En 20 años de construcción de cimentaciones profundas ¿hemos aprendido algo?

After 20 years of deep foundations construction, have we learned something?

Walter I Paniagua Z, Pilotec
José Luis Rangel N, UAM-Azcapotzalco
Enrique Ibarra R, Instituto de Ingeniería, UNAM

RESUMEN: Se presenta una perspectiva general, de la evolución de la práctica de las cimentaciones profundas en los últimos 20 años, distinguiendo lo utilizado en la ciudad de México y en zonas costeras del país. Se destacan algunos procedimientos constructivos novedosos en México, así como en la revitalización de otros.

ABSTRACT: A general perspective of the evolution of the deep foundation practice in the last 20 years is presented, separating what is used in Mexico City and in shore areas. Some new construction procedures are highlighted, as well as the return from the past of others.

1 ANTECEDENTES

1.1 *Alcance*

Durante los sismos que se presentaron en las costas de Michoacán y Guerrero el 19 y 20 de Septiembre de 1985, se evidenció un mal comportamiento de diversas estructuras en la ciudad de México y zonas costeras de los estados mencionados.

En 1986, la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS) conjuntó los esfuerzos de una gran parte de la comunidad de ingeniería geotécnica, para dar testimonio de lo sucedido, tratar de explicar los fenómenos y comportamiento observados y plantear los problemas a resolver para evitar los daños que se evidenciaron en 1985. Gran parte de la información recopilada hasta ese momento se aglutinó en una publicación (SMMS, 1986), que se utiliza como referencia de partida para las reflexiones que ocupan este escrito.

Aunque la mayor parte de las fallas presentadas en 1985 se debieron a un mal comportamiento estructural, también es cierto que un amplio número de cimentaciones sufrieron hundimientos importantes, desplomes y en algunos casos inclusive se colapsaron.

Gran parte de las cimentaciones que se utilizan –tanto en la ciudad de México, como en zonas costeras- son de tipo profundo: pilotes y pilas, principalmente.

En este trabajo, con base en los reportes de SMMS (1986), se hace un recuento de los casos de estructuras soportadas en cimentaciones profundas, que presentaron fallas durante los sismos de 1985, tanto en la ciudad de México, como en Lázaro Cárdenas, Michoacán.

Asimismo, se presentan los cambios en la práctica de la construcción de cimentaciones profundas y mejoramiento masivo de suelos, como respuesta a las inquietudes que surgieron después de los sismos de 1985 y de 1995.

1.2 *Comportamiento de cimentaciones profundas en los sismos de 1985*

Ciudad de México. Los reportes concernientes al mal comportamiento de estructuras con cimentaciones profundas (fig 1) de Auvinet y Mendoza (1986), Flores (1986), Girault (1986) y Santoyo et al (1986), convergen en los siguientes puntos:

Pilotes de punta. Fallas por número insuficiente de pilotes, desconocimiento de las propiedades mecánicas del estrato de apoyo (capa dura), emersión previa al sismo, que generó vulnerabilidad estructural.

Pilotes de fricción. Se apreció un mal diseño, debido a la mala interpretación del balance entre cajón de cimentación y pilotes de fricción; número insuficiente de pilotes, y se generó la duda de la posible pérdida de adherencia suelo-pilote ante solicitaciones sísmicas.

Pilotes de control. Fallas por tensión o volcadura en los cabezales o controles, grandes deformaciones, sistemas mal conceptuados y falta de mantenimiento general.

Pilotes entrelazados. Se diseñaron sin entender claramente el concepto de su funcionamiento, con argumentos similares a los señalados para los pilotes de fricción.

Pilotes segmentados. Mal comportamiento estructural del pilote, desviaciones de su posición.

Pilotes presforzados Tensa. Mal comportamiento estructural, falta de suelo en porciones de la sección transversal.

Lázaro Cárdenas, Mich. Los trabajos de Santoyo (1986), Valverde y Moreno (1986) reflejan principalmente daños debidos al fenómeno de licuación de arenas (fig 2), concluyendo lo siguiente:

Pilotes de punta. Comportamiento adecuado para edificios, muelles, tanques y otras estructuras.

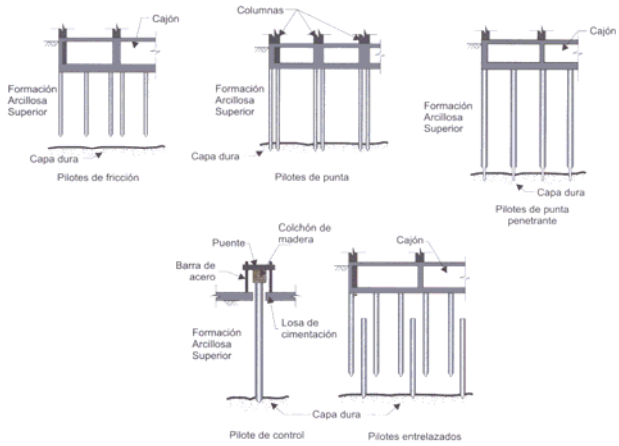

Fig 1, Tipos de cimentaciones profundas empleados en la ciudad de México

Cimentaciones superficiales. Sufrieron hundimientos importantes, pero se apunta la inconveniencia de cimentarlos con pilotes de punta, por ser incosteable.

Se apreció un buen comportamiento en zonas mejoradas previamente con compactación dinámica, y se hace énfasis en buscar nuevas soluciones.

Asimismo, se anota la necesidad de desarrollar un sistema de construcción de pilas coladas en el lugar de diámetro pequeño, para estructuras ligeras y recimentaciones.

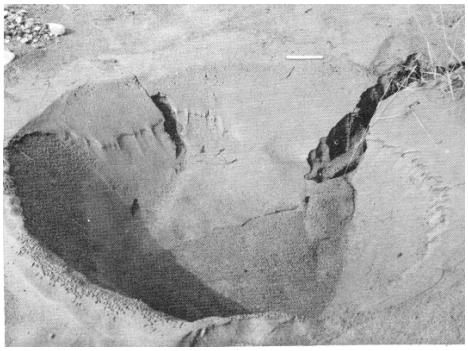

Fig 2, Volcán típico de licuación de arenas

2 PERSPECTIVA ACTUAL EN LA CIUDAD DE MEXICO

2.1 *Pilotes y pilas de punta*

Profundidad de desplante. En la última década, se han construido o se encuentran en construcción en nuestra ciudad hoteles y edificios multifuncionales que albergan centros comerciales y deportivos, departamentos unifamiliares, oficinas y centros de negocios. Su construcción conlleva un elevado número de entrepisos así como excavaciones profundas para alojar sótanos de estacionamientos; ejemplo de estas edificaciones son el Hotel Nikko, Torre Mayor (fig 3), Torre Libertad, Torre Ángel, Reforma 222, entre otras. Las solicitaciones sísmicas en la cimentación bajo tales condiciones requieren la construcción de cimentaciones profundas con pilas que alcanzan cada vez con mayor frecuencia los depósitos profundos de la Cuenca, empotrándose en éstos algunos metros; con ello el diseñador busca obtener suficiente resistencia del trabajo por fuste para tomar las tensiones generadas durante los eventos sísmicos.

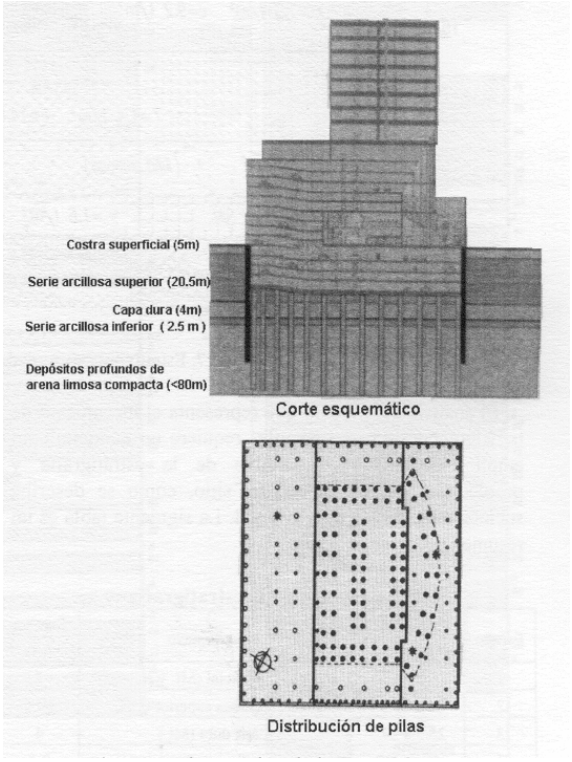

Fig 3, Cimentación de la Torre Mayor, Tamez (2003)

Las pilas que se construyen para estos proyectos suelen ser de diámetros generosos, desde 1.2 m hasta 1.5 m o más; incluso, se usan pilas oblongas cuando el diseño requiere gran capacidad portante o cuando el sembrado de las pilas y las restricciones del área de construcción obligan a juntar algunas de éstas.

Por otra parte, los diseñadores encuentran en las pilas de grandes diámetros ventajas para resistir cargas laterales ante eventos sísmicos, sobre todo en puentes carreteros y vehiculares, debido al momento de inercia grande de su sección (O'Neill, 1998).

Es interesante mencionar que los procedimientos constructivos para ejecutar este tipo de trabajos son básicamente los mismos que se han utilizado en los últimos 20 años (Paniagua, 2001); sin embargo, hay que reconocer que se han incorporado a la industria de la construcción equipos más modernos, se han desarrollado avances en la tecnología de lodos de perforación y algunos elementos secundarios (tubería tremie, aranceles de perforación y otros). Procedimientos radicalmente diferentes, como la construcción de pilas con hélice continua, apenas empiezan a desarrollarse en México.

Ademes definitivos. En algunos casos en los que se construyen pilas a profundidades mayores de 30 m, para asegurar una sección transversal confiable, se han utilizado ademes metálicos permanentes (Avelar, 2005), geotextiles (Santoyo, 2001, fig 4) o fundas plásticas (Segovia, 2004). Estos elementos además limitan los consumos adicionales de concreto que se presentan al deformarse el suelo blando ante la presión hidrostática del concreto recién colocado.

Fig 4, Colocación de geotextil para pila

Propiedades del estrato resistente. A pesar de que un número importante de edificios se apoyan en los estratos resistentes de la zona del lago y de transición de la ciudad de México, en muchos casos no se conoce con certeza las propiedades mecánicas de estos depósitos. Auvinet y Mendoza (1986) señalaron que una herramienta útil para caracterizar estos materiales podría ser el presiómetro; se han realizado algunos esfuerzos en este sentido (recientemente se han hecho pruebas de corte directo en la capa dura con phicómetro; Santoyo et al, 2005), pero todavía no es una práctica común. En estructuras importantes, se ha preferido realizar pruebas de carga en pilas o pilotes, Ortiz y Ovando (2004), fig 5, Mendoza et al (2004).

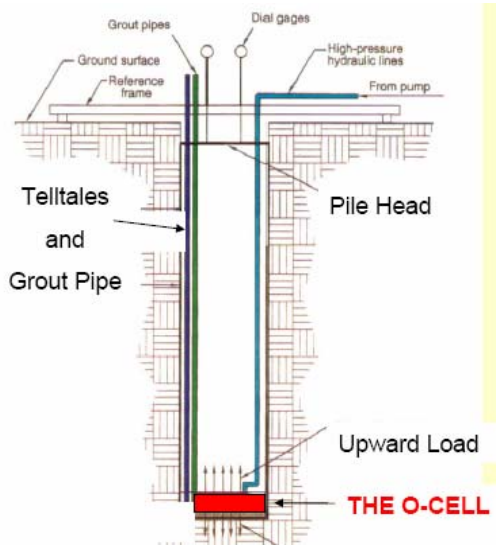

Fig 5, Esquema de la prueba de carga con celda Osterberg, Fellenius (2002)

2.2 *Pilotes de fricción*

Cajones con pilotes de fricción. Una de las soluciones de cimentación que tuvieron críticas serias después del sismo de 1985 fue la de cajón con pilotes de fricción.

La razón de tales críticas se centra en que el 13% de los edificios de 5 a 15 niveles experimentaron asentamientos y desplomos de importancia (Auvinet y Rodríguez, 2004) y en la falla total que se presentó en cuatro edificaciones (Tamez, 2005).

El análisis posterior de dichos casos, así como de muchos más incluyendo el comportamiento observado de las estructuras del Metro elevado y de los puentes vehiculares, han modificado la visión de tal solución para considerarla segura, toda vez que su diseño adopte los mecanismos de transferencia pilote-suelo que actualmente se aplican (Tamez, 2001 y 2005, SMMS 2001).

Para el estudio del cajón de cimentación parcialmente compensado con pilotes de fricción, Auvinet y Mendoza (1987) han propuesto considerar dos condiciones de trabajo, fig 6:

Tipo I. Los pilotes de fricción pueden soportar las cargas transmitidas por el edificio con factores de seguridad aceptables. Cuando el factor de seguridad es elevado, existe la posibilidad de emersión del edificio (Auvinet y Rodríguez, 2004).

Tipo II. Los pilotes solamente son capaces de soportar parte de la carga transmitida por la edificación; por lo que su función podría limitarse al refuerzo de los estratos más compresible y a la reducción de los asentamientos en condiciones estáticas (Zeevaert, 1990). Dado que este tipo de pilotes se encuentran en un estado de falla inminente o permanente, se les denomina *Creep Piles* (Hansbo, 1984).

Casi la totalidad de los edificios con cimentación parcialmente compensada con pilotes de fricción cuyo comportamiento fue deficiente durante el sismo, eran del tipo II, lo cual en primera instancia pudo ser resultado de un mal diseño o de una falta de comprensión de los conceptos señalados anteriormente.

Es claro que el mal comportamiento de los cajones con pilotes tipo II durante el sismo se debió a que la capacidad de carga total de los pilotes en tales condiciones (estática más sísmica) fue superada y que la cimentación siguió deformándose de acuerdo con la rigidez que resulta de la interacción suelo-cajón. En los casos más desfavorables, donde además la capacidad del cajón no fue suficiente en condiciones sísmicas, al vencerse la capacidad de los pilotes posteriormente se supera la del cajón, provocándose la falla de la cimentación.

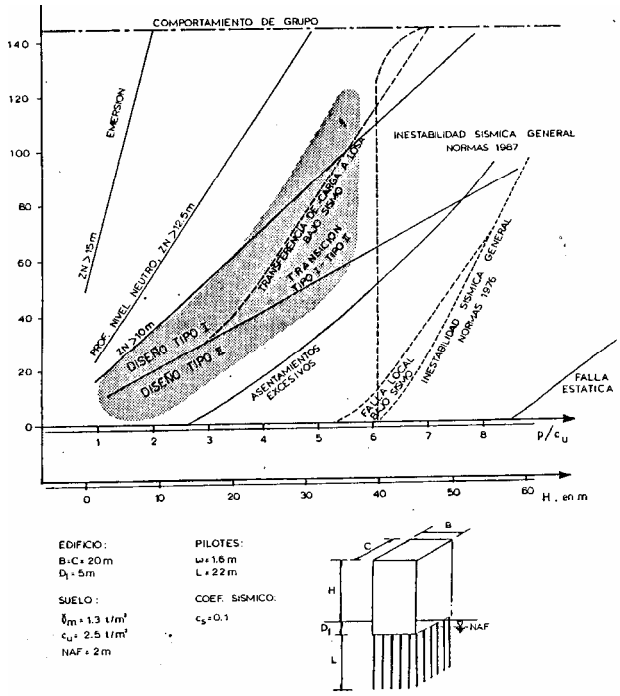

Fig 6, Condiciones de trabajo y límites de comportamiento de cimentaciones en pilotes de fricción, Auvinet y Mendoza (1987)

Influencia de la perforación previa. La influencia de la perforación previa, en pilotes hincados en arcillas blandas fue estudiada en un modelo a escala, Jaime et al (1992). Los resultados de esta investigación indican que la perforación previa reduce la capacidad de carga última por fricción. Se observó que este efecto es una función del diámetro nominal de la perforación previa: a mayor diámetro, menor capacidad de carga; otro factor importante es la geometría de la sección transversal del pilote, fig 7. Actualmente, se ha modificado el factor de reducción para pilotes de fricción en el Reglamento de Construcciones del DF (RCDF).

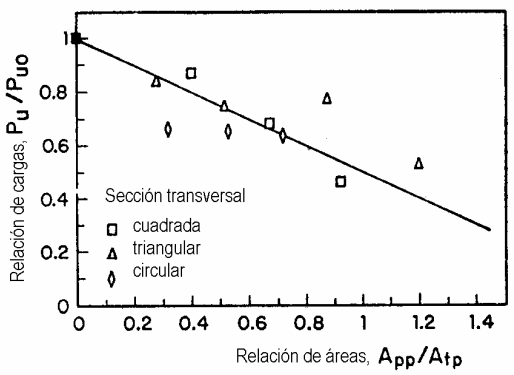

Fig 7, Efecto de la perforación previa en la capacidad de carga, Jaime et al (1992)

De acuerdo con el RCDF (2004), en pilotes de fricción el diámetro de la perforación previa para facilitar la hinca o para minimizar el desplazamiento de los suelos blandos se ha limitado a ser menor del 75 por ciento del diámetro o lado del pilote. En caso de recurrir a perforación previa, el factor de reducción F_R se redujo multiplicando el valor aplicable en ausencia de perforación por la relación $(1–0.4D_{perf}/D_{pil})$ donde D_{perf} y D_{pil} son respectivamente el diámetro de la perforación previa y el del pilote.

Comportamiento de pilotes de fricción. Posterior a los sismos de 1985, se llevaron a cabo diversas investigaciones para conocer mejor el comportamiento dinámico de pilotes de fricción en la arcilla de la ciudad de México (por ejemplo Jaime et al 1988, 1992). Los resultados observados permitieron que los pilotes de fricción ganaran confiabilidad nuevamente y se utilizan con frecuencia, aunque se continua investigando su comportamiento ante sismos.

Los resultados obtenidos de las investigaciones realizadas por Jaime *et. al.* (1988) y Ovando (1995), muestran que en pilotes sometidos a cargas cíclicas se generan deformaciones de importancia cuando la combinación de carga sostenida más carga cíclica crece a valores cercanos a la capacidad última del pilote; asimismo, cuando la combinación supera la carga última, la capacidad estática no se recupera instantáneamente.

Por otra parte, en investigaciones recientes en modelos de pilotes a escala instrumentados (Ibarra *et al.*, 2005), se encontró que para similar carga máxima cercana a la última, resultante de la combinación de carga sostenida y cíclica, cuanto mayor es la amplitud del componente dinámico se alcanzan condiciones más críticas a juzgar por la magnitud de los desplazamientos permanentes inducidos, esto es, la amplitud del ciclaje parece determinante en la generación de un mecanismo de falla.

Utilizando un modelo de elementos finitos, Rangel *et al* (2005), estudian la respuesta sísmica de edificios cimentados con cajón y pilotes de fricción. En este modelado se representa cada una de las etapas constructivas de la cimentación y del edificio, y posteriormente se hace incidir un movimiento en la base del depósito (fig 8). Los resultados obtenidos indican que la presencia de pilotes de fricción disminuye las ordenadas espectrales y la aceleración máxima tanto en el edificio como en su cimentación. Asimismo, existe un corrimiento ligero de dichas ordenadas hacia periodos cortos por efecto del amortiguamiento del suelo. En general, las ordenadas espectrales son máximas en la parte superior del edificio, de valor intermedio en la cimentación y menores las de campo libre.

2.3 *Pilotes de control*

Después de observarse el mal comportamiento de los mecanismos de control en la cabeza de los pilotes, los esfuerzos por solucionar este problema estuvieron enfocados en dos direcciones (Santoyo y Segovia, 1995): a) sustituir las celdas deformables por materiales con leyes de deformación más definidas o sistemas mecánicos de ajuste; y b) sustitución del puente de reacción y de la celda deformable, por mecanismos que permitan soportar tensiones y momentos de volteo, fig 9. No se conoce ningún caso práctico empleando estos mecanismos.

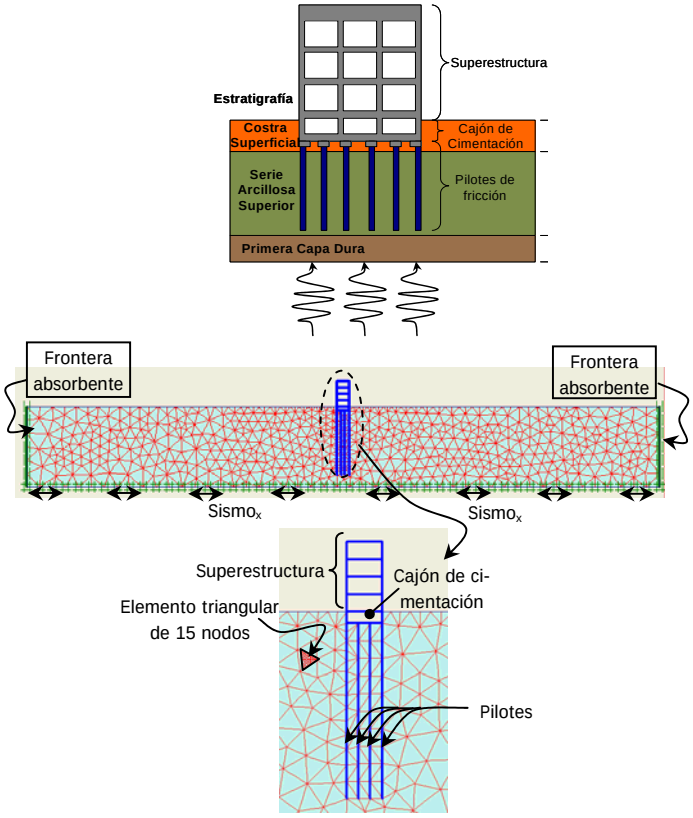

Fig 8, Modelo de Elementos Finitos de una cimentación resulta con cajón y pilotes de fricción sometida a cargas dinámicas (Rangel *et al*, 2005)

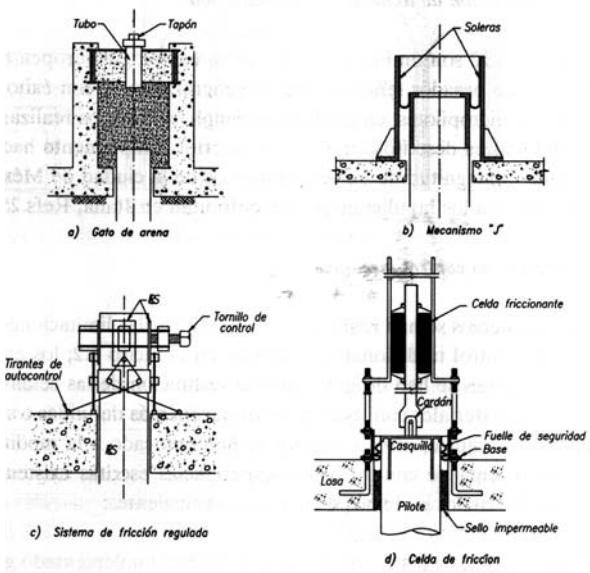

Fig 9, Diferentes sistemas de control, Santoyo y Segovia (1995)

2.4 *Micropilotes*

Como una respuesta a la problemática en recimentaciones, se ha difundido el uso de micropilotes para recimentar estructuras y monumentos, e inclusive para edificaciones nuevas. Se han adoptado diferentes técnicas, principalmente europeas, con adaptaciones a las condiciones locales de la ciudad de México (Santoyo y Segovia, 1995), fig 10. Fundamentalmente trabajan como pilotes de frcción, aunque en ciertos casos se han utilizado de punta. También se emplean como anclas, inclusiones, o con el concepto de *soil nailing.*

Fig 10, Construcción de micropilotes en la ciudad de México

2.5 *Pilotes entrelazados*

La aplicación de pilotes entrelazados se ha renovado, con diferentes enfoques de diseño (Menache, 2002). Estuvieron prácticamente en desuso durante poco más de una década, pero han vuelto a la práctica de la ingeniería de cimentaciones desde mediados de la década de 1990.

Para su aplicación, han ayudado nuevas herramientas de cálculo (fig 11), así como una mejor comprensión de la transmisión de carga del grupo, utilizando el enfoque de análisis de inclusiones.

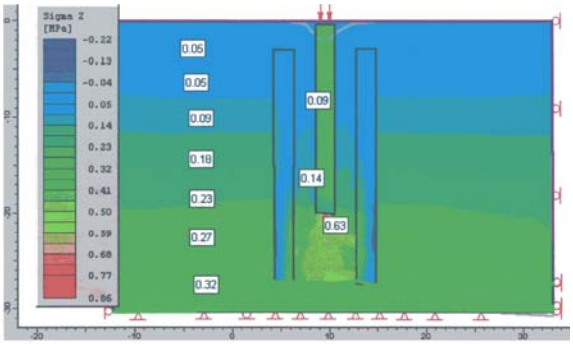

Fig 11, Esfuerzos verticales en pilotes entrelazados, Menache (2002)

2.6 *Muros milán*

Una alternativa constructiva a las pilas para tensiones, es la construcción de muros milán pila; en efecto, las excavaciones para alojar los sótanos suelen hacerse con muro milán anclado o apuntalado, sea éste estructural o de acompañamiento, donde algunos de sus tableros se profundizan más que el resto del perímetro ademado, con el objeto de alcanzar depósitos resistentes, formando así muros-pila que trabajan tanto a tensión como a compresión. Si bien este sistema tiene la ventaja de que elimina el detalle de la conexión estructural de las pilas perimetrales con el cajón y losa de cimentación, debe decirse que la calidad de la construcción de los muros colados *in situ* a grandes profundidades requiere un gran control en obra. En nuestra ciudad hay pocas experiencias al respecto (por ejem-

plo, Torre Mayor); en la ciudad de Puebla se han cimentado tres torres de más de 100 m de altura con esta solución (Paniagua, 2003).

2.7 *Pilotes en desuso*

Pilotes seccionados. Para solucionar el problema de falta de continuidad estructural, se propusieron diversos mecanismos para la unión de los segmentos, el más popular las placas de acero soldadas. Sin embargo, estos pilotes han sido prácticamente sustituidos por los micropilotes, en sus diversas modalidades constructivas.

Pilotes Tensa. El uso de pilotes presforzados tipo Tensa ha caído en desuso; se siguen utilizado pilotes presforzados de otro tipo, tanto en la ciudad de México, como en proyectos costeros (Paniagua 1994, 2002).

2.8 *Extracción de pilotes*

En algunos casos fue necesario demoler edificios cimentados sobre pilotes, haciéndose necesario la extracción de los pilotes antiguos, para cimentar las nuevas construcciones. Se reportaron dos técnicas para atender esta necesidad Galindo (1988), fig 12, y Ponce (1990); inclusive se extrajeron pilotes segmentados. Sin embargo, esta práctica no se ha extendido. En su lugar, se han utilizado inclusiones con pilotes precolados o colados en el lugar, para homogeneizar la reacción del suelo ante nuevas estructuras.

Fig 12, Extracción de pilotes, Galindo (1988)

3 CIMENTACIONES EN ZONAS COSTERAS

El comportamiento durante los sismos de las cimentaciones profundas en zonas costeras fue satisfactorio, mientras que las estructuras cimentadas superficialmente o grandes extensiones, como patios de contenedores (fig 13), sufrieron daños debido a la licuación de arenas. Por este motivo, los esfuerzos de la ingeniería de cimentaciones en estas zonas se han enfocado a la aplicación de técnicas de mejoramiento masivo de suelos, dirigidas a densificar los estratos de suelo potencialmente licuables.

Fig 13, Daños por licuación en el Puerto de Manzanillo, durante el sismo de 2003

En este apartado se presenta una breve descripción de los métodos más usados para el mejoramiento masivo de suelos a profundidad en México, con fines de mitigar el potencial de licuación de arenas. Una exposición más amplia de este tema se encuentra en SMMS (2002).

3.1 *Métodos dinámicos*

Vibrocompactación. El método consiste en la inserción de un vibrador de fondo, que genera vibraciones horizontales; una vez densificado el suelo, se rellena el vacío generado con arena, retirando el vibrador simultáneamente, fig 14. La compactación se debe a la acción del vibrador, que usualmente es acompañado con agua a presión, la cual reduce temporalmente las fuerzas intergranulares entre las partículas; las vibraciones generan exceso de presión de poro hasta que se licúa el suelo; entonces, la disipación de presión de poro conduce a un arreglo más compacto del suelo.

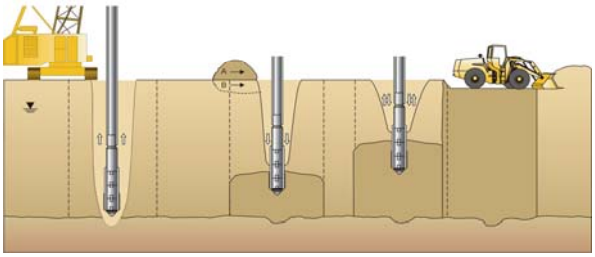

Fig 14, Proceso de vibrocompactación

La eficiencia del mejoramiento depende del tipo de suelo, espaciamiento de los puntos de vibrado y el tiempo de vibrado en cada punto. Generalmente, el espaciamiento está entre 1.80 y 3.50 m, con arreglos triangulares o en cuadrícula. Una vez que el vibrador alcanza la profundidad de diseño, el tratamiento se realiza por intervalos de profundidad. Durante la compactación, se rellena con una arena limpia desde la superficie para compensar la reducción del volumen del suelo debido al proceso de densificación; con esto se mantiene la elevación original.

Este método se utilizó con éxito en el Puerto pesquero en Alvarado, Veracruz, en 1963.

Compactación a profundidad con probetas. Consiste en la compactación producida por vibraciones verticales generadas por vibradores en la superficie, conectados a probetas metálicasque se introducen en el suelo, fig 14. Estas vibraciones provocan en el suelo sumergido, y que se encuentra alrededor de estos elementos, un aumento en la presión de poro hasta que se licua de una manera controlada; al disiparse este exceso de presión de poro, el suelo toma un arreglo más compacto en forma cilíndrica, el cual debe traslaparse para obtener un suelo homogéneamente compactado.

Existen varias geometrías y diseños de probetas; en México se han utilizado tubos circulares (Sámano y Schmitter, 2004), o e forma de Y (Avelar, 2004).

Los principales factores que influyen en este método son el espaciamiento, el tiempo de vibrado y el manejo de la probeta (inserción, suspensión y extracción). No existe un procedimiento racional de diseño para la selección de estos parámetros, por lo que se debe diseñar con base en datos recabados en la experiencia o con áreas de prueba.

Fig 15, Compactación con probeta vibratoria

Compactación dinámica. Este método consiste en dejar caer una masa repetidamente desde una cierta altura. La reacción del suelo ante la compactación dinámica depende del tipo de suelo y de la energía que le sea impartida por los impactos que tienen un arreglo predeterminado. La energía es función de la masa, altura de caída, espaciamiento de la cuadrícula y número de caídas en cada punto. Las masas son usualmente bloques de concreto, bloques de acero o una serie de placas de acero sujetas entre sí.

Las masas se dejan caer de 2 a 10 veces en el mismo lugar, siguiendo un patrón de cuadrícula con espaciamientos entre 1.80 y 5 m. El procedimiento normalmente se hace con más de una pasada o serie de apisonamientos, rellenando los cráteres que se forman entre pasadas. Actualmente, se realiza mejoramiento masivo de suelos con esta técnica en la Modernización de la Refinería Lázaro Cárdenas, en la ciudad de Minatitlán, Veracruz, fig 16.

Fig 16, Compactación dinámica en Minatitlán, Ver.

3.2 *Métodos con refuerzo de suelos*

Vibrosustitución. La vibrosustitución constituye un método de mejora de terreno, mediante la rigidización que produce la introducción de columnas de grava en los orificios creados por un vibrador de fondo.

La grava proporciona una mejor transmisión de la fuerza vibratoria al suelo circundante, y por tanto incrementa el efecto de densificación. Otros beneficios son el control de la presión de poro por medio de la columna de grava, que actúa como dren, y la reducción de esfuerzos cortantes cíclicos en el suelo, debido a una concentración de esfuerzos en la columna, ya que posee mayor rigidez que el suelo que la rodea, ademas de tener un efecto de deformación limitada.

Los dos métodos de instalación más comunes son: vibrosustitución por vía húmeda y vibrosustitución por vía seca. A éste último también se le llama vibrodesplazamiento.

El método de vibrosustitución por vía seca, se utiliza para mejorar suelos finos blandos, creando perforaciones mediante el desplazamiento del terreno producido por las fuerzas horizontales impartidas por el vibrador, ayudado por aire comprimido en cada punto del tratamiento.

Los procesos de vibrosustitución vía húmeda y vibrodesplazamiento implican la realización de la perforación por medio de agua y aire a presión, respectivamente, hasta una profundidad específica, alimentando la perforación con grava, a partir de esta profundidad se empieza a introducir y extraer el vibrador con una vibración de 30 Hz, por lo que la grava se empieza a densificar y adherir en el suelo circundante. En México se ha utilizado con éxito en Manzanillo, fig 17.

Fig 17, Vibrador de fondo en Terminal de Contenedores, Manzanillo, 1998

Vibro-remplazo. Una variante del método anterior, pero integrando el material de relleno –usualmente grava, por dentro del vibrador, para colocarlo desde el fondo, hacia la superficie, fig 18.

Fig 18, Vibro-remplazo en la Terminal de Contenedores Colón, 2000

4 INCLUSIONES

Es quizás la solución de mejoramiento que en las últimas décadas se ha desarrollado con mayor ímpetu, dado que representa una alternativa económica para aplicarse a los desarrollos habitacionales compuestos con grandes trenes de viviendas desplantados en suelos muy deformables y compresibles.

Las inclusiones pueden definirse como elementos que se colocan en el subsuelo y que no se conectan a la cimentación del edificio. Pueden ser de formas diferentes, pero en general dominan las cilíndricas, y pueden construirse utilizando procesos diversos.

En principio, pueden clasificarse en dos grupos: flexibles y rígidas.

Como ejemplo de las primeras se tienen los drenes de arena que usualmente se emplean para disminuir las presiones de poro en estratos limosos o arcillosos, o las inclusiones formadas con mezclas de arcilla-cal-cemento donde se evita que la mezcla solidifique, que se emplean para disminuir la compresibilidad de estratos arcillosos muy plásticos.

El uso de las inclusiones rígidas se ha vuelto popular al resolver problemas relacionados con la reducción de asentamientos superficiales e incremento del factor de seguridad contra la falla por cortante, ya sea en estabilidad de taludes o en cimentaciones superficiales.

Cuando se emplean en la reducción de asentamientos, las inclusiones rígidas suelen denominarse pilotes de fricción negativa porque la presión de la losa que se transmite al suelo es tomada por la inclusión mediante la fricción que se desarrolla al impedir el descenso del suelo que rodea a la inclusión (interacción suelo-inclusión, fig 19).

Para las inclusiones rígidas se tiene en general cuatro condiciones de trabajo (fig 20):

- Con apoyo en la cabeza de la inclusión (tipo A).
- Con apoyo en la base de la inclusión (tipo B).
- Con apoyo en la base y cabeza de la inclusión.
- Sin apoyo.

Algunos ingenieros consideran que el trabajo de las inclusiones sin apoyo es inadecuado por lo que optan por las condiciones A o B; la condición con apoyo tanto en la cabeza como la base, hace que la inclusión trabaje como un pilote de punta.

Actualmente, existe la tendencia a utilizar las inclusiones del tipo A (Briançon et al, 2004); sin embargo, es necesario llevar a cabo investigaciones al respecto a fin de definir cuál es la condiciones óptima dado el tipo de problema a resolver.

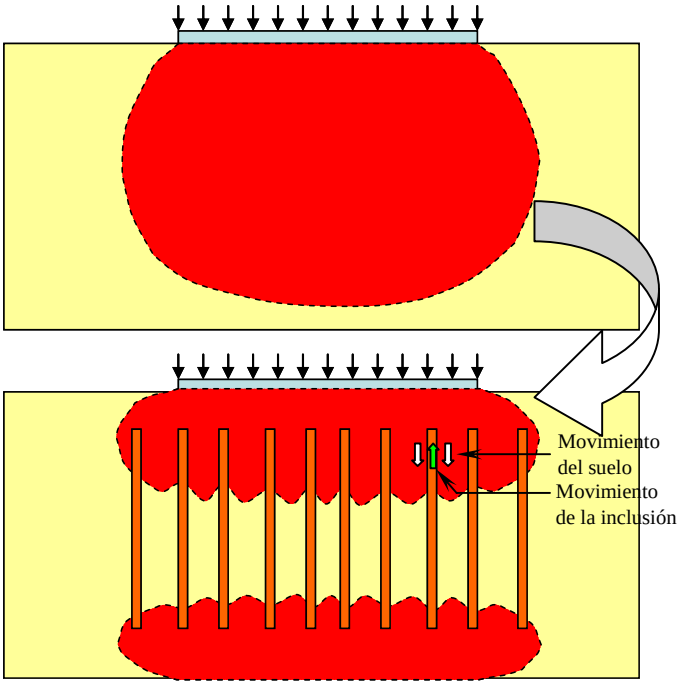

Fig 19, Diagrama esquemático de la transferencia de la carga de la losa al suelo y del suelo a la inclusión.

Respecto a las plataformas de transferencias éstas pueden ser de dos tipos: naturales o artificiales. La costra superficial se considera una plataforma de transferencia natural por lo que es usual que las inclusiones se apoyen en dicha capa, mientras que los rellenos compactados con o sin refuerzos (geomallas, por ejemplo) se consideran como plataformas artificiales.

Por otra parte, cuando se requiere disminuir la consolidación de estratos arcillosos se han empleado las inclusiones tipo B o sin apoyo.

Los procedimientos constructivos de las inclusiones rígidas son diversos, pero pueden agruparse en dos grupos: hincadas o coladas en el lugar. Las primeras pueden estar formadas por elementos precolados, ser de madera o fortubos de acero; mientras que las segundas pueden construirse utilizando inyección a baja presión de mezclas diversas de arena-suelo-cemento-cal, el jet-grouting, etc. En la tabla 1 se indican los distintos procedimientos constructivos de inclusiones rígidas que a la fecha se conocen:

Es conveniente destacar que las inclusiones están aún en etapas de conocimiento y prueba, y que se tienen problemas técnicos por resolver. Por lo que su empleo debe de realizarse con la mayor precaución, cuidando aspectos tales como las condiciones estratigráficas, los procedimientos constructivos y la instrumentación.

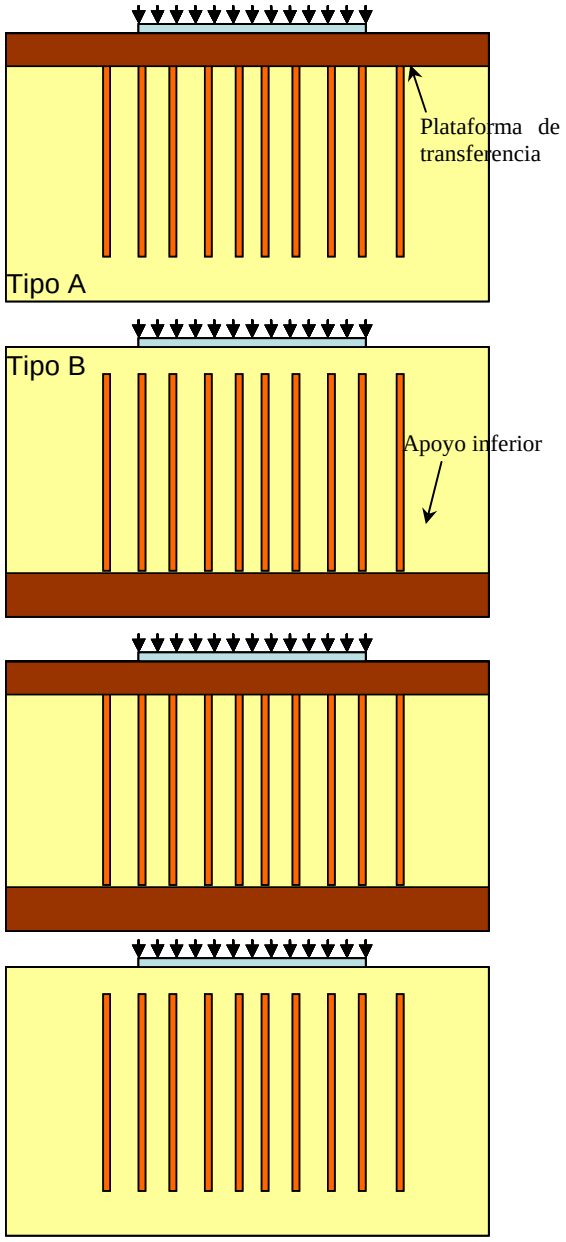

Fig 20, Condiciones de trabajo de las inclusiones rígidas.

Tabla 1, Procedimientos constructivos de inclusiones rígidas

Procedimiento constructivo	Técnica
Hincadas	De madera Metálicas De concreto
Construidas en el sitio	Perforaciones estabilizadas con lodo Perforaciones con el sistema de barrena continua Jet-Grouting Soil-Mixing Columnas de grava Columnas de módulo controlado Columnas de vibro-concreto Pilotes de desplazamiento

5 PRUEBAS ESTÁTICAS, DINÁMICAS Y DE INTEGRIDAD EN ELEMENTOS DE CIMENTACIÓN

Una práctica sana que debe impulsarse y adoptarse en nuestro país como parte integral del proceso de diseño, control y de supervisión de las cimentaciones profundas, es la ejecución sistemática de pruebas estáticas, pruebas dinámicas y pruebas de integridad en los elementos de cimentación.

Es claro el hecho de la ejecución de las pruebas de carga representa un costo adicional al de la propia construcción y en ocasiones existe cierta resistencia del dueño de las obras para absorberlo; sin embargo, se soslaya el hecho de que la ejecución de estas pruebas genera certidumbre en las hipótesis de diseño que se pueden reflejar en ahorros sustanciales en las obras, al comprobarse la capacidad de carga medida *in situ* en estos elementos de cimentación; asimismo, las pruebas dinámicas se ejecutan en los propios pilotes de producción, lo que constituye atractivas ventajas respecto a las pruebas estáticas que requieren la instalación adicional del sistema de reacción, de mayor costo y tiempo.

Por su parte, las pruebas de integridad para elementos colados *in situ* (pilas, inclusiones) que son pruebas de control y supervisión rutinarias en otros países, tienen escaso o nulo uso en nuestro país. Su ejecución es sencilla (fig 21): en la cabeza de la pila se aplica un impacto de magnitud pequeña; este impacto genera ondas sísmicas que se propagan a todo lo largo de la pila. Las variaciones en la forma de la pila (abultamientos, estrangulamientos, cambios de sección) o en la calidad del material, producen reflexiones del pulso sísmico aplicado, las cuales regresan al cabezal donde son captadas por un acelerómetro.

Los resultados de las pruebas de integridad pueden detectar anomalías en las pilas, ofreciendo así cimentaciones más seguras para nuestras edificaciones.

Fig 21, Prueba de integridad en pila

6 COMENTARIOS

La ingeniería de cimentaciones profundas es lenta en su evolución; sin embargo, después de 20 años es posible destacar cambios importantes en la práctica en nuestro país, tanto en la ciudad de México, como en las zonas costeras.

Se ha modificado en algunos aspectos, como en la profundidad de desplante para pilas de edificios importantes; se ha retomado la confiabilidad de otros sistemas, como los pilotes de fricción y entrelazados; se han adoptado sistemas nuevos, como inclusiones, extracción de pilotes y micropilotes; e inclusive se han abandonado algunos sistemas, como los pilotes de control, pilotes segmentados y pilotes tensa.

El mejoramiento masivo de suelos con potencial de licuación se ha adoptado como una práctica casi común, si bien está siendo utilizada por proyectos importantes de infraestructura. A medida que conozcamos mejor estas técnicas, se extenderán a otro tipo de estructuras.

Queda todavía trabajo por investigar, así como impulsar nuevas técnicas, como las pruebas de integridad en cimientos colados en sitio.

Sin embargo, a partir de un evento desafortunado, como fueron los sismos de 1985, la ingeniería mexicana ha respondido con imaginación y creatividad a los retos planteados hace 20 años.

REFERENCIAS

Auvinet, G. y Mendoza M. (1986): *Comportamiento de diversos tipos de cimentación en la zona lacuste de la ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre de 1985.* Simposio “Los sismos de 1985, Casos de Mecánica de Suelos”. Sociedad Mexicana de Mecánicas de Suelos, México.

Auvinet, G. y Mendoza M. (1987): *Consideraciones respecto al diseño de cimentaciones sobre pilotes de fricción*, VII Reunión Nacional de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, 19-21 de Noviembre, Querétaro, México.

Auvinet, G. y J.F. Rodríguez (2004): *Rehabilitación sísmica de cimentaciones: La experiencia mexicana*. VIII Simposio de Ingeniería Sísmica, Tlaxcala 2004, México.

Avelar R. (2003) *Vibrocompactación vertical profunda del subsuelo*. IV Simposio Consultores-Constructores de Cimentaciones Profundas. Sociedad Mexicana de Mecánicas de Suelos, México.

Avelar R. (2005) *Solución constructiva de pilas en el Centro Histórico de la Ciudad de México*. V Simposio Consultores-Constructores de Cimentaciones Profundas. Sociedad Mexicana de Mecánicas de Suelos, México.

Briançon, L., R. Kastner, B. Simon y D. Dias (2004): *État des connaissances: Amélioration des sols par inclusions rigides*, Symposium International sur l'Amélioration des Sols en Place. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Comité Technique 17 de la Societé Int. De Mec. Des Sols et de Geotech., Paris.

Fellenius, B. (2002): *Basics of foundation design*. Electronic edition.

Flores, J. (1986): *Cimentaciones falladas por sismos.* Simposio "Los sismos de 1985, Casos de Mecánica de Suelos". Sociedad Mexicana de Mecánicas de Suelos, México.

Galindo, A. (1988): *Extracción de pilotes*. No publicado.

Girault, P. (1986): *Fallas de cimentaciones durante el sismo en la ciudad de México.* Simposio "Los sismos de 1985, Casos de Mecánica de Suelos". Sociedad Mexicana de Mecánicas de Suelos, México.

Hansbo, S. (1984): *Foundations on friction creep piles in soft clays*, International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St Louis, Mi., USA, pp 343-360.

Ibarra, E, Mendoza, M. J, Rufiar, M. y Prócoro, B., (2005) *Comportamiento de modelos instrumentados de pilotes de fricción ante cargas cíclicas*, Memorias del XV CNIS, SMIS, México D.F.

Jaime A., Romo M. y Reséndiz D. (1988) *Comportamiento de pilotes de fricción en arcilla del Valle de México.* Series del Instituto de Ingeniería No. 515, UNAM.

Jaime A., Rojas E. y Legorreta H. (1992) *Static behavior of floating piles in soft clay*. Volumen Raúl J. Marsal, Sociedad Mexicana de Mecánicas de Suelos, México.

Menache, A. (2002): *Nuevas investigaciones en el diseño y aplicación de los pilotes entrelazados en suelos lacustres de muy alta compresibilidad y muy baja resistencia al esfuerzo cortante.* XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Querétaro, México.

Mendoza, M. J., Ibarra, E., Romo, M. P., Aire, C., Rufiar, M. y Castillo, T. (2004) *Pruebas de carga axial en pilas instrumentadas de dos sitios del distribuidor vial San Antonio, D. F.*, Memorias XXII RNMS, SMMS, Guadalajara.

O'Neill, M.W.O. (1998): *Applications of large-diameter bored piles in the United States*, Memorias, 3rd International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles. Bélgica

Ovando, E. (1995): *Direct shear test on Mexico City Clay with referente to friction pile behaviour*, Geotechnical and Geological Engineering, 13, pp 1-16.

Ortiz R. y Ovando E. (2004): *Análisis de una prueba no convencional de capacidad de carga.* XXII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Guadalajara, México.

Paniagua, W.I. (1994): *Muelle de contenedores Coco Solo: una experiencia interactiva*. III Simposio Consultores-Constructores de Cimentaciones Profundas. Sociedad Mexicana de Mecánicas de Suelos, México.

Paniagua, W.I. (2001): *Construcción de cimentaciones profundas*. Cap. 5 del Manual de Cimentaciones Profundas. Sociedad Mexicana de Mecánicas de Suelos, México.

Paniagua, W.I. (2002): *Comportamiento de pilotes centrifugados en la Refinería Madero*. XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Querétaro, México.

Paniagua, W.I. (2003): *Construcción de cimentaciones profundas: tres casos de interacción con el diseño*. IV Simposio Consultores-Constructores de Cimentaciones Profundas. Sociedad Mexicana de Mecánicas de Suelos, México.

Ponce, J.A. (1990): *Extracción de pilotes*. XV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Querétaro, México.

Rangel, J.L., E. Ibarra, E. Sordo y A. Gómez (2005): *Comportamiento sísmico de trenes de viviendas cimentadas con pilotes de fricción*. XV Reunión Nacional de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México

RCDF (2004): *Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de cimentaciones*. Gaceta oficial del Distrito Federal, Octubre.

Sámano A. y Schmitter J.J. (2004) *Compactación por vibrado en suelos potencialmente licuables, en la Planta de Nitrógeno Cantarell, en Antonio Cárdenas, Campeche.* XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Querétaro, México.

Santoyo, E. (1986): *Desarrollo de las cimentaciones en el Puerto Industrial Lázaro Cárdenas.* Simposio "Los sismos de 1985, Casos de Mecánica de Suelos". Sociedad Mexicana de Mecánicas de Suelos, México.

Santoyo E., Gutiérrez C., Hernández E. y Gálvez C. (1986): *Una encuesta sobre cimentaciones piloteadas de edificios en la ciudad de México.* Simposio "Los sismos de 1985, Casos de Mecánica de Suelos". Sociedad Mexicana de Mecánicas de Suelos, México.

Santoyo E. y Segovia J. (1995): *Recimentación y renivelación de estructuras y monumentos.* Ediciones TGC Geotecnia, México.

Santoyo, E. (2001): Comunicación personal.

Santoyo, E., Ovando, E., Mosser, F. y León, E. (2005) *Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México*, TGC, México, D.F.

Segovia, J. (2004): Comunicación personal.

SMMS (1986): *Los sismos de 1985, Casos de Mecánica de Suelos*. Sociedad Mexicana de Mecánicas de Suelos, México.

SMMS (2001): *Manual de Cimentaciones Profundas*. Sociedad Mexicana de Mecánicas de Suelos, México.

SMMS (2002): *Manual de Construcción Geotécnica*. Sociedad Mexicana de Mecánicas de Suelos, México.

Tamez, E. (2001): *Ingeniería de Cimentaciones*: Conceptos básicos de la práctica. TGC Geotecnia, México.

Tamez, E. (2003): *Diseño balanceado de pilas de cimentación y su aplicación al diseño sísmico de la Torre Mayor*. XIV Reunión Nacional de Ingeniería Sísmica, México.

Tamez, E. (2005): *Algunas contribuciones de la mecánica de suelos a la ingeniería mexicana*, Reunión Conmemorativa Enrique Tamez González, SMMS, México.

Valverde H. y Moreno H. (1986): *Comportamiento de las estructuras de la terminal de recibo y distribución de PEMEX en Lázaro Cárdenas, Mich. Durante el sismo*

del 19 de septiembre de 1985.. Simposio “Los sismos de 1985, Casos de Mecánica de Suelos”. Sociedad Mexicana de Mecánicas de Suelos, México.

Zeevaert, L. (1990): *Conceptos básicos en el diseño de cimentaciones compensadas sin y con pilotes de fricción*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México DF.