

COMPORTAMIENTO SISMICO DE EDIFICIOS IRREGULARES EN ELEVACION

Ing. Cecilia Chuy S.
Dinámica Estructural Ltda.

Ing. Erich Neurohr B.
Franz Sauter & Asociados S.A.

RESUMEN

Se efectúa un estudio teórico-analítico del comportamiento sísmico de edificios con apéndices. Mediante tres edificios modelos hipotéticos se evalúa la respuesta dinámica según el grado de irregularidad. Para el análisis estructural se emplean los métodos estático y dinámico lineales propuestos por el Código Sísmico de Costa Rica (CSCR-1986). Además se aplica el método estático bilineal propuesto por B. M. Shahrooz para edificios con apéndices, basado en la utilización de un único modo de oscilación bilineal.

1. INTRODUCCION

La selección de la forma y configuración apropiada de un edificio es una de las decisiones más importantes en el diseño estructural, para que un edificio se comporte satisfactoriamente ante un sismo. Esto se debe a que la respuesta de una estructura depende tanto de la resistencia y rigidez de sus elementos, como de su distribución e interacción. El ingeniero no puede garantizar que un edificio con una mala estructuración se comporte adecuadamente.

En la práctica es común que sea únicamente el arquitecto el que se encargue de definir la forma y las dimensiones globales de la estructura, así como la distribución preliminar de los elementos resistentes. Preferiblemente, el ingeniero estructural debe participar activamente en esta tarea, tomando en cuenta la demanda de resistencia, ductilidad y rigidez, ante cargas gravitacionales y sísmicas. Así, ambos profesionales llegarán a una solución que complemente la funcionalidad con la seguridad del edificio.

Un problema concerniente a la forma estructural es la irregularidad en edificios, que se define como un cambio sensible en su rigidez o en su masa. Existen dos tipos de irregularidades: en elevación y en planta. Cada uno ocasiona diferentes comportamientos de la estructura ante un sismo.

Algunos de los ejemplos más comunes de discontinuidad de rigidez en elevación son: pisos intermedios con diferente altura, discontinuidad de columnas y muros de corte, existencia de torres o apéndices sobre una base compuesta de pisos con mayor área en planta, y otros. En cuanto a cambios bruscos de masa pueden citarse las aglomeraciones en algún piso, como puede ser la ubicación de piscinas, bodegas o maquinaria pesada. Ambos tipos de irregularidad en elevación pueden presentarse conjuntamente (Fig. 1).

La importancia de una buena estructuración y un análisis acertado se hace patente ante la cantidad de estructuras con estas características que se han diseñado y construido, las cuales han sufrido daños en eventos sísmicos pasados. En casos severos de irregularidad el diseñador puede perder noción de la respuesta real del edificio, y por ende de la demanda de resistencia en los diferentes elementos que lo componen. Diversos investigadores han comprobado que la mayor cuantía de daños se ha presentado en los niveles donde se da la discontinuidad. Por lo tanto es necesario determinar la demanda real de los elementos estructurales en estos niveles. De esta forma podrán evitarse daños excesivos en elementos estructurales y no-estructurales, y el colapso acompañado de posibles pérdidas de vidas humanas.

Este estudio abarca únicamente edificios que presentan cambios de rigidez o masa en el sentido vertical, es decir, en elevación y no en planta.

2. MARCO TEORICO

2.1 Configuración estructural

El diseño sismorresistente exige del ingeniero estructural una comprensión del comportamiento de los edificios sometidos a acciones sísmicas. La buena concepción de las obras debe existir antes de cualquier análisis estructural, puesto que los sistemas resistentes inadecuados no logran superar los problemas inherentes a su estructuración aún después de un análisis dinámico complejo.

La resistencia sísmica de un edificio está ligada a su configuración, entendiéndose por configuración el tamaño y la forma de la estructura, así como la localización, tamaño y naturaleza de los elementos que la componen. Por supuesto, ésta depende de ciertos requerimientos de lugar, uso y estética. Por ende, para lograr un buen diseño desde el punto de vista conceptual, no deben olvidarse los criterios de estructuración y los detalles constructivos. Además, la creatividad siempre debe estar presente en el ejercicio de la ingeniería.

Para contribuir a un buen desenvolvimiento estructural, se deben tener en lo posible edificios con una forma simple y simétrica. Para evitar los puntos débiles se busca ante todo la continuidad y uniformidad en la distribución global de masa, resistencia, rigidez y ductilidad. Las discontinuidades en cualquiera de estas características producen una transmisión irregular de esfuerzos.

En general, las estructuras más simples tienen mejores oportunidades de sobrevivir. En primer lugar, porque se puede predecir mejor su comportamiento sísmico total y en segundo lugar, porque los detalles estructurales simples son más fáciles de comprender y de llevar a la práctica.

2.2 Respuesta sísmica de edificios con apéndices (irregulares en elevación)

En el pasado, diversos estudios han demostrado que la respuesta sísmica de edificios con apéndices difiere notoriamente con respecto a la de edificios regulares. Este fenómeno se ha observado tanto en modelos de laboratorio como en edificios reales.

Las reducciones y los aumentos bruscos de una planta con respecto a otra inmediata, por lo general se llevan a cabo por estética y funcionalidad (Fig. 1). La magnitud de los efectos producidos por la presencia de un apéndice, depende de las relaciones de masa y rigidez entre las diferentes secciones (torre y base).

Debido a la presencia de un apéndice se puede dar una gran concentración de esfuerzos a nivel de la discontinuidad y a la vez un acentuamiento de los desplazamientos relativos de la torre. Esto se debe a que los períodos de vibración de las partes se afectan recíprocamente, variando los modos de oscilación (en relación a edificios regulares). Se ha encontrado que los desplazamientos de la torre aumentan conforme su período natural de vibración se asemeja a alguno de los períodos de los primeros modos de oscilación de la base. El problema anterior es grave, pues se presenta el efecto de resonancia (Ref. 8).

Otro efecto observado en edificios con apéndices es la contribución sustancial de los últimos modos de oscilación en la respuesta total de la estructura. Esto quiere decir que un porcentaje considerable de la masa vibrará de manera no representada por los primeros modos de oscilación. En estas estructuras la demanda de ductilidad aumenta a consecuencia del cambio súbito en la distribución de rigidez del edificio. En la unión entre la torre y la base, donde se tiende a concentrar la deformación plástica, se requiere una gran acción de diafragma para transmitir las fuerzas de la torre a la base.

Por lo tanto, no se recomiendan las variaciones bruscas de masa o rigidez, porque el desenvolvimiento estructural es inadecuado y por ende los modelos utilizados pueden no apegarse al comportamiento real. De esta manera ni los más sofisticados programas de computación contribuyen a determinar acertadamente los esfuerzos. Además, en caso de conocer estos esfuerzos, sería imperioso el detalle de la estructura en sus puntos débiles.

No se debe obviar la ubicación en planta de la torre sobre la base, pues si el apéndice se ubica excéntricamente, conjuntamente con los problemas inherentes a la irregularidad en elevación, se presentarán efectos torsionales en el edificio. La irregularidad en planta implica que los puntos de aplicación de las fuerzas varían considerablemente de un piso a otro, conllevando a la generación de pares torsionales perjudiciales, que deben estudiarse aparte de los problemas de irregularidad en elevación.

2.3 Métodos de análisis

Los métodos de análisis tradicionalmente propuestos por el CSCR para el diseño sismorresistente se clasifican en estático y dinámico lineales. En este estudio se presenta un método estático basado en la suposición de un primer modo bilineal para estructuras con apéndices (Ref. 10).

Método estático bilineal

El método desarrollado por B. M. Shahrooz (Ref. 10) para determinar la distribución de las fuerzas laterales mediante un análisis estático, se basa en un primer modo de oscilación bilineal. Este método se propone, ya que el estático convencional basado en un modo de oscilación triangular no necesariamente predice la concentración de daños en los elementos cerca de la irregularidad.

Además, a pesar de que la concentración de comportamiento inelástico se atribuye a la configuración estructural, el análisis dinámico lineal para estructuras con apéndices no necesariamente refleja este comportamiento (Ref. 10).

Mediante el método estático bilineal se asignan dos grados de libertad traslacionales al edificio; uno para la torre y otro para la base. Para obtener la forma del primer modo, deben conocerse la rigidez y la masa de cada parte. La relación de rigideces está definida por el término a , y b es la relación de masas. Con estos dos términos puede determinarse el parámetro d que mide el grado de irregularidad del edificio. Así se determina si la presencia del apéndice puede dar como resultado concentraciones de esfuerzos debidas a cambios sensibles de masa y rigidez. B. M. Shahrooz indica que para un valor de $d > 2$, amerita realizarse el análisis estructural mediante este método. Una vez determinados a , b , d y el cortante en la base, se procede a la distribución de las fuerzas laterales por piso (Anexo).

La diferencia entre este método y el método estático usual, es la utilización de un primer modo bilineal, donde el cambio de pendiente se presenta en el nivel de la discontinuidad. La forma del primer modo se presenta en la fig. 2.

El primer modo se define como:

$$\phi = \left\{ \frac{h_{1b}}{H_b}, \frac{h_{2b}}{H_b}, \dots, 1, 1 + \frac{d \cdot h_{1t}}{H_b}, 1 + \frac{d \cdot h_{2t}}{H_b}, \dots, 1 + \frac{d \cdot h_t}{H_b} \right\}$$

Conociendo la forma modal, el cortante en la base se distribuye de la siguiente manera:

$$F_i = \frac{M_i \phi_i}{\sum_{i=1}^n M_i \phi_i} * V$$

donde F_i es la fuerza lateral en el nivel i , M_i es la i -ésima masa, V es el cortante en la base y N es el número de pisos.

3. MARCO EXPERIMENTAL

Escogencia y descripción de los edificios modelo

Para el estudio de la respuesta sísmica de edificios irregulares se escogieron tres edificios con el mismo tipo de irregularidad en elevación: la presencia de un apéndice. Este apéndice localizado excéntricamente con respecto a la base, consiste en una reducción drástica de una sola dimensión en planta. La diferencia entre estos modelos estriba en el grado de irregularidad, el cual se puede medir cualitativamente relacionando la geometría global de los edificios, como se indica en el capítulo anterior (Fig. 3).

Con base en la relación de masas y rigideces laterales se establece el grado de irregularidad de los edificios modelo. En la figura 3 se aprecia que en los modelos A y B se tiene una reducción de un 50% de área, mientras que para el modelo C la disminución es de un 75%.

Según la clasificación propuesta por B. M. Shahrooz (Ref. 10) para edificios con apéndices, se tiene que el modelo C es el más irregular ($d = 2.85$), seguido por el modelo B ($d = 2.39$), que es más irregular que el A ($d = 1.27$) (Fig. 4).

Se parte de las siguientes suposiciones que son comunes a los tres modelos:

- Cada edificio, destinado a oficinas, está confinado por marcos dúctiles de concreto reforzado con divisiones livianas y de mampostería.

- Se ubica en una zona sísmica similar a la de San José de Costa Rica.

- Está cimentado a 1.5 metros de profundidad sobre un suelo firme.

Propiedades de los modelos

Para todos los modelos, el tipo de entrepiso se compone de una losa de concreto con viguetas trapezoidales de concreto preesforzado, paralelas a la luz más larga (en dirección del eje X).

Para el dimensionamiento preliminar de vigas se utiliza las especificaciones del ACI 318-83. Las vigas en el sentido corto resultan ser de 45 x 20 cm y las vigas en el sentido largo de 65 x 30 cm. Con el fin de definir la inercia de las vigas se toma en cuenta la contribución de la losa. Se siguen las normas ACI 318-83 que indican un ala efectiva de $b + h$ para vigas exteriores y $b + 2h$ para vigas interiores, donde b es el ancho de la viga y h la altura de la viga menos el espesor de la losa.

El dimensionamiento de las columnas se lleva a cabo tomando en cuenta la columna más cargada. Para columnas simétricas se aplica el criterio de que la carga axial última debe ser menor o igual que el 50% de la carga axial balanceada. De esta forma se

obtienen columnas de 50 x 50 cm en los últimos dos pisos y de 60 x 60 cm en los demás pisos.

Para el análisis sísmico de cada modelo se considera el sismo actuando a lo largo del eje X; ésto con el fin de evaluar sólo los efectos de irregularidad en elevación. Puede notarse que en todos los edificios modelo, la irregularidad en planta se manifiesta únicamente para el sismo actuando a lo largo del eje Y.

4. ESTUDIO PARAMETRICO

Los tres edificios modelo escogidos han sido analizados por los métodos estático, dinámico y estático bilineal, apegados a las normas del Código Sísmico de Costa Rica. En casos muy severos de irregularidad en elevación el método estático lineal (primer modo de oscilación triangular) no es aplicable, y es por esto que se estudia el método estático bilineal que pretende cuantificar la respuesta sísmica de edificios con apéndices.

Los resultados que se presentan con el fin de comparar la respuesta sísmica de los edificios son: desplazamientos absolutos, razón de desplazamientos y cortantes por piso.

4.1 Resultados de los tres edificios modelo

Para edificios irregulares en elevación como los escogidos, el CSCR sugiere utilizar un análisis dinámico lineal. Los desplazamientos y las fuerzas internas obtenidos mediante este método servirán para comparar el comportamiento de los tres edificios modelo. Como se muestra en las figuras 5, 6 y 7, el grado de irregularidad afecta directamente los desplazamientos y la distribución de fuerzas internas en el edificio.

La fig. 5 señala que los desplazamientos relativos cercanos al nivel de la irregularidad son los mayores en todo el edificio. Esta razón de desplazamiento se define como la diferencia entre el desplazamiento del nivel en cuestión y el del nivel inferior inmediato, dividida por la altura entre los dos niveles. En el caso del modelo A este fenómeno se da en el nivel 2, para el edificio B se da en el nivel 3 y para el C, en el piso 4. Para el modelo C los desplazamientos relativos son mayores que para el modelo B, el cual presenta, a la vez, desplazamientos relativos mayores que el modelo A. Al observar la figura 6 y comparar el desplazamiento de los tres modelos en el sexto nivel, se nota que los tres modelos tienen desplazamientos muy similares.

Comparando los cortantes en la base de los edificios, se tiene el mayor valor para el modelo C y el menor para el modelo B. La fuerza lateral sigue esta misma tendencia, y en todos los casos se presenta la mayor concentración de fuerza cortante justamente al nivel de la irregularidad (Fig. 7). Por concentración de fuerza cortante se entiende la diferencia de cortante entre dos pisos adyacentes.

Los cortantes en la base están gobernados por la distribución de la masa en altura. Puesto que para el edificio B, la discontinuidad se presenta en el piso 2 y no en el 3 como en el

A, su masa total es menor, generando un cortante en la base menor. De igual forma, como el edificio C consta de 7 pisos (uno más que los anteriores) y dos luces más en la base, su fuerza cortante total es considerablemente mayor.

4.2 Resultados obtenidos mediante los tres diferentes métodos de análisis

Considerando las normas del CSCR, se procede a ver la diferencia en desplazamientos y fuerzas internas resultantes para el edificio modelo C a lo largo del eje X. Se escoge un solo modelo partiendo de que la respuesta obtenida utilizando los diferentes métodos posee una tendencia similar en los tres edificios.

Debido a que en la actualidad en el CSCR no se contempla el método estático bilineal, para aplicarlo se propone utilizar del CSCR únicamente las fórmulas que éste recomienda para la obtención del cortante en la base. El método estático lineal tradicional se aplica en este estudio aún cuando no es recomendado en las normas, para edificios con este tipo de irregularidad. Esto con el fin de comparar los resultados obtenidos mediante los tres métodos de análisis (estático, dinámico y estático bilineal).

Observando los cortantes resultantes en la base, se obtiene un valor mayor para el método dinámico con respecto a ambos métodos estáticos. En cuanto a la distribución del cortante en los niveles 3 y 4, el valor obtenido mediante el método dinámico es menor a los de los métodos estáticos (Fig. 8).

Debido a que el cortante en la base se calcula mediante la misma fórmula en los métodos estáticos, su magnitud es igual. Sin embargo, la distribución por piso varía de un método a otro y ésta diferencia es más notoria en los niveles 3 y 4 (cerca de un 15%), en donde todos los valores son mayores para el método estático bilineal (Fig. 8).

Viendo el cambio de cortante entre los niveles en donde se da la irregularidad, el método dinámico presenta una variación más acentuada. La diferencia porcentual con respecto al cortante en la base entre los pisos 2 y 3 es del 28% para el análisis dinámico, mientras que para el estático y el estático bilineal es de 21% y 14%, respectivamente (Tabla 1).

Los desplazamientos absolutos en todos los pisos que arrojan ambos métodos estáticos son mayores que los del dinámico. Además, en los niveles superiores el método estático bilineal presenta valores alrededor de un 15% mayor que los del método estático tradicional (Fig. 9). En este gráfico de desplazamientos se observa una tendencia bilineal, donde el cambio severo se presenta visiblemente en el segundo nivel, donde se encuentra la irregularidad.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La conveniencia de un edificio regular consiste, primordialmente, en lo predecible de su comportamiento ante un sismo. El análisis de este tipo de edificios se simplifica, debido a características inherentes a su regularidad.

La disposición regular de los elementos resistentes se traduce en una distribución uniforme de la masa y la rigidez en todo el edificio, lo que conlleva a una demanda de resistencia adecuadamente distribuida. A la vez, la regularidad le permite al edificio vibrar de una manera simple, lo que quiere decir que aunque su respuesta esté compuesta por diferentes movimientos oscilatorios, ésta se verá influenciada mayormente por el primer modo de oscilación. Simplificando, es posible utilizar para el análisis únicamente este primer modo y además aproximarlos linealmente como indican los métodos estáticos convencionales. Estos métodos sencillos reflejan certeramente el comportamiento sísmico de estructuras regulares.

Para el análisis de estructuras irregulares en elevación, el CSCR recomiendan utilizar el método dinámico lineal, pues éste toma en cuenta la participación de los modos superiores de oscilación, que adquieren mayor importancia en estos casos. El método estático queda desechado, pues como se demostró en este trabajo, la utilización de un único modo de oscilación triangular no refleja el comportamiento real de este tipo de estructura. En edificios con apéndices, el movimiento oscilatorio gobernado por vibraciones superpuestas, muestra una tendencia bilineal en la respuesta global. Este desenvolvimiento se debe a cambios bruscos de propiedades dinámicas que generan una transmisión irregular de esfuerzos, que produce que algunos elementos se esfuercen más que otros.

Cuando son mayores la flexibilidad y la reducción de masa del apéndice con respecto a la base, se producen los más severos desplazamientos relativos y la más significativa concentración de fuerza cortante al nivel de la irregularidad. Estos efectos aumentan conforme crece el grado de irregularidad de un edificio.

El problema con las estructuras irregulares consiste en que las demandas reales pueden ser muy diferentes a las calculadas mediante algún método estático. Sin embargo, un análisis dinámico lineal no siempre es suficiente para determinar el comportamiento de edificios con irregularidades severas en elevación. En primer lugar, si se tienen períodos de oscilación demasiado cercanos, como puede ser el caso en edificios irregulares, la combinación modal no garantiza un resultado satisfactorio en la respuesta máxima de la estructura. En segundo lugar, si se tienen deformaciones excesivas provocadas por el sismo, pueden haber incursiones en el rango inelástico de los elementos, lo cual no es contemplado en ningún análisis lineal. Por lo tanto en casos extremos de irregularidad, para conocer la respuesta de la estructura es necesario efectuar un análisis dinámico no-lineal del sistema completo (estructural y no-estructural). Este tipo de análisis es mucho más laborioso y oneroso, por lo que en nuestro medio por lo general no es factible. Por lo tanto, es preferible eliminar las irregularidades en la etapa

de estructuración para evitar comportamientos indeseables y difíciles de predecir.

El método estático bilineal representa de una manera más exacta mediante un único modo bilineal, la tendencia a la deformación de edificios con apéndices. Este método no se contempla en los códigos sísmicos actuales, sin embargo utiliza los mismos conceptos del método estático convencional, distribuyendo fuerzas laterales estáticas en cada piso.

La distribución por piso del cortante es diferente para cada método y es el estático bilineal el que genera fuerzas laterales mayores en los niveles en donde se encuentra la irregularidad. La amplificación dinámica en la torre, notoria en los métodos estáticos y en especial en el bilineal, no es tan apreciable en el dinámico.

Debido a que en la mayoría de los pisos la fuerza lateral resultante es mayor para los métodos estáticos, éstos son los que inducen desplazamientos absolutos más grandes. Los desplazamientos más conservadores los presenta el estático bilineal. Se recomienda por lo tanto, que para edificios con apéndices se aplique el método de análisis estático bilineal en combinación con el dinámico lineal, tradicionalmente recomendado por el CSCR.

Es importante destacar que el método estático bilineal da como resultado una respuesta sísmica más acentuada en los niveles que presentan discontinuidad. De esta manera se distribuye mejor el comportamiento inelástico del edificio. Esto debe considerarse como un aspecto a favor de este análisis, pues permite prever las concentraciones de esfuerzos en dichos niveles. Sin embargo, debe reconocerse que únicamente al conocer el comportamiento real del edificio se puede evaluar la exactitud de los resultados.

Todos los gráficos de desplazamientos muestran una tendencia bilineal, lo cual es de esperar para el método estático bilineal, pues éste se basa precisamente en este efecto. Los métodos estático y dinámico también presentan esta tendencia, que señala el comportamiento de los edificios con apéndices y justifica los principios que fundamentan el método bilineal. Este fenómeno también se aprecia en los gráficos de desplazamiento relativo por piso, que indican claramente el efecto de "latigazo" que se da en la torre.

Por último, cabe recalcar que para garantizar la seguridad de un edificio debe lograrse una configuración estructural adecuada. De esta manera se obtiene un mejor comportamiento de la estructura.

REFERENCIAS

- [1] Arnold, C., BUILDING CONFIGURATION: CHARACTERISTICS FOR SEISMIC DESIGN, Proceedings, Seventh World Conference on Earthquake Engineering, Turkey, Vol. IV, 1980, pp.589-592.
- [2] Arnold, C. and Elsesser, E., BUILDING CONFIGURATION: PROBLEMS AND SOLUTIONS, Proceedings, Seventh World Conference on Earthquake Engineering, Turkey, Vol. IV, 1980, pp.153-160.
- [3] Bertero, Vitelmo, SEISMIC PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES, Sesiones Científicas "Dr. Abel Sánchez Díaz " sobre Ingeniería Sismorresistente, 1978, pp.75-143.
- [4] Chopra, A. K., DYNAMICS OF STRUCTURES, Earthquake Engineering Research Institute.
- [5] Chuy, C. y Neurohr, E., ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE EDIFICIOS IRREGULARES EN ELEVACION, Proyecto Final de Graduación, UCR, 1990.
- [6] Dowrick, D. J., EARTHQUAKE RESISTANT DESIGN, A MANUAL FOR ENGINEERS AND ARCHITECTS, John Wiley & Sons, Great Britain, 1978, pp.80-129.
- [7] Maison, B. F. and Neuss, C. F., SUPER-ETABS, 1983, Micro Conversion by Wilson, Hollings & Dovey, 1985.
- [8] Penzien, J. and Chopra, A., EARTHQUAKE RESPONSE OF APPENDAGE ON A MULTI-STORY BUILDING, Proceedings, Third World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1965.
- [9] Sauter, F. F., DISEÑO SISMORRESISTENTE DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO, Consejo Superior de Investigaciones Científicas Instituto Eduardo Torroja, Madrid, España, 1989.
- [10] Shahrooz, B.M. and Moehle, J.P., EXPERIMENTAL STUDY OF SEISMIC RESPONSE OF R.C. SETBACK BUILDINGS, E.E.R.C., University of California at Berkeley, 1987.
- [11] Wakabayashi, M. y Martinez, R. E., DISEÑO DE ESTRUCTURAS SISMORRESISTENTES, Editorial McGraw-Hill, México, 1988.
- [12] CODIGO SISMICO DE COSTA RICA / Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos; Jorge A. Gutiérrez G., 1986.

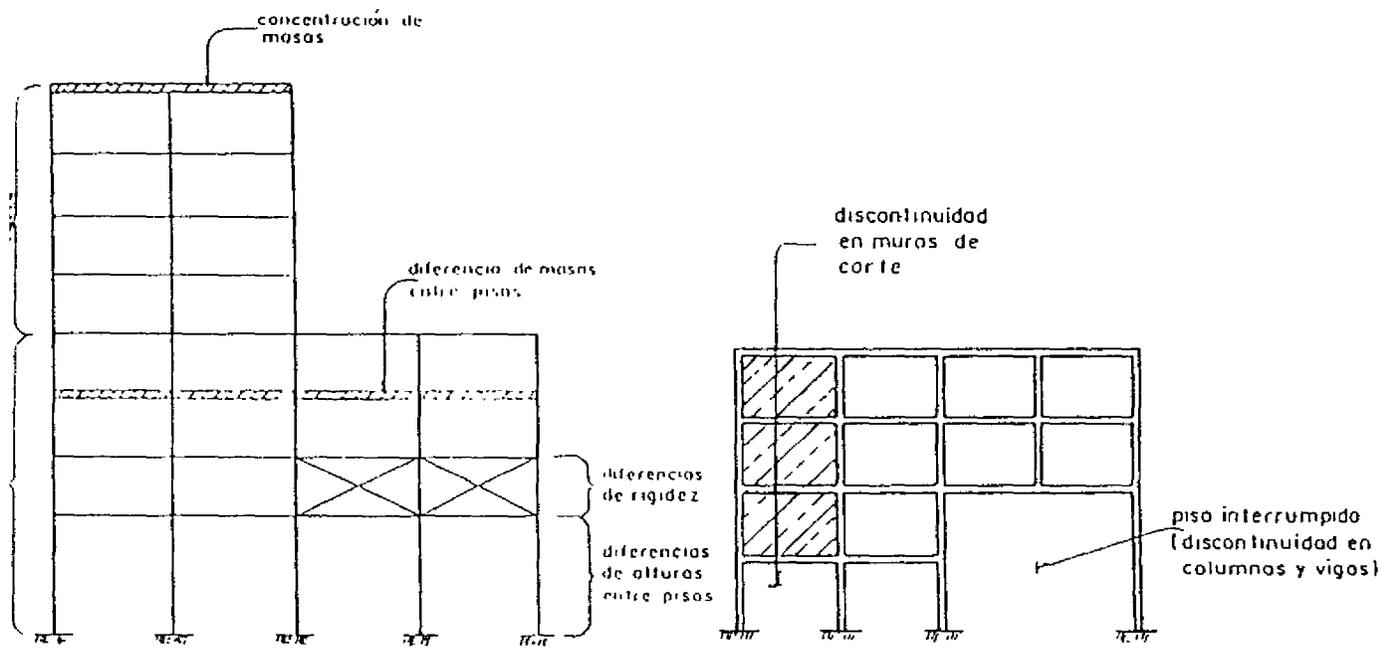


FIG. 1

PROBLEMAS DE IRREGULARIDAD EN ELEVACION

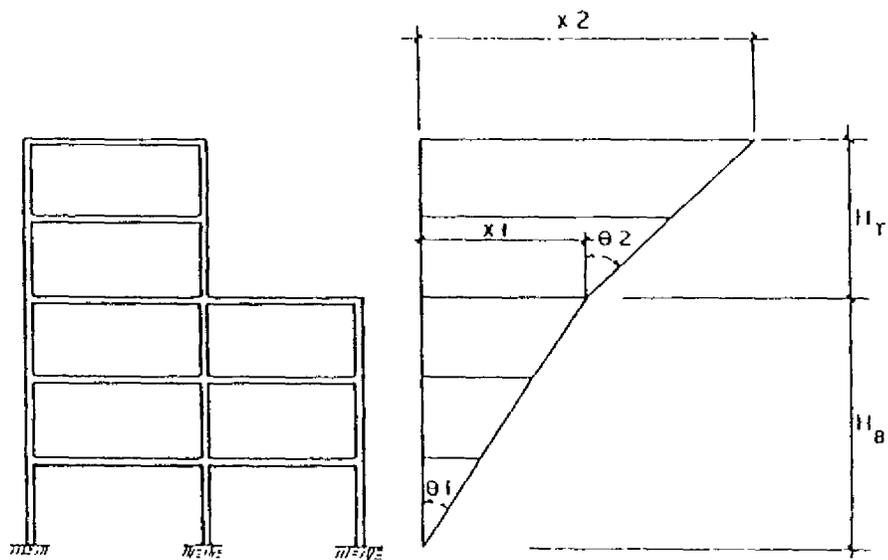
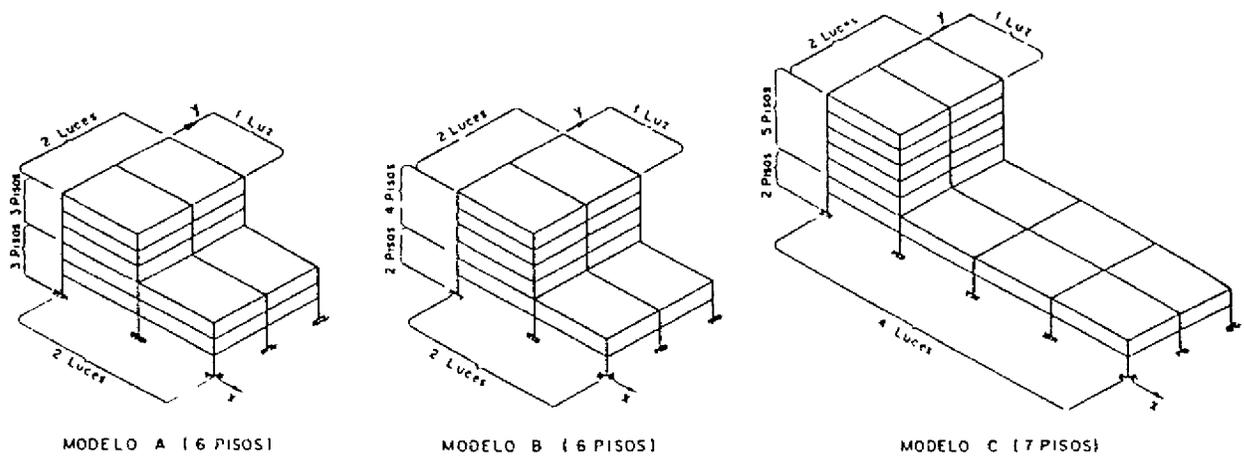


FIG 2

PRIMER MODO DE OSCILACION BILINEAL



EDIFICIOS MODELO

FIG. 3

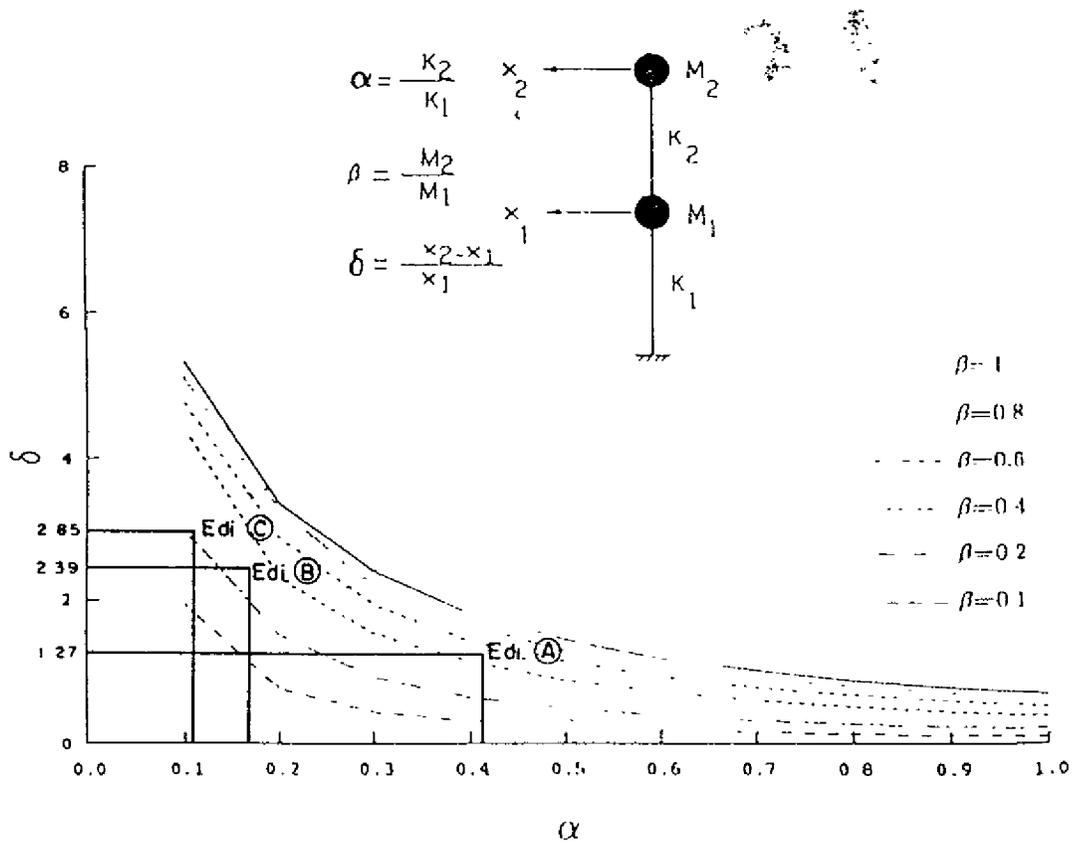


FIG. 4

GRADO DE IRREGULARIDAD S

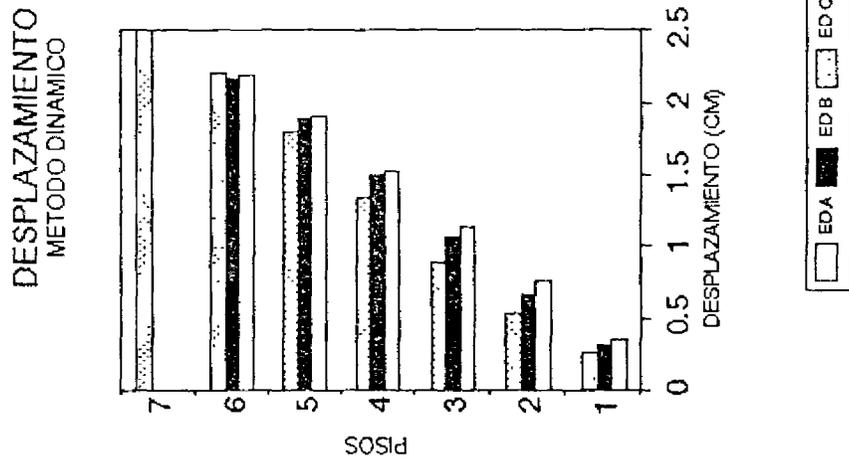


FIG. 6

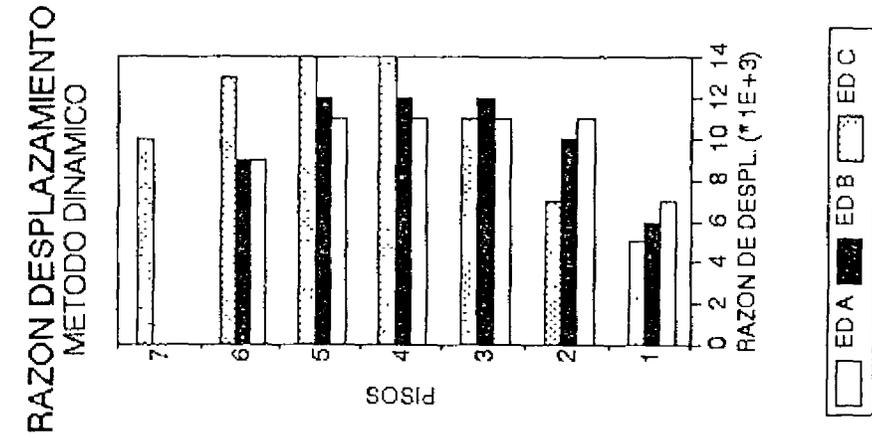


FIG. 5

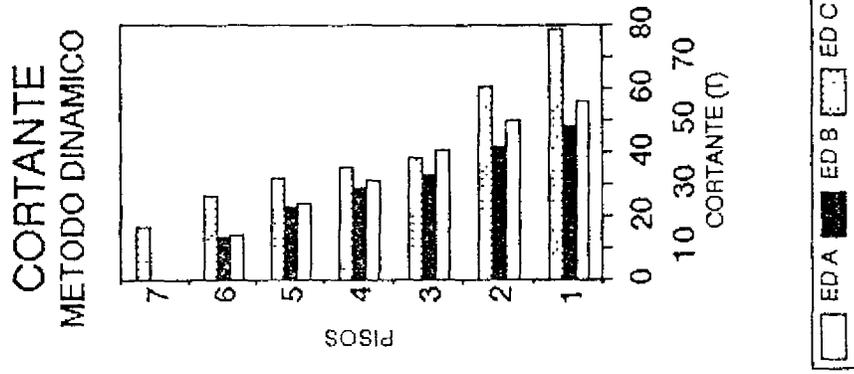


FIG. 7

CORTANTE
EDIFICIO C

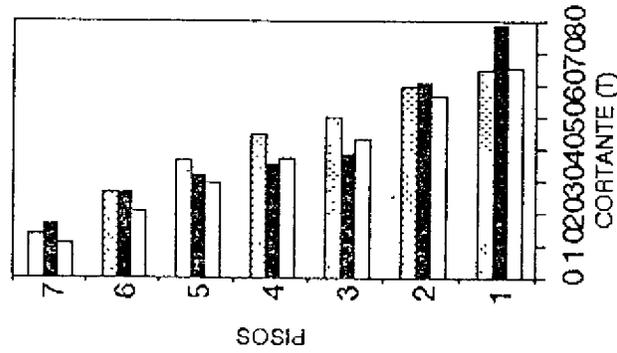


FIG. 8

DESPLAZAMIENTO
EDIFICIO C

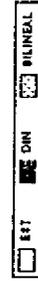
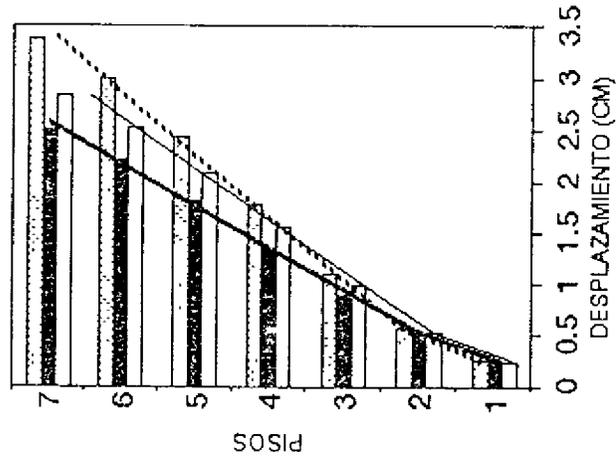


FIG. 9

PORCENTAJE DE CORTANTE CON
RESPECTO AL CORTANTE EN LA
BASE (SISMO EN X)

CSCR

PISO	EST	DIN	BILINEAL
7	16.1	20.8	21.0
6	31.6	33.9	30.3
5	45.3	40.2	56.5
4	56.9	44.4	69.0
3	65.8	48.8	77.3
2	87.1	76.6	91.4
1	100.0	100.0	100.0

TABLA 1

ANEXO

METODO ESTATICO BILINEAL

La forma del primer modo bilineal (Fig. 2) se expresa:

$$\phi^T = [a_1 * h_{1b}, a_1 * h_{2b}, \dots, a_1 * H_b, x_1 + a_2 * h_{1t}, x_1 + a_2 * h_{2t}, \dots, x_1 + a_2 * H_t]$$

donde:

$$a_1 = \tan \theta_1, \quad a_2 = \tan \theta_2 = d * a_1$$

h_{ib} : altura del nivel i de la base
 h_{it} : altura del nivel i de la torre desde la parte inferior de la torre

Expresando el modo en función de las alturas y d:

$$\phi^T = [h_{1b}/H_b, h_{2b}/H_b, \dots, 1, 1 + d * h_{1t}/H_b, 1 + d * h_{2t}/H_b, \dots, 1 + d * H_t/H_b]$$

$$d = \frac{x_2 - x_1}{x_1} \quad d: \text{razón de desplazamiento}$$

d se obtiene de la Fig. 4 que representa la variación de la razón de desplazamiento en función de las relaciones de rigidez y masa, a y b respectivamente.

$$a = \frac{K_2^*}{K_1^*} \quad b = \frac{M_2^*}{M_1^*}$$

Para el cálculo de K_1^* , K_2^* , M_1^* y M_2^* se deben generalizar la masa y la rigidez de la base y la torre. Así,

$$K^* = \sum_{i=1}^{N-1} [(K_i + K_{i+1}) \left(\frac{h_i}{H} \right)^2 - 2K_{i+1} \frac{h_i(h_{i+1})}{H^2}] + K_N \left(\frac{h_N}{H} \right)^2$$

$$M^* = \sum_{i=1}^N [M_i * (h_i/H)^2]$$

donde:

- K_i : rigidez lateral del piso i
- h_i : altura hasta el piso i
- N : # total de pisos (torre o base)
- H : altura total (torre o base)
- M_i : masa del piso i

Conociendo la forma modal y el cortante en la base, se distribuyen las fuerzas laterales por piso de la siguiente forma:

$$F_i = \frac{M_i \phi_i}{\sum_{i=1}^N M_i \phi_i} * V \quad V: \text{cortante en la base}$$