8vo | 14.21 | 14.64 | 0.32 | 0.36 |
| 7mo | 13.89 | 14.28 | 0.50 | 0.56 |
| 6to | 13.39 | 13.72 | 0.70 | 0.76 |
| 5to | 12.69 | 12.96 | 0.89 | 0.96 |
| 4to | 11.80 | 12.00 | 1.06 | 1.14 |
| 3ro | 10.74 | 10.86 | 1.29 | 1.37 |
| 2do | 9.45 | 9.50 | 1.72 | 1.80 |
| 1ro | 7.73 | 7.70 | 7.73 | 7.70 |

Tabla 5.40 Modelo PB-8B0. Estructura con piso blando y sin alas de concreto.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 8vo | 12.58 | 13.11 | 0.44 | 0.49 |
| 7mo | 12.14 | 12.62 | 0.71 | 0.74 |
| 6to | 11.43 | 11.89 | 0.95 | 0.98 |
| 5to | 10.48 | 10.91 | 1.17 | 1.20 |
| 4to | 9.31 | 9.71 | 1.35 | 1.40 |
| 3ro | 7.96 | 8.32 | 1.57 | 1.62 |
| 2do | 6.39 | 6.70 | 1.70 | 1.80 |
| 1ro | 4.70 | 4.90 | 4.70 | 4.90 |

Tabla 5.41 Modelo PB-8B1. Estructura con piso blando y alas de concreto hasta el 2do nivel.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 8vo | 12.41 | 13.04 | 0.46 | 0.50 |
| 7mo | 11.95 | 12.54 | 0.71 | 0.74 |
| 6to | 11.24 | 11.80 | 0.97 | 1.00 |
| 5to | 10.27 | 10.80 | 1.16 | 1.21 |
| 4to | 9.11 | 9.59 | 1.25 | 1.34 |
| 3ro | 7.86 | 8.25 | 1.41 | 1.52 |
| 2do | 6.45 | 6.73 | 1.67 | 1.78 |
| 1ro | 4.78 | 4.95 | 4.78 | 4.95 |

Tabla 5.42 Modelo PB-8B2. Estructura con piso blando y alas de concreto hasta el 4to nivel.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 8vo | 12.23 | 12.96 | 0.45 | 0.50 |
| 7mo | 11.78 | 12.47 | 0.70 | 0.75 |
| 6to | 11.09 | 11.72 | 0.87 | 0.96 |
| 5to | 10.22 | 10.76 | 1.04 | 1.13 |
| 4to | 9.18 | 9.63 | 1.21 | 1.31 |
| 3ro | 7.97 | 8.33 | 1.43 | 1.52 |
| 2do | 6.55 | 6.81 | 1.69 | 1.79 |
| 1ro | 4.86 | 5.03 | 4.86 | 5.03 |

Tabla 5.43 Modelo PB-8B3. Estructura con piso blando y alas de concreto hasta el 6to nivel.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 8vo | 12.68 | 13.16 | 0.43 | 0.47 |
| 7mo | 12.24 | 12.69 | 0.68 | 0.72 |
| 6to | 11.56 | 11.97 | 0.93 | 0.95 |
| 5to | 10.63 | 11.02 | 1.15 | 1.18 |
| 4to | 9.48 | 9.84 | 1.33 | 1.36 |
| 3ro | 8.15 | 8.48 | 1.54 | 1.55 |
| 2do | 6.62 | 6.93 | 1.78 | 1.79 |
| 1ro | 4.84 | 5.14 | 4.84 | 5.14 |

Tabla 5.44 Modelo PBF-81. Estructura con piso blando y 10% de alas de concreto en el primer nivel.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 8vo | 11.47 | 11.88 | 0.55 | 0.61 |
| 7mo | 10.92 | 11.27 | 0.86 | 0.90 |
| 6to | 10.07 | 10.37 | 1.13 | 1.17 |
| 5to | 8.94 | 9.20 | 1.37 | 1.40 |
| 4to | 7.58 | 7.80 | 1.55 | 1.58 |
| 3ro | 6.03 | 6.23 | 1.70 | 1.72 |
| 2do | 4.34 | 4.51 | 1.63 | 1.64 |
| 1ro | 2.71 | 2.87 | 2.71 | 2.87 |

Tabla 5.45 Modelo PBF-82. Estructura con piso blando y 20% de alas de concreto en el primer nivel.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 8vo | 10.82 | 11.20 | 0.62 | 0.67 |
| 7mo | 10.20 | 10.52 | 0.94 | 1.00 |
| 6to | 9.26 | 9.53 | 1.24 | 1.29 |
| 5to | 8.02 | 8.24 | 1.51 | 1.55 |
| 4to | 6.51 | 6.68 | 1.70 | 1.74 |
| 3ro | 4.81 | 4.94 | 1.82 | 1.86 |
| 2do | 2.99 | 3.08 | 1.52 | 1.57 |
| 1ro | 1.48 | 1.52 | 1.48 | 1.52 |

Tabla 5.46 Modelo PBF-83. Estructura con piso blando y 30% de alas de concreto en el primer nivel.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 8vo | 11.09 | 11.51 | 0.58 | 0.65 |
| 7mo | 10.51 | 10.85 | 0.91 | 0.96 |
| 6to | 9.60 | 9.89 | 1.19 | 1.25 |
| 5to | 8.41 | 8.65 | 1.45 | 1.49 |
| 4to | 6.96 | 7.16 | 1.64 | 1.67 |
| 3ro | 5.33 | 5.48 | 1.76 | 1.79 |
| 2do | 3.57 | 3.69 | 1.58 | 1.61 |
| 1ro | 2.00 | 2.09 | 2.00 | 2.09 |

Tabla 5.47 Modelo PBF-84. Estructura con piso blando y 25% de alas de concreto en el primer nivel.

| Nivel | Rigidez Lateral K (ton/cm) | |
|-------|-------------------------------|-------|
| | En X | En Y |
| 8vo | 178.4 | 154.0 |
| 7mo | 210.2 | 186.2 |
| 6to | 204.1 | 185.8 |
| 5to | 192.2 | 174.5 |
| 4to | 182.8 | 166.5 |
| 3ro | 171.9 | 158.3 |
| 2do | 163.2 | 150.4 |
| 1ro | 67.1 | 58.8 |

Tabla 5.48 Rigideces Laterales del Modelo PBF-81.

| Nivel | Rigidez Lateral K (ton/cm) | |
|-------|-------------------------------|-------|
| | En X | En Y |
| 8vo | 193.6 | 171.6 |
| 7mo | 219.6 | 204.1 |
| 6to | 211.0 | 196.6 |
| 5to | 194.9 | 181.5 |
| 4to | 186.5 | 173.2 |
| 3ro | 186.0 | 173.1 |
| 2do | 214.9 | 201.6 |
| 1ro | 145.8 | 131.9 |

Tabla 5.49 Rigideces Laterales del Modelo PBF-82.

| Nivel | Rigidez Lateral K (ton/cm) | |
|-------|-------------------------------|-------|
| | En X | En Y |
| 8vo | 203.1 | 183.4 |
| 7mo | 221.9 | 206.3 |
| 6to | 207.4 | 192.4 |
| 5to | 189.9 | 176.0 |
| 4to | 184.6 | 171.3 |
| 3ro | 192.3 | 178.2 |
| 2do | 255.7 | 236.1 |
| 1ro | 293.1 | 275.8 |

Tabla 5.50 Rigideces Laterales del Modelo PBF-83.

| Nivel | Rigidez Lateral K (ton/cm) | |
|-------|-------------------------------|-------|
| | En X | En Y |
| 8vo | 199.6 | 177.2 |
| 7mo | 222.0 | 206.2 |
| 6to | 209.5 | 194.8 |
| 5to | 192.3 | 178.6 |
| 4to | 185.5 | 172.2 |
| 3ro | 190.8 | 177.3 |
| 2do | 236.2 | 221.3 |
| 1ro | 209.8 | 193.6 |

Tabla 5.51 Rigideces Laterales del Modelo PBF-84.

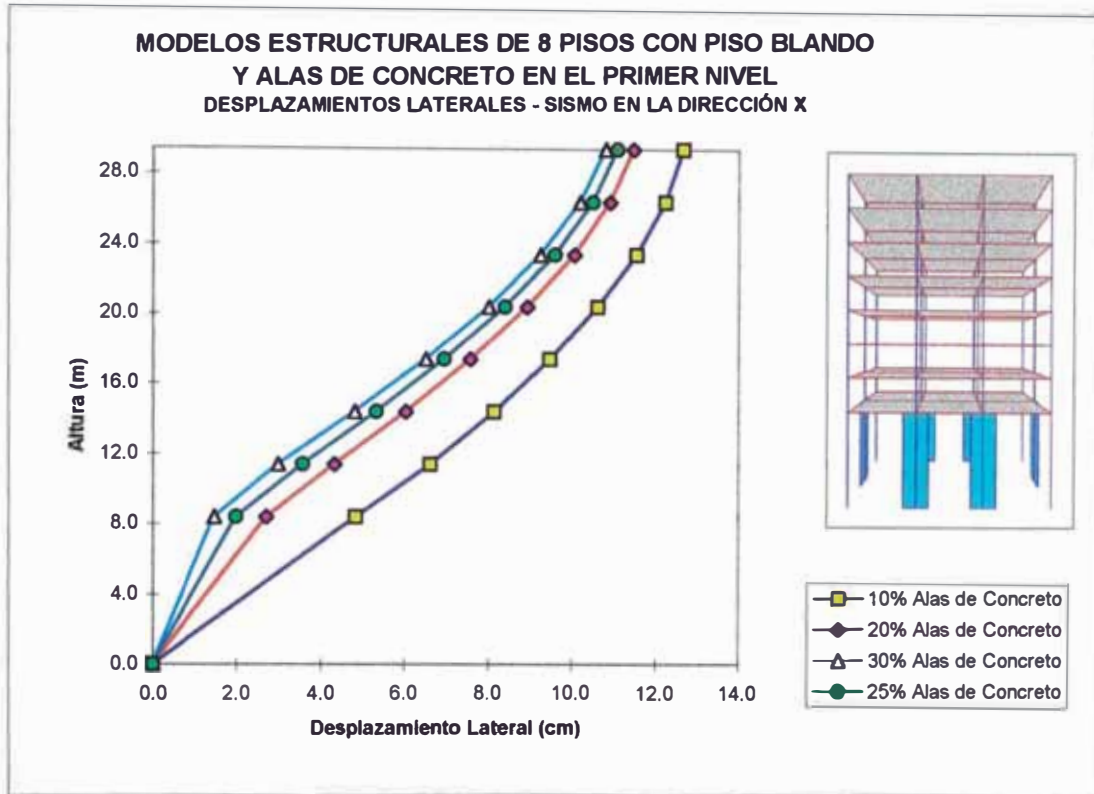


Figura 5.10

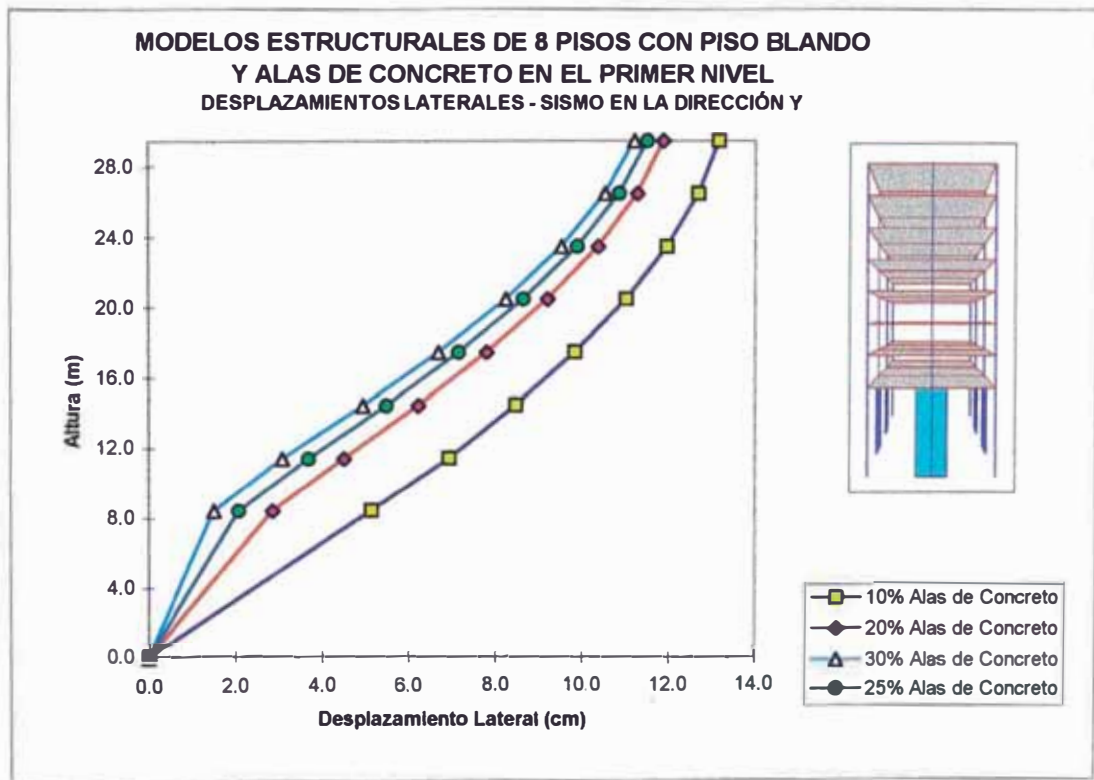


Figura 5.11

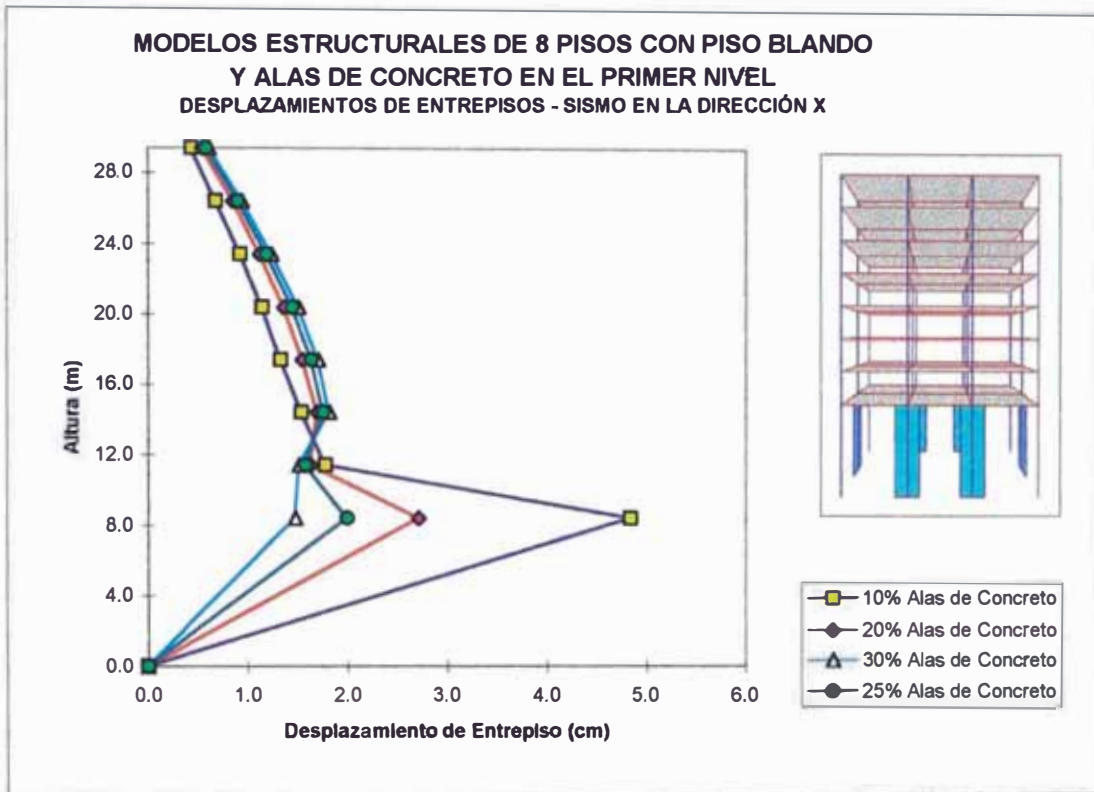


Figura 5.12

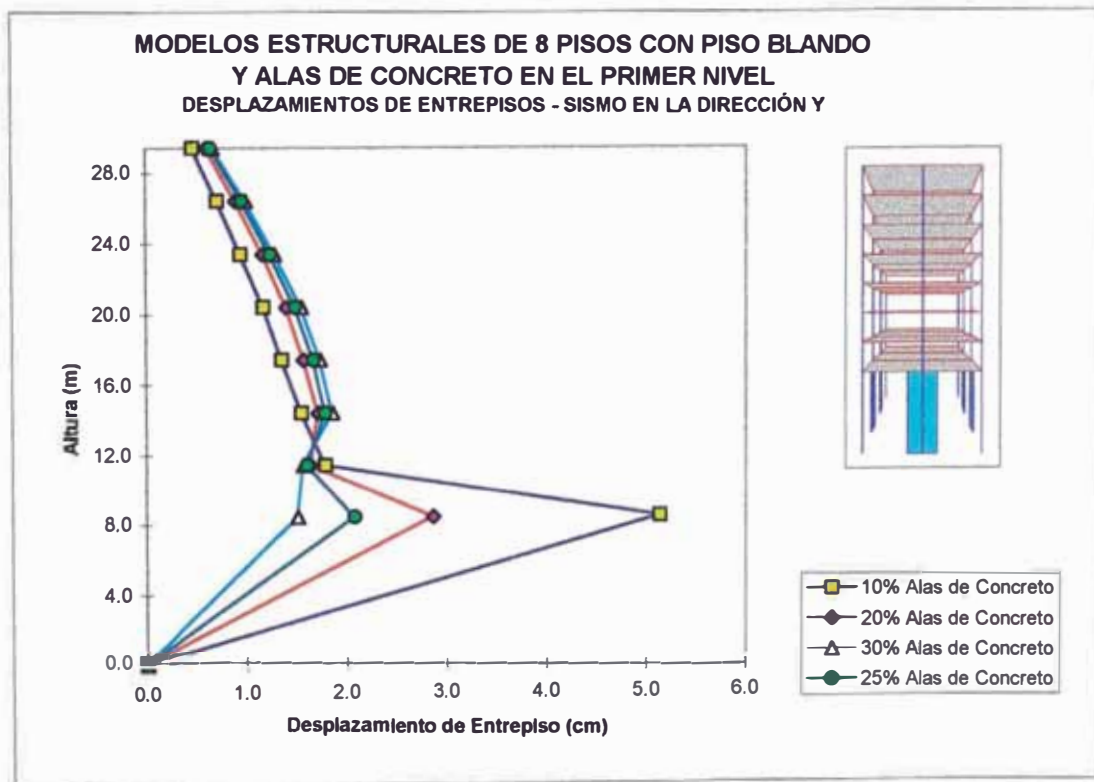


Figura 5.13

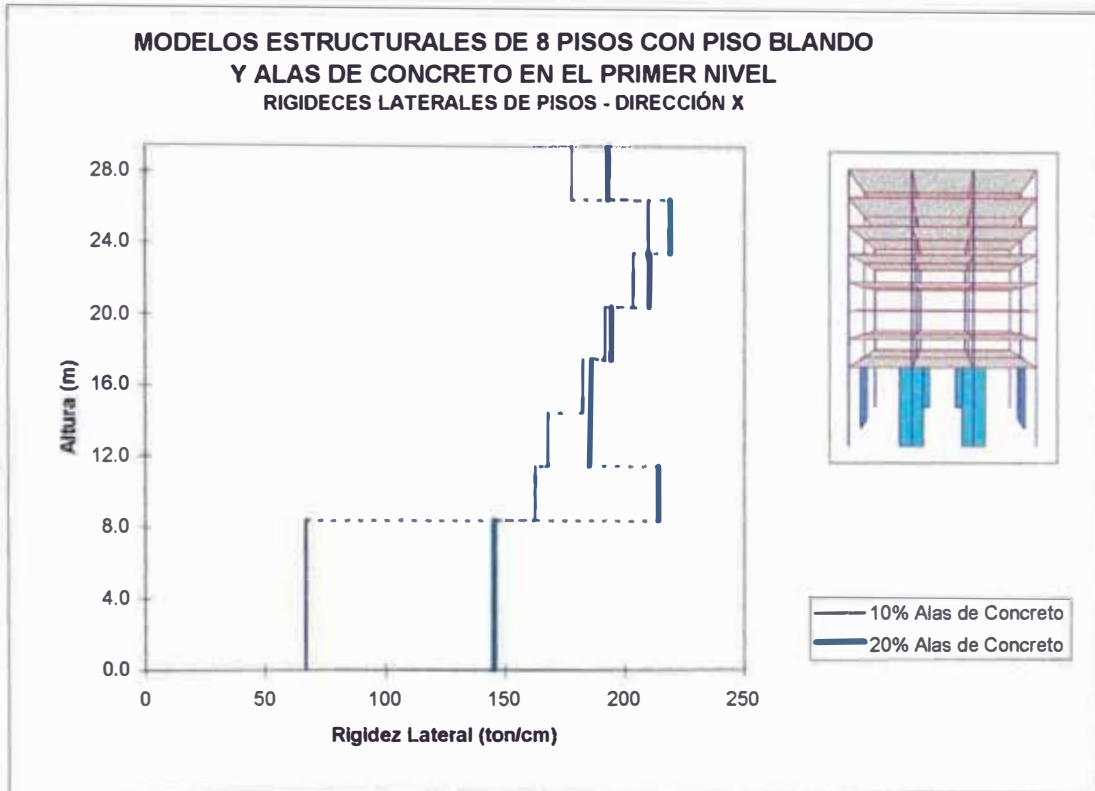


Figura 5.14

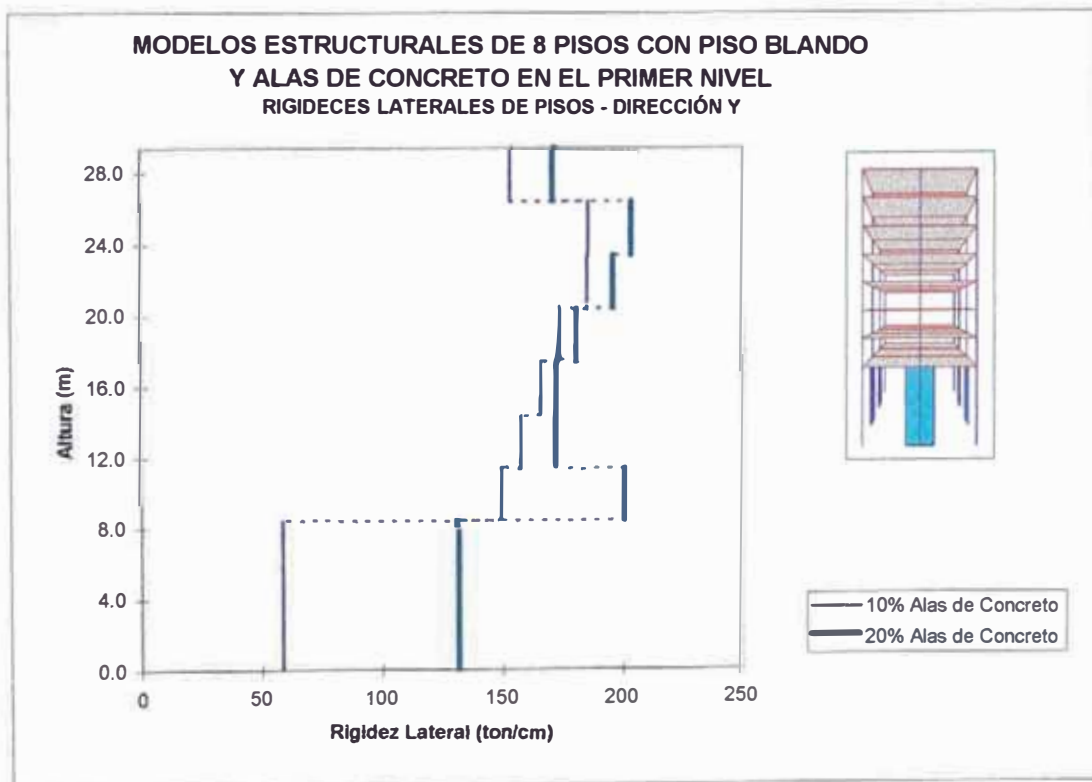


Figura 5.15

5.6 ANÁLISIS DINÁMICO DE MODELOS ESTRUCTURALES DE 12 PISOS

En esta sección se presentan los resultados del análisis sísmico dinámico de los modelos estructurales que conforman los Grupos 1-3, 2-3, 3-3 y 4-3, definidos en el ítem 5.2. El modelo tridimensional M-121, elegido como *modelo patrón* de los edificios de 12 pisos, se presenta en la Figura 5.16.

Al igual que en los modelos de 4 y 8 pisos, el análisis se ha efectuado según la Norma Técnica de Edificación E.030 de Diseño Sismorresistente (salvo se indique lo contrario) para dos direcciones de entrada del espectro: 0° y 90° . Como las estructuras son simétricas, los desplazamientos laterales sólo tienen componente en la dirección del sismo.

Para el cálculo de la respuesta (desplazamientos y fuerzas) se ha considerado el número total de las formas de modo de vibración, que en el caso de los modelos de 12 pisos es de 36.

Los desplazamientos laterales, de todos los modelos de 12 pisos, se muestran en las Tablas 5.52 a 5.68. Las rigideces laterales, de los modelos del Grupo 4-3, aparecen en las Tablas 5.69 a 5.72. Adicionalmente se presentan gráficos de desplazamientos y de rigideces obtenidos de las tablas anteriores (ver Figuras 5.17 a 5.22).

Las denominaciones sobre *desplazamientos laterales* dadas en el ítem 5.4 también son válidas para esta parte.

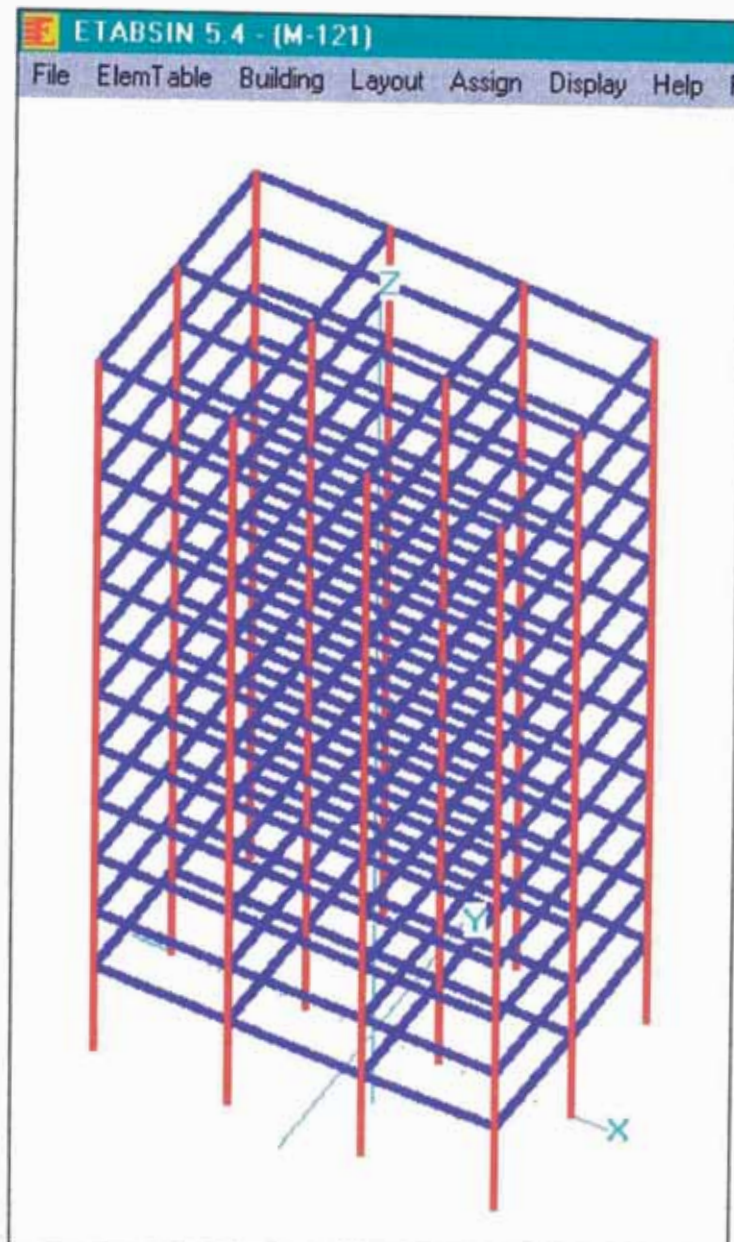


Figura 5.16 Modelo Patrón para el Análisis Dinámico Tridimensional de Estructuras de 12 Pisos.

| Nivel | Desplazamiento Lateral | | Desplazamiento de Entepiso | | Δ Permisible (cm) |
|-------|------------------------|------------|----------------------------|------------|--------------------------------|
| | D (cm) | | Δ (cm) | | |
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 12vo | 16.54 | 18.06 | 0.44 | 0.53 | 3.00 |
| 11vo | 16.09 | 17.53 | 0.64 | 0.73 | 3.00 |
| 10mo | 15.45 | 16.80 | 0.87 | 0.98 | 3.00 |
| 9no | 14.58 | 15.82 | 1.11 | 1.23 | 3.00 |
| 8vo | 13.48 | 14.59 | 1.31 | 1.45 | 3.00 |
| 7mo | 12.17 | 13.14 | 1.49 | 1.64 | 3.00 |
| 6to | 10.67 | 11.50 | 1.66 | 1.82 | 3.00 |
| 5to | 9.01 | 9.68 | 1.80 | 1.96 | 3.00 |
| 4to | 7.22 | 7.72 | 1.88 | 2.04 | 3.00 |
| 3ro | 5.34 | 5.68 | 1.89 | 2.04 | 3.00 |
| 2do | 3.45 | 3.64 | 1.78 | 1.90 | 3.00 |
| 1ro | 1.67 | 1.74 | 1.67 | 1.74 | 4.50 |

Tabla 5.52 Modelo M-120. Resultados del análisis dinámico según RNC77.

| Nivel | Desplazamiento Lateral | | Desplazamiento de Entepiso | | Δ Permisible (cm) |
|-------|------------------------|------------|----------------------------|------------|--------------------------------|
| | D (cm) | | Δ (cm) | | |
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 12vo | 18.03 | 18.82 | 0.55 | 0.63 | 2.10 |
| 11vo | 17.48 | 18.19 | 0.76 | 0.82 | 2.10 |
| 10mo | 16.72 | 17.37 | 0.97 | 1.04 | 2.10 |
| 9no | 15.75 | 16.33 | 1.18 | 1.25 | 2.10 |
| 8vo | 14.57 | 15.08 | 1.36 | 1.43 | 2.10 |
| 7mo | 13.21 | 13.65 | 1.52 | 1.61 | 2.10 |
| 6to | 11.69 | 12.04 | 1.69 | 1.77 | 2.10 |
| 5to | 10.00 | 10.27 | 1.85 | 1.93 | 2.10 |
| 4to | 8.15 | 8.34 | 1.99 | 2.06 | 2.10 |
| 3ro | 6.16 | 6.28 | 2.09 | 2.15 | 2.10 |
| 2do | 4.07 | 4.13 | 2.06 | 2.11 | 2.10 |
| 1ro | 2.01 | 2.02 | 2.01 | 2.02 | 3.15 |

Tabla 5.53 Modelo M-121. Resultados del análisis dinámico según NTE E.030.

| Nivel | Desplazamiento Lateral | | Desplazamiento de Entepiso | | Δ Permisible (cm) |
|-------|------------------------|------------|----------------------------|------------|--------------------------------|
| | D (cm) | | Δ (cm) | | |
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 12vo | 15.48 | 16.18 | 0.43 | 0.50 | 2.10 |
| 11vo | 15.05 | 15.68 | 0.62 | 0.69 | 2.10 |
| 10mo | 14.43 | 14.99 | 0.82 | 0.88 | 2.10 |
| 9no | 13.61 | 14.11 | 0.99 | 1.06 | 2.10 |
| 8vo | 12.62 | 13.05 | 1.12 | 1.19 | 2.10 |
| 7mo | 11.50 | 11.86 | 1.26 | 1.33 | 2.10 |
| 6to | 10.24 | 10.53 | 1.39 | 1.46 | 2.10 |
| 5to | 8.85 | 9.07 | 1.54 | 1.61 | 2.10 |
| 4to | 7.31 | 7.46 | 1.67 | 1.72 | 2.10 |
| 3ro | 5.64 | 5.74 | 1.78 | 1.84 | 2.10 |
| 2do | 3.86 | 3.90 | 1.84 | 1.88 | 2.10 |
| 1ro | 2.02 | 2.02 | 2.02 | 2.02 | 3.15 |

Tabla 5.54 Modelo M-122. Resultados del análisis dinámico según NTE E.030.

| Nivel | Desplazamiento Lateral | | Desplazamiento de Entepiso | | Δ Permisible (cm) |
|-------|------------------------|------------|----------------------------|------------|--------------------------------|
| | D (cm) | | Δ (cm) | | |
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 12vo | 15.39 | 16.10 | 0.43 | 0.50 | 2.10 |
| 11vo | 14.96 | 15.60 | 0.62 | 0.69 | 2.10 |
| 10mo | 14.34 | 14.91 | 0.81 | 0.89 | 2.10 |
| 9no | 13.53 | 14.02 | 0.99 | 1.05 | 2.10 |
| 8vo | 12.54 | 12.97 | 1.12 | 1.19 | 2.10 |
| 7mo | 11.42 | 11.78 | 1.26 | 1.33 | 2.10 |
| 6to | 10.16 | 10.45 | 1.40 | 1.46 | 2.10 |
| 5to | 8.76 | 8.99 | 1.54 | 1.61 | 2.10 |
| 4to | 7.22 | 7.38 | 1.66 | 1.73 | 2.10 |
| 3ro | 5.56 | 5.65 | 1.79 | 1.84 | 2.10 |
| 2do | 3.77 | 3.81 | 1.81 | 1.85 | 2.10 |
| 1ro | 1.96 | 1.96 | 1.96 | 1.96 | 3.15 |

Tabla 5.55 Modelo M-123. Resultados del análisis dinámico según NTE E.030.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | | Δ Permisible (cm) |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|--------------------------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 12vo | 19.62 | 20.85 | 0.44 | 0.51 | 2.10 |
| 11vo | 19.18 | 20.34 | 0.58 | 0.66 | 2.10 |
| 10mo | 18.59 | 19.68 | 0.77 | 0.84 | 2.10 |
| 9no | 17.83 | 18.84 | 0.93 | 1.02 | 2.10 |
| 8vo | 16.90 | 17.82 | 1.09 | 1.18 | 2.10 |
| 7mo | 15.81 | 16.64 | 1.24 | 1.34 | 2.10 |
| 6to | 14.57 | 15.31 | 1.38 | 1.49 | 2.10 |
| 5to | 13.19 | 13.82 | 1.54 | 1.64 | 2.10 |
| 4to | 11.66 | 12.18 | 1.70 | 1.81 | 2.10 |
| 3ro | 9.96 | 10.37 | 1.88 | 1.99 | 2.10 |
| 2do | 8.08 | 8.39 | 2.13 | 2.24 | 2.10 |
| 1ro | 5.95 | 6.14 | 5.95 | 6.14 | 6.30 |

Tabla 5.56 Modelo PB-12A. Estructura con piso blando y 5% de alas de concreto en todos los niveles.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | | Δ Permisible (cm) |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|--------------------------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 12vo | 18.76 | 19.85 | 0.54 | 0.63 | 2.10 |
| 11vo | 18.22 | 19.22 | 0.67 | 0.75 | 2.10 |
| 10mo | 17.54 | 18.47 | 0.82 | 0.91 | 2.10 |
| 9no | 16.72 | 17.55 | 1.00 | 1.08 | 2.10 |
| 8vo | 15.72 | 16.47 | 1.14 | 1.24 | 2.10 |
| 7mo | 14.58 | 15.23 | 1.28 | 1.37 | 2.10 |
| 6to | 13.30 | 13.86 | 1.42 | 1.52 | 2.10 |
| 5to | 11.88 | 12.35 | 1.57 | 1.67 | 2.10 |
| 4to | 10.31 | 10.68 | 1.71 | 1.79 | 2.10 |
| 3ro | 8.60 | 8.89 | 1.85 | 1.94 | 2.10 |
| 2do | 6.76 | 6.95 | 1.98 | 2.06 | 2.10 |
| 1ro | 4.78 | 4.89 | 4.78 | 4.89 | 6.30 |

Tabla 5.57 Modelo PB-12B. Estructura con piso blando y 10% de alas de concreto en todos los niveles.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | | Δ Permisible (cm) |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|--------------------------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y | |
| 12vo | 17.62 | 19.00 | 0.66 | 0.78 | 2.10 |
| 11vo | 16.96 | 18.22 | 0.76 | 0.89 | 2.10 |
| 10mo | 16.19 | 17.33 | 0.89 | 1.02 | 2.10 |
| 9no | 15.30 | 16.31 | 1.04 | 1.16 | 2.10 |
| 8vo | 14.27 | 15.15 | 1.16 | 1.28 | 2.10 |
| 7mo | 13.11 | 13.87 | 1.28 | 1.40 | 2.10 |
| 6to | 11.83 | 12.47 | 1.40 | 1.53 | 2.10 |
| 5to | 10.43 | 10.94 | 1.52 | 1.64 | 2.10 |
| 4to | 8.90 | 9.30 | 1.63 | 1.74 | 2.10 |
| 3ro | 7.28 | 7.56 | 1.71 | 1.82 | 2.10 |
| 2do | 5.57 | 5.75 | 1.76 | 1.84 | 2.10 |
| 1ro | 3.80 | 3.91 | 3.80 | 3.91 | 6.30 |

Tabla 5.58 Modelo PB-12C. Estructura con piso blando y 15% de alas de concreto en todos los niveles.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| | 12vo | 21.45 | 23.21 | 0.41 |
| 11vo | 21.04 | 22.71 | 0.57 | 0.67 |
| 10mo | 20.47 | 22.04 | 0.76 | 0.86 |
| 9no | 19.70 | 21.18 | 0.95 | 1.07 |
| 8vo | 18.76 | 20.11 | 1.12 | 1.25 |
| 7mo | 17.64 | 18.86 | 1.27 | 1.41 |
| 6to | 16.37 | 17.45 | 1.43 | 1.58 |
| 5to | 14.94 | 15.87 | 1.59 | 1.76 |
| 4to | 13.35 | 14.11 | 1.76 | 1.93 |
| 3ro | 11.59 | 12.18 | 1.98 | 2.16 |
| 2do | 9.61 | 10.02 | 2.33 | 2.49 |
| 1ro | 7.28 | 7.53 | 7.28 | 7.53 |

Tabla 5.59 Modelo PB-12B0. Estructura con piso blando y sin alas de concreto.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| | 12vo | 19.37 | 20.09 | 0.50 |
| 11vo | 18.87 | 19.54 | 0.68 | 0.74 |
| 10mo | 18.19 | 18.80 | 0.89 | 0.94 |
| 9no | 17.30 | 17.87 | 1.09 | 1.13 |
| 8vo | 16.21 | 16.73 | 1.26 | 1.30 |
| 7mo | 14.95 | 15.44 | 1.41 | 1.46 |
| 6to | 13.54 | 13.97 | 1.58 | 1.61 |
| 5to | 11.96 | 12.37 | 1.71 | 1.76 |
| 4to | 10.25 | 10.61 | 1.83 | 1.88 |
| 3ro | 8.42 | 8.74 | 1.93 | 1.99 |
| 2do | 6.50 | 6.75 | 1.95 | 2.04 |
| 1ro | 4.55 | 4.71 | 4.55 | 4.71 |

Tabla 5.60 Modelo PB-12B1. Estructura con piso blando y alas de concreto hasta el 2do nivel.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| | 12vo | 19.22 | 20.03 | 0.51 |
| 11vo | 18.71 | 19.47 | 0.70 | 0.74 |
| 10mo | 18.02 | 18.73 | 0.91 | 0.95 |
| 9no | 17.10 | 17.78 | 1.12 | 1.15 |
| 8vo | 15.98 | 16.63 | 1.28 | 1.32 |
| 7mo | 14.70 | 15.31 | 1.43 | 1.48 |
| 6to | 13.27 | 13.83 | 1.58 | 1.62 |
| 5to | 11.69 | 12.21 | 1.68 | 1.75 |
| 4to | 10.01 | 10.46 | 1.73 | 1.82 |
| 3ro | 8.29 | 8.64 | 1.81 | 1.91 |
| 2do | 6.48 | 6.74 | 1.91 | 2.01 |
| 1ro | 4.57 | 4.73 | 4.57 | 4.73 |

Tabla 5.61 Modelo PB-12B2. Estructura con piso blando y alas de concreto hasta el 4to nivel.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| | 12vo | 19.07 | 19.97 | 0.52 |
| 11vo | 18.56 | 19.41 | 0.71 | 0.76 |
| 10mo | 17.84 | 18.65 | 0.92 | 0.96 |
| 9no | 16.92 | 17.69 | 1.12 | 1.16 |
| 8vo | 15.80 | 16.54 | 1.28 | 1.32 |
| 7mo | 14.53 | 15.22 | 1.42 | 1.48 |
| 6to | 13.11 | 13.74 | 1.48 | 1.58 |
| 5to | 11.63 | 12.17 | 1.58 | 1.68 |
| 4to | 10.06 | 10.49 | 1.68 | 1.78 |
| 3ro | 8.38 | 8.71 | 1.81 | 1.91 |
| 2do | 6.57 | 6.80 | 1.93 | 2.02 |
| 1ro | 4.64 | 4.79 | 4.64 | 4.79 |

Tabla 5.62 Modelo PB-12B3. Estructura con piso blando y alas de concreto hasta el 6to nivel.

| Nivel | Desplazamiento Lateral | | Desplazamiento de Entepiso | |
|-------|------------------------|------------|----------------------------|------------|
| | D (cm) | | Δ (cm) | |
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 12vo | 18.92 | 19.91 | 0.52 | 0.56 |
| 11vo | 18.41 | 19.34 | 0.71 | 0.76 |
| 10mo | 17.69 | 18.59 | 0.91 | 0.96 |
| 9no | 16.78 | 17.63 | 1.10 | 1.16 |
| 8vo | 15.68 | 16.46 | 1.21 | 1.31 |
| 7mo | 14.47 | 15.16 | 1.31 | 1.40 |
| 6to | 13.16 | 13.76 | 1.43 | 1.52 |
| 5to | 11.73 | 12.23 | 1.55 | 1.66 |
| 4to | 10.18 | 10.58 | 1.69 | 1.78 |
| 3ro | 8.49 | 8.80 | 1.82 | 1.92 |
| 2do | 6.67 | 6.88 | 1.96 | 2.04 |
| 1ro | 4.71 | 4.84 | 4.71 | 4.84 |

Tabla 5.63 Modelo PB-12B4. Estructura con piso blando y alas de concreto hasta el 8vo nivel.

| Nivel | Desplazamiento Lateral | | Desplazamiento de Entepiso | |
|-------|------------------------|------------|----------------------------|------------|
| | D (cm) | | Δ (cm) | |
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 12vo | 18.81 | 19.86 | 0.52 | 0.57 |
| 11vo | 18.29 | 19.29 | 0.72 | 0.78 |
| 10mo | 17.57 | 18.51 | 0.88 | 0.97 |
| 9no | 16.69 | 17.54 | 1.01 | 1.11 |
| 8vo | 15.68 | 16.43 | 1.15 | 1.24 |
| 7mo | 14.53 | 15.20 | 1.28 | 1.37 |
| 6to | 13.25 | 13.82 | 1.42 | 1.52 |
| 5to | 11.83 | 12.31 | 1.56 | 1.66 |
| 4to | 10.27 | 10.65 | 1.70 | 1.79 |
| 3ro | 8.57 | 8.86 | 1.84 | 1.93 |
| 2do | 6.74 | 6.93 | 1.98 | 2.06 |
| 1ro | 4.76 | 4.88 | 4.76 | 4.88 |

Tabla 5.64 Modelo PB-12B5. Estructura con piso blando y alas de concreto hasta el 10mo nivel.

| Nivel | Desplazamiento Lateral | | Desplazamiento de Entepiso | |
|-------|------------------------|------------|----------------------------|------------|
| | D (cm) | | Δ (cm) | |
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 12vo | 19.44 | 20.12 | 0.49 | 0.55 |
| 11vo | 18.95 | 19.57 | 0.68 | 0.72 |
| 10mo | 18.28 | 18.85 | 0.88 | 0.93 |
| 9no | 17.40 | 17.92 | 1.07 | 1.12 |
| 8vo | 16.33 | 16.80 | 1.24 | 1.29 |
| 7mo | 15.09 | 15.51 | 1.40 | 1.45 |
| 6to | 13.69 | 14.06 | 1.55 | 1.60 |
| 5to | 12.14 | 12.47 | 1.70 | 1.74 |
| 4to | 10.43 | 10.73 | 1.83 | 1.87 |
| 3ro | 8.60 | 8.86 | 1.95 | 1.99 |
| 2do | 6.65 | 6.87 | 2.04 | 2.07 |
| 1ro | 4.61 | 4.80 | 4.61 | 4.80 |

Tabla 5.65 Modelo PBF-121. Estructura con piso blando y 10% de alas de concreto en el primer nivel.

| Nivel | Desplazamiento Lateral | | Desplazamiento de Entepiso | |
|-------|------------------------|------------|----------------------------|------------|
| | D (cm) | | Δ (cm) | |
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 12vo | 18.08 | 18.93 | 0.59 | 0.65 |
| 11vo | 17.50 | 18.28 | 0.78 | 0.86 |
| 10mo | 16.72 | 17.42 | 1.00 | 1.07 |
| 9no | 15.72 | 16.36 | 1.20 | 1.27 |
| 8vo | 14.52 | 15.09 | 1.37 | 1.45 |
| 7mo | 13.15 | 13.64 | 1.54 | 1.62 |
| 6to | 11.61 | 12.02 | 1.70 | 1.77 |
| 5to | 9.92 | 10.25 | 1.83 | 1.91 |
| 4to | 8.09 | 8.35 | 1.92 | 1.99 |
| 3ro | 6.17 | 6.36 | 1.92 | 1.98 |
| 2do | 4.25 | 4.38 | 1.69 | 1.74 |
| 1ro | 2.56 | 2.64 | 2.56 | 2.64 |

Tabla 5.66 Modelo PBF-122. Estructura con piso blando y 20% de alas de concreto en el primer nivel.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 12vo | 17.51 | 17.96 | 0.63 | 0.69 |
| 11vo | 16.88 | 17.27 | 0.85 | 0.90 |
| 10mo | 16.03 | 16.37 | 1.06 | 1.11 |
| 9no | 14.97 | 15.26 | 1.28 | 1.32 |
| 8vo | 13.69 | 13.94 | 1.46 | 1.51 |
| 7mo | 12.23 | 12.44 | 1.64 | 1.67 |
| 6to | 10.60 | 10.77 | 1.80 | 1.84 |
| 5to | 8.80 | 8.93 | 1.94 | 1.97 |
| 4to | 6.86 | 6.96 | 2.03 | 2.05 |
| 3ro | 4.83 | 4.91 | 1.95 | 1.99 |
| 2do | 2.88 | 2.93 | 1.48 | 1.54 |
| 1ro | 1.40 | 1.39 | 1.40 | 1.39 |

Tabla 5.67 Modelo PBF-123. Estructura con piso blando y 30% de alas de concreto en el primer nivel.

| Nivel | Desplazamiento Lateral D (cm) | | Desplazamiento de Entepiso Δ (cm) | |
|-------|----------------------------------|------------|---|------------|
| | Sismo en X | Sismo en Y | Sismo en X | Sismo en Y |
| 12vo | 17.66 | 18.38 | 0.61 | 0.68 |
| 11vo | 17.05 | 17.70 | 0.82 | 0.89 |
| 10mo | 16.23 | 16.82 | 1.04 | 1.10 |
| 9no | 15.20 | 15.72 | 1.24 | 1.31 |
| 8vo | 13.96 | 14.42 | 1.41 | 1.48 |
| 7mo | 12.55 | 12.94 | 1.58 | 1.65 |
| 6to | 10.97 | 11.29 | 1.74 | 1.81 |
| 5to | 9.23 | 9.48 | 1.89 | 1.95 |
| 4to | 7.34 | 7.53 | 1.97 | 2.02 |
| 3ro | 5.37 | 5.51 | 1.93 | 1.99 |
| 2do | 3.44 | 3.53 | 1.56 | 1.62 |
| 1ro | 1.88 | 1.91 | 1.88 | 1.91 |

Tabla 5.68 Modelo PBF-124. Estructura con piso blando y 25% de alas de concreto en el primer nivel.

| Nivel | Rigidez Lateral K (ton/cm) | |
|-------|-------------------------------|-------|
| | En X | En Y |
| 12vo | 126.1 | 108.6 |
| 11vo | 158.1 | 142.1 |
| 10mo | 152.2 | 136.6 |
| 9no | 139.4 | 126.4 |
| 8vo | 130.9 | 118.2 |
| 7mo | 124.6 | 113.5 |
| 6to | 120.8 | 110.4 |
| 5to | 116.7 | 107.3 |
| 4to | 113.6 | 104.4 |
| 3ro | 111.4 | 102.3 |
| 2do | 113.2 | 104.4 |
| 1ro | 55.1 | 49.8 |

Tabla 5.69 Rigideces Laterales del Modelo PBF-121.

| Nivel | Rigidez Lateral K (ton/cm) | |
|-------|-------------------------------|-------|
| | En X | En Y |
| 12vo | 141.9 | 125.7 |
| 11vo | 176.4 | 157.5 |
| 10mo | 164.4 | 148.8 |
| 9no | 147.3 | 133.4 |
| 8vo | 136.7 | 123.7 |
| 7mo | 130.2 | 118.4 |
| 6to | 125.6 | 115.5 |
| 5to | 122.1 | 112.6 |
| 4to | 121.6 | 112.4 |
| 3ro | 129.1 | 119.6 |
| 2do | 160.0 | 148.4 |
| 1ro | 119.6 | 111.7 |

Tabla 5.70 Rigideces Laterales del Modelo PBF-122.

| Nivel | Rigidez Lateral K (ton/cm) | |
|-------|-------------------------------|-------|
| | En X | En Y |
| 12vo | 157.2 | 142.2 |
| 11vo | 182.0 | 167.2 |
| 10mo | 167.2 | 152.7 |
| 9no | 147.6 | 136.3 |
| 8vo | 138.7 | 126.9 |
| 7mo | 131.5 | 122.3 |
| 6to | 126.1 | 116.9 |
| 5to | 122.4 | 113.6 |
| 4to | 124.0 | 115.3 |
| 3ro | 139.3 | 128.8 |
| 2do | 202.8 | 184.8 |
| 1ro | 244.1 | 237.0 |

Tabla 5.71 Rigideces Laterales del Modelo PBF-123.

| Nivel | Rigidez Lateral K (ton/cm) | |
|-------|-------------------------------|-------|
| | En X | En Y |
| 12vo | 151.7 | 134.0 |
| 11vo | 181.3 | 164.1 |
| 10mo | 166.7 | 152.0 |
| 9no | 148.9 | 135.0 |
| 8vo | 138.7 | 126.4 |
| 7mo | 131.8 | 120.9 |
| 6to | 126.9 | 117.0 |
| 5to | 122.3 | 113.3 |
| 4to | 123.5 | 114.6 |
| 3ro | 135.1 | 124.8 |
| 2do | 183.5 | 169.0 |
| 1ro | 173.5 | 165.8 |

Tabla 5.72 Rigideces Laterales del Modelo PBF-124.

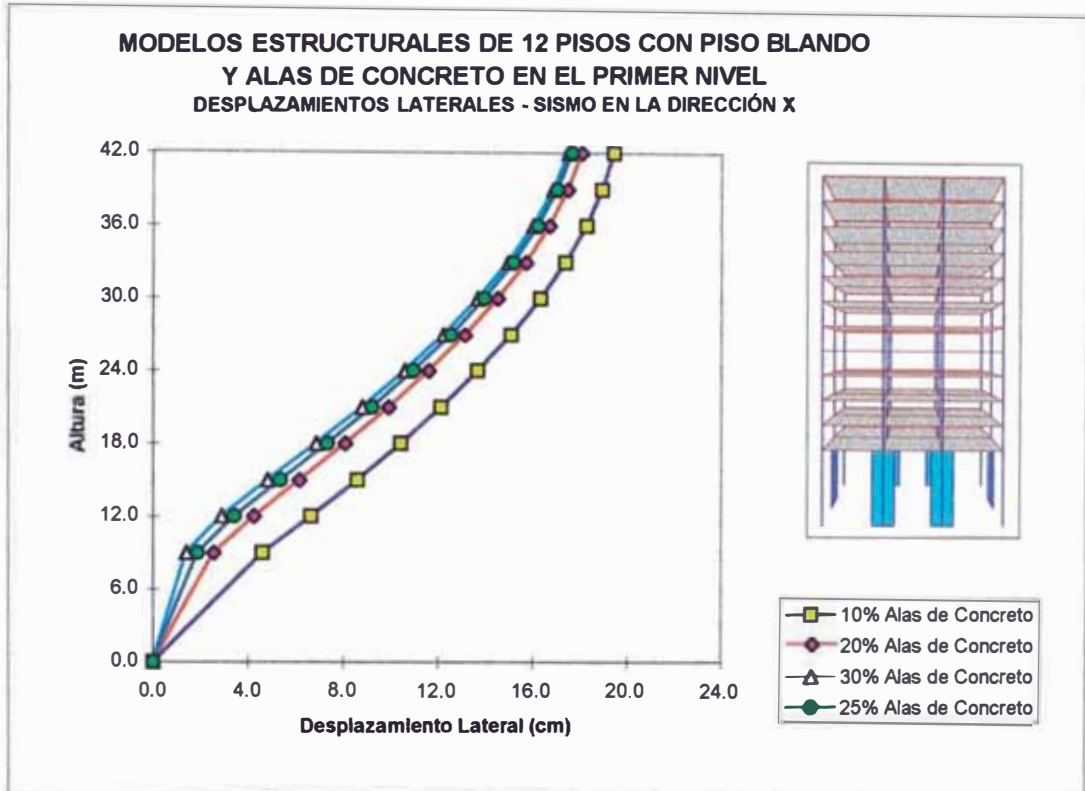


Figura 5.17

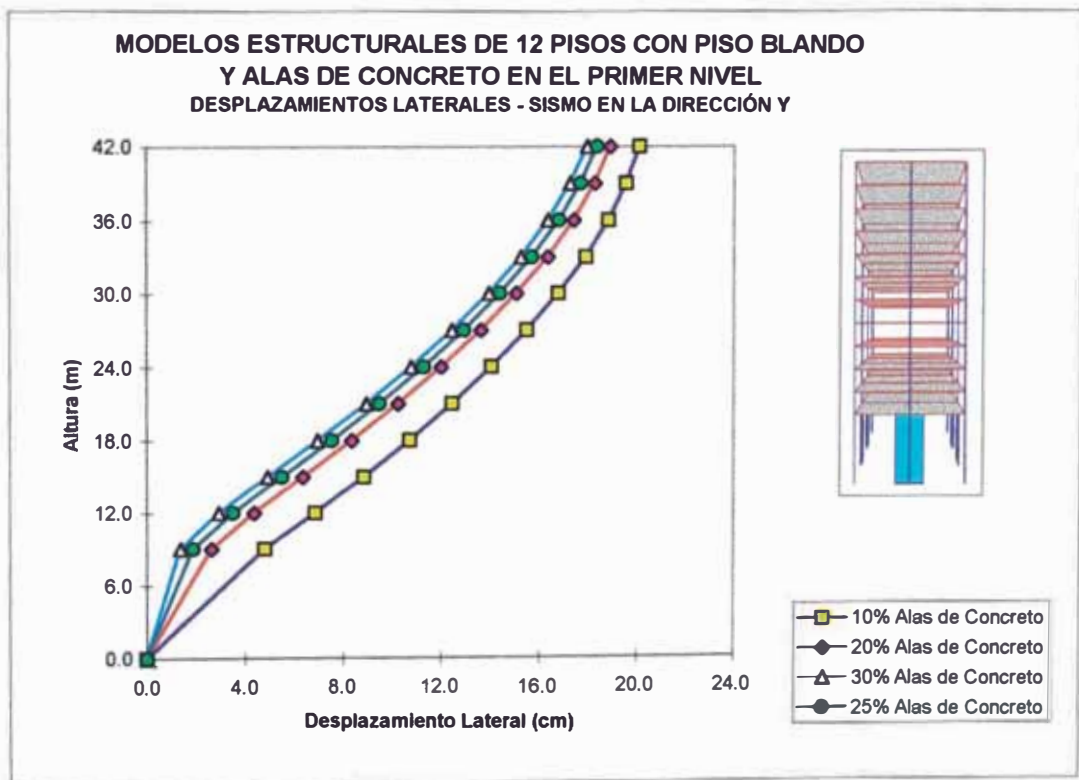


Figura 5.18

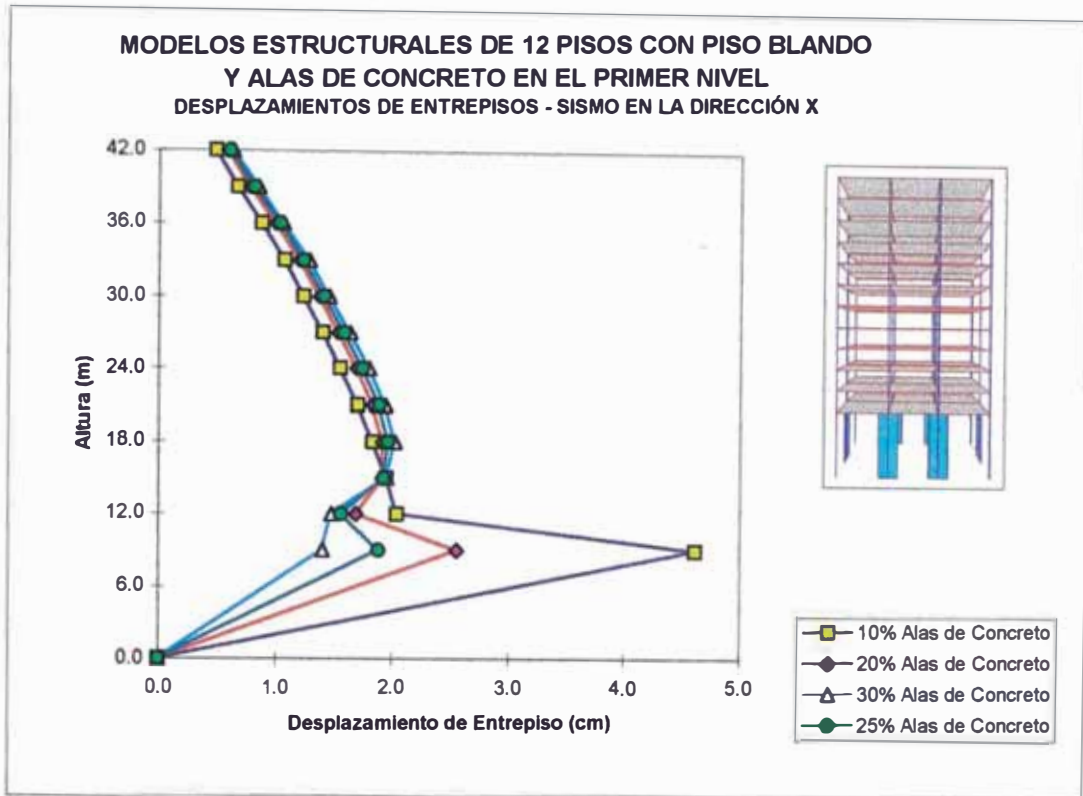


Figura 5.19

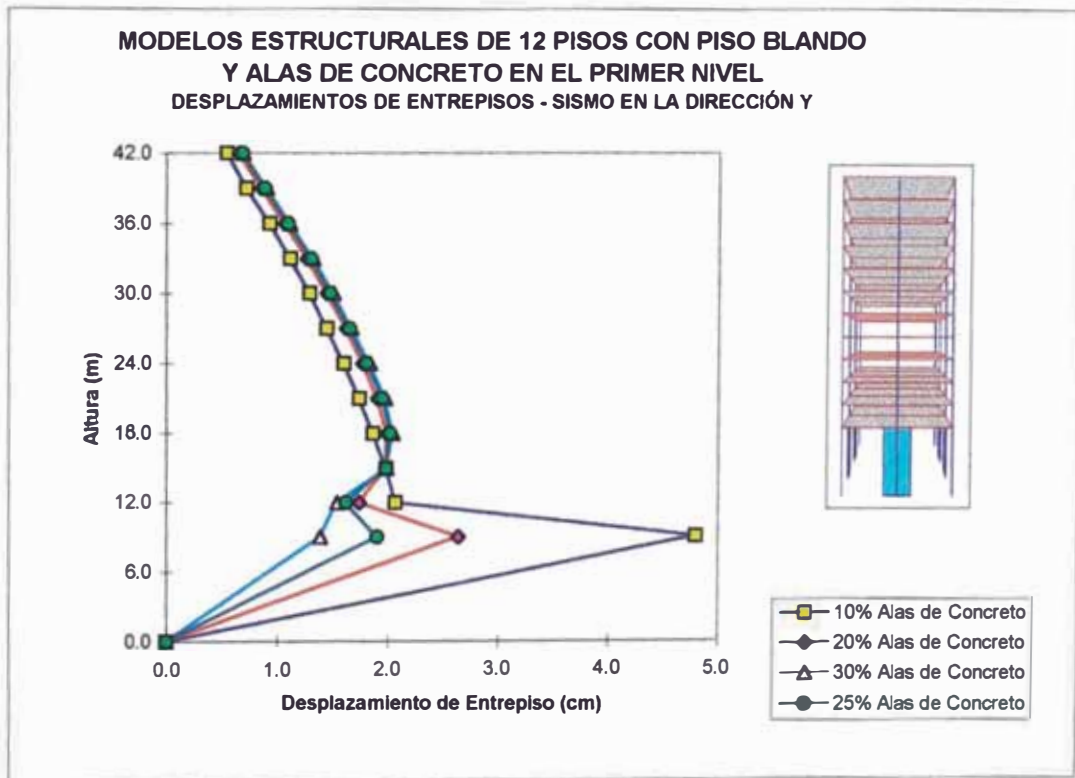


Figura 5.20

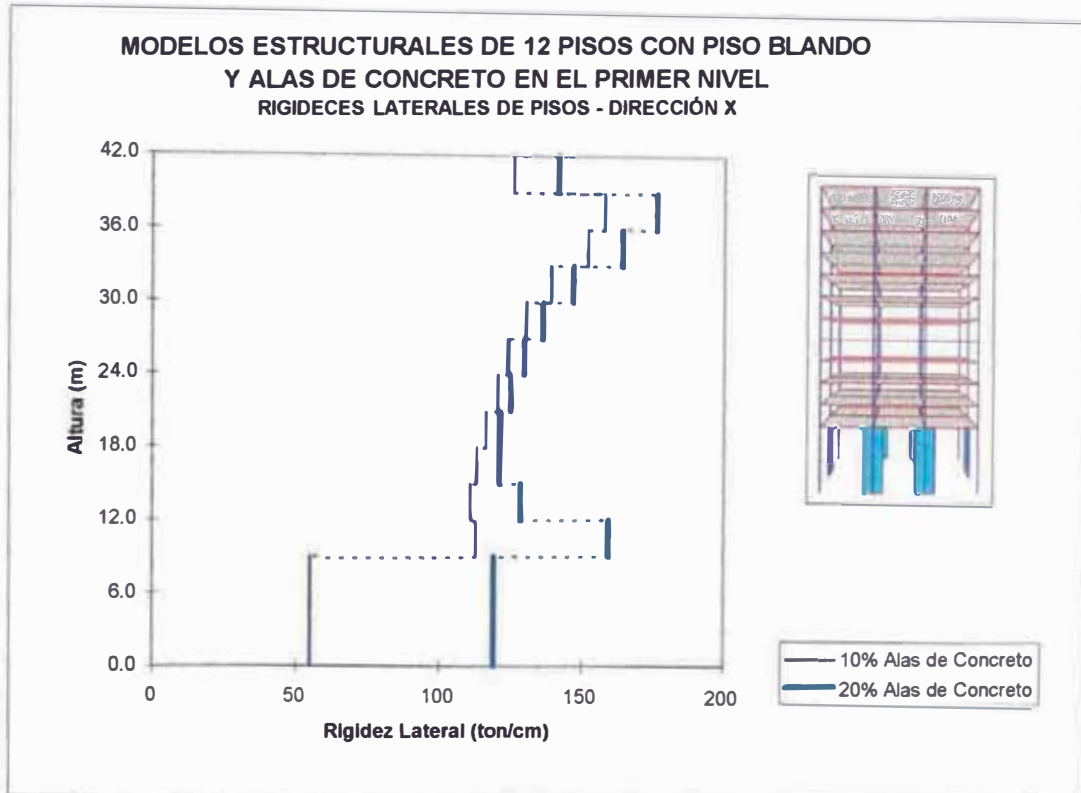


Figura 5.21

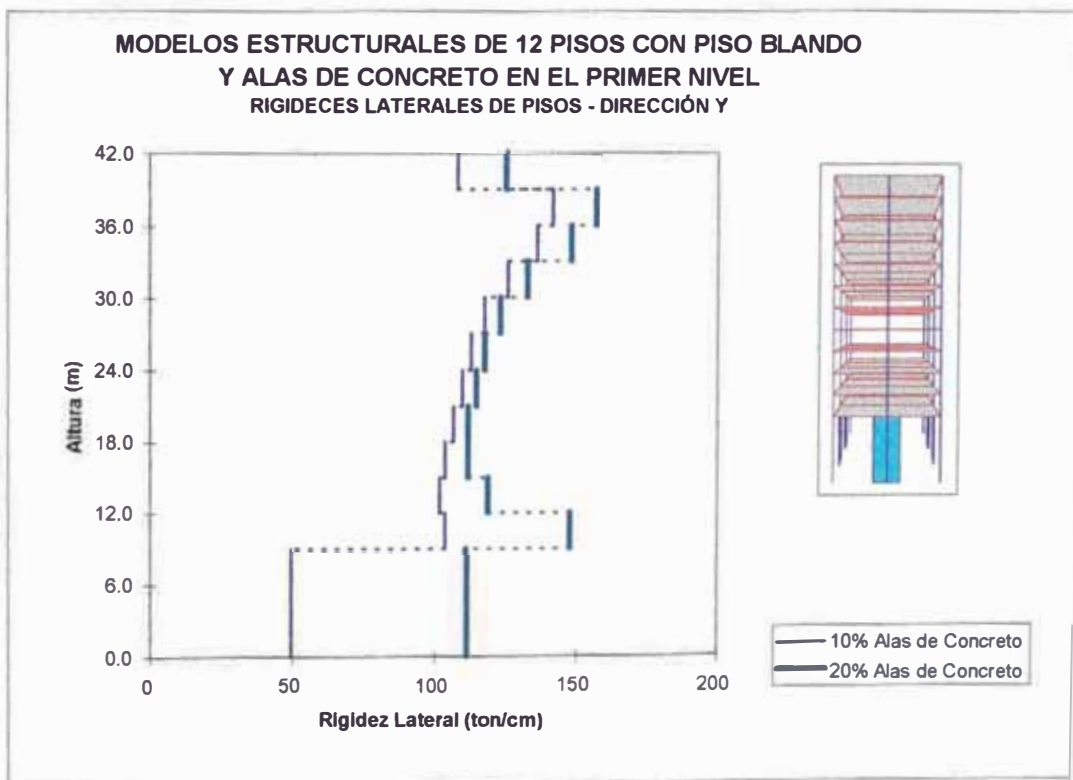


Figura 5.22

5.7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como se describió al comienzo de este capítulo, el análisis se efectuó en cuatro etapas, cada cual contenía tres grupos de modelos estructurales: de 4, 8 y 12 pisos. En este ítem, en que se discuten los resultados, se mantendrá la misma división en etapas, sólo que esta vez, la explicación se hará en forma global.

Primera etapa

Los modelos de 4, 8 y 12 pisos, analizados según RNC77, presentan desplazamientos de entrepisos menores que los permisibles (Tablas 5.16, 5.33 y 5.52). Es decir, de acuerdo al código anterior, las estructuras regulares aporticadas son capaces de resistir la fuerza sísmica actuante.

Al realizar este análisis según el nuevo código, se observa que, en el caso de vigas, ya no es suficiente trabajar con secciones que resultan de un predimensionamiento clásico. Más bien es conveniente incrementar ligeramente el peralte para un mejor control de desplazamientos laterales. Sin embargo, en el caso de columnas, las fórmulas dadas en el Anexo B resultan suficientes. Estas fórmulas tienen su origen en investigaciones desarrolladas en Japón.

Segunda etapa

Ante la presencia del piso blando, se necesita tener al menos un 10% de alas de concreto en el perímetro del edificio para cumplir con los desplazamientos de entrepisos del nuevo código (Tablas 5.21, 5.38 y 5.57). No es necesario que estas alas se extiendan hasta el último nivel, como se muestra en tablas posteriores.

Tercera etapa

Al considerar que las alas de concreto no se extienden hasta el último nivel del edificio, sino que pueden terminar en el segundo piso, cuarto piso, etc., se encuentra que no existe una variación significativa entre el desplazamiento lateral de un diafragma cualquiera de un modelo con alas de concreto hasta el segundo nivel y el correspondiente desplazamiento de un modelo con alas hasta el último piso. Ver Tablas 5.24, 5.41 a 5.43, y 5.60 a 5.64. En otras palabras, modelos de un mismo número de pisos experimentan aproximadamente la misma deformación para un mismo porcentaje de alas de concreto y diferente proyección vertical de éstas.

Cuarta etapa

Las estructuras con piso blando y alas de concreto en el primer nivel presentan un comportamiento que depende del porcentaje de alas. Trabajando con 10%, 20%, 25% y 30%, se observa que a medida que aumenta el porcentaje de alas se obtiene una mejor distribución vertical de rigideces laterales y de desplazamientos. Ver Figuras 5.3 a 5.8, 5.10 a 5.15, y 5.17 a 5.22.

Sin embargo, no es necesario escoger el mayor porcentaje de alas para disipar el efecto sísmico que causa el piso blando. Se puede seleccionar el porcentaje adecuado en base a otro criterio. En las Tablas 5.73, 5.74 y 5.75 se muestra un resumen de rigideces laterales del primer piso de todos los modelos analizados en la última etapa y se hace una comparación con las rigideces laterales de los modelos que no presentan el piso blando (modelo patrón) y los que, incluyendo el piso blando, no tienen alas de concreto.

De acuerdo a estos resultados, con 20% de alas de concreto en el piso blando se consigue una rigidez lateral que se aproxima al valor obtenido de una estructura simétrica cuyas alturas de pisos son uniformes.

| MODELOS ESTRUCTURALES DE 4 PISOS | | | | | |
|--|----------------------|----------------------|---------|----------------------|---------|
| Estructura | | Rigidez Lateral en X | | Rigidez Lateral en Y | |
| | | (ton/cm) | % | (ton/cm) | % |
| <i>Regular</i> | Sin Alas de Concreto | 124.0 | K1 | 120.0 | K1 |
| <i>Irregular por presencia del piso blando</i> | Sin Alas de Concreto | 19.8 | 0.16 K1 | 19.5 | 0.16 K1 |
| | 10% Alas de Concreto | 54.7 | 0.44 K1 | 46.4 | 0.39 K1 |
| | 20% Alas de Concreto | 131.8 | 1.06 K1 | 117.7 | 0.98 K1 |
| | 25% Alas de Concreto | 194.8 | 1.57 K1 | 179.1 | 1.49 K1 |
| | 30% Alas de Concreto | 278.7 | 2.25 K1 | 260.9 | 2.17 K1 |

Tabla 5.73

| MODELOS ESTRUCTURALES DE 8 PISOS | | | | | |
|--|----------------------|----------------------|---------|----------------------|---------|
| Estructura | | Rigidez Lateral en X | | Rigidez Lateral en Y | |
| | | (ton/cm) | % | (ton/cm) | % |
| <i>Regular</i> | Sin Alas de Concreto | 175.6 | K1 | 167.9 | K1 |
| <i>Irregular por presencia del piso blando</i> | Sin Alas de Concreto | 32.5 | 0.18 K1 | 31.6 | 0.19 K1 |
| | 10% Alas de Concreto | 67.1 | 0.38 K1 | 58.8 | 0.35 K1 |
| | 20% Alas de Concreto | 145.8 | 0.83 K1 | 131.9 | 0.79 K1 |
| | 25% Alas de Concreto | 209.8 | 1.19 K1 | 193.6 | 1.15 K1 |
| | 30% Alas de Concreto | 293.1 | 1.67 K1 | 275.8 | 1.64 K1 |

Tabla 5.74

| MODELOS ESTRUCTURALES DE 12 PISOS | | | | | |
|--|----------------------|----------------------|---------|----------------------|---------|
| Estructura | | Rigidez Lateral en X | | Rigidez Lateral en Y | |
| | | (ton/cm) | % | (ton/cm) | % |
| <i>Regular</i> | Sin Alas de Concreto | 143.4 | K1 | 137.7 | K1 |
| <i>Irregular por presencia del piso blando</i> | Sin Alas de Concreto | 30.3 | 0.21 K1 | 29.2 | 0.21 K1 |
| | 10% Alas de Concreto | 55.1 | 0.38 K1 | 49.8 | 0.36 K1 |
| | 20% Alas de Concreto | 119.6 | 0.83 K1 | 111.7 | 0.81 K1 |
| | 25% Alas de Concreto | 173.5 | 1.21 K1 | 165.8 | 1.20 K1 |
| | 30% Alas de Concreto | 244.1 | 1.70 K1 | 237.0 | 1.72 K1 |

Tabla 5.75

(*) Donde figuran "alas de concreto", éstas se localizan sólo en el primer nivel del edificio.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

La Combinación Cuadrática Completa (CQC), que se basa en teorías de vibración aleatoria, produce mejores resultados que las otras técnicas de combinación modal (SRSS y Sum Abs). El éxito de esta técnica radica en que para encontrar la respuesta final toma en cuenta la influencia de cada modo sobre los otros.

Cuando los espectros de entrada son iguales, es posible realizar un solo análisis con cualquier sistema de referencia, y la estructura resultante tendrá todos sus elementos diseñados para resistir por igual movimientos sísmicos actuantes en todas las direcciones posibles.

En los modelos estructurales de 4 pisos sin irregularidades, los desplazamientos laterales del primer piso, calculados según el código anterior, son de 1.14 cm en la dirección X y 1.16 cm en la dirección Y. Empleando el nuevo código, estos desplazamientos llegan a 2.96 cm y 2.97 cm, en las direcciones X e Y, respectivamente, es decir 2.6 veces los desplazamientos encontrados con el código anterior de diseño sismorresistente.

En los modelos estructurales de 8 pisos sin presencia del piso blando, los desplazamientos laterales del primer piso, calculados de acuerdo al código anterior, son de 1.18 cm en la dirección X y 1.23 cm en la dirección Y. Con el nuevo código, estos desplazamientos aumentan con un factor de 1.9 aproximadamente.

En los modelos estructurales de 12 pisos sin presencia del piso blando, los desplazamientos laterales del primer piso, determinados con el código anterior, resultan 1.67 cm y 1.74 cm, en las direcciones X e Y, respectivamente. Al aplicar el nuevo código, estos desplazamientos aumentan con un factor de 1.2 aproximadamente.

Los desplazamientos de entrepisos de los sistemas aporricados sin irregularidades de 4, 8 y 12 pisos, cumplen con el código anterior de diseño sismorresistente sin necesidad de

modificar las secciones de los elementos estructurales. Sin embargo, no cumplen con el nuevo código por considerar límites más rigurosos para los desplazamientos de entrepisos.

En los modelos de 4 pisos con piso blando y sin alas de concreto, los desplazamientos laterales del primer nivel son de 9.23 cm y 9.38 cm, en las direcciones X e Y, respectivamente. Al colocar 5% de alas de concreto en las columnas tipo C2 y C3 de todos los pisos los desplazamientos se reducen en 29%; con 10% de alas los desplazamientos se reducen en 46%; y con 15% de alas, se reducen en 58%.

En los modelos de 8 pisos con piso blando y sin alas de concreto, los desplazamientos laterales del primer nivel son de 7.73 cm y 7.70 cm, en las direcciones X e Y, respectivamente. Al emplear 5% de alas de concreto en todos los pisos los desplazamientos se reducen en 19%; con 10% de alas los desplazamientos se reducen en 37%; y con 15% de alas, se reducen en 51%.

En los modelos de 12 pisos con piso blando y sin alas de concreto, los desplazamientos laterales del primer nivel son de 7.28 cm en la dirección X y 7.53 cm en la dirección Y. Al colocar alas de concreto en todos los pisos los porcentajes de reducción de desplazamientos laterales son de 18%, 34% y 48%, para 5%, 10% y 15% de alas de concreto, respectivamente.

Los modelos estructurales con piso blando experimentan aproximadamente la misma deformación lateral para 10% de alas de concreto y diferente proyección vertical de éstas.

Los mayores desplazamientos relativos de entrepisos se concentran en el piso blando en lugar de distribuirse de manera más uniforme entre todos los pisos. Así, en un sismo intenso, el piso blando experimentará esfuerzos y daños mayores que los otros pisos de la edificación.

En los modelos con piso blando y alas de concreto sólo en el primer nivel, a medida que aumenta el porcentaje de alas se consigue una mejor distribución vertical de rigideces laterales y de desplazamientos relativos de entrepisos. Por ejemplo, en el modelo estructural de 4 pisos y 10% de alas de concreto la rigidez lateral del primer nivel, en la dirección X, es 54.7 ton/cm, y en el segundo nivel es 137.5 ton/cm, es decir, la rigidez del piso blando representa el 40% de la rigidez lateral del piso inmediato superior. Para 20%, 25% y 30% de alas de concreto, los porcentajes de rigidez lateral son 75%, 103% y 140%, respectivamente.

Para estructuras de 4, 8 y 12 pisos, con piso blando y 20% de alas de concreto en el primer nivel, la rigidez lateral del piso blando se aproxima a la rigidez lateral del correspondiente nivel del modelo estructural sin irregularidades en elevación.

6.2 RECOMENDACIONES

Examinar las propiedades direccionales de las formas de modo tridimensionales. Esta inspección llevada a cabo en la fase preliminar del diseño puede servir de gran ayuda para mejorar el diseño sismorresistente de una estructura.

En el análisis dinámico tridimensional, por lo general, ninguna forma de modo tiene su dirección predominante a lo largo de los ejes principales de la estructura. Si antes se recomendaba que para el cálculo de desplazamientos laterales se debía tomar por lo menos los tres primeros modos predominantes en una dirección, ahora, el criterio de selección del número de modos cambia rotundamente. Esta vez, se hace en función de los Factores Modales de Masa Efectiva, y se recomienda incluir la cantidad de modos que acumule un factor no menor de 90% para cualquier dirección de excitación.

Usar las fórmulas contenidas en el Anexo B para el predimensionamiento de columnas tipo C1, C2 y C3. Además, se requiere ser más conservadores en las dimensiones de las columnas de esquina; en vez de usar columnas tipo C4, cambiarlas por tipo C2 o C3.

Para estructuras aporticadas ubicadas en zonas de alto riesgo sísmico, incrementar el peralte de vigas en 20% como mínimo, con respecto a las dimensiones obtenidas del Anexo B.

Para atenuar el efecto sísmico del piso blando en los modelos estudiados, usar por lo menos 20% de longitud de alas de concreto en el primer nivel. Por medio de esta corrección se consigue que la estructura se comporte como si fuera netamente aporticada y sin irregularidades en elevación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Arnold, Christopher y Reitherman, Robert. *Configuración y Diseño Sísmico de Edificios*. Ed. LIMUSA, México, 1994.
2. Bathe, Klaus y Wilson, Edward. *Numerical Methods in Finite Element Analysis*. Ed. Prentice Hall, USA, 1976.
3. Bazán, Enrique y Meli, Roberto. *Manual de Diseño Sísmico de Edificios*. Ed. LIMUSA, México, 1990.
4. Chopra, Anil. *Dynamics of Structures*. Ed. Prentice Hall, USA, 1995.
5. Habibullah, Ashraf. *ETABS User's Manual. Versión 5.4*. Computers and Structures Inc, USA, 1992.
6. Habibullah, Ashraf. *ETABS User's Manual. Versión 6.2*. Computers and Structures Inc, USA, 1997.
7. Morales, Roberto. *Apuntes de Clase de Concreto Armado II*. UNI-FIC, 1994.
8. Morales, Roberto. *Apuntes de Clase de Ingeniería Antisísmica*. UNI-FIC, 1994.
9. Park, R. y Gamble, W. *Losas de Concreto Reforzado*. Ed. LIMUSA, México, 1990.
10. Wakabayashi, Minoru. *Diseño de Estructuras Sismorresistentes*. Ed. Mc Graw Hill, México, 1988.
11. Wilson, Edward. *Three Dimensional Dynamic Analysis of Structures*. Computers and Structures Inc, USA, 1997.