

Por lo que se refiere al hundimiento regional, el señalamiento que se hacía en las NTC-1977 para investigar los movimientos debidos al abatimiento piezométrico regional, forma parte ahora del Reglamento. Desafortunadamente la Comisión de Aguas del Valle de México ha dejado de publicar información relevante al respecto, que es básica para poder cumplir con este ordenamiento.

6. VERIFICACION DE LA SEGURIDAD DE LAS CIMENTACIONES

6.1 Acciones de Diseño

Como se señala en los Arts 193 y 223 del Reglamento, la verificación de la seguridad de las cimentaciones consistirá en la revisión de los estados límite de falla y de servicio. Esto es, como ya se ha señalado, que en el primer caso se asegure que la capacidad de carga, obtenida con una resistencia reducida al afectarla por un factor de resistencia menor que la unidad, sea superior a las acciones de diseño aumentadas por ciertos factores de carga.

Por lo que se refiere a los estados límite de servicio, los valores máximos permisibles están explícitamente señalados en la Tabla II. En esta tabla se distinguen límites diferentes para construcciones colindantes y aisladas; para éstas últimas se acepta inclusive que se sobrepasen tales límites si se diseña *exprofesso*.

Por otra parte y a diferencia de las NTC-1977 que no mencionaban las acciones de diseño, en las Normas actuales se repite de hecho el Art 188 para tener presente las combinaciones de cargas que deben considerarse en la verificación de la seguridad de las cimentaciones. Se señalan expresamente a las cargas sísmicas como parte de las acciones que deben involucrarse en la evaluación de deformaciones transitorias y permanentes. Ratificando lo dispuesto en las Normas de Emergencia, deberán considerarse las fuerzas de inercia debidas al sismo que actúan en la masa de suelo bajo la cimentación, potencialmente deslizante; en la *Ref 18* se describe un procedimiento para tomarlas en cuenta. Asimismo se reconoce en las cimentaciones profundas a la fricción negativa como una acción por considerar, afectándola con un factor de carga $F_c = 1.1$; no se indica el procedimiento para determinarla y habiendo diferentes metodologías que arrojan resultados diferentes, parece superfluo precisar el $F_c = 1.1$.

Más adelante en este mismo capítulo se aborda la verificación de estabilidad de los diferentes tipos de cimentación empleados en la ciudad, distinguiendo sistemáticamente para cada caso los eventuales estados límite de falla y de servicio.

6.2 Factores de Carga y de Resistencia

Los factores de carga no han sufrido modificación respecto a los valores antes establecidos. Los factores de resistencia que se indicaban en el Reglamento, han pasado a las NTC; en éstas se aclara que no se trata de factores de reducción de la capacidad de carga, como antes se decía y que se prestaba a la interpretación de ser el inverso de un factor de seguridad tradicional, sino factores que reducen la resistencia cortante que se involucra en las determinaciones de la capacidad de carga de cimentaciones.

Los valores anteriores del factor de resistencia persisten, excepto para los pilotes de fricción ante la combinación de acciones que incluyan las solicitaciones sísmicas; su valor está dado por:

$$F_R = 0.7 (1 - s/2)$$

en donde s es el cociente entre los máximos de la solicitación sísmica y la solicitación total que actúan sobre el pilote. De esta manera, se tomó en cuenta explícitamente en los cálculos de capacidad de carga la posible degradación de la adherencia pilote-suelo bajo cargas transitorias. Atendiendo a que las cimentaciones sobre pilotes de fricción fueron las más afectadas por los sismos de 1985 se adoptó en el Reglamento el criterio de que la resistencia a considerar en el análisis de estado límite de falla sea tanto menor, cuanto mayor sea la solicitación

dinámica respecto a la total, vía el factor de reducción de la resistencia. Los valores típicos que así se alcanzan del F_R varían entre 0.5 y 0.7. En el subcapítulo 6.5 de este trabajo se amplían los comentarios respecto a las cimentaciones con pilotes de fricción.

6.3 Cimentaciones Someras

Estados Límite de Falla. En las NTC anteriores se preveía la posibilidad de falla local reduciendo los parámetros de resistencia cuando la compresión simple $q_u < 5 \text{ t/m}^2$. Considerando la experiencia local en suelos cohesivos, en las normas actuales no se reducen sus parámetros de resistencia, aunque sí en los suelos granulares cuando su compacidad relativa $D_r < 70 \%$. Empero se indica que para cimentaciones desplantadas en suelos cohesivos, sus parámetros de resistencia aparente se deben determinar en ensayos triaxiales del tipo UU, y no de compresión simple.

En general se señala que se deberán revisar los posibles mecanismos de falla compatibles con el perfil estratigráfico, agrietamiento existente o presencia de taludes, mediante un método de análisis límite.

Por otra parte, para el caso de cargas excéntricas (particularmente las debidas a acciones sísmicas) se indica explícitamente que se deben tomar en cuenta dimensiones reducidas $B' = B - 2e$ del área en planta tanto en la dirección longitudinal como en la transversal, atendiendo a la excentricidad e en esas direcciones.

Estados límites de servicio. A diferencia de la versión anterior en que se aportaban ayudas de diseño, tales como tablas y gráficas para calcular la distribución de esfuerzos y movimientos elásticos, en las NTC actuales sólo se indica que se calcularán usando la Teoría de la Elasticidad. Se ha juzgado que las NTC no deben pretender sustituir a un tratado o manual de mecánica de suelos. Asimismo, enfatizan la necesidad de evaluar deformaciones permanentes debidas a cargas cíclicas; se señala que se podrán estimar con base en los resultados de pruebas de laboratorio representativas del fenómeno.

6.4 Cimentaciones Compensadas

Estanquidad. Se hace el ordenamiento expreso de que debe considerarse como llena de agua la porción de las celdas del cajón de cimentación que se encuentra por debajo del nivel freático y que no tenga un empleo funcional en el edificio. Esta medida está justificada, ya que después de los sismos de 1985, pudo constatarse que en una gran proporción las celdas del cajón de cimentaciones subcompensadas o compensadas, que se supusieron estancas en el diseño de la cimentación, se encontraban inundadas.

Estados límite de falla y servicio. Se señala la necesidad de verificar la estabilidad de la construcción ante la posibilidad de falla local o general, cuando se considera en la combinación de cargas a las acciones sísmicas. Para la revisión del estado límite de servicios se insiste en la necesidad de evaluar las deformaciones transitorias y permanentes bajo cargas sísmicas. En la *Ref 33* se proponen para estos casos procedimientos detallados para una razonable estimación.

Presiones sobre muros exteriores de la subestructura. En las NTC actuales se adiciona la disposición aplicable cuando el diseño de los muros exteriores de la subestructura deben resistir fuerzas horizontales; en tal caso la resistencia del suelo por considerar deberá ser menor al empuje pasivo afectado por un $F_R = 0.35$.

6.5 Cimentaciones con Pilotes de Fricción

Si bien se señala en las NTC que los pilotes de fricción podrán usarse como complemento de un sistema de cimentación parcialmente compensado, debe tenerse presente que también existe el diseño de este tipo de cimentación [*Ref 3*] en el que el número y las dimensiones de los pilotes se seleccionan de tal manera que por sí solos sean capaces de soportar la carga del edificio, y con suficiente factor de seguridad, tanto para condiciones estáticas como bajo acciones sísmicas, Fig 5. De hecho, como se indica en el apartado siguiente, este enfoque de diseño es el

aplicable cuando se desprecia el aporte de la capacidad de la losa de cimentación.

En este tipo de cimentación persisten incertidumbres en su comportamiento, y ante las diversas evidencias de daños en edificaciones así cimentadas durante los sismos de 1985, en las NTC se han implementado disposiciones más bien conservadoras, que sólo los resultados de una investigación amplia al respecto podrán atenuar. A este respecto cabe tener en mente como se indicó al principio de este trabajo, que las regulaciones de construcción en zonas sísmicas usualmente se modifican con un enfoque más conservador cada que ocurre un temblor intenso, lo que demuestra lo insuficiente de tales disposiciones para enfrentar uno ulterior.

Estados límite de falla. En las NTC-1977 se aceptaba la sumatoria de las capacidades máximas de losa de cimentación y pilotes de fricción, aunque con la salvedad de que ello fuese compatible con las condiciones de trabajo de la cimentación; lo cierto es que prácticamente de manera indiscriminada se sumaban estas capacidades en los diseños de este tipo de cimentación. Por el contrario, las disposiciones actuales establecen que la capacidad de carga del sistema se considerará igual al mayor de los valores siguientes: la capacidad de carga de la losa de cimentación, sin considerar el aporte de pilotes, o bien la capacidad de carga de los pilotes sin tomar en cuenta la contribución de la losa. En este segundo caso, se hace mención expresa a

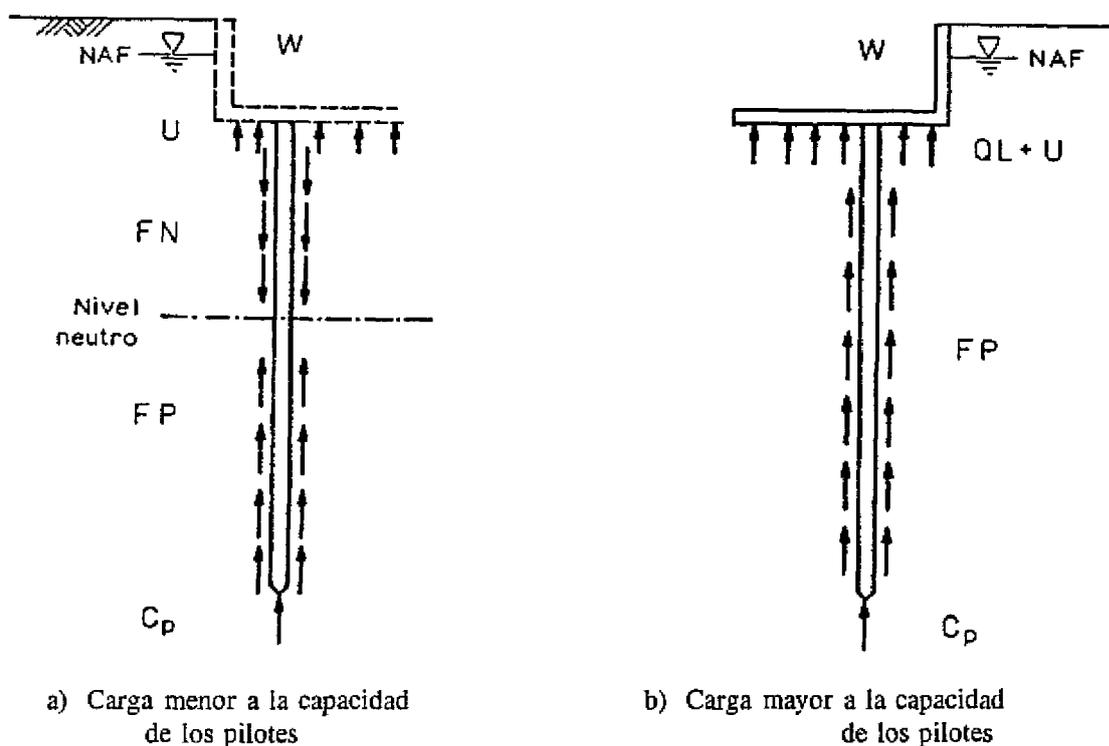


Fig 5. Solicitaciones sobre pilotes hincados en un estrato arcilloso en proceso de consolidación

la aportación tanto por fricción como por punta del pilote, con lo que se reconoce que esta última contribución no necesariamente es despreciable.

Se establece que la adherencia lateral pilote-suelo se considerará igual a la cohesión media de éste, misma que como en las cimentaciones someras, deberá determinarse con pruebas triaxiales no consolidadas-no drenadas, con las que se puede tener mejor representatividad de las condiciones in-situ.

Para calcular la capacidad de carga de un pilote de fricción se procedió a multiplicar su área lateral por la resistencia cortante antes indicada, obtenida con especímenes muestreados antes del hincado. Debe tenerse presente que este procedimiento simplifica un fenómeno más complejo de transferencia de carga del pilote al subsuelo. En efecto, durante el hincado el suelo cercano al pilote se remoldea, pierde resistencia y se facilita su penetración; sin embargo, conforme transcurre tiempo el suelo que circunda al pilote se reconsolida y gana resistencia, la que por los altos esfuerzos laterales actuantes debido a la presencia de los pilotes, resulta a menudo mayor al valor correspondiente de la condición inalterada antes del hincado, *Ref 30*.

Por lo antes indicado parecería que el procedimiento que definen las normas subestima la capacidad, pero no es así, ya que por mediciones [*Ref 23*] en pilotes instrumentados ensayados en la ciudad de México y en otros sitios, se ha verificado que ocurre un fenómeno de falla progresiva a lo largo de un pilote. Mientras que en las partes cercanas a la punta se han generado desplazamientos suficientes como para que el suelo sobrepase la resistencia máxima y esté contribuyendo con la residual, en las partes cercanas a la cabeza los desplazamientos son reducidos y el suelo sólo se ve solicitado con una fracción de su resistencia máxima.

Así, al adoptar en los cálculos el valor medio de la resistencia inalterada obtenida antes del hincado, se está considerando que los dos efectos anteriores se compensan. Parece lógico suponer que el deslizamiento no ocurre en el contacto pilote-suelo, sino entre la zona remoldeada y reconsolidada anular al pilote y el subsuelo inalterado. Zeevaert [*Ref 33*] sugiere considerar un radio de esa interfase $R = 1.05 r$, donde r es el radio del pilote, aunque sin considerar el mecanismo de transferencia antes descrito.

Asimismo, debe tenerse presente que en algunas cimentaciones en la ciudad que emplean pilotes de fricción, tienen éstos francamente un comportamiento de grupo; ello a juzgar por la separación no mayor de seis diámetros. A este respecto por cierto, en las NTC no se especifican separaciones mínimas entre pilotes, las que de acuerdo con otras regulaciones [*Ref 32*] son función de la longitud de los pilotes y de si trabajan más bien por fricción o por punta. En casos de grupos de pilotes existen evidencias, al menos en otras ciudades, de que lo que rige es el cortante (adherencia) en la periferia del grupo; ésto es, en la pila "envolvente". En la *Ref 4* se sugiere inclusive que para fines de diseño se considere que la carga total se transfiere al suelo a lo largo del perímetro del grupo de pilotes. Es claro que si se dispusiera de manera sistemática que rige el diseño el perímetro de la pila envolvente, debería establecerse una separación mínima entre pilotes. En las NTC se ha optado por aceptar el valor menor entre la suma de las capacidades de los pilotes individuales o de la capacidad de la pila envolvente.

Por otra parte, se establece en las NTC-1987 que debe tomarse a la fricción negativa como parte de las acciones que actúan sobre el pilote o grupo de pilotes de fricción, para el análisis de un eventual estado límite de falla. Su consideración no parece clara, ya que en ese estado desaparece ésta y el pilote desarrolla en toda su longitud fricción positiva. Desde luego en condiciones de trabajo, existe fricción negativa y debe considerarse para definir previamente el nivel neutro, y luego evaluar desplazamientos verticales a fin de cumplir con la revisión del estado límite de servicio.

De lo expuesto anteriormente se desprende la conveniencia de analizar el mecanismo de transferencia de carga de los pilotes al subsuelo, a fin de cumplir satisfactoriamente con la revisión del estado límite de falla. En relación con el comportamiento bajo condiciones dinámicas se justifica un enfoque conservador, en tanto no se cuente con información acerca del comportamiento real de pilotes en la ciudad, sometidos a cargas cíclicas provocadas por un sismo. Debe tenerse presente que la degradación de la resistencia que aumenta con el número de ciclos, nivel previo de esfuerzo y amplitud del incremento dinámico [*Ref 3*] se ve atenuado por la velocidad de aplicación de la carga dinámica; esto es, cuanto más rápida es su aplicación, mayor es la resistencia del suelo. Por lo arriba mencionado, será prudente aceptar para fines de diseño que predomina la degradación sobre el efecto de la velocidad de aplicación de carga, tal como se considera en la ecuación del factor de reducción de resistencia que para el caso

establecen las NTC en su inciso 3.2

En lo referente a la revisión que debe efectuarse de la capacidad de carga con la combinación de acciones que incluyen a la sísmica, se menciona explícitamente que debe despreciarse la capacidad de los pilotes sometidos a tensión salvo que se hayan diseñado y construido para tal fin. Esta disposición puede cumplirse al considerar un área reducida debido a cierta excentricidad, como en las cimentaciones someras, equivalente al momento de volteo sísmico; de esta manera se desprecia la presencia de pilotes fuera de esta área reducida.

Estados límite de servicio. En lo referente al análisis de asentamientos o emersiones para revisar los estados límite de servicio, debe tenerse presente también que en la medida que se haga explícita la manera en que los pilotes transfieren la carga al subsuelo, se podrán hacer estimaciones realistas de movimientos de la edificación; se evitarían así los procedimientos empíricos que se emplean frecuentemente.

En las NTC-1977 se requería la revisión de sólo los movimientos verticales a largo plazo; en las Normas actuales además de la revisión de los asentamientos o emersiones bajo cargas estáticas, se dispone la necesidad de calcular los desplazamientos horizontales, el giro transitorio y las deformaciones permanentes en general, bajo la combinación de cargas que incluya a la acción sísmica.

6.6 Cimentaciones con Pilotes de Punta o Pilas

Estados límite de falla. Para definir la capacidad de carga que debe resultar mayor que las acciones en la desigualdad correspondiente, se distinguen dos ecuaciones; una es aplicable cuando la punta del pilote o pila se encuentra en suelos cohesivos, y la otra cuando descansa en suelos friccionantes. Para el primer caso, se optó por una solución [Ref 19] válida para un mecanismo de falla propio de una cimentación profunda, lo que lleva a los valores tabulados del coeficiente de capacidad de carga, N_q .

Por lo que se refiere a los pilotes o pilas que descansan en un estrato friccionante, se recurrió a una solución [Ref 5] en la que el coeficiente de capacidad de carga, N_q , es función del cociente entre la longitud de empotramiento del pilote o pila en el estrato resistente y el ancho o diámetro del pilote o pila en esa misma longitud, L/B . Se proporcionan de manera tabulada los valores mínimo y máximo de N_q , que corresponden respectivamente a un empotramiento nulo en el estrato resistente y a un cociente $L/B = 4 \tan(45^\circ + \phi'/2)$; para obtener los valores de N_q correspondientes a cocientes intermedios, se efectúa una interpolación lineal.

Debe tenerse presente que la solución de este problema no es único, habiendo otros mecanismos de falla de pilotes propuestos por diferentes investigadores que conducen a resultados que difieren de los adoptados en las NTC. Lo más importante sin duda será hacer la mejor evaluación del ángulo de fricción interna, ϕ' , que es la variable más influyente en la determinación de N_q . Para el caso será deseable contar con muestras inalteradas para ensayarlas en el laboratorio en pruebas triaxiales representativas; aunque con ciertas dificultades técnicas es posible muestrear convenientemente los materiales de la capa dura o los depósitos profundos de la ciudad de México. Opcionalmente pueden usarse ensayos de campo como la penetración estándar, el presiómetro de Menard o el cono eléctrico. Asimismo, deberá asegurarse durante la construcción que la longitud empotrada en el estrato de apoyo corresponda a la longitud de diseño; ello podría requerir una excavación previa.

Por otra parte, y a diferencia de las NTC-1977 que la ignoraban, se ha introducido una corrección por el efecto de escala en pilotes o pilas de más de 0.5 m de diámetro; en este factor se toman en cuenta todas aquellas condiciones locales del subsuelo de apoyo que van en detrimento de la capacidad de carga de la punta, tales como zonas más sueltas o blandas, grietas, discontinuidades, etc. La probabilidad de que estén presentes tales heterogeneidades es mayor, cuanto mayor es el diámetro. Las ecuaciones indicadas del factor de reducción por escala, F_{rs} , se deben a Meyerhof [Ref 20], son de naturaleza semi-empírica y válidas para elementos hincados o preexcavados. Una ecuación es para suelos friccionantes y otra para cohesivos; en los primeros es en los que en general la reducción de capacidad de carga es mayor, y tanto más drástica cuanto más denso sea el suelo granular.

Esta corrección sin duda afectará el costo de las cimentaciones para construcciones pesadas, sobre todo en las zonas I o II, ya que el factor de reducción podría alcanzar valores tan bajos como 0.3. Si bien es cierto que esta corrección está basada en resultados de pruebas en diversos sitios del mundo, su aplicabilidad para el caso de la ciudad de México deberá verificarse. Podría pensarse en primera instancia y con base en los mínimos daños que sufrieron estas estructuras en tales zonas durante los sismos de 1985, que tal disposición es conservadora; sin embargo, debe tenerse presente que un reglamento de construcción debe cubrir no el sismo que ya ocurrió, sino los futuros por venir. En este sentido, temblores generados en fuentes más cercanas y diferentes a los de subducción del Pacífico, que podrían ser ricos en frecuencias altas, generarían condiciones adversas en las estructuras y zonas mencionadas. Adicionalmente, debe tenerse presente que para que alcance una pila una alta capacidad de carga, su punta o base debe sufrir una penetración considerable, que es una fracción proporcional a su diámetro, misma que podría ser incompatible con la rigidez de la propia estructura; y finalmente, la consideración de que la aplicación puntual de cargas altas en el subsuelo que dista de ser homogéneo, hace necesario un enfoque conservador.

Por otra parte, se señala expresamente que debe despreciarse tanto la eventual contribución a la capacidad de carga de la losa en contacto con el suelo, como la subpresión; ello se justifica plenamente por el hundimiento regional que asegura a largo plazo la pérdida del contacto entre la losa y el suelo, y por la imposibilidad práctica de conservar estanca la cimentación.

Lo hasta aquí señalado se refiere a las acciones y capacidades en dirección vertical; en las NTC-1987 se menciona por primera vez el requerimiento de revisar tanto la estabilidad del sistema, como de la capacidad estructural de los pilotes, ante cargas horizontales.

Estados límite de servicio. Para este tipo de cimentación se establece el requerimiento de estimar la emersión provocada por el hundimiento regional. Por lo que se refiere a los asentamientos que pudieran sufrir, llama la atención acerca de la contribución de los estratos bajo la punta (segunda formación arcillosa); ello es tanto más significativo cuanto menor sea el espesor del estrato resistente de apoyo. La magnitud de asentamiento inducido por acciones sísmicas podría calcularse con un procedimiento [Ref 21] en el que se involucra una solución elástica y propiedades del estrato resistente obtenidas en cámara triaxial dinámica; en ésta se reproducen primeramente condiciones semejantes del estado de esfuerzos in-situ cerca de la punta de los pilotes, y posteriormente se someten esos especímenes a un número de ciclos e incrementos de esfuerzo axial cíclicos, equivalentes a los de un sismo. Las deformaciones permanentes inducidas permiten hacer predicciones de los desplazamientos de una edificación debido a un temblor.

6.7 Pruebas de Carga en Pilotes

Se estipula en las NTC-87 la necesidad de recurrir a pruebas de carga cuando existan incertidumbres excesivas, en los casos de estructuras de los grupos A (aquéllas cuya falla podría causar gran cantidad de pérdidas humanas, económicas o culturales, o bien hospitales, escuelas, estaciones de bomberos, centrales telefónicas, etc.) o B (construcciones de más de 30 m de altura, o con más de 6 000 m² construidos en las zonas I y II; o bien, las de más de 15 m de altura ó 3 000 m² en la zona III). Ya que es difícil precisar lo señalado como incertidumbres excesivas, tal decisión queda en manos del responsable y corresponsables de la obra. En las normas anteriores se proporcionaba una ecuación que promediaba los valores de n capacidades de carga determinadas experimentalmente; en las normas actuales se omitió ésto y, con la salvedad antes indicada, se señala cuándo y para qué edificios proceden las pruebas de carga

6.8 Cimentaciones Especiales y Recimentaciones

Aunque se precisa que todo tipo de cimentación especial debe proporcionar una seguridad equivalente y demostrada a la de las cimentaciones tradicionales, las normas vigentes no establecen requerimientos específicos para los diversos tipos de cimentaciones especiales. Actualmente muchas de ellas están en uso y muchas otras se han propuesto como factibles; al parecer, para no excluir a algunas de éstas, no se ha particularizado ninguna. Cabe

hacer el señalamiento de que como en cada uno de los diferentes tipos tradicionales de cimentación empleados en la zona lacustre de la ciudad, varias edificaciones con cimentación especial acusaron mal comportamiento durante los sismos de septiembre de 1985.

Merece algún comentario el aspecto referente a la recimentación de edificios. En el Reglamento y Normas no se establecen requerimientos específicos para éstas, aunque es obvio que deben cumplir todos los requisitos exigidos para las cimentaciones en general. Se aprecia sin embargo cierta tendencia actual a una mayor disposición y aceptación a las modificaciones estructurales, en relación con los consecuentes cambios necesarios en la cimentación de edificios por reforzar y/o remodelar. No son desusuales los proyectos de reconstrucción en los que se introducen cambios sustanciales en el comportamiento de la edificación original, al incluir por ejemplo muros de concreto para soportar acciones sísmicas, considerando muy optimísticamente o inclusive ignorando las repercusiones sobre la cimentación; sin duda, la adición de carga sobre la cimentación, la mayoría de las veces concentradas, requiere particular atención a posibles estados límite de falla.

7. DISEÑO ESTRUCTURAL DE LA CIMENTACION

En las NTC-1987 se pide expresamente que se calculen los elementos mecánicos, con fines de diseño estructural de la cimentación, para cada combinación de acciones. Por lo que se refiere a las presiones de contacto se especifican criterios fundados en la condición de equilibrio local y general, así como en la compatibilidad de deformaciones y que éstas no rebasen los valores máximos permisibles.

Por otra parte se indica que los pilotes deben diseñarse estructuralmente para poder resistir cargas verticales, horizontales, las debidas al transporte e hincado, así como las que se presenten como resultado del proceso de emersión en pilotes de punta. Conviene señalar que ocurrieron fallas estructurales en pilotes de punta en su empotramiento con las contratrabes durante los sismos de septiembre de 1985; en ellos se conjuntaron altas cargas verticales, sobre todo en los de esquina y orilla, fuertes cortantes horizontales por la emersión de la cimentación (pobre o nula contribución de las paredes circundantes de la subestructura) y sobre todo, por el deficiente refuerzo transversal y longitudinal de los pilotes cerca de su cabeza.

8. ANALISIS Y DISEÑO DE EXCAVACIONES

De manera análoga a como se presentan las normas para cimentaciones, en las excavaciones se exponen sistemáticamente los posibles estados límite de falla y de servicio que deben revisarse.

Estados límite de falla. La seguridad de las excavaciones debe verificarse al revisar la estabilidad de sus taludes, paredes y fondo. A las normas anteriores se añadió el eventual estado de falla debido a la inestabilidad del fondo por flujo de agua en suelos granulares, así como el mecanismo consistente en el levantamiento del fondo de una excavación en una formación impermeable a la que subyace un estrato permeable con cierta presión hidráulica; esta última situación se presenta cuando el espesor entre el fondo de la excavación y el estrato permeable es suficientemente reducido como para que su peso propio y la posible resistencia en las superficies de ruptura, sean menores a la acción de la presión del agua en el estrato permeable.

El factor de resistencia prescrito en las normas actuales es de 0.6, en vez del 0.7 anterior; asimismo, el F_R que antes era de 0.8 para excavaciones temporales o secundarias pasó a un valor de 0.7.

Por lo que se refiere al análisis de estabilidad del fondo de la excavación, en la desigualdad por satisfacer se ha cambiado el factor de resistencia de 0.7 a 0.5, que puede ser el mismo 0.7 si la posible falla no afecta a servicios públicos, instalaciones o construcciones adyacentes. En principio esta reducción parece excesiva, aunque si se juzga que en las NTC-1977 se consideraba una resistencia reducida ($0.67 c_u$) cuando $c_u < 2.5 \text{ t/m}^2$, entonces el

resultado podría juzgarse como equivalente.

Estados límite de servicio. Además de las expansiones instantáneas y diferidas por descargas que ya señalaban las normas anteriores, se menciona en las actuales el requerimiento de estimar y monitorear los asentamientos en el terreno adyacente a cortes en arcillas blandas, como resultado de la cedencia lateral en el sistema de soporte. Para estimar los asentamientos y desplazamientos horizontales fuera de la excavación ademada, se sugiere recurrir al método propuesto por Clough [Ref 6], o bien a la solución ya clásica propuesta por Peck [Ref 22]. En la solución de Clough se evalúan los asentamientos y desplazamientos laterales en función de la rigidez relativa del sistema y del factor de seguridad tradicional contra levantamiento del fondo. En gráficas simples se presentan los desplazamientos de manera normalizada con respecto a la profundidad de excavación; tales resultados basados en estudios teórico-numérico y verificados con mediciones en diversos sitios con suelos blandos.

9. MUROS DE CONTENCION

Como en el caso de las cimentaciones y excavaciones, en las normas actuales se establecen por separado los estados límite de falla y de servicio para los muros de gravedad, los que incluyen aquellos con anclas o contrafuertes y los que emplean la acción de voladizo.

Estados límite de falla. Se señala que deben revisarse cuatro estados límite; éstos son volteo, deslizamiento, falla de la cimentación y ruptura estructural del muro en cuestión. Se acepta que puede emplearse el método semiempírico de Terzaghi para el cálculo del empuje activo sobre muros de menos de 6 m de altura, y se enfatiza la importancia del drenaje para evitar presiones hidrostáticas altas. En el caso de muros perimetrales de cimentación se especifica que deben diseñarse para soportar, entre otras acciones, el empuje en reposo del relleno.

Estados límite de servicio. Se indica que cuando la cimentación sea compresible, debe evaluarse el asentamiento e inclinación del muro. Aunque por el enfoque de las normas actuales parece obvio que procede la revisión de estos estados incluyendo las acciones sísmicas, no se menciona explícitamente.

10. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

Se resumen en el subcapítulo 7 de las NTC los lineamientos específicos acerca de los procedimientos constructivos de diversas cimentaciones, excavaciones y otras actividades geotécnicas; los ordenamientos anteriores a este respecto, estaban contenidos tanto en las NTC-1976 como en el Reglamento de ese año. Actualmente se establecen requerimientos para el colado de cimentaciones superficiales y de pilotes y pilas colados en el lugar. Entre otros aspectos, para pilotes hincados se especifican características del martillo y se acepta que el equipo de hincado se pueda definir con base en un análisis dinámico basado en la ecuación de onda; aquí cabe mencionar que este procedimiento teórico-experimental, que también es usado en otros países para predecir la capacidad de carga de pilotes o pilas, no es citado como una alternativa y complemento de las pruebas estáticas de carga tradicionales de estos elementos.

En lo referente al control del flujo de agua se mencionan los aspectos que comprende el diseño del sistema de bombeo y se definen los objetivos de éste en formaciones arcillosas de baja permeabilidad. En lo que concierne a excavaciones se señala al proceso por etapas para formar zanjas o porciones de dimensiones reducidas, a fin de disminuir expansiones del fondo, así como a la posibilidad de hincar pilotes de fricción antes de la excavación para el mismo fin.

Se estima que las normas adolecen de lineamientos que deben cumplir los tramos de pilote en sí; no se señalan requerimientos de colocación del armado y de la junta, inclinación máxima de la cabeza con respecto a su eje,

desviación angular de las juntas, etc; tampoco se precisa la necesidad de supervisión y control del hincado, ensayos de las juntas o criterios de rechazo, entre otros aspectos.

11. OBSERVACION DEL COMPORTAMIENTO DE LA CIMENTACION

El requerimiento de efectuar nivelaciones topográficas periódicas en edificaciones pesadas, a partir de su construcción y hasta cierto tiempo después, se ha extendido también para aquellas construcciones con excavaciones de más de 2.5 m. Asimismo, fija la obligatoriedad de realizar mediciones después de eventos sísmicos.

Las normas no establecen ni sugieren, lo que parece muy deseable tener: dispositivos o instrumentos en cimentaciones de edificios. Ello permitiría, a través de monitoreo periódico mediante la instrumentación, revisar su comportamiento, verificar las hipótesis del diseño y facilitar el avance del conocimiento del diseño y práctica de la construcción de cimentaciones. Cuando sólo se realizan nivelaciones topográficas, en el mejor de los casos se conocerán los efectos, pero no las causas.

Por último, como ya se ha comentado, al final de la NTC-1987 se orienta al usuario acerca de bibliografía relevante para cada capítulo de este ordenamiento. Se enfatizan las dificultades y particularidades geotécnicas y sísmicas que ofrece el subsuelo de la ciudad de México, para el diseño y construcción de cimentaciones.

12. IMPLICACIONES ECONOMICAS

Se ha señalado que una normatividad que debe cubrir un nivel menor de riesgo ante acciones como las que generan los sismos, conlleva costos mayores de la construcción; éstos se derivan, por una parte, del dimensionamiento mayor de los elementos estructurales y del consecuente incremento en el peso sobre la cimentación, y por otra, de los requerimientos más conservadores implícitos en las normas para verificar la seguridad de la cimentación.

En efecto, un análisis y diseños comparativos [Ref 1] de un edificio de diez pisos señala que al aplicar las normas vigentes, el volumen de concreto aumenta un promedio de 35% respecto a la norma de 1976; el acero de refuerzo se incrementa en un 79%. Asumiendo *a priori* que este edificio se ubicase en la Zona del Lago y tuviese una cimentación mixta con pilotes de fricción, este sistema debe ahora soportar un peso mayor y cumplir las regulaciones comentadas en los subcapítulos 6.5 y 6.2.

Otro ejemplo se tiene con los pilotes o pilas trabajando por punta que se emplearían en construcciones pesadas, ya que el Reglamento vigente introduce una corrección por el efecto de escala cuando su diámetro es mayor de 50 cm. El factor de reducción que afecta directamente a la capacidad de carga última de esos elementos podría alcanzar valores tan bajos como 0.35; la cantidad requerida de pilas o pilotes varía de manera inversamente proporcional con este factor.

13. POSIBLES ADICIONES Y MODIFICACIONES A LAS NTC-CIMENTACIONES

Se mencionan enseguida algunos aspectos normativos que quien escribe considera se deberían evaluar para su inclusión en una futura versión de las NTC-Cimentaciones.

Aspectos Generales

* Las dificultades que enfrenta la práctica de la ingeniería de cimentaciones en la ciudad de México, reconocidas en las NTC-Cimentaciones, deberían reflejarse en un mayor reconocimiento a esta actividad en otras porciones del propio Reglamento. Sería deseable que en éste se reconociese y precisase: Corresponsables en la Seguridad

Estructural y de la Cimentación; o bien, crear la figura de Corresponsable Geotécnico.

- * Sería deseable contar con lineamientos geotécnicos para la construcción de basureros y rellenos sanitarios.
- * Convendría establecer lineamientos específicos para la cimentación de edificios.

Procedimiento Constructivo

Se estima que en general, las NTC-Cimentaciones fijan criterios adecuados y suficientes para la revisión del diseño de cimentaciones para asegurar su seguridad. Se estima sin embargo, que su mayor limitación actualmente es que no pone igual énfasis en la normatividad para la construcción de la cimentación; esto es, para materializar convenientemente lo diseñado, parece conveniente precisar y agregar requisitos, limitaciones, tolerancias y lineamientos para la ejecución; entre éstos podrían citarse los siguientes:

- + Requerimientos acerca del detallado tanto del acero longitudinal como transversal en pilotes, así como lineamientos para su colado, curado y descimbrado.
- + Requisitos para la manufactura de pilotes en la obra y en planta.
- + Tolerancias en las dimensiones de los tramos de pilote.
- + Perpendicularidad de los extremos de cada tramo de pilote con su eje axial; cuál es la desviación máxima permisible ?
- + Criterios para desechar pilotes de concreto en función de su agrietamiento, recubrimiento y medio corrosivo en el que van a trabajar.
- + Cuándo recurrir a la perforación previa para hincar pilotes? Extracción de material, o no ?
- + Requerimientos para la verificación de la integridad de los pilotes.

Pilotes de punta

- Señalar algún criterio para revisar la eventualidad de una falla por punzonamiento o penetración de pilotes de punta o pilas en el estrato de apoyo, como resultado del reducido espesor de suelo resistente bajo la punta en comparación con el ancho o diámetro del pilote o pila, y de la presencia de estratos blandos debajo de la capa de apoyo.
- Otro posible mecanismo que se tendrá que revisar es el posible pandeo de pilotes de punta, en función de su esbeltez, carga que transmiten y relativo bajo confinamiento que ejerce el suelo arcilloso circundante.
- Lineamientos para la verificación de la seguridad, con base en los resultados que se derivan de pruebas de campo bajo cargas sostenidas y cíclicas.
- Definir procedimiento/s para cuantificar fricción negativa.
- Revisar la reducción de la capacidad de carga por el efecto de escala, en pilotes de más de 50 cm y en pilas.
- Revisar la desviación permisible respecto a la vertical; con la actual y tratándose de pilotes de orilla, podrían incluso invadir el subsuelo de predios contiguos.

Pilotes de fricción

* Cabría reconocer explícitamente la posibilidad de dos enfoques de diseño, Fig 5 y Ref 3:

- a) Como un sistema de cimentación en el que los pilotes de fricción soportan la totalidad de las cargas que actúan sobre la estructura, con sus diferentes combinaciones de acciones; esto es, en términos de capacidad de carga, y
- b) Como un sistema de cimentación en el que los pilotes de fricción se usan como un suplemento a fin de disminuir los asentamientos de la estructura; en este caso, la capacidad portante de los pilotes es menor al peso de la estructura, y por lo tanto la losa de cimentación transfiere parte de esa carga al suelo.

* Que el factor de resistencia F_R que actualmente es función del término s que es un cociente sólo entre solicitaciones de carga (la máxima sísmica entre la total, incluyendo a aquélla), involucre más bien un cociente en el que se relacione la suma de las acciones estática y la semiamplitud cíclica sísmica, con la capacidad de carga última del pilote de fricción. Esta sugerencia se basa en los resultados de estudios recientes de campo [Refs 13 y 17] y laboratorio [Ref 27] que muestran la importancia de la magnitud de la solicitación estática sostenida, y ello en comparación desde luego con la capacidad de carga del pilote de fricción.

* Lineamientos para la verificación de la seguridad, con base en los resultados que se derivan de pruebas de campo bajo cargas sostenidas y cíclicas.

* Definir espaciamientos mínimos entre pilotes, en función de su longitud; así mismo, cabría establecer si este espaciamiento mínimo es el mismo si se trata de pilotes de fricción o de punta.

Diseño estructural de la cimentación

- + Señalar requisitos que deben cumplir el acero y los agregados del concreto con que se construyen pilotes.
- + Definir un esfuerzo mínimo de tensión sobre los pilotes, que deben soportar tanto la conexión entre tramos de pilote, como el refuerzo longitudinal; ello con objeto de cubrir tanto las diferentes combinaciones de acciones como los esfuerzos debidos al transporte, izado e hincado.
- + Definir criterios de revisión específicos para pilotes de acero.
- + Lineamientos para la determinación experimental de la rigidez de los pilotes, considerando la conexión o junta entre tramos.

14. CONCLUSIONES

El Reglamento y las Normas Técnicas Complementarias vigentes para el diseño y construcción de cimentaciones refleja el estado actual del conocimiento y práctica en la materia, así como las incertidumbres que aún persisten en el comportamiento de ciertos tipos de cimentación, sobre todo bajo acciones sísmicas; por ésto último, y porque como lección de los sismos de 1985 se sabe que las solicitaciones dinámicas que entonces ocurrieron fueron mayores a las reconocidas antes de esos eventos, se estima que el criterio adoptado en las NTC para el diseño de cimentaciones, es justificado y racionalmente más conservador que el de las NTC-1976. Sólo la observación de las edificaciones a través del tiempo y los resultados de investigación en aspectos específicos podrán modificar la

normatividad actual; entre otros, de éstos últimos puede citarse aquéllos que den luz acerca de :

- * mecanismos de transferencia de carga en pilotes de fricción bajo acciones cíclicas,
- * propiedades dinámicas de la arcilla; en particular, condiciones de generación de deformaciones permanentes
- * mecanismo de trabajo conjunto de pilotes de fricción y losa de cimentación,
- * procedimientos para estimar desplomes y asentamientos de edificaciones, debido a carga sísmica

Por otra parte, el autor considera que las NTC actuales no ponderan el aspecto de la construcción de cimentaciones con la misma atención que se trata lo relativo al diseño. Se estima que sería muy deseable señalar requerimientos más específicos para la supervisión y control de la construcción de los elementos de una cimentación, de tal suerte que su verificación por parte de una entidad supervisora, asegurara que la obra se construye según lo diseñado; o bien, que se revisen las implicaciones en el proyecto original de los cambios dictados por la construcción.

La modificación a los Reglamentos de Construcción, aquí y en otras partes del mundo, ha estado estrechamente relacionado con la ocurrencia de sismos de gran intensidad, que han provocado múltiples pérdidas humanas y cuantiosos destrozos materiales; ojalá los próximos cambios a las NTC actuales estén motivados por los resultados de la investigación, y no por una manifestación severa de la naturaleza; ahí está el reto para los ingenieros e investigadores geotécnicos, así como para las autoridades correspondientes.

REFERENCIAS

1. Apango, L. y Gómez, Ch., "Estudio Comparativo de Dimensionamiento para un Edificio Típico Considerando los Criterios del RCDF-76 y RCDF-87", Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, SMIS, p D-32, Querétaro, Qro., 1987
2. Auvinet, G. y Mendoza, M. J., "Comportamiento de Diversos Tipos de Cimentación en la Zona Lacustre de la Ciudad de México durante el Sismo del 19 de Septiembre de 1985", Memorias del Simposio sobre los Sismos de 1985: Casos de Mecánica de Suelos", SMMS, México D. F., 1986
3. Auvinet, G. y Mendoza, M. J., "Consideraciones respecto al Diseño de Cimentaciones sobre Pilotes de Fricción en Zonas Sísmicas", Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, pp C-223 a C-239, Querétaro, Qro., 1987
4. Burland, J. B., Broms, B. B. and DeMello, V. F. B., "Behavior of Foundations and Structures". State-of-the-Art Report, Proc 9th ICSMFE, Vol 2, pp 495-546, Tokyo, 1977
5. Caquot, A. y Kérisel, J., *Traité de Mécanique des Sols*, Gauthier- Villars, 2nd ed, Paris, 1956
6. Clough, G. W., "Effects of Excavation Induced Movements in Clays on Adjacent Structures", Contributions on the Influence of Earthwork Construction on Structures, Eds. D. Reséndiz y M. P. Romo, XI ICSMFE, San Francisco, 1985
7. De Valle-Arizpe, A., *Calle Vieja y Calle Nueva*, Ed. Diana, México D. F., 1980
8. DDF, *Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones*, México, D. F.,

Versiones 1976 y 1987

9. DDF, Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, México, D.F. Versiones 1976 y 1987
10. DDF, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, México, D. F., Versiones 1976 y 1987
11. Jaime, A., "Comportamiento Dinámico de las Arcillas del Valle de México", Tesis Doctoral, DEPI-UNAM, México D. F., 1988
12. Jaime, A., "Foundation Engineering in Mexico City: General Aspects and Subsoil Conditions", Memorias del Simposio Internacional de Ingeniería Geotécnica de Suelos Blandos, Vol. 2, pp 225-243, SMMS, México D. F., 1990
13. Jaime, A., Romo, M.P. y Reséndiz, D., "Comportamiento de Pilotes de Fricción en Arcilla del Valle de México", Series del Instituto de Ingeniería, No. 515, México, D.F., 1988
14. Marsal, R. J. y Mazari, M., "El Subsuelo de la Ciudad de México", Facultad de Ingeniería, UNAM, México D. F., 1969
15. Marsal, R. J., "Notas sobre el Diseño y Construcción de Cimentaciones en el Distrito Federal", CFE, Public. No. 61, México D. F., 1986
16. Mendoza, M. J. y Auvinet, G., "Comportamiento de Cimentaciones en Edificios en la Ciudad de México durante el Sismo del 19 de Septiembre de 1985", Informe del I de I-UNAM al DDf y CONACYT, México D. F., 1986
17. Mendoza, M. J., "Foundation Engineering in Mexico City: Behavior of Foundations", Memorias del Simposio Internacional de Ingeniería Geotécnica de Suelos Blandos, Vol. 2, pp 351-367, SMMS, México D. F., 1990
18. Mendoza, M. J., "Effect of Soil Inertial Forces due to Seismic Actions on Bearing Capacity of Shallow Foundations on Clayey Soils", Reunión del Comité Internacional sobre el Comportamiento de Cimentaciones bajo Cargas Sísmicas y su Influencia en Reglamentos de Construcción, SMMS, México D. F., 1992
19. Meyerhof, G., "Bearing Capacity and Settlements of Pile Foundations", Eleven Terzaghi Lecture, J. of the Geotech. Engrg. Div., ASCE, Vol 102, GT3, 1975
20. Meyerhof, G., "Scale Effects on Ultimate Pile Capacity", J of the Geotech. Engrg., ASCE, Vol 109, 1983
21. Ovando, E., Mendoza, M. J. y Romo, M. P., "Ensayes Cíclicos en Suelos de la Capa Dura de la Ciudad de México y Estimación de Asentamientos Inducidos por Sismo en Pilotes de Punta", Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, pp E-95 a E-111, Querétaro, Qro, 1987
22. Peck, R. B., "Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground", State-of- the-Art-Volume, 7th ICSMFE, pp 225-290, México, 1969
23. Reséndiz, D., "Estudio de Campo sobre Pilote de Concreto Reforzado", Revista Ingeniería, México D. F., enero 1964
24. Reséndiz, D., "Cimentaciones en la Ciudad de México: Cambios de Reglamentación y Práctica tras los Sismos de 1985", Series del Instituto de Ingeniería No. ES-9, México D. F., 1991

25. Romo, M. P. y Seed, H. B., "Analytical Modelling of Dynamic Soil Response in the Mexico Earthquake of Sept. 19, 1985". Proc. of the Int. Conf. on the Mexico Earthquake-1985, ASCE, pp 148-162. Mexico City 1986
26. Romo, M. P., "Foundation Engineering in Mexico City: Seismic Aspects". Memorias del Simposio Internacional de Ingeniería Geotécnica de Suelos Blandos, Vol 2, pp 213-224, SMMS, México D. F., 1990
27. Romo, M. P., "Comportamiento Dinámico de las Arcillas de la Ciudad de México y su Repercusión en la Ingeniería de Cimentaciones". Memorias del Simposio El Subsuelo de la Cuenca del Valle de México y su Relación con la Ingeniería de Cimentaciones a Cinco Años del Sismo, SMMS, pp 83-94, 1990
28. Rosenblueth, E. y Ovando, E., "Geotechnical Lessons Learned from Mexico and Other Recent Earthquakes" (State of the Art Paper), Proc. 2nd Int Conf on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis Mo., 1991
29. Rosenblueth, E. y Reséndiz, D., "Disposiciones Reglamentarias de 1987 para Tener en Cuenta Interacción Dinámica Suelo-Estructura", Series del Instituto de Ingeniería, No. 509, México D. F., 1988
30. Seed, H. B. and Reese, L. C., "The Action of Soft Clay along Friction Piles", Transactions, ASCE, Vol 122, 1957
31. Seed, H. B., "Influence of Local Soil Conditions on Ground Motions and Building Damage during Earthquakes", 8a. Conferencia Nabor Carrillo, SMMS, Mazatlán Sin., 1986
32. Swedish Building Code, Chapter 23.3, Pile Foundations, 1980
33. Zeevaert, L., Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions, Van Nostrand Reinhold, New York, 1972