

Comportamiento estructural de dos edificaciones por hundimiento del suelo en la ciudad de México

JOSÉ LUIS CAMBA CASTAÑEDA (*)

RESUMEN Los problemas de hundimiento del subsuelo en la antigua zona lacustre de la Ciudad de México, así como los efectos sísmicos, están provocando problemas importantes sobre las estructuras cimentadas en dicha zona.

En este trabajo se describen brevemente las condiciones actuales en las que se encuentran dos tipos de estructuraciones, una de la época colonial y otra contemporánea.

En la primera de ellas, se trata de la Catedral Metropolitana, la cual se analizó mediante modelos de elementos finitos a fin de determinar el estado de esfuerzos, analizando los efectos de peso propio así como la combinación con los efectos sísmicos y revisando la seguridad estructural. Se le aplicaron mediadas de vibración ambiental y los métodos para corregir los asentamientos diferenciales, evaluando finalmente los resultados obtenidos.

Para la segunda estructura, se seleccionó un edificio de diez niveles, al cual se le impuso un asentamiento diferencial importante, que permite estimar sus consecuencias con las de las cargas gravitacionales y posteriormente, resistiendo los efectos sísmicos en esas condiciones, tomando en cuenta la interacción suelo estructura. Para el análisis estructural aplicado a este edificio, se utilizó el método paso a paso, con las fuerzas sísmicas obtenidas del acelerograma SCT registrado durante los sismos de septiembre de 1985. Para conservar lo mejor posible las condiciones tridimensionales, se seleccionó un marco en la dirección longitudinal, al cual se le aplicaron las masas de tal forma, que en dicho marco provocaran los mismos periodos y los desplazamientos que los de la estructura tridimensional.

STRUCTURAL BEHAVIOUR OF TWO BUILDINGS FOR REASONS OF LAND SUBSIDENCE IN MEXICO CITY

ABSTRACT *The problems of subsoil subsidence in the old lake area of Mexico City, as well as seismic effects, are causing considerable problems to the structures built on foundations in that area.*

This study gives a brief description of the current conditions in which two types of structure find themselves: one is a colonial period building and the other is contemporary.

The first of these is the Metropolitan Cathedral, which was analysed by means of finite element models for the purpose of verifying the status of stresses, analysing the effects of its own weight as well as the combination with seismic effects and reviewing its structural safety. Environmental vibration measurements and methods of correcting differential settling were applied, and the results obtained were finally assessed.

For the second structure, a ten-storey building was selected and subjected to considerable differential settling, which permits an estimation of its consequences with those of the gravitational loads and subsequently, resisting seismic effects under those conditions, taking into account the ground-structure interaction. The step-by-step method was used for the structural analysis applied to this building, with the seismic forces obtained from the SCT accelerogram recorded during the September 1985 earthquakes. In order to preserve the three-dimensional conditions in the best way possible, a longitudinal direction frame was selected and the masses applied to it in such a way as to cause the same periods and displacements within the frame as those of the three-dimensional structure.

1. INTRODUCCIÓN

Las características de los suelos arcillosos de la ciudad de México han sido descritas en esta Bienal (REF. 1). Cuando las estructuras se desplantan en este tipo de suelos, se verán sujetas a movimientos diferenciales, dependiendo de las profundidades de estas capas de arcillas que varían entre 25 y 40 metros.

Las rotaciones y traslaciones de la base de estos edificios, pueden producir efectos de gran magnitud en las estructuras bajo cargas dinámicas como es el caso del sismo. Los objetivos del presente trabajo están dirigidos a mostrar la influencia de este tipo de suelos blandos en las estructuras cuando se presentan asentamientos diferenciales debido a cargas gravitacionales y como se comportan cuando en estas condiciones, las estructuras deben soportar los efectos de un sismo.

Se seleccionaron dos tipos de estructuras, una colonial que presenta hundimientos diferenciales muy importantes y que se trata de la Catedral Metropolitana así como un edificio típico, de construcción reciente, haciendo modelos matemáticos los cuales se analizaron bajo condiciones de asenta-

(*) Ingeniería Civil

mientos diferenciales y los efectos de un sismo semejante al ocurrido en la Ciudad de México, en septiembre de 1985.

A continuación se describe con detalle el estado actual, los análisis estructurales a que fueron sujetas, tomando en cuenta la interacción suelo-estructura, la interpretación de resultados obtenidos y las propuestas de solución correctivas, para cada una de las edificaciones.

2. LA CATEDRAL METROPOLITANA

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y ESTADO ACTUAL DE SU COMPORTAMIENTO

La catedral de la ciudad de México, inició su construcción a finales del siglo XVI y se prolongó más de 200 años para terminarla. Está construida en suelos arcillosos muy blandos, que fueron previamente consolidados por monumentos aztecas.

Desde el inicio de su construcción se presentaron problemas de hundimientos, debido a la gran deformabilidad de los suelos, mismos que trataron de corregirlos llegando a variar la longitud de algunas columnas más de 85 cm. El bombeo constante del subsuelo en este siglo, agravó el problema de hundimientos diferenciales, llegando a tener un valor máximo de 2,40 m entre las columnas eje 3C y la 11B (Fig. 1a) así como 12 desplomes en columnas del orden de 3% (REF 2). Dos intentos de recimentación anteriores no lograron disminuir sensiblemente estos hundimientos diferenciales.

La estructura de la Catedral está cimentada sobre una retícula de contratrabes de mampostería de 2,5 m de ancho y 3,5 m de peralte que se apoyan sobre un pedraplen del orden de 1 m de espesor, sobre toda su superficie construida que es de 122 x 56 m. La altura máxima es de 61 m (Fig. 1b)

Este pedraplén descansa a su vez sobre un cabezal de 20 cm de espesor, que se apoya sobre una retícula de estacones de madera a cada 60 cm y de 2 a 3 m de longitud con diámetro de 20 cm. Los arcos que reciben las bóvedas cilíndricas del techo están apoyados sobre diez y ocho columnas aisladas y otras diez y ocho más que están adosadas a muros, todas de piedra volcánica unidas con mortero de arena. El peso total de la estructura y la cimentación es de 127.000 toneladas, que proporcionan al suelo una descarga del orden

de 13 ton/m², valor muy elevado para este tipo de suelos que está provocando asentamientos diferenciales importantes. Los hundimientos diferenciales que provocaron los desplomes mencionados en columnas y que afectaron seriamente la seguridad estructural, han producido agrietamientos numerosos en las bóvedas, que han sido reparadas constantemente para evitar filtraciones, condujeron a la necesidad de analizar y plantear soluciones que permitan resolver, o al menos disminuir, estos problemas.

Desde hace varios años se está llevando un monitoreo de los desplazamientos de la estructura, en un número imposible de puntos de la misma, relativos principalmente a alturas de columnas utilizando inclinómetros electrónicos así como la ubicación y anchos de los agrietamientos en los principales elementos. Las verificaciones se realizan mensualmente y los resultados se procesan automáticamente a través de un sistema de cómputo, permitiendo visualizar las respuestas de la estructura.

2.2 MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA Y ANÁLISIS

Se hizo un modelo tridimensional a base de elementos finitos (Fig. 2) tomando los datos de los planos más fiables y comprobándolos en obra, para obtener el estado general de esfuerzos, con las hipótesis de comportamiento lineal de los elementos estructurales y de isotropía, con las limitaciones de ser un material heterogéneo con capacidad baja a la tensión y además de tener la presencia de niveles de agrietamiento importantes. Sin embargo, estos modelos permitieron obtener una buena aproximación del estado general de esfuerzos y detectar las zonas más críticas.

Para poder representar lo mejor posible los efectos no-lineales en el modelo, se disminuyeron los valores del módulo de elasticidad en las zonas agrietadas. Para el análisis de cargas verticales, el peso propio es la acción más importante, pudiendo desprejiciarse las cargas vivas. Los análisis de estado límite de los principales miembros de la estructura, detectaron mecanismos no lineales en los arcos, debido a los desplomes. En las columnas centrales, los momentos flexionantes debidos a las excentricidades de las cargas, incrementaron a más del doble los valores de esfuerzos axiales sin deformaciones, que están cercanos a la

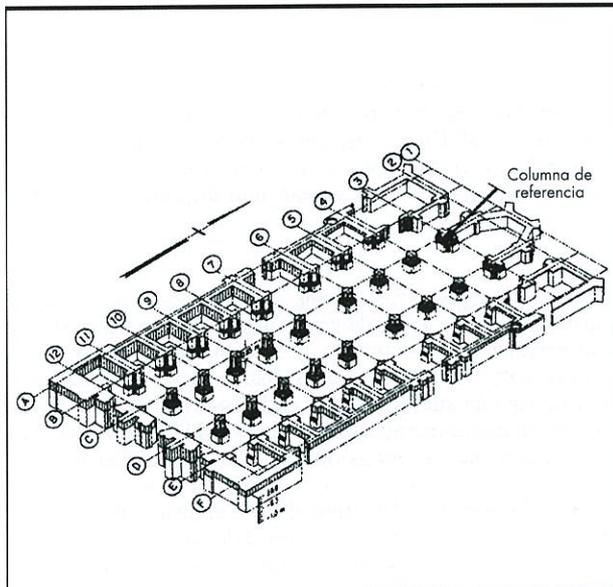


FIGURA 1a. Planta de localización de columnas y muros

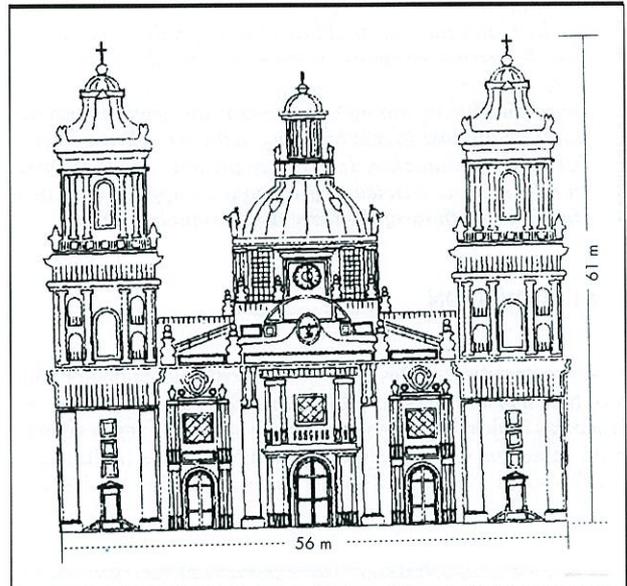


FIGURA 1b. Fachada principal

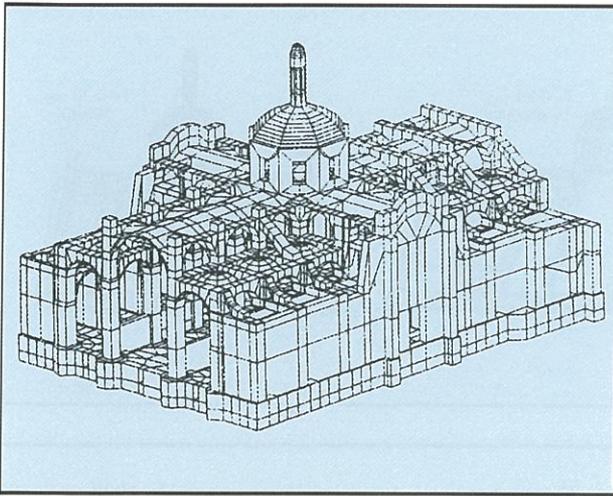


FIGURA 2. Modelo a base de elementos finitos

resistencia de la piedra en la parte superior de la columna, que además se demostró que son piedras de menor resistencia, que las de la parte inferior de la columna. La mayor excentricidad entre las partes superior e inferior de las columnas es de 53 cm, que representan del orden del 25% de lado de la columna.

Estos casos de los agrietamientos de arcos y bóvedas (Fig. 3) así como el desplome de columnas son los más críticos para la seguridad estructural.

En el caso de las columnas, los esfuerzos debidos a cargas gravitacionales, efectuados desde por métodos tradicionales hasta el análisis por elementos finitos, dieron un valor promedio en compresión del orden de 20 kg/cm² en toda la sección.

Sin embargo utilizando la técnica del gato plano (REF. 3), que consiste en hacer cortes en el mortero de las juntas horizontales en columnas, introduciendo un gato plano muy delgado en estas ranuras entre rocas, por lo cual la presión necesaria aplicada por el gato para cerrar la ranura se puede medir. Los valores así obtenidos en diferentes puntos de la sección, difieren bastante del promedio, mencionando en algunos casos más del doble, indicando una fuerte presencia de excentricidades provocadas por momentos flexionantes, siendo esta técnica de mayor precisión que la obtenida por los modelos analíticos.

Los valores de esfuerzos obtenidos mediante la técnica del gato plano, implican que la resistencia en compresión de

algunas columnas, está cerca de alcanzarse, al tener factores de seguridad contra la falla cercanos a la unidad.

2.3 ANÁLISIS SÍSMICO Y MEDIDAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

Siendo la catedral una estructura masiva y rígida, desplantada sobre un suelo muy blando, la interacción de este último con la estructura, reduce en forma importante los efectos sísmicos, lo cual explica el buen comportamiento que han tenido en general, monumentos coloniales ante las acciones sísmicas a lo largo de varios siglos.

En el modelo de un grado de libertad con rigidez y masas equivalentes, sobre una cimentación muy rígida, es importante resaltar el hecho de que para el período crítico del suelo, en este lugar que es alrededor de dos segundos, la amplificación sería del orden de 10 veces sin tomar en cuenta la interacción suelo-estructura, mientras que tomándola en cuenta es menor a tres.

Esto se debe a que la energía que trata de introducir el suelo a la estructura, se regresa al mismo por radiación cuando ésta empieza a vibrar, ya que la amortiguación es bastante mayor al 5% del crítico en edificios típicos, al tener un valor en este caso cercano al 20% (REF. 2)

Siguiendo el reglamento vigente del departamento del Distrito Federal 93, le correspondería para su análisis un valor de 0.4 como ordenada de diseño espectral, que por razones expuestas, sería muy conservador, por lo cual se adoptó para su revisión un coeficiente de 0.20, que corresponde al 50% del reglamentario.

Al modelo tridimensional se le hizo un análisis modal espectral (REF. 4) con las limitaciones que implica un comportamiento lineal a este tipo de material, obteniendo valores aproximados de períodos de 0.32 y 0.28 segundos para las direcciones transversal y longitudinal respectivamente y de 0.20 segundos para el cuarto modo que representa la dirección vertical (fig. 4); siendo éste último de consideración, comparado con los modos horizontales, pero en los suelos arcillosos de la Ciudad de México, las aceleraciones verticales son pequeñas, disminuyendo sensiblemente sus efectos.

Se hicieron mediciones de vibración ambiental (paso de vehículos, ruido, viento, etc) instalando una serie de acelerógrafos en el piso de criptas, en la cubierta y en la cúpula para conocer las respuestas ante un sismo y que permitieron una verificación con los modelos analíticos obteniéndose valores sensiblemente mayores que los calculados, del orden del 50%. Estas diferencias se pueden explicar porque el modelo estructural no toma con la precisión deseada la rotación de la base, ni tampoco el agrietamiento existente en la estructura, los cuales tienden a incrementar el período de vibración.

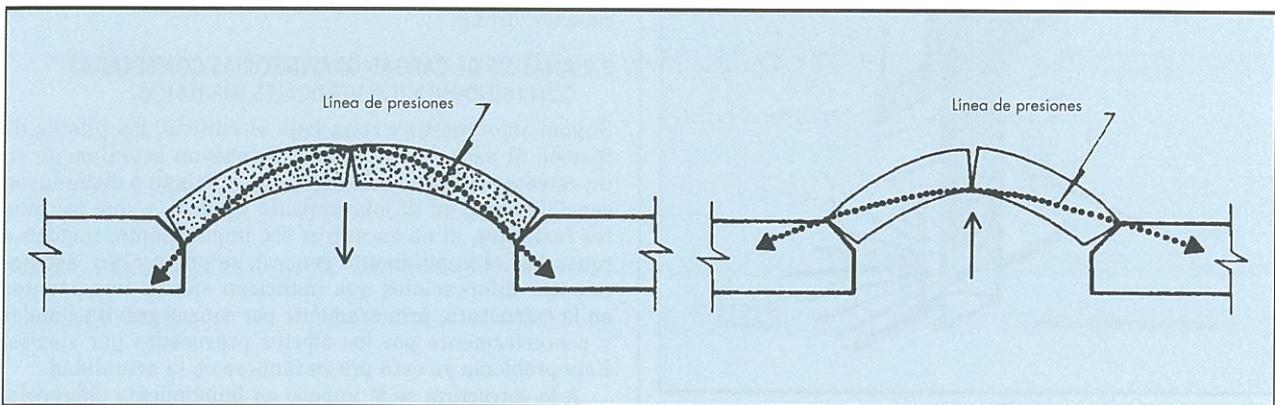


FIGURA 3. Agrietamiento por incremento del claro

Agrietamiento por disminución del claro

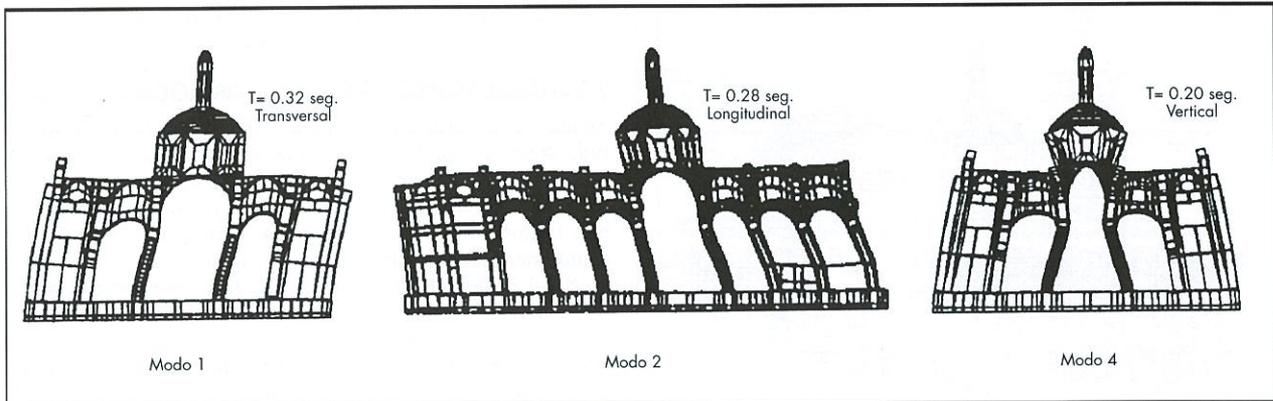


FIGURA 4. Formas modales de vibración

La presencia de los muros de fachada así como los que dividen las diferentes capillas, proporcionan una seguridad adecuada para soportar los efectos sísmicos, pero deberá cuidarse que los giros de los muros longitudinales, no causen desplazamientos importantes en las columnas principales adosadas a ellos, provocando excentricidades adicionales que conduzcan a una inestabilidad lateral y a un posible colapso local.

2.4 MEDIDAS CORRECTIVAS Y EVALUACIÓN

Los análisis estructurales efectuados condujeron a la conclusión de que la seguridad de la Catedral era inadecuada, principalmente debido a las columnas centrales que soportan la cúpula, siendo indispensable aplicar medidas correctivas.

Habiendo estudiado varias alternativas, se optó por el método llamado "subexcavación", para corregir lo más posible los hundimientos (REF. 5).

Esta técnica consiste en hacer descender las partes altas del terreno, extrayendo suelo de los estratos de arcilla que son más compresibles. El procedimiento se hace a través de lumbreras secas de aproximadamente 20 metros de profundidad, a partir de las cuales se realizan 30 perforaciones radiales, por las que se extraerá el material, produciéndose pequeños asentamientos al cerrarse los agujeros horizontales abiertos (Fig. 5).

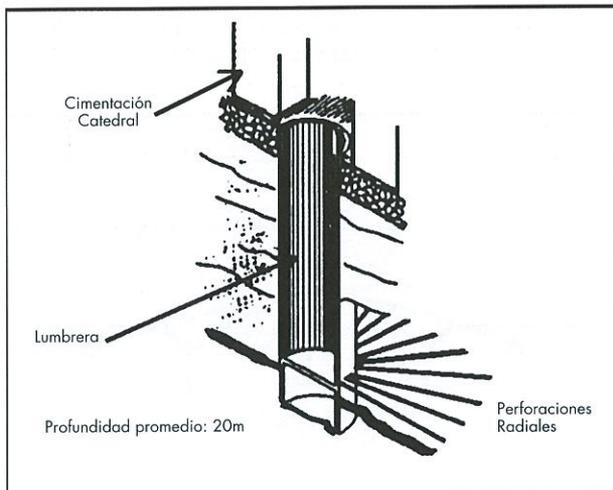


FIGURA 5. Lumbrera y perforaciones radiales

Este procedimiento se inició en agosto de 1993, estando la estructura debidamente apuntalada y para 1998, año en que se terminaron los trabajos, se logró disminuir el asentamiento en 0,98 metros, con daños mínimos en la estructura, que representa un 40% del total mencionado, 2.40 m, logrando así que se produjera un giro en la base de la catedral, casi como cuerpo rígido debido a los hundimientos provocados. La corrección de excentricidad de las columnas, fue un poco menor, del orden del 30%, debido a que no están suficientemente empotradas en la base.

3. EDIFICIO DE DIEZ NIVELES

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Se trata de un edificio con sótano, planta baja y diez niveles superiores ubicados en el suelo blando. En planta tiene forma rectangular con tres crujeas en la dirección corta y cuatro longitudinales. La estructuración es a base de trabes y losas de concreto reforzado, apoyadas en columnas del mismo material. En la dirección corta en los extremos tiene muros de hormigón (Fig. 6).

La cimentación está formada por un cajón y contratraves que se apoyan en pilotes de fricción de 22 metros de longitud.

La estructura tuvo daños durante el sismo de septiembre de 1985, formándose articulaciones plásticas en los extremos de las trabes y en el caso de las columnas, en la parte inferior de las mismas, en planta baja, se articularon en las cuatro esquinas y en la dirección longitudinal del edificio. Se aprovecharon los resultados analíticos obtenidos que se realizaron hace varios años y se impuso una nueva condición de carga, debido a un asentamiento diferencial importante de carácter virtual.

3.2 ANÁLISIS DE CARGAS GRAVITATORIAS COMBINADAS CON HUNDIMIENTOS VERTICALES IMPUESTOS

Suponiendo que una zona bajo el edificio, los pilotes de fricción al paso de varios años se apoyan actualmente en un estrato relativamente duro, que eliminan o disminuyen sensiblemente su desplazamiento vertical, y que los pilotes restantes, al no encontrar ese impedimento, tiendan a conservar el hundimiento general, se provocarán asentamientos diferenciales que inducirán efectos importantes en la estructura, primeramente por causas gravitacionales y posteriormente por los efectos provocados por sismos. Este problema ya está presentándose en la actualidad.

A la estructura se le impuso un hundimiento diferencial del 2% de la dirección longitudinal del edificio, que es el do-

ble del valor máximo admisible del reglamento de Construcción del Departamento del Distrito Federal 1993 (REF. 6)

3.3 ANÁLISIS SÍSMICO

Es ampliamente conocida la relación que existe entre los períodos de vibración de estructuras y el período de vibración del suelo que las soporta, para conocer la respuesta dinámica de las mismas.

La influencia más significativa para el comportamiento estructural de edificaciones situadas en las zonas blandas de la ciudad de México, formadas de capas de arcilla con profundidades comprendidas entre los 25 y 40 metros, son las traslaciones y rotaciones en la base, induciendo fuerzas muy importantes en las estructuras, que pueden provocar daños importantes e incluso el colapso de las mismas, por lo cual es importante tomar en cuenta el conjunto de efectos provocados por las deformaciones del suelo sujeto a cargas dinámicas, conocido como interacción suelo-estructura.

Para considerar este efecto, se siguieron los criterios utilizados por el RCDF-93 basados en una serie de simplificaciones que conducen a considerar en cada una de las dos direcciones ortogonales, un grado de libertad de desplazamiento horizontal y otro de giro, con relación a un eje perpendicular a la dirección analizada.

Como los sismos presentan en el caso de terrenos blandos una franja de banda estrecha, se puede representar el suelo por una masa virtual unida a la cimentación como una caja rígida, soportada por resortes y amortiguadores.

Se hizo un análisis dinámico modal espectral a partir del espectro de respuesta SCT 85, E-W, para obtener períodos y

formas modales. En seguida, se utilizó el método de análisis paso a paso, (REF. 7) con las fuerzas sísmicas obtenidas del acelerograma SCT, registrado durante el sismo ocurrido en la ciudad de México el 19 de septiembre de 1985.

El programa de computadora utilizado fue el DRAIN-2D, que permite calcular el comportamiento lineal o no lineal de una estructura, ya que si una sección de la misma alcanza una resistencia última, después de un paso determinado, el programa pone una articulación plástica y calcula de nuevo la rigidez de este elemento.

El sistema de ecuaciones de movimiento lo resuelve el programa en cada paso y las fuerzas sísmicas las obtiene el acelerograma mencionado.

Es importante señalar que en este análisis, se supuso un análisis muy grande de las resistencias de las secciones, con objeto de poder estimar la influencia de los asentamientos impuestos, combinados con los efectos gravitacionales y posteriormente la envolvente de éstos con los efectos sísmicos.

Sin esta superposición, la formación de articulaciones plásticas, conduciría a un análisis no-lineal, que dificultaría el objetivo de valorar los efectos provocados por los hundimientos diferenciales.

3.4 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

3.4.1- Envolventes de los valores de momento flexionante con carga gravitacional sola y la envolvente con efectos del hundimiento.

En la Fig. 8, se muestran los valores de los momentos flexionantes en vigas de la cruja extrema y se nota como los valo-

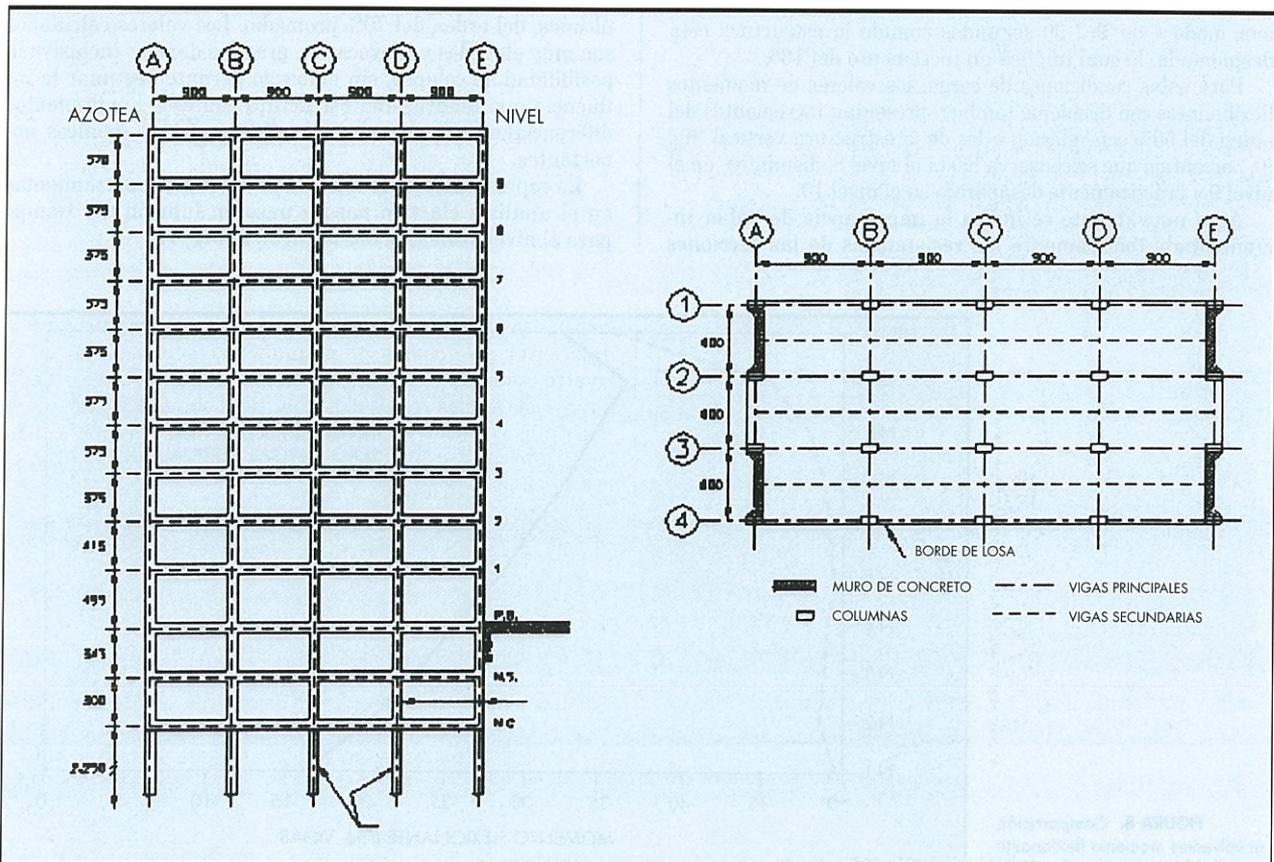


FIGURA 6. Edificio de 10 niveles

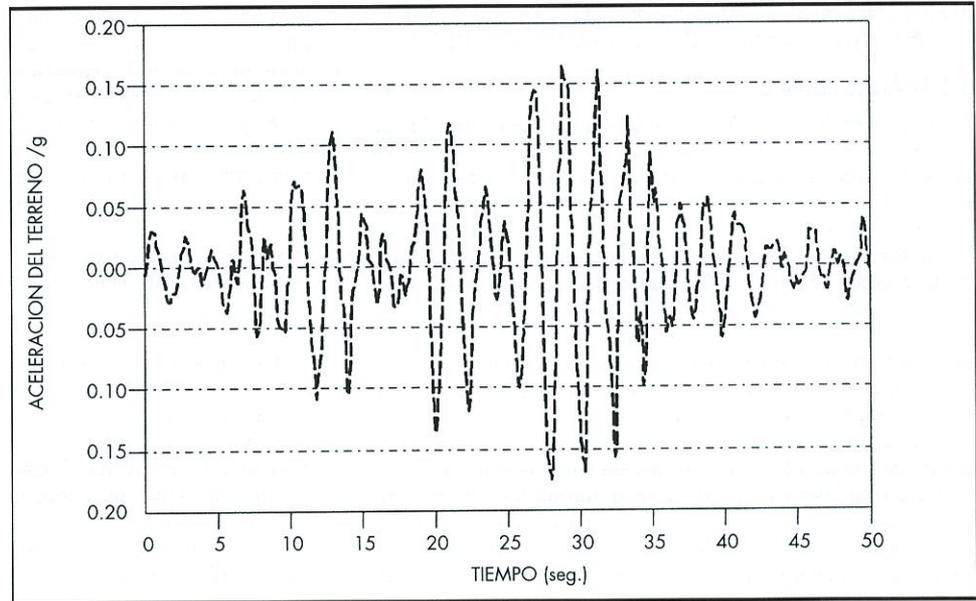


FIGURA 7. Acelerograma SCT-EW (19-sept-85, suelo tipo III (blando))

res con desplome del edificio, comparados con los que no lo tienen, varían desde el 300% mayores en los niveles inferiores, hasta el 200% en los superiores, siendo solamente pequeño el incremento en el último nivel.

3.4.2- Carga muerta, carga viva y sismo

El período de vibración del modelo vertical, o sea sin asentamientos diferenciales, fue de $T=1.64$ segundos para el primer modo y de $T=1.90$ segundos cuando la estructura está desplomada, lo cual implica un incremento del 16%.

Para estas condiciones de carga, los valores de momentos flexionantes con desplome también presentan incrementos del orden del 50% con relación a los de la estructura vertical (fig. 9), porcentaje que se conserva hasta el nivel 8, disminuye en el nivel 9 y prácticamente desaparece en el nivel 10.

Aquí nuevamente se indica la importancia de haber incrementado teóricamente las resistencias de las secciones

para conservar el comportamiento lineal de la estructura. El valor del momento resistente de las secciones es del orden de 200 ton/m para momento negativo en el apoyo sobre las columnas, sin considerar sobre-resistencias de los materiales.

Con relación a los desplazamientos laterales, la diferencia entre los obtenidos sin y con desplomes impuestos del 2% (Fig. 10), conducen a los valores que se incrementan en estos últimos, del orden del 70% promedio. Los valores calculados son muy elevados y provocarían grandes daños e inclusive la posibilidad de colapso, sin embargo permiten estimar la influencia que tendría una estructura con esos hundimientos diferenciales, cuando se ve sometida a efectos sísmicos importantes.

La representación de los valores de esos desplazamientos en el análisis elástico paso a paso en función del tiempo para el nivel azotea, se observan en la Fig. 11.

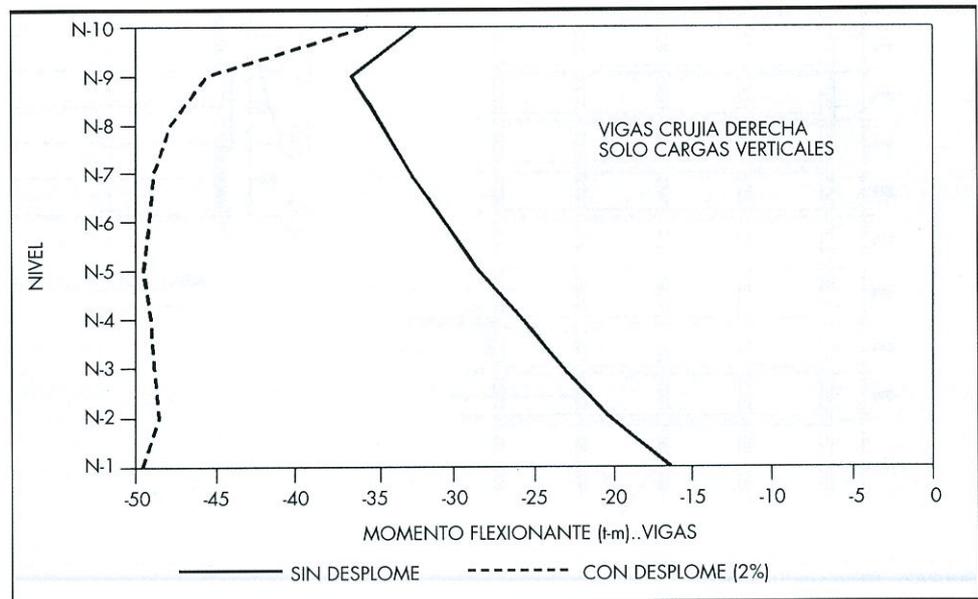


FIGURA 8. Comparación envolventes momento flexionante edificio sin y con desplome (2%)... CM+CV

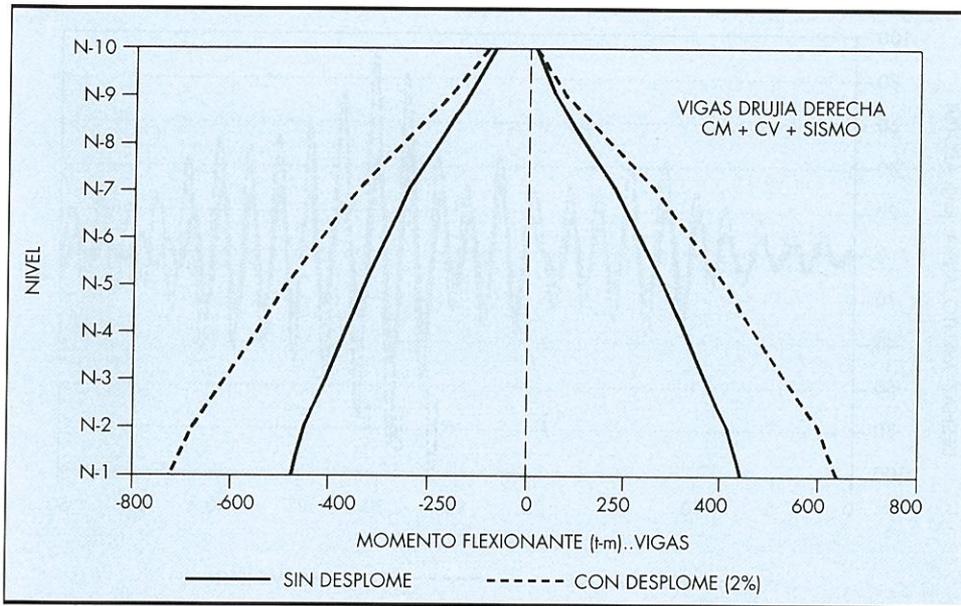


FIGURA 9. Comparación envoltentes momento flexionante edificio sin y con desplome

3.4.3- Comparación de coeficientes sísmicos

Finalmente, el cociente de la fuerza cortante sísmica en la base, el peso total del edificio, que es conocido como el valor del coeficiente sísmico, debido a que se permite actuar la verdadera ductilidad de la estructura, se alcanzan valores máximos de 0.4 para la estructura sin desplome y de cerca de 0.8 con él, que son muy grandes resultando rangos inaceptables para la estructura, ya que ocasionarían un número muy elevado de formación de articulaciones plásticas e inclusive la probabilidad muy alta de colapso.

Estos valores de cortante basales tienen una buena coherencia de acuerdo con los obtenidos a partir de los períodos del primer modo calculados con y sin desplome 1.64 y 1.90 seg. respectivamente del espectro de respuesta elástico SCT-EW 85.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los trabajos de nivelación de la Catedral Metropolitana, así como los resultados de los análisis a la estructura del edificio de diez niveles, se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones:

4.1 CATEDRAL METROPOLITANA

La rehabilitación debida a la técnica de subexcavación así como los resultados de los análisis estructurales, han permitido comprender la magnitud del problema y lograr hasta el presente buenos resultados. Los trabajos de subexcavación se terminaron el presente año 1998.

Sin embargo, con el asentamiento regional de la zona del lago va a continuar, el problema estructural estará presente y será necesario prever refuerzos directamente en los elementos más críticos de la estructura, como son las colum-

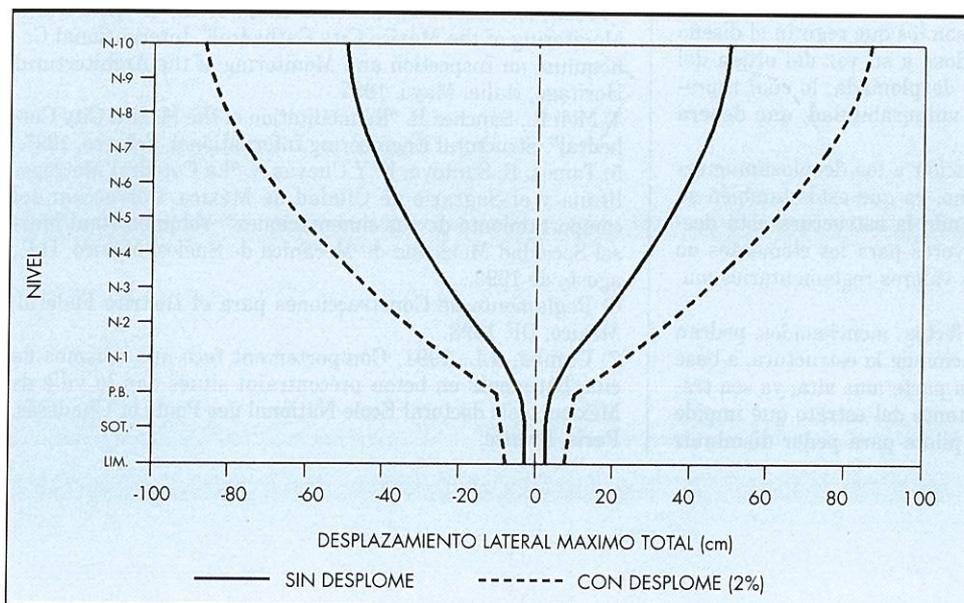


FIGURA 10. Comparación envoltentes desplazamientos edificio sin y con desplome

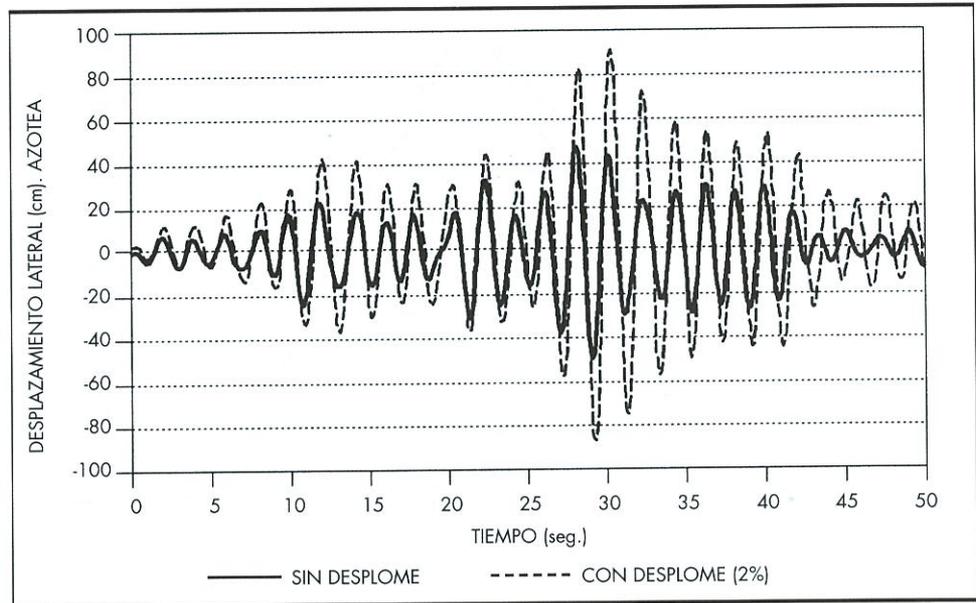


FIGURA 11. Comparación de desplazamientos laterales sin y con desploma (2%); SCTEW85

nas, las cuales podrán zuncharse con anillos metálicos o rellenar de concreto los huecos de las mismas, así como un refuerzo adicional en los arcos, para disminuir los agrietamientos en los centros de claros.

Actualmente, se está inyectando el suelo con morteros de cal, en los estratos más compresibles y se prolongarán los trabajos aproximadamente por un año más.

4.2 EDIFICIO DE DIEZ NIVELES

Para el edificio analizado con hundimientos virtuales diferenciales importantes (2%) se hacen evidentes los incrementos de los valores de momentos flexionantes debido a la carga gravitacional actuando sola, que pueden triplicarse cuando ocurren estos hundimientos, que si bien pueden presentarse lentamente en función del tiempo, son efectos de consideración.

Como la envolvente de carga gravitacional con el sismo, los valores de momento flexionante aumentan considerablemente, del orden de diez veces, son los que regirán el diseño de la estructura, incrementándose a su vez del orden del 70% cuando la estructura está desplomada, lo cual representa una situación de mayor vulnerabilidad, que deberá evitarse.

Algo similar sucede con relación a los desplazamientos laterales provocados por el sismo, ya que estos también se incrementan notablemente cuando la estructura está desplomada, implicando daños mayores para los elementos no estructurales y sobre pasado los valores reglamentarios máximos permisibles.

Para tratar de resolver los efectos mencionados, podrán aplicarse la propuesta de nivelación de la estructura, a base de provocar asentamientos en la parte más alta, ya sea tratando de perforar la capa resistente del estrato que impide el desplazamiento vertical del pilote para poder disminuir

este asentamiento diferencial o alguna técnica como la inyección aplicada a este tipo de suelos.

Si para edificios semejantes al analizado, las técnicas de subexcavación o similares para disminuir asentamientos, no dan resultado o son demasiado costosas, será necesario una recimentación del edificio a base de incrementar el número de pilotes en la zona de mayores asentamientos, con los procedimientos relativamente simples y con maquinaria ligera para el hincado de pilotes metálicos y de pequeño diámetro, aún cuando el detalle para recibirlos y unidos a la cimentación existente, sea un punto más delicado a realizar.

REFERENCIAS

- 1) Santoyo, E. "Cimentaciones en México, D.F." I Biental Iberoamericana Madrid/España, octubre de 1998.
- 2) Meli, R., Sánchez, A. Rehabilitación de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México. Instituto de Ingeniería, UNAM, julio 1993.
- 3) Meli, R. Rossi P.P., Sánchez R., Zaldívar, S. "Structural Monitoring of the Mexico City Cathedral". International Colloquium on Inspection and Monitoring of the Architectural Heritage, Italia. Mayo, 1997.
- 4) Meli R., Sánchez R. "Rehabilitation of the México City Cathedral". Structural Engineering International, Febrero, 1997.
- 5) Tamez, E, Santoyo, E. Y Cuevas A. "La Catedral Metropolitana y el Sagrario de Ciudad de México. Corrección del comportamiento de sus cimentaciones". Volumen Raul Marsel Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., agosto de 1993.
- 6) Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, México, DF. 1993.
- 7) Camba, J.L. 1991. Comportement face aux séismes de cinq bâtiments en béton précontraint situés dan la ville de México. tesis doctoral École National des Ponts et Chaussées. Paris, France.