

ACERCA DE LA NORMATIVIDAD PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE CIMENTACIONES EN LA CIUDAD DE MEXICO

MANUEL J. MENDOZA LOPEZ

**Asesor en Geotecnia, Centro Nacional de Prevención de Desastres
Investigador Titular, Instituto de Ingeniería, UNAM**

1. INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

La reglamentación que la autoridad de una ciudad o entidad expide para salvaguardar las vidas humanas y las construcciones que éstas requieren para su desarrollo se ven sometidas a cambios que, por lo menos en zonas sísmicas, están casi siempre ligados a la ocurrencia de temblores intensos. Son estos eventos los detonadores de una serie de estudios y actividades que conducen a modificaciones en las disposiciones legales para reducir el nivel de riesgo ante tales calamidades. Lo anterior es comprensible si se considera que las decisiones ingenieriles totalmente seguras, si es que existen, están acotadas por el aspecto económico; así pues, en la medida en que un sismo provoca un número mayor de víctimas y daños más cuantiosos, se analizan los factores generadores, se asimilan lecciones y se llega usualmente a soluciones más conservadoras, las que en general resultan más costosas.

Los sismos del 19 y 20 de septiembre de 1985 exigieron la revisión incluso de los principios básicos y las prácticas de diseño y construcción de cimentaciones comunmente aceptados en la ciudad de México. Como se menciona más adelante, esta tarea está todavía inconclusa debido por una parte a las dificultades que presenta el subsuelo de la metrópoli; y por otra, a las manifestaciones adversas de la naturaleza y de la actividad humana. Esta compleja problemática de la práctica geotécnica en esta ciudad está reconocida en las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones (NTC-Cimentaciones) y para Diseño por Sismo [Refs 8, 9 y 10], al señalarse que estas actividades presentan dificultades muy superiores a las que son usuales en otras ciudades; esta es la primera gran lección que deben tener muy presente los Directores Responsables de Obra, a quienes en particular está orientado este trabajo.

En el caso de la ciudad de México y hasta 1985, los ingenieros y la ciudadanía en general consideraban que el reglamento de construcciones vigente era confiable para hacer frente a los temblores de gran magnitud, que se sabía podían manifestarse con una intensidad alta en la zona central de la metrópoli; esta confianza estaba basada en que tales regulaciones se fundaban en avanzadas consideraciones antisísmicas y comportamiento satisfactorio, hasta entonces, de las estructuras durante sismos intensos. Sin embargo, los temblores de 1985 pusieron de manifiesto que las intensidades reales eran superiores a las esperadas, basadas éstas últimas en los registros de sismos en tiempos recientes. Se puso en evidencia que no pueden extrapolarse las experiencias de comportamiento de construcciones antiguas a las estructuras más modernas, como también se apreció la mayor incidencia de daños en edificios de moderada altura, cuya construcción proliferó en las décadas de los setentas y ochentas, debido a que su modo natural de vibración era semejante al casi movimiento armónico de los suelos arcillosos de la cimentación. Precisamente las características del movimiento estuvo muy relacionado con la presencia de estos depósitos de suelos blandos que constituyen la Zona del Lago o Zona Geotécnica III de la ciudad de México, Fig 1.

No obstante, sería un error señalar que, por lo menos en lo que se refiere a cimentaciones, el número relativamente alto de edificios con mal comportamiento se debió exclusivamente a la magnitud excepcional de los sismos de septiembre de 1985 o a limitaciones del reglamento de construcciones entonces vigente. En efecto, en estudios posteriores a estos eventos [Refs 2, 15, 16 y 17] acerca del comportamiento de diversos tipos de cimentación de edificios en la zona lacustre de la ciudad, se concluyó que en diez de los trece edificios analizados que mostraron mal comportamiento debido a su cimentación, no se cumplía la desigualdad entre las fuerzas resistentes y las cargas actuantes, que establecía el Reglamento de Construcciones 1976 contra un eventual estado límite de falla; ello ocurría inclusive para sólo cargas permanentes. En dos de los casos se cumplía tal desigualdad para cargas permanentes, pero no para la combinación que incluía las cargas sísmicas que estipulaba dicho reglamento.

Los estudios antes mencionados pusieron de manifiesto también ciertas deficiencias en la práctica del diseño y construcción de cimentaciones, así como del conocimiento limitado e insuficiente tanto de las propiedades de los suelos de la ciudad como del comportamiento de ciertos tipos de cimentación ante sollicitaciones dinámicas. Así pues, las modificaciones en el capítulo de cimentaciones implementadas en el Reglamento de Construcciones 1987 para el Distrito Federal, se reconocen implícitamente las incertidumbres en el estado actual del conocimiento y de la práctica ingenieril, por lo que justificadamente su enfoque general es más conservador que el del Reglamento 1976, pero de menor grado que el de las Normas de Emergencia 1985, emitidas inmediatamente después de los sismos.

El Reglamento vigente y sus Normas Técnicas Complementarias enfatizan la revisión que ante acciones sísmicas debe someterse el diseño de una estructura. En los artículos del reglamento se establecen los lineamientos generales invariantes que deben cumplir el diseño y la construcción de cimentaciones, en tanto que en las NTC se fijan sus criterios y métodos, a fin de cumplir con tales señalamientos.

1.2 Objetivos de este Trabajo

Los objetivos principales de este trabajo son 1) hacer una breve revisión de los principios del análisis y diseño de cimentaciones; 2) revisar, explicar y discutir la normatividad que se tiene al respecto para la ciudad de México; 3) exponer las observaciones más importantes acerca del comportamiento que experimentaron las cimentaciones durante los eventos sísmicos de 1985; 4) exponer y discutir los cambios más relevantes que se han introducido en el Reglamento y Normas vigentes para esta ciudad; y 5) sugerir algunas posibles modificaciones y adiciones a las NTC-Cimentaciones vigentes.

1.3 Alcance

Las NTC-Cimentaciones son las únicas dentro del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal que además de las normas en sí, contiene Comentarios y Referencias. Ahí se indica expresamente que además de contar con los conocimientos básicos de mecánica de suelos, el diseñador debe conocer con profundidad las peculiaridades geotécnicas y sísmicas del Valle de México. Se proporciona una lista de referencias a las que se hace mención para dar respuesta a los diversos aspectos que inciden en el diseño y construcción de cimentaciones.

Desde luego no se pretende en este trabajo hacer un repaso de los fundamentos de mecánica de suelos, como tampoco de la información incluida en las referencias mencionadas en las NTC-Cimentaciones. Las referencias 2, 3, 11, 13, 15, 17, 18, 21, 24, 25, 26, 27, 28, 29 y 31 de este trabajo complementan a aquéllas, ya que incluyen información y resultados de estudios recientes. Durante el desarrollo de este trabajo se revisarán algunos de esos estudios y se comentará su incidencia, por una parte en la normatividad al respecto, y por otra en el análisis y diseño de cimentaciones.

Se repasan en este trabajo los fundamentos invariantes del diseño de cimentaciones en general y de la reglamentación al respecto para la ciudad de México, y luego se resumen las causas de mal comportamiento de las cimentaciones en la ciudad de México, primordialmente a raíz de los sismos de 1985. Posteriormente se revisan, comentan o

explican los aspectos más relevantes del contenido de cada uno de los capítulos que contienen las NTC-Cimentaciones. Cuando se ha considerado conveniente, se presenta una breve descripción de posibles procedimientos teórico-numéricos, a fin de cumplir con lo señalado en estos ordenamientos. Finalmente se exponen algunas de las lagunas o limitaciones que el autor estima adolecen las normas vigentes.

2. ANALISIS Y DISEÑO DE CIMENTACIONES

2.1 Investigación Geotécnica

El requisito básico para un diseño geotécnico exitoso de una cimentación es, y siempre será, una buena investigación del subsuelo llevada a cabo con un conocimiento suficiente de los requerimientos de la estructura por soportar. Lo anterior implica:

❖ Adquirir un claro conocimiento de la estratigrafía y las condiciones hidráulicas en el sitio, enmarcadas en el contexto de la geología local y de experiencias en la región. Siempre será deseable una descripción detallada y sistemática del suelo en cada estrato, en términos de su identificación visual y táctil. Esto es particularmente cierto para el caso de la ciudad de México, y exige para alcanzarlo, la atención directa y el involucramiento de un ingeniero durante la investigación del subsuelo para realizar estas tareas. Es usual que en nuestro medio esta labor se le vea no propia para un profesional, y se le encargue a personal no calificado; muy frecuentemente los resultados de esta situación son deficiencias en el conocimiento acerca del perfil de suelos y de las condiciones hidráulicas, con los consecuentes retrasos, costos mayores e inclusive consideraciones equivocadas que conducen a errores de diseño.

No sería aventurado aseverar que en la gran mayoría de los casos, el diagnóstico del tipo y profundidad de desplante de la cimentación puede hacerse básicamente con el conocimiento antes mencionado. Además, la planeación de los procedimientos constructivos dependen fuertemente de esta información.

❖ Determinar las propiedades mecánicas relevantes de cada estrato, en función de las características y tipo de estructura por cimentar, por medio de las pruebas de laboratorio y/o de campo adecuadas. Una comprensión sólida de los factores que influyen en las propiedades mecánicas del subsuelo es esencial; sin embargo, esto debe estar unido a una conciencia acerca de las limitaciones en la teoría, técnicas de ensaye y en las incertidumbres en la información de las condiciones del terreno.

En el capítulo siguiente se exponen diversos comentarios al respecto; cabe adelantar sin embargo que se advierte en la actualidad un incremento de la construcción en las Zonas I y II de la capital. Ello exige particular atención al primer punto, y a la ejecución de ensayos sobre todo *in situ*, en los que no se cuenta con tanta experiencia y conocimientos como la que ya se ha acumulado para la Zona del Lago o Zona III.

2.2 Idealización y Realidad

Se reconoce que la ingeniería de cimentaciones no es una ciencia exacta [Ref 33], pero que sin embargo se requiere de una precisión suficiente para asegurar el diseño y construcción exitoso de una cimentación, para tampoco sacrificar la economía. Lo anterior exige un enfoque racional, alejado de dogmatismos y dejando en un segundo plano al empirismo.

En las últimas décadas se han desarrollado poderosos y muy valiosos métodos teórico-numéricos para obtener soluciones a problemas geotécnicos complejos, los que eran inabordables hace pocas décadas; sin duda, las computadoras personales de amplio acceso en la actualidad para prácticamente todos los ingenieros, han abierto la posibilidad de complementar la información mencionada en el subcapítulo 2.1 y llegar a diseños geotécnicos sanos. Desde luego la condición para ello es que estas poderosas herramientas y técnicas teórico-numéricas se usen con

sensibilidad y discernimiento. Así empleadas, son de gran ayuda al diseñador de una cimentación, facilitándole visualizar y cuantificar diversas soluciones, escenarios y consecuencias; empero, si se usan ciegamente, tales métodos son una amenaza y pueden ser extremadamente engañosos.

Con frecuencia se aprecia una tendencia a diseñar sobre la base de números contenidos en listados de computadora obtenidos por paquetes de cómputo y algunos informes de mecánica de suelos, en los que no están claras las hipótesis o idealizaciones implícitas en la solución analítica, y consecuentemente no existe una clara comprensión de que tan lejos o que tan cerca están de la realidad. Es indispensable por una parte escudriñar esas *cajas negras* que son los paquetes adquiridos de *software* para conocer su alcance; y por otra, alimentarlos con los parámetros adecuados y representativos de las propiedades mecánicas de los materiales involucrados en el problema. Finalmente, para cerrar el círculo y lograr avances en los métodos de diseño de cimentaciones es necesario observar y monitorear con la instrumentación conveniente las obras reales, orientándola principalmente a conocer el comportamiento durante el evento sísmico mismo.

Desde luego, también se ha podido detectar que en las rutinas de la ingeniería en la ciudad de México se emplean a menudo procedimientos demasiado simplistas, no justificados por las herramientas computacionales con que se cuenta en la actualidad, y menos por las hipótesis arbitrarias asumidas; tal es el caso por ejemplo, de ciertos procedimientos de cálculo de asentamientos de cimentaciones con pilotes de fricción.

2.3 Solicitaciones de Carga

Además de los conocimientos estratigráficos y de propiedades de los materiales del subsuelo, así como de los análisis geotécnicos mencionados en el inciso anterior, es indispensable conocer las solicitaciones de carga que ejercerá la estructura sobre el terreno. En general, las cargas permanentes (muertas principalmente) son razonablemente estimadas en función de la geometría de la estructura, aunque no son extraños en nuestro medio las diferencias que experimenta ésta entre lo diseñado y lo construido. Empero, son las cargas variables (vivas principalmente) y las accidentales (sobre todo las sísmicas) en donde se tienen las mayores incertidumbres en su magnitud.

Una de las lecciones más evidentes de los sismos de 1985 es que debe prestarse mayor atención a la cuantificación de las cargas de la construcción mismas que soporta la cimentación, así como de sus posibles variaciones durante la vida útil de la estructura. En efecto, buena parte de las cimentaciones dañadas se encontraban sobrecargadas y seguramente con una estimación optimista de la carga viva, o bien por un irracional cambio en el tipo de carga. Las consecuencias de esta situación inclusive con relativamente pequeños incrementos de esfuerzo, sobre todo en la Zona III, son los fuertes asentamientos o la creación de condiciones propicias a la falla general o local, primordialmente cuando se suma a acciones sísmicas. Es necesario que en el futuro los diseños de cimentación incluyan un análisis de sensibilidad a las hipótesis de cálculo y en particular a posibles diferencias entre las cargas reales y las de diseño.

2.4 Dimensiones del Área Cargada

Debe reconocerse por otra parte, la gran influencia de las dimensiones del área cargada de losas de cimentación o cajones que compensan parcialmente el peso de un edificio. Para ejemplificar lo anterior, se muestran en la Fig 2 los asentamientos calculados provocados por la combinación de áreas con anchos variables y de diferentes cargas uniformemente repartidas; para ello se consideraron las propiedades de compresibilidad del subsuelo muestreado en un sondeo realizado en una región precargada de la Zona del Lago. Se distingue que para misma presión neta, conforme aumenta el ancho de la cimentación crece el asentamiento esperado, y la razón de cambio es tanto más significativa cuanto mayor es la presión aplicada.

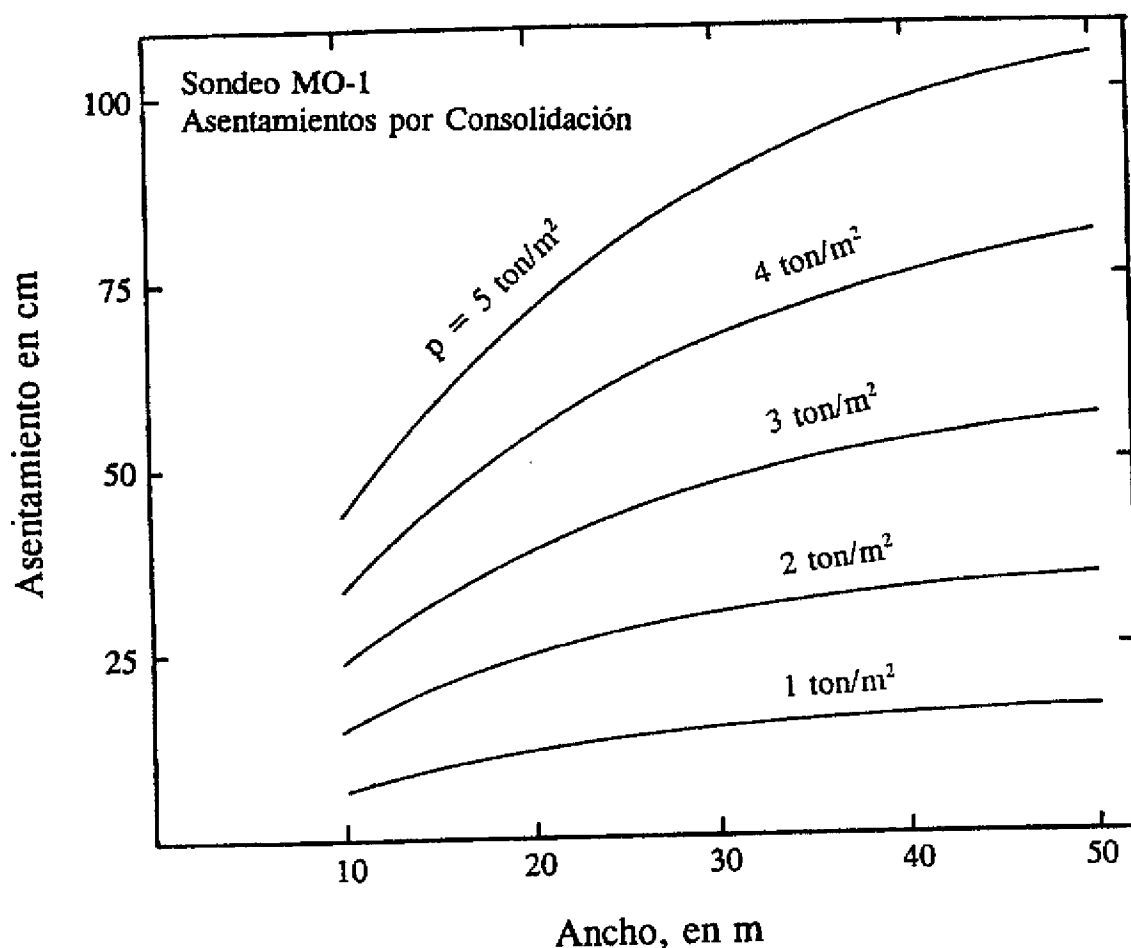


Fig 2. Asentamientos calculados para áreas cuadradas sometidas a diferentes presiones uniformes en un sitio de la Zona III de la ciudad de México

2.5 Interacción entre Profesionales

Los efectos de los sismos de 1985 sobre las cimentaciones de edificios de la ciudad de México pusieron al descubierto diversas prácticas que no contribuyen al mejor comportamiento de las estructuras, aunque por fortuna y en general se pudo comprobar que existen teorías y prácticas bien probadas con las que se diseñan y construyen cimentaciones con buen comportamiento, inclusive bajo severas acciones sísmicas. Entre aquéllas se pudo apreciar la fuerte división de actividades entre los ingenieros estructuralistas y geotecnistas, lo que propicia que no se tomen en cuenta adecuadamente las interacciones entre superestructura y cimentación, y entre ésta y el subsuelo, principalmente bajo acción dinámica [Ref 24]. Así mismo, se distinguió que los ingenieros geotecnistas ponen mayor atención al problema de estabilidad asociados a los estados límite de falla, soslayando los problemas de movimientos de la cimentación, relacionados con los estados límite de servicio. En particular, casi nula atención se presta por lo general a la estimación de los movimientos permanentes o residuales que sufren cimentación y superestructura después de sismos intensos, a pesar de que los comportamientos indeseables más frecuentes de cimentaciones por los sismos de 1985 fueron los debidos a fuertes asentamientos diferenciales y totales, así como a desplomes.

3. NORMATIVIDAD

3.1 Criterios de Seguridad

Debe quedar muy claro que las NTC-Cimentaciones no son un manual de diseño, sino que son el instrumento normativo mediante el que la autoridad establece las normas mínimas que deben cumplir el diseño y la construcción de cimentaciones en la ciudad; debe por tanto diferenciarse y separarse de lo que es estrictamente el análisis y diseño de la cimentación. Estas dos últimas actividades deben realizarse poniendo en juego todos los conocimientos y medios que la ingeniería geotécnica nos proporciona para resolver una cimentación; una vez que se ha llegado a un diseño, las normas correspondientes, no tienen más función que: 1) la de revisar si los "criterios de seguridad" a que se llega con los métodos adoptados de análisis y diseño satisfacen los requerimientos mínimos de seguridad y 2) si los procedimientos constructivos propuestos están de acuerdo con el estado actual de la práctica de la ingeniería. En la Fig 3 se muestra un esquema del proceso.

Los criterios de seguridad a que se refiere el primer punto tienen que ver con un problema de estabilidad, y a otro íntimamente asociado que es el de compresibilidad y/o deformabilidad. Para analizar el aspecto de estabilidad, aquellos criterios se basan comunmente en el cálculo del factor de seguridad tradicional, que es el cociente entre la capacidad de carga máxima o última que potencial y teóricamente puede soportar el sistema cimentación-subsuelo, y las cargas o acciones sobre el mismo. Por su parte, en el Reglamento de Construcciones para el D.F. y sus NTC se adopta un criterio considerado más racional, en el que se distinguen las diferentes fuentes de incertidumbre, y a cada una de ellas se les asocia un factor que las toma en cuenta.

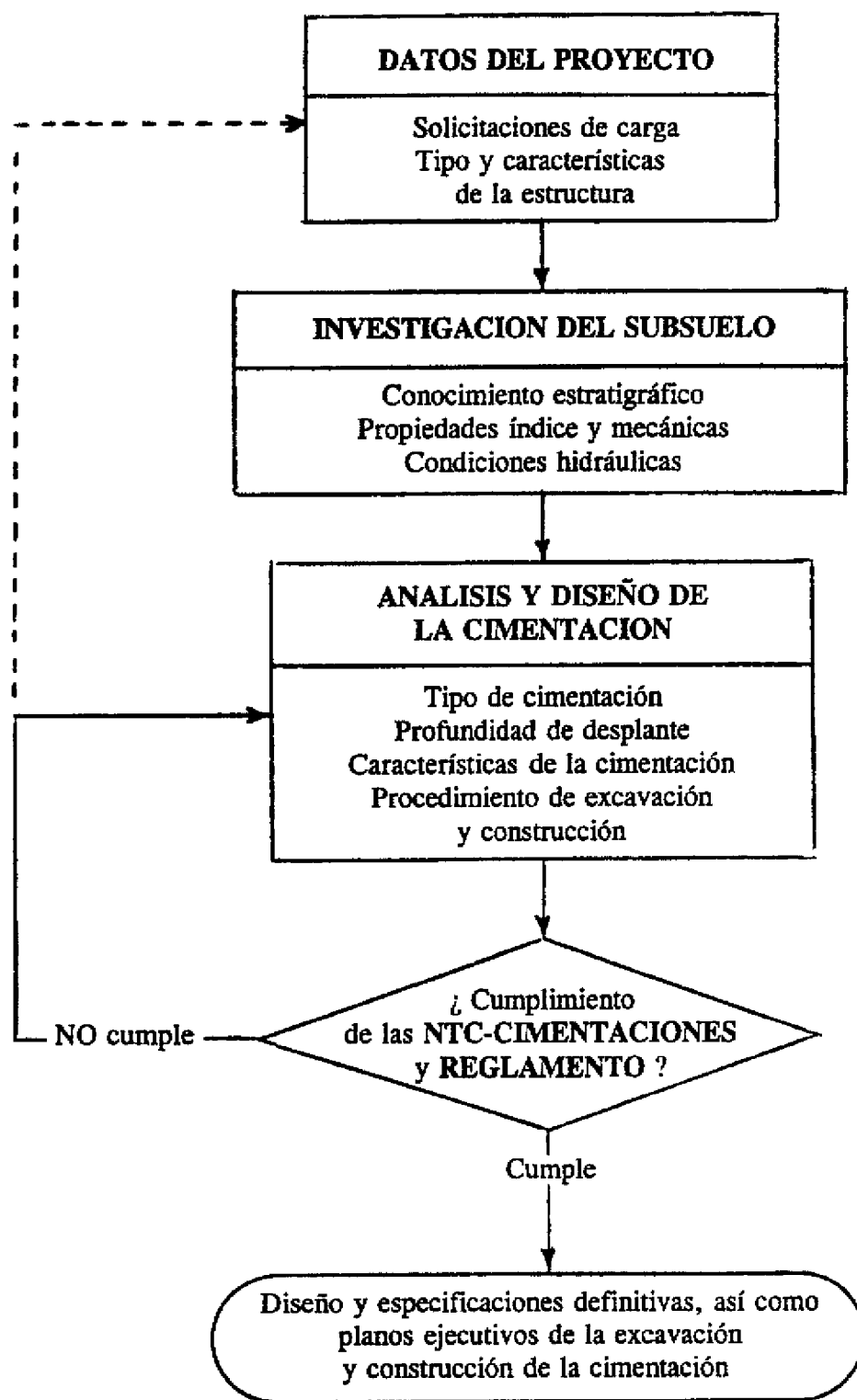


Fig. 3. Proceso de análisis y diseño de una cimentación, incluyendo su revisión a través del Reglamento de Construcciones

Así, a cada una de las diversas combinaciones de carga se les afecta por cierto *factor de carga* mayor que la unidad. Por su parte, a la resistencia al esfuerzo cortante del suelo se le afecta por un *factor de resistencia* menor que la unidad, antes de involucrarla en la determinación analítica de la capacidad de carga.

3.2 Estados Límite de Falla

La revisión de seguridad de acuerdo con las NTC consiste en comprobar que no se caiga en posibles *estados límite de falla*, al verificar el cumplimiento de que cada combinación de cargas o acciones "aumentadas" sea menor que la capacidad de carga "disminuida" del suelo. En el Art 224 del Reglamento se establece que esas posibles situaciones que provocarían una falla franca o colapso estarían asociadas a flotación (fuerzas de subpresión en el contacto de la cimentación, o hidráulicas en un estrato permeable cercano al desplante de la cimentación, mayores que el peso de la cimentación), falla plástica general o local bajo la cimentación (mecanismo cinemáticamente admisible de indentación del cimientto en el subsuelo), y falla estructural de algún elemento de la cimentación.

A las condiciones anteriores, habrán de añadirse en futuras versiones de las NTC-Cimentaciones otras posibles fallas que se han detectado podrían presentarse, dadas algunas prácticas cotidianas; éstas se mencionan en el capítulo 13 de este trabajo.

3.3 Estados Límite de Servicio

La revisión de la cimentación ante *estados límite de servicio* consiste en verificar que los movimientos estimados que sufra una cimentación no excedan los valores establecidos en las propias normas. Así, se definen valores máximos permisibles al asentamiento o emersión, velocidad con que ésta puede ocurrir, inclinación o desplome y asentamientos diferenciales; éstos últimos, en función de la rigidez y tipo de estructura.

Se enfatiza que el Reglamento y sus Normas establecen requisitos mínimos, y reconoce que muy a menudo éstos son insuficientes para asumir un razonable margen de seguridad, en función de las dificultades que enfrenta el diseño y construcción de cimentaciones en la ciudad de México: suelo muy difícil por su alta compresibilidad y baja resistencia, el asentamiento regional y las altas intensidades sísmicas. Debe quedar muy claro, por tanto, que aun cuando se establecen estos mínimos, la normatividad vigente no es exhaustiva y no exime de responsabilidad al Responsable de Obra de realizar todos los estudios necesarios para conocer adecuadamente las condiciones del subsuelo, así como el de efectuar todos los análisis teorico-numéricos que permitan asegurar con razonable certidumbre, que no se caerá en ningún estado límite de falla o de servicio. Cabe también puntualizar por una parte que para todo fin práctico y legal, igual fuerza y obligatoriedad tienen los artículos del propio Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal como lo estipulado en sus Normas Técnicas Complementarias; y por otra, que es posible adoptar criterios y métodos diferentes a los establecidos en las Normas, siempre y cuando se cuente con la aprobación expresa del Departamento del Distrito Federal.

4. COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES

4.1 Sistemas de Cimentación Utilizados en la Ciudad de México

Son múltiples y antiguas las descripciones de problemas constructivos para cimentar edificaciones en la ciudad, ya que el desarrollo de ésta se inició dentro de la Traza Colonial, que corresponde al Centro actual y que se ubica en la zona geotécnica III; en ésta se tienen potentes depósitos de suelos arcillosos muy compresibles y de baja resistencia, que no son otra cosa que los depósitos del fondo del otrora lago de la ciudad. Al Portal de Agustinos, situado en la vieja calle de Tlapaleros -hoy 16 de Septiembre- se le describe [Ref 7] con "...muchos de sus arcos hundidos por la insegura inestabilidad del subsuelo lodoso que no soporta grandes pesos, mayormente y con más razón éste, que sustentaba dos pisos altos, de elevadas techumbres". El anterior pasaje explica claramente las

consecuencias de sobrecargar los cimientos, en este caso superficiales; ello es la causa primordial del mal comportamiento de las cimentaciones empleadas en la zona lacustre de la ciudad, dadas las pobres características ingenieriles del subsuelo.

Son sin embargo las acciones sísmicas, sobre todo las que se manifiestan con gran intensidad en la zona lacustre debido a la gran amplificación que ahí tienen lugar, las que someten a las condiciones más críticas a las construcciones de nuestra ciudad, ya que les inducen esfuerzos altos adicionales a los del peso propio; por tal razón, en el diseño de las cimentaciones y de las estructuras en general, deben tomarse explícitamente en cuenta las sollicitaciones sísmicas.

Las condiciones del subsuelo y sísmicas han obligado al uso de diferentes tipos de cimentación en la ciudad de México; en la Fig 4 se muestra un esquema de las más usuales.

Desde luego la problemática geotécnica de la ciudad no se circunscribe sólo al ámbito de las arcillas lacustres de la Zona III. En la Zona I se enfrentan a menudo problemas relacionados con la presencia de excavaciones subterráneas abandonadas, resultantes de la explotación de arenas y gravas, así como discontinuidades o incluso cavidades en formaciones francamente rocosas. La erraticidad y la variabilidad de espesores blandos son características de la Zona II, lo que impone dificultades para la caracterización del sitio, y por ende del análisis y la construcción de cimentaciones.

4.2 Comportamiento durante los Sismos de 1985

Los daños observados en edificios en la ciudad de México durante los fuertes sismos de septiembre de 1985 estuvieron determinados por las condiciones locales del subsuelo; de hecho se reconoce [*Refs 25, 31, 26 y 28, entre otras*] que aquí ocurrió el caso más espectacular en tiempos recientes de lo denominado *efectos de sitio*, que se refiere a la gran amplificación dinámica que experimenta un depósito de suelo al transmitir un temblor de tierra. Las intensidades más altas ocurrieron en los depósitos lacustres de arcilla blanda con espesores entre 25 y 45 m, igual a lo acontecido con los temblores de 1957 y 1979; en general, en aquellas áreas con espesores menores o mayores la intensidad disminuyó significativamente, y en las zonas con suelos duros los daños fueron pocos o despreciables.

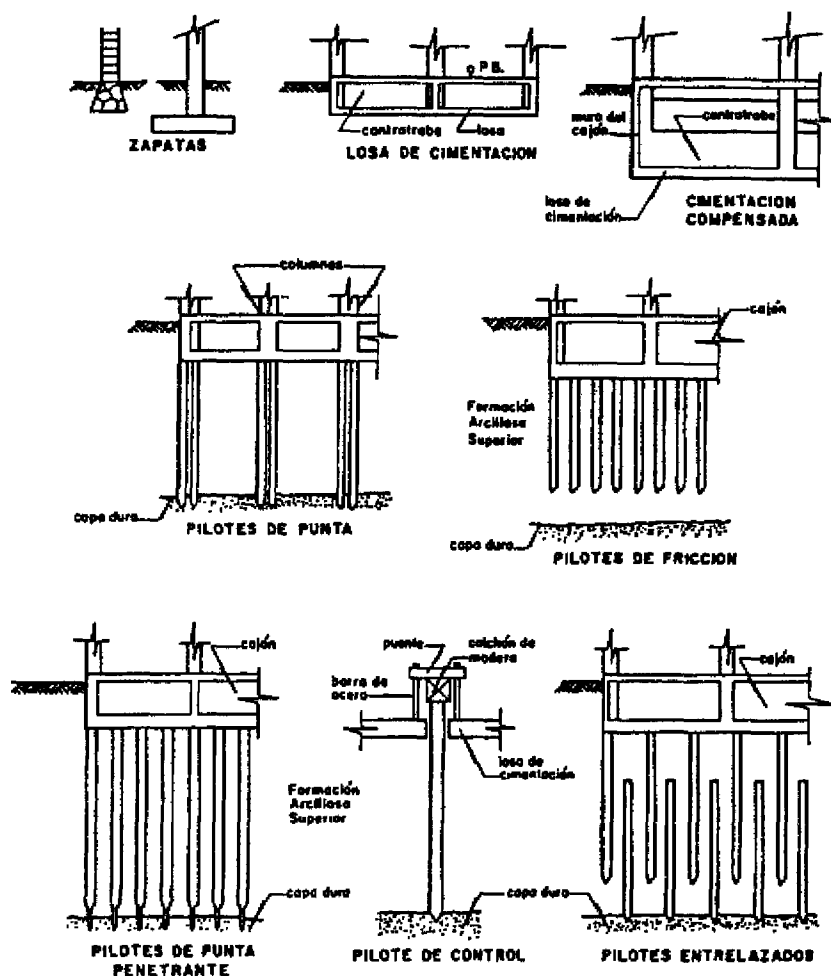


Fig 4. Tipos de cimentación empleados en la ciudad de México

Aun cuando se pudieron apreciar casos de mal comportamiento en todos los tipos de cimentación señalados en la Fig 4, las edificaciones con sistemas mixtos de una losa o cajón de cimentación y pilotes de fricción fueron las más afectadas durante esos temblores; éstas eran típicamente de moderada altura (6 a 15 pisos) con periodos naturales de vibración relativamente largos. Debido precisamente a la similitud entre estos modos de vibrar y los de aquellos depósitos de suelo blando es que estas estructuras junto con este tipo de cimentación que era muy usual, resultan particularmente susceptibles a los efectos de sismos originados en la zona de subducción cercana a la costa del Pacífico. Sin embargo, debe mencionarse que del análisis de los casos historia de edificios con pilotes de fricción que acusaron un comportamiento deficiente, pudo concluirse que todos tenían defectos conceptuales en su diseño. Se ha presentado en otro trabajo [Ref 3] una revisión actualizada de consideraciones para el diseño de cimentaciones sobre pilotes de fricción en zonas sísmicas.

La mayoría de los edificios en la ciudad de México con mal comportamiento debido a su cimentación durante los sismos de septiembre de 1985 contaban con un diseño de cimentación inadecuado desde el punto de vista estático; ello implicaba reducidos factores de seguridad ante falla por corte, grandes deformaciones y estados de esfuerzo cercanos a la condición de fluencia del suelo de apoyo. La situación anterior propició la generación de

deformaciones permanentes cuando el temblor indujo altos incrementos de esfuerzo cortante cíclico, traduciéndose en asentamientos, desplomes e incluso en colapsos. Estas conclusiones, junto con las que se indican enseguida, resultaron de un análisis de casos típicos reales con funcionamiento deficiente; la descripción completa de éstos y sus resultados se han publicado previamente [Refs 2, 16 y 17] por lo que sólo se resumen aquí los factores principales que determinaron el comportamiento pobre de las cimentaciones; éstos fueron los siguientes:

■ Altas presiones estáticas netas aplicadas por la losa o cajón de cimentación, lo que fue especialmente crítico para edificios con grandes dimensiones en planta; a ello contribuyó la casi sistemática presencia de agua en los cajones de cimentación, los que se supone deberían conservarse estancos con fines de compensación.

■ Excentricidades intrínsecas en las cargas sobre la cimentación, ya sea por la configuración estructural o inclusive por operaciones de bombeo excéntrico, los que fueron cruciales en cimentaciones angostas y/o estructuras esbeltas.

■ Forma en planta de la cimentación, lo que definió ejes con menor resistencia a los momentos de volteo.

■ La necesaria alta rigidez del cajón o losa de cimentación, lo que condujo a concentraciones de esfuerzo en sus orillas y esquinas, que se trasmitían al subsuelo.

■ Daños estructurales en elementos de la cimentación, tales como aquéllos que se apreciaron cerca de la conexión de pilotes de punta con dados o contratraveses.

■ Falta de mantenimiento y fallas estructurales en mecanismos inadecuados de algunos sistemas de pilotes de control.

■ Poca profundidad al desplante de la cimentación, lo que limita la contribución de sus paredes para soportar desplazamientos laterales y cabeceo del edificio, y

■ Cantidad y longitud reducidas de pilotes de fricción, lo que determina que trabajen en condiciones de fluencia bajo cargas sostenidas, sin posibilidad de contribuir significativamente a resistir las acciones sísmicas, propiciando la sobrecarga de la losa o cajón.

Un común denominador en varios casos de comportamiento inadecuado de cimentaciones de edificios durante los temblores de 1985, fue que no cumplían con los criterios y normas vigentes; la gran mayoría ya habían mostrado un comportamiento deficiente bajo cargas estáticas, tales como asentamientos diferenciales y totales, así como desplomes.

5. INVESTIGACION DEL SUBSUELO

5.1 Zonificación

En el Reglamento vigente sólo se reconocen 3 zonas geotécnicas que comprenden únicamente a la mancha urbana del D. F., Fig 1; desaparece la zona IV que correspondía principalmente a la zona sur del D. F., poco conocida desde el punto de vista de la mecánica de suelos; se justifica esta exclusión desde un punto de vista práctico, ya que la construcción en esa zona montañosa es reducida. En el Art 219 del Reglamento y en el Capítulo 2 de las NTC-Cimentaciones se describen cada una de estas zonas. El lector puede encontrar una fuente de información muy documentada acerca de las propiedades del subsuelo de la ciudad, así como del comportamiento previo al sismo de 1985 de diversas cimentaciones, en la obra monumental de Marsai y Mazari [Ref 14].

Aun cuando se señala la preponderancia de los resultados de exploraciones directas del subsuelo en un sitio dado para definir la zona, se proporciona en las NTC un mapa indicativo más detallado que el del Reglamento anterior con la zonificación geotécnica; está basado en información recopilada en la década de los setenta, así como en exploraciones más recientes, con las que fue posible incluir la zona arcillosa blanda de los ex-lagos de Xochimilco y Chalco. Cabe señalar que el uso de ese mapa geotécnico está restringido sólo para aquellas construcciones ligeras o medianas de poca extensión y con excavaciones someras.

Sin poder precisar en ese mapa los límites de la Zona del Lago o Zona III con la información disponible, se esbozó un "istmo" blando entre los ex-lagos antes mencionados y los de la ciudad de México y Texcoco; resultados de exploraciones directas y relatos históricos de tránsito de chinampas entre esos lagos, señalan la presencia en esa "garganta" de potentes sedimentos de suelos lacustres blandos.

5.2 Exploración

Los requisitos mínimos de exploración que anteriormente estaban señalados en el reglamento, pasaron a las NTC. Para el caso, se dividieron las construcciones en sólo dos categorías: las ligeras o medianas de poca extensión y con excavaciones someras, y las pesadas, extensas o con excavaciones profundas; para hacer tal distinción se agregó al juicio basado en la magnitud de la presión media y de la profundidad de desplante de la cimentación, el perímetro de la construcción. Así, las exploraciones mínimas procedentes se establecen para cada tipo de construcción y zona geotécnica. Por cierto, se redujo el perímetro o envolvente de mínima extensión de la superficie cubierta por la construcción, para definir el número mínimo de exploraciones; con ello se reconoce el relativo avance en el conocimiento de las propiedades de los suelos de la ciudad, y se indica la importancia de seleccionar y ejecutar el tipo de sondeo adecuado conforme al objetivo de la exploración.

En las NTC vigentes se ha puesto énfasis en distinguir los diferentes tipos de sondeo y sus objetivos (recuperación de muestras alteradas o inalteradas, verificación estratigráfica, avance, etc.); ello permite una mejor comprensión y aplicación de los requisitos de exploración.

En las NTC no se establece la profundidad de la exploración, pero es claro que ésta está en función del tipo de construcción y zona geotécnica, así como de las dimensiones en planta de aquélla, de acuerdo a lo señalado en el subcapítulo 2.4.

5.3 Propiedades Índice y Mecánicas

En las NTC-1977 se señalaban cuáles eran las propiedades índice y mecánicas de interés, mencionándose también detalles sobre cómo determinarlas. En las Normas actuales sólo se menciona que deben realizarse según los procedimientos aceptados; se eliminó entre otras tablas, la clasificación de suelos del SUCS, considerando que como en otros pormenores se encuentra en todo libro o manual de mecánica de suelos y que quien emplee estas normas les deben ser familiares.

Se ha adoptado al contenido natural de agua como el mejor indicador de las condiciones estratigráficas de la zona de arcillas lacustres (zona III), por lo que se pasó de por lo menos una determinación de propiedades índice por cada metro de sondeo (NTC-1977) a tres determinaciones de contenido de agua, por metro, en las Normas actuales. En la *Ref 14* se proporcionan inclusive múltiples correlaciones de propiedades mecánicas con el contenido natural de agua de las arcillas de la ciudad. Alternativamente, se aceptan otros sondeos de penetración, como el de un cono, como indicador de las condiciones estratigráficas de un sitio.

Por otra parte, se enfatiza la necesidad de determinar las propiedades dinámicas de los materiales del subsuelo, a fin de evaluar explícitamente los estados límite de falla y servicio bajo cargas sísmicas. La mayor parte de los laboratorios de mecánica de suelos en la ciudad tienen limitaciones en cuanto a equipo adecuado (laboratorio o campo) para determinar tales propiedades; los sismos de 1985 mostraron que es menester modificar pronto esta situación.