

PILOTES DE CONTROL

Funcionamiento,
diseño y aplicación



Norma Patricia López Acosta
Eduardo Martínez Hernández

ISBN: 978-607-30-5144-6

DOI: 10.22201/iingen.9786073051446e.2021



INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM

Serie
**Investigación
y Desarrollo**
Publicación arbitrada

SID 710
SEPTIEMBRE, 2021

Publicación arbitrada

ISBN 978-607-30-5144-6

doi: <https://doi.org/10.22201/iingen.9786073051446e.2021>

**PILOTES DE CONTROL:
Funcionamiento, diseño y aplicación**

Norma Patricia López Acosta¹
IIUNAM
nlopeza@iingen.unam.mx

Eduardo Martínez Hernández²
IIUNAM
emartinezher@iingen.unam.mx

Serie SID 710
Septiembre 2021

¹ Investigadora Titular “A”, Instituto de Ingeniería, UNAM

² Ingeniero de proyecto, Instituto de Ingeniería, UNAM

Pilotes de control:

Funcionamiento, diseño y aplicación.

Primera edición, septiembre de 2021

SID 710

D.R.© 2021 **Universidad Nacional Autónoma de México**

Instituto de Ingeniería, UNAM

Ciudad Universitaria, CP 04510, Ciudad de México

ISBN 978-607-30-5144-6

doi: <https://doi.org/10.22201/iingen.9786073051446e.2021>

La obra fue editada por el Instituto de Ingeniería, de la Universidad Autónoma de México (IIUNAM). El cuidado de la edición estuvo a cargo de la Unidad de Promoción y Comunicación del IIUNAM. Esta obra está gratuitamente disponible para consulta e impresión, en archivo PDF de 15.5 MB, en la sección de Publicaciones del portal electrónico del IIUNAM, <http://www.iingen.unam.mx>, desde que se terminó de editar.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa de ingeniería Pilotes de Control S.A. (PICOSA) por la información técnica proporcionada, por la actitud siempre dispuesta en las visitas técnicas solicitadas a distintos edificios en la Ciudad de México con pilotes de control y por el material proporcionado para realizar pruebas de laboratorio en cilindros poliméricos. También se reconoce el apoyo de la empresa Cimentaciones y Estructuras por los cubos de madera suministrados para ensayos experimentales con cubos individuales y conjuntos de cubos. Asimismo, se agradece a la empresa TGC por el material fotográfico compartido y las visitas técnicas a inmuebles con dispositivos de control con tacones de neopreno.

De igual forma, se da un especial agradecimiento al M. I. David Francisco Barba Galdámez por su apoyo en el estudio del comportamiento en grupo de los cubos de madera, a la M. I. Alejandra Liliana Espinosa Santiago por su colaboración en la investigación de las características de la caoba y la caobilla, y a la M.D.I. Érika Rodríguez Martínez por su apoyo en la edición de las imágenes de los resultados experimentales presentados en esta investigación.

Resumen

Los pilotes de control son una cimentación especial utilizada desde 1948 en edificios de la Ciudad de México (CDMX) para corregir asentamientos diferenciales y permitir el descenso de estructuras acorde con el hundimiento regional del Valle de México. Este tipo de cimentación está compuesta por pilotes de punta que atraviesan la losa de cimentación de un edificio. La cabeza del pilote tiene un dispositivo conformado por un marco de carga y una celda de deformación que controla la carga del pilote y los desplazamientos verticales del edificio. Actualmente, no existen lineamientos reglamentarios oficiales para el diseño de cimentaciones con pilotes de control ni criterios formalizados para su mantenimiento. Tampoco hay recomendaciones que indiquen el momento apropiado para reemplazar la celda de deformación. Esta investigación contribuye al estudio del funcionamiento, diseño y aplicación de pilotes de control. En la parte principal, se presentan resultados obtenidos en pruebas de laboratorio en materiales utilizados como celda de deformación. Para celdas de deformación constituidas por arreglos de cubos de madera, se propone un criterio para obtener la carga de fluencia necesaria para el diseño de la cimentación. Las aportaciones más importantes de esta investigación se fundamentan en los resultados experimentales anteriores, entre ellas: 1) entender el funcionamiento de pilotes de control, 2) establecer distintos tipos de mantenimiento y las actividades a realizar en cada uno de ellos, y 3) explicar la aplicación de los criterios de diseño y de revisión para cimentaciones con pilotes de control.

En este trabajo también se establece una guía de las actividades a realizar en una recimentación mediante el hincado de nuevos pilotes de control y/o la transformación de pilotes de punta existentes a pilotes de control. Adicionalmente, se exponen casos de edificios recimentados con este sistema. Finalmente, se dan conclusiones y recomendaciones generales acerca de pilotes de control.

Palabras clave: pilotes de control, asentamientos diferenciales, recimentación, emersión aparente, hundimiento regional, mantenimiento de dispositivos de control, celda de deformación, cubos de madera de caobilla.

Abstract

Control piles are a special foundation used since 1948 in buildings in Mexico City (CDMX) to correct differential settlements and allow the descent of a structure following the regional subsidence of the Valley of Mexico. This type of foundation is composed of point-bearing piles that freely penetrate the foundation slab of a building. The pile head includes a control device consisting of a load frame and a deformable cell that controls the load on the pile and the vertical displacements of the building. Currently, there are no official regulatory guidelines for the design of a foundation based on control piles or adequate criteria for their maintenance. There are also no recommendations that indicate the appropriate interval to replace the deformable cell. This research contributes to the study of the operation, design and application of control piles. In the main part, results obtained in laboratory tests on materials used as deformable cells are presented. For deformable cells constituted by arrangements of wooden cubes, a criterion is proposed to obtain the yield load necessary for the design of the foundation. The most important contributions of this research are based on previous experimental results, including: 1) understanding the operation of control piles, 2) establishing different types of maintenance and the activities to be carried out in each of them, and 3) explaining the application of the design and review criteria for foundations with control piles. This research also establishes a guide to the activities carried out in an underpinning based on driving new control piles and/or the transformation of existing point bearing piles to control piles. In addition, some cases of buildings with this system in the CDMX are exposed. Finally, conclusions and recommendations about control piles are given.

Key words: control piles, differential settlements, underpinning, apparent emersion, regional subsidence, maintenance of control devices, deformable cell, caobilla wood cubes.

Índice

Agradecimientos	iii
Resumen	v
Abstract	vii
Índice	ix
1. Introducción	1
2. Pilotes de control	5
2.1. Origen de los dispositivos de control	5
2.2. Descripción de los pilotes de control tradicionales	7
2.2.1. Pilote	7
2.2.2. Marco de carga o cabezal	9
2.2.3. Celdas de deformación	15
2.2.3.1. Arreglo de cubos de madera	18
2.2.3.2. Cilindros poliméricos	19
2.2.3.3. Tacones de neopreno	20
3. Funcionamiento del dispositivo de control	23
4. Procedimientos de cimentación y recimentación con pilotes de control	27
4.1. Hincado de nuevos pilote de control	28
4.2. Transformación de pilotes existentes a pilotes de control	34
5. Tipos de mantenimiento y su importancia	39
5.1. Mantenimiento preventivo	40
5.2. Mantenimeinto de rutina	41
5.3. Intervención especial	45
5.4. Dispositivos carentes de mantenimiento y con mantenimeinto inadecuado	49
6. Evaluación de celdas de deformación de distintos materiales	53
6.1. Cubos de madera	53
6.1.1. Pruebas realizadas	53
6.1.2. Resultados y discusión	57
6.1.2.1. Cubos individuales secos y saturados	57
6.1.2.2. Cubos individuales apilados en tres niveles	62
6.1.2.3. Arreglo de mxn cubos en tres niveles	63

6.1.3. Criterio para la estimación de la carga de fluencia de las celdas de deformación	68
6.1.4. Análisis del comportamiento de una celda de transformación	69
6.2. Cilindros poliméricos	73
6.3. Tacones de neopreno.....	75
7. Comportamiento de los pilotes de control ante sismos	77
7.1. Sismo de 1985.....	78
7.2. Sismo de 2017.....	79
8. Criterios de diseño y de revisión de pilotes de control	81
8.1. Criterio de diseño de González-Flores	82
8.2. Criterio de diseño de Tamez	84
8.3. Criterio de revisión de Zeevaert.....	86
8.4. Criterio de revisión de Auvinet y López-Acosta.....	87
8.5 Aplicación de los criterios de diseño y de revisión	89
8.5.1. Consideraciones generales	89
8.5.2. Aplicación del criterio de diseño de González-Flores.....	90
8.5.3. Aplicación del criterio de diseño de Tamez.....	94
8.5.4. Aplicación del criterio de revisión de Zeevaert	98
8.5.5. Aplicación del criterio de revisión de Auvinet y López-Acosta	99
8.5.6. Comentarios referentes a los criterios aplicados	102
9. Casos de recimentación y renivelación con pilotes de control	105
9.1. Recimentación y levantamiento de un templo del siglo XVIII	105
9.2. Recimentación de la torre de un conjunto de edificios en Tlatelolco	108
9.3. Recimentación de tanques de almacenamiento.....	112
9.4. Recimentación y renivelación de un edificio en la Zona III Lacustre de la CDMX.....	117
10. Conclusiones y recomendaciones generales	123
11. Referencias	127

1. Introducción

El Valle de México es uno de los cuatro valles que conforman la Cuenca de México. El subsuelo de este valle está dividido en tres zonas geotécnicas (Singh *et al.*, 1995): a) *zona de lomas*, conformada por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, b) *zona de transición*, constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre, y c) *zona lacustre*, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresible, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla (Marsal & Mazari, 1959).

La zona lacustre del Valle de México, donde se ubica principalmente el desarrollo urbano de la Ciudad de México (CDMX) (Ossa *et al.*, 2019), experimenta hundimiento regional ocasionado por el bombeo excesivo de agua de los estratos profundos y la alta compresibilidad de las arcillas que conforman el subsuelo de la Ciudad de México (Carrillo, 1948). Este fenómeno genera dos problemas en las edificaciones: a) emersión aparente en edificios cimentados con pilotes de punta y b) asentamientos diferenciales principalmente en edificios cuya cimentación está conformada por un cajón de cimentación complementado con pilotes de fricción (López-Acosta & Martínez-Hernández, 2018a). Ambos problemas, han sido resueltos con el uso de pilotes de control.

Los pilotes de control son una cimentación especial cuya creación se atribuye al ingeniero mexicano González-Flores (González-Flores, 1948). Este tipo de cimentación consiste en pilotes de punta que atraviesan libremente la losa de cimentación de un edificio y en cuya cabeza tienen un dispositivo de control a base de un marco de carga y una celda de deformación. Este último elemento (constituido usualmente por un arreglo de cubos de madera de *caobilla*, aunque también se han utilizado cilindros poliméricos y tacones de neopreno) permite controlar la carga de los pilotes y los desplazamientos verticales de la estructura para generar en todo momento el contacto suelo-estructura. Actualmente, más de 700 edificaciones en la Ciudad de México emplean este sistema, la mayoría de ellas ubicadas en los suelos

lacustres blandos del Valle de México (González-Flores, 1948). Iglesias, hospitales, escuelas, hoteles, sitios históricos, tanques de almacenamiento, y edificios, son algunos ejemplos de estructuras con pilotes de control. Existen otros dispositivos de control como el sistema *Jack up* implementado en el aeropuerto de Kansai en Japón (Matsui, Oda, & Tabata, 2003; Puzrin, Alonso, & Pinyol, 2010) (Figura 1.1a) o el dispositivo de Zeevaert (Figura 1.1b), entre otros. Sin embargo, los pilotes de control tradicionales son reconocidos y preferidos por los geotecnistas mexicanos para resolver problemas de hundimiento diferencial y emersión aparente en edificios de la Ciudad de México (Figura 1.1c).



a) Sistema *Jack up*
(cortesía de M. J. Mendoza)



b) Dispositivo de Zeevaert
(cortesía de J. Fernández)



c) Pilote de control tradicional

Figura 1.1 Dispositivos de control

Si bien los pilotes de control se utilizan regularmente para recimentar edificios en la CDMX, también se utilizan para cimentar nuevas construcciones. Un aspecto importante a tener en cuenta es que, para su buen funcionamiento, los pilotes de control requieren un mantenimiento constante durante toda la vida útil de la edificación. Asimismo,

una cimentación o recimentación a base de pilotes de control debe fundamentarse en diseños geotécnicos y estructurales específicos.

El mantenimiento debe estar a cargo de personal especializado en este tipo de mecanismos, pues el desconocimiento del funcionamiento del sistema de control puede derivar en un mantenimiento inapropiado o en la falta de mantenimiento, y propiciar un mal comportamiento de las estructuras que, a su vez, se refleja en problemas de asentamientos diferenciales y desplomos. Esta investigación tiene como objetivo principal contribuir a un mejor entendimiento de los pilotes de control, explicando con detalle los elementos que componen el dispositivo y el funcionamiento del sistema en conjunto. Asimismo, proporcionar una guía de las actividades que se realizan en una recimentación a base del hincado de nuevos pilotes de control y/o la transformación de pilotes existentes a pilotes de control. También, describir los distintos tipos de mantenimiento y las actividades que deben realizarse en cada uno de ellos.

Como complemento, se evalúa experimentalmente el comportamiento mecánico de los materiales utilizados como celdas de deformación (cubos de madera, cilindros poliméricos y tacones de neopreno) mediante pruebas de laboratorio de compresión simple y carga cíclica. Para el caso de los cubos de madera (individuales y en conjunto) se propone un criterio para obtener la carga de fluencia, la cual es necesaria en distintos criterios de diseño de los pilotes de control descritos en esta investigación. Además, se presenta un criterio para la revisión del comportamiento de cimentaciones a base de pilotes de control.

Con todo lo anterior, se pretende ayudar a un mejor uso de los pilotes de control y con ello, favorecer el buen comportamiento de los edificios cimentados o recimentados con este tipo de dispositivos.

2. Pilotes de control

2.1. Origen de los dispositivos de control

En 1948 González-Flores creó el primer dispositivo de control con la finalidad de controlar los asentamientos de las construcciones (Figura 2.1). Este dispositivo estaba compuesto por tres elementos principales: a) un pilote segmentado en tramos de 91 cm y excéntrico con respecto a los ejes de las columnas del edificio, b) un cabezal a base de dos canales tipo C unidos en la parte central por placas separadoras y anclado en cada extremo con un tornillo (también conocido como husillo o espárrago) que en su parte superior tiene una placa roldana y una tuerca cuadrada, mientras que en su parte inferior está embebido en el concreto (González-Flores, 1948), y c) *cinco anillos de concreto*, que debían retirarse utilizando un sistema denominado *doble puente* para permitir el descenso de la estructura congruente con el hundimiento regional del sitio.

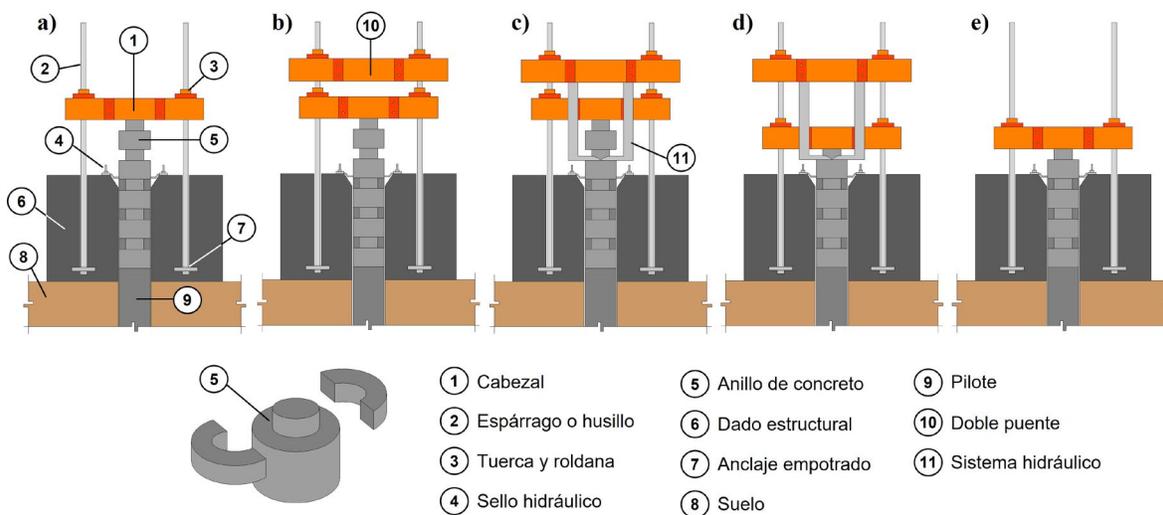
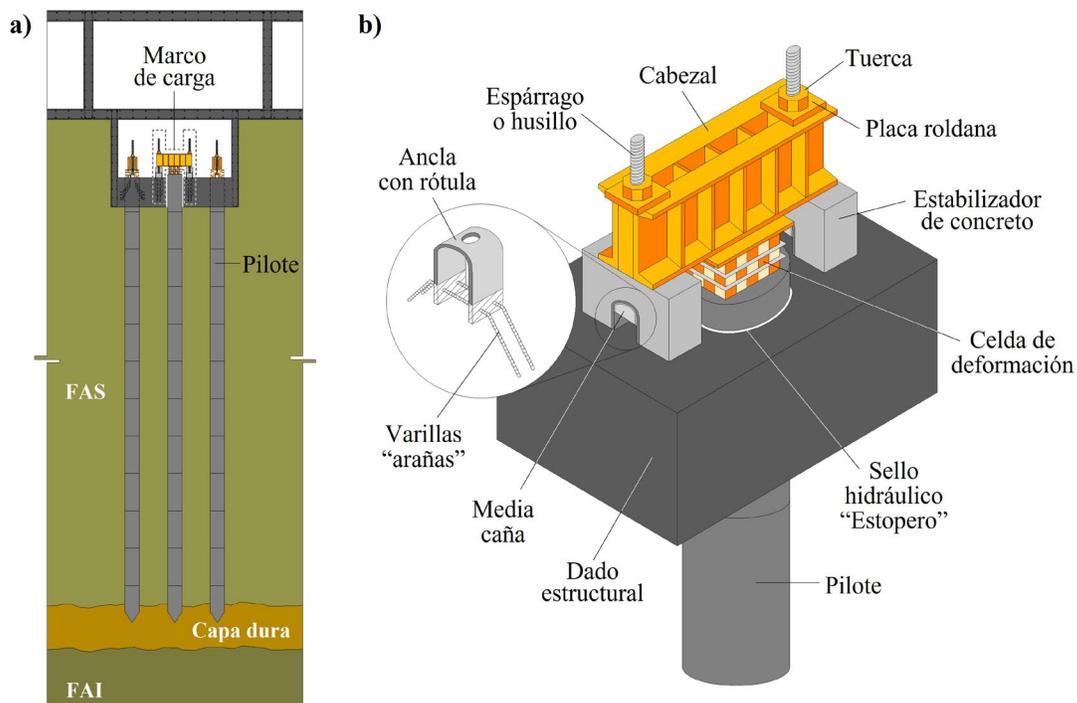


Figura 2.1 Primer dispositivo de control de González-Flores (González-Flores, 1948)

Posteriormente, González-Flores realizó una serie de mejoras al primer dispositivo de control, lo que dio origen a lo que hoy se conoce como el *pilote de control tradicional* (Figura 2.2). Al igual que el primer dispositivo de control, los pilotes de control tradicionales están conformados por: a) un pilote desligado estructuralmente de la edificación (Salazar-Resines, 1960), b) un marco de carga anclado estructuralmente a la cimentación y que liga de forma indirecta al pilote con el edificio. La principal diferencia radica en que los pilotes de control tradicionales poseen una celda de deformación constituida por un arreglo de cubos de madera de *caobilla* de 5 cm de lado, colocada entre la cabeza del pilote y el marco de carga (Aguirre, 1991; González-Flores, 1948). La celda de deformación permite controlar la carga en los pilotes y el asentamiento de las construcciones (López-Acosta & Martínez-Hernández, 2017c). La descripción detallada de los tres elementos que conforman el pilote de control tradicional se presenta a continuación.



Nota: FAS = Formación Arcillosa Superior; FAI = Formación Arcillosa Inferior; Capa Dura = Estrato resistente.

Figura 2.2 a) Sección transversal de un pilote de control tradicional en un edificio, y b) componentes del dispositivo de control

2.2. Descripción de los pilotes de control tradicionales

2.2.1. Pilote

Los pilotes utilizados en las recimentaciones son los denominados tipo *Mega* (Santoyo & Alanís, 2013) que se caracterizan por ser pilotes prefabricados de geometría circular y seccionados en tramos de 91 cm (Figuras 2.3 y 2.5a). Estos pilotes tienen un hueco en la parte central para colocar el armado de refuerzo (generalmente 4 varillas de ½”, Figura 2.5a). Los pilotes seccionados facilitan los trabajos de recimentación en espacios reducidos. Una limitación de este tipo de pilotes es que no pueden absorber tensiones, a no ser que, se coloquen torones postensados en la parte central del pilote en lugar de las 4 varillas de ½”. Antes del hincado de los pilotes a presión, se realiza una perforación previa con equipo especial para ayudar a la verticalidad del pilote (ver Capítulo 4). Si el espacio disponible lo permite, en vez de los pilotes tipo *Mega*, se utilizan pilotes monolíticos prefabricados. Estos últimos se emplean con mayor frecuencia en cimentaciones nuevas, como ocurrió en la Nueva Basílica de Guadalupe (PICOSA, 2010).

Los pilotes más comunes son de 45 cm de diámetro para una capacidad de 981 kN (100 t) y 60 cm para 1471 kN (150 t) (Martínez-Hernández, 2017). El diámetro, profundidad y armado de los pilotes dependen de las condiciones particulares de diseño de cada cimentación (cargas estáticas y sísmicas, profundidad del cajón de cimentación, entre otras) y de las características específicas del suelo del sitio.



a) Secciones de 91 cm antes del hincado

b) Después de ser hincados (cortesía de TGC)

Figura 2.3 Pilotes tipo *Mega*

Existe otro tipo de pilotes patentados denominados *machimbrados-postensados* que se caracterizan por ser segmentados y en cuyo extremo superior tienen una sección sólida que embona en el tramo siguiente que está hueco en su extremo inferior con este fin (Figuras 2.4, 2.5b y 2.5c). Asimismo, existen dos tipos de pilotes *machimbrados-postensados*: a) con un orificio central, y b) con cuatro orificios en la periferia del pilote. En ambos casos, los orificios son para colocar torones que van desde la punta hasta la cabeza del pilote (Figuras 2.5b y 2.5c) para posteriormente ser postensados. Lo anterior contribuye a que el pilote pueda tomar tensión. Este tipo de pilotes forma parte de un dispositivo de control conocido como *sistema mecanizado* (Aguilar & Rojas, 1990) que es similar al pilote de control tradicional.

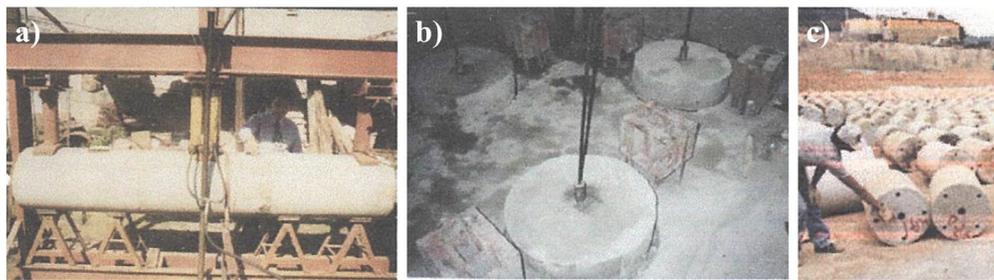


Figura 2.4 Pilotes *machimbrados-postensados* (cortesía de M. Aguilar): a) secciones del pilote con un orificio central, b) torones al centro del pilote, y c) secciones con cuatro orificios perimetrales

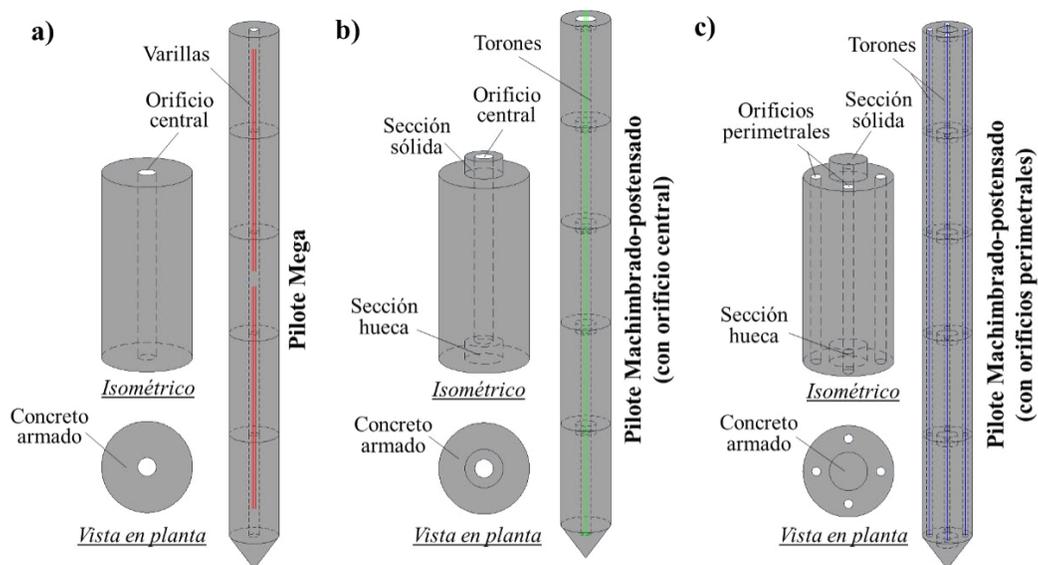


Figura 2.5 a) Pilote tipo Mega, b) pilote *machimbrado-postensado* con un orificio central, y c) pilote *machimbrado-postensado* con cuatro orificios perimetrales

Aunque la mayoría de las recimentaciones consisten en el hincado de nuevos pilotes de control, existen casos en los que los pilotes existentes (sean de punta o de fricción) se transforman a pilotes de control. Los pilotes nuevos generalmente se ubican excéntricos a los ejes o columnas de las construcciones. Contrariamente, los pilotes ya existentes que son transformados a pilotes de control se ubican generalmente céntricos a los ejes y a las columnas del edificio (como fueron construidos originalmente), lo que hace necesaria la construcción de un nuevo cajón de cimentación para colocar el dispositivo de control (ver Capítulo 4).

Si bien en la práctica se han utilizado pilotes de fricción con dispositivo de control, es claro que éstos tendrán limitaciones para corregir asentamientos diferenciales. Asimismo, los pilotes de fricción con dispositivo de control no han sido suficientemente estudiados y documentados a la fecha, por lo que requieren mayor evaluación y registro de los casos existentes.

2.2.2. Marco de carga o cabezal

El marco de carga o cabezal (en conjunto con la celda de deformación) tiene como función principal restringir o permitir la penetración aparente del pilote. El marco de carga se ubica arriba de la cabeza del pilote y está conformado por un cabezal de acero, dos espárragos, dos sistemas de anclaje y dos estabilizadores de concreto (Figura 2.2).

Desde la concepción del primer dispositivo de control (González-Flores, 1948) a la actualidad, se han realizado diversas mejoras al marco de carga. La primera de ellas, en el sistema de anclaje, consistió en eliminar los espárragos empotrados en el dado de concreto (ver Figura 2.1) y en su lugar colocar *anclas planas* hechas con soleras ligadas estructuralmente al armado del dado de concreto que en su parte superior tenían soldado el espárrago (Figura 2.6a). La unión entre el espárrago y el ancla generó complejidad en el mantenimiento del sistema, por lo que se realizó una segunda modificación que radicó en desligar el espárrago del sistema de anclaje mediante *anclas semicirculares* hechas con soleras (también ligadas al dado estructural) y en cuya parte superior disponían de un orificio para embonar el espárrago (Figura 2.6b). Con la finalidad de facilitar la unión entre el sistema de anclaje y el armado del dado estructural, se realizó una tercera mejora que

consistió en la creación del *ancla con rótula (ancla tipo araña)*, caracterizada por tener un doblez más estético y por la colocación de varillas (denominadas arañas) en la parte inferior (Figura 2.6c). El ancla con rótula es la más utilizada actualmente en los pilotes de control.

En 1990 Aguilar y Rojas propusieron el sistema mecanizado que posee un nuevo tipo de ancla denominada *ancla rígida*, conformada por perfiles metálicos y seis varillas que se anclan al armado del dado estructural (Figura 2.6d).

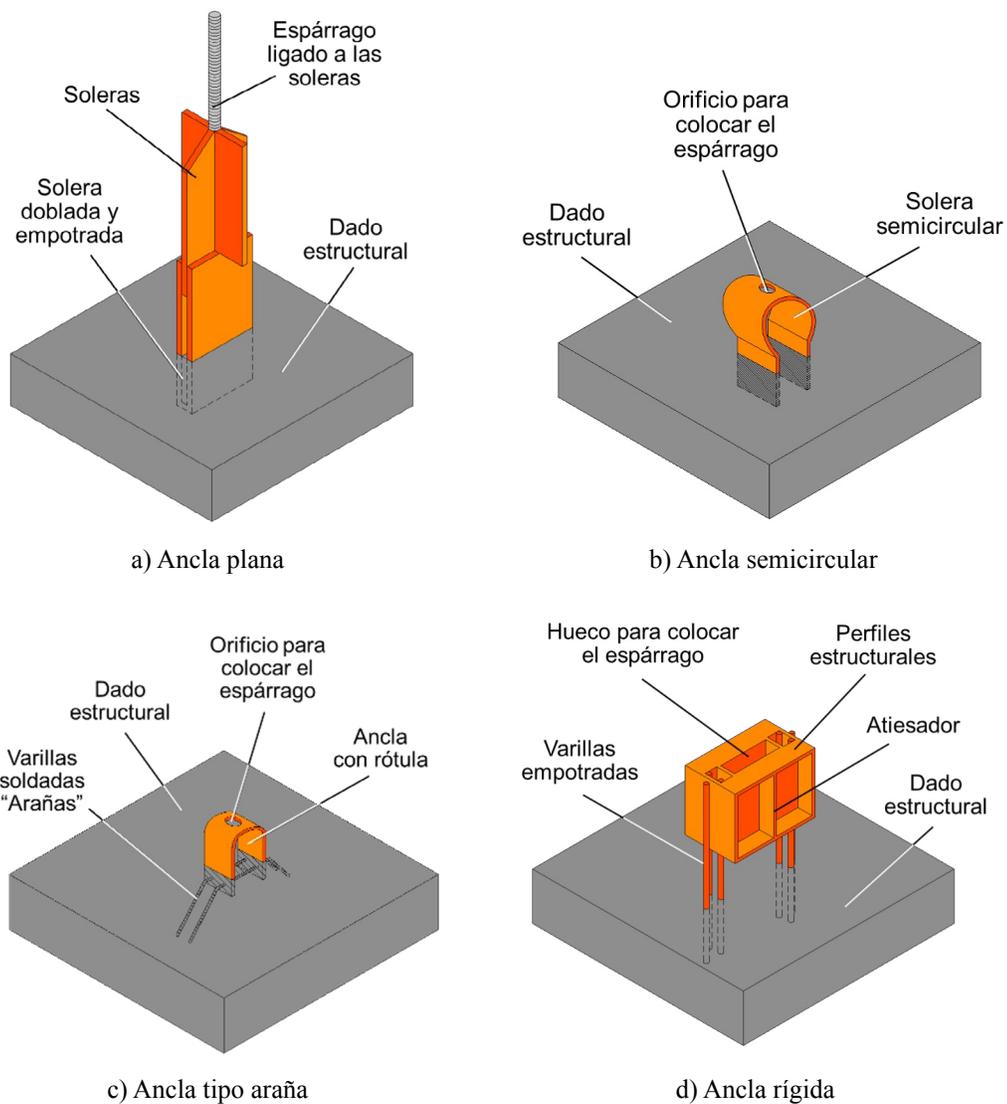


Figura 2.6 Distintos tipos de ancla de los pilotes de control

Después de las mejoras al sistema de anclaje, se realizaron mejoras en el cabezal o marco de carga. La primera de ellas consistió en sustituir el cabezal por otro con perfiles metálicos de mayor peralte (Figura 2.7b) (González-Flores, 1959). La segunda mejora consistió en colocar dos atiesadores en el cabezal para incrementar la capacidad de carga del mismo (Figura 2.7c) (González-Flores, 1964).

Los dispositivos de control con las mejoras en el sistema de anclaje y el cabezal exhibieron un funcionamiento adecuado en condicionales normales de operación (cargas estáticas) y condición sísmica (Tamez, 1988). Sin embargo, a raíz del sismo de 1985 (ver Capítulo 7), se implementaron dos mejoras adicionales en el sistema de control tradicional con la finalidad de incrementar la seguridad y evitar fallas en condición sísmica (Figura 2.8). La primera de ellas, consistió en la colocación de un estabilizador de concreto en cada extremo del sistema (utilizado años antes en un edificio de la Ciudad de México), los cuales en conjunto ayudan a absorber parcialmente el momento de volteo, limitando así la inclinación del cabezal. La segunda mejoría radicó en la colocación de un mayor número de atiesadores en el cabezal para proporcionar mayor estabilidad a la sección transversal del cabezal en caso de que los cubos exhiban una deformación excesiva y se genere una sobrecarga por el sismo.

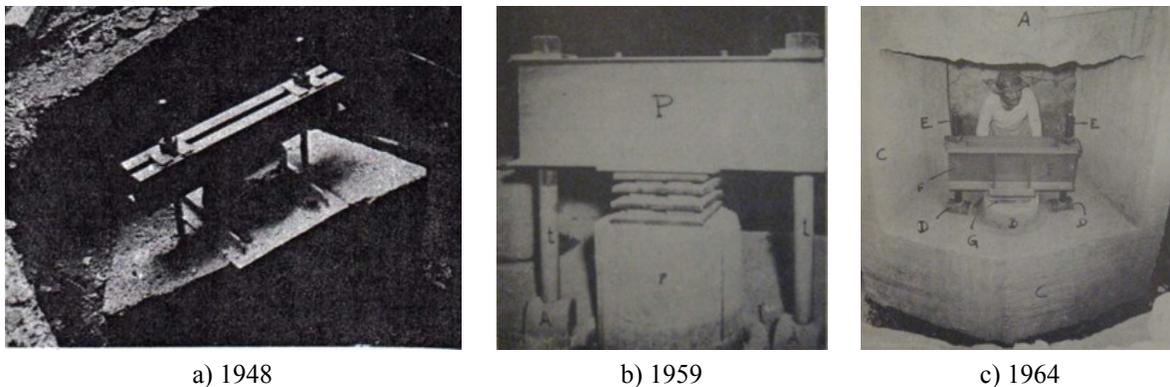


Figura 2.7 Marco de carga o cabezal: a) diseño original (González-Flores, 1948), b) primera mejora en el cabezal (González-Flores, 1959), y c) segunda mejora en el cabezal (González-Flores, 1964)



Figura 2.8 Sistema de control con mejoras adicionales después del sismo de 1985

La capacidad de carga de un cabezal está en función de sus dimensiones, del número de atiesadores y del espesor de los perfiles metálicos. Los marcos de carga con mayor uso son los de 980 y 1470 kN (100 y 150 t, respectivamente). Sin embargo, con la finalidad de incrementar la capacidad de carga del dispositivo de control, distintos ingenieros han creado otros marcos de carga tomando como base el diseño original de González-Flores. Ejemplo de ello, son:

- a) *Marco con cabezal doble*. Tiene una mayor resistencia a la compresión por lo que es posible transmitir mayor carga al pilote (Figura 2.9a).
- b) *Marco tipo STAG*. En este tipo de marco se elimina la rótula y se incrementa el número de espárragos de dos a cuatro (Figura 2.9b). El marco tipo STAG se ha empleado en varios edificios de la CDMX con celdas hidráulicas (Santoyo & Segovia, 1995) y con arreglos de cubos de madera.
- c) *Diseño de Aguilar* (Aguilar & Rojas, 1990). Es muy similar al marco propuesto por González-Flores (1948), pero en este caso los estabilizadores de concreto se sustituyen por estabilizadores de acero (Figura 2.9c) que se anclan rígidamente a la losa de cimentación mediante cuatro varillas, eliminando con ello la rótula.
- d) *Diseño de Tamez* (Santoyo & Alanís, 2013). A diferencia de los marcos de carga anteriores, está diseñado para emplear como celda de deformación tacones de neopreno de dureza controlada o arreglos de 8 x 7 cubos de madera (Figura 2.9d).



a) Cabezal doble



b) Tipo STAG



c) Diseño de Aguilar

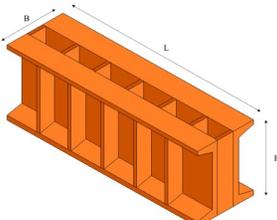
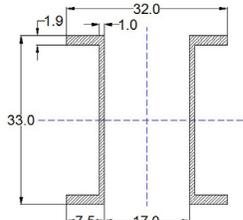
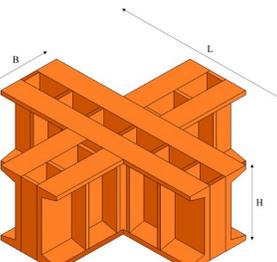
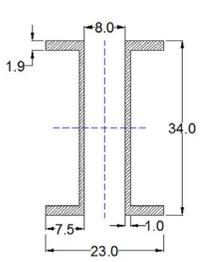
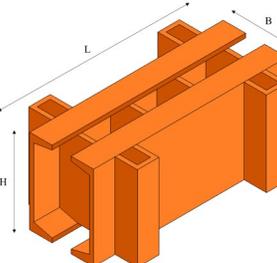
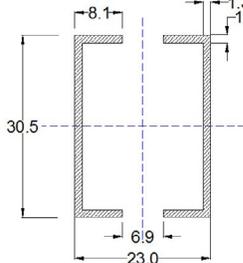


d) Diseño de Tamez (cortesía de TGC)

Figura 2.9 Otros tipos de marcos de carga o cabezales

Una serie de estudios se ha realizado para obtener la resistencia de distintos cabezales (Peña, Cruz, & Badajoz, 2016). En la Tabla 2.1 se presentan los tipos de cabezales evaluados, sus características físicas y la capacidad estructural aproximada obtenida en cada uno de ellos. Las capacidades de los elementos se obtuvieron de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2004). La capacidad de carga de cada marco está dada por la menor resistencia de sus componentes (cabezal, espárragos y sistema de anclaje) y no consideran factores de reducción. Las capacidades señaladas en esta tabla constituyen una guía de utilidad para el funcionamiento apropiado de este tipo de sistemas de control, que además de controlar asentamientos de la estructura ayudan a controlar carga. La capacidad de carga del marco debe ser congruente con la carga que se transmite al pilote, para que no esté subutilizado ni tampoco exceda la carga máxima aceptable que llegue a provocar la falla del marco. Para dar un mayor margen de seguridad es recomendable considerar un factor de reducción en las capacidades del sistema proporcionadas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Capacidad estructural de distintos tipos de cabezales (Peña *et al.*, 2016)

Esquema	Corte transversal	Largo L (m)	Ancho B (m)	Altura H (m)	Capacidad del sistema CS (t)
Cabezal tradicional					
		1.0	0.32	0.33	156.3
		0.85	0.23	0.33	189.8
		0.85	0.37	0.38	192.7
		0.75	0.22	0.33	192.7
		1.1	0.32	0.32	133.8
		0.84	0.23	0.33	192.5
Cabezal doble					
		0.85	0.33	0.34	385.3
		0.85	0.33	0.33	379.5
		0.55	0.33	0.33	364.0
Cabezal tipo STAG					
		0.7	0.23	0.31	158.2
		0.7	0.24	0.21	107.8

En 2010 una empresa dedicada a la recimentación, mantenimiento e intervención de los pilotes de control patentó un nuevo cabezal (Patent Núm. 328256, 2015) como una mejora del sistema de control tradicional. En esta modificación se sustituyó el cabezal sencillo por un cabezal triangular, con la finalidad de disminuir la excentricidad con respecto al pilote y evitar el momento de volteo en condición sísmica. Este nuevo diseño no considera la colocación de estabilizadores de concreto (Figura 2.10). No se tiene registro de que este cabezal haya sido utilizado en algún edificio de la Ciudad de México.

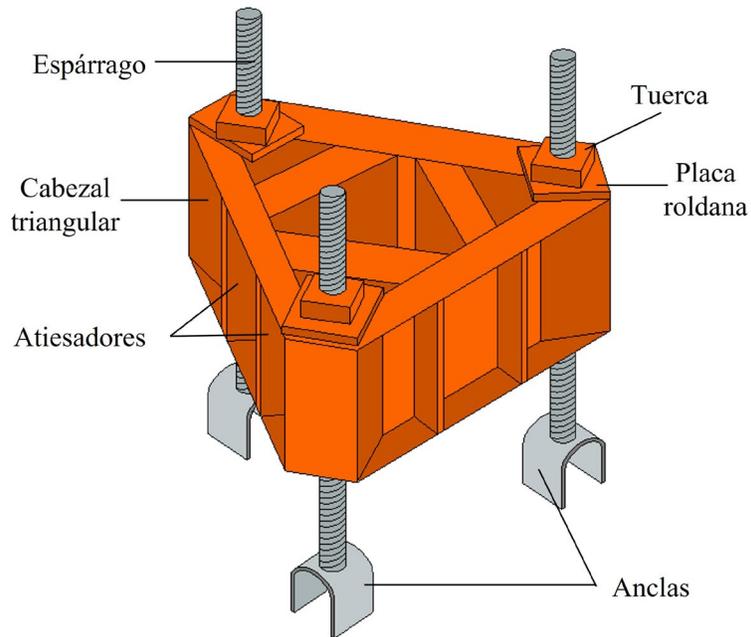


Figura 2.10 Marco de carga o cabezal triangular

2.2.3. Celdas de deformación

La celda de deformación se localiza entre la cabeza del pilote y el marco de carga. Es un elemento primordial del sistema de control, pues permite transmitir carga constante al pilote y a su vez, deformarse en igual magnitud que el hundimiento regional del sitio, permitiendo con ello el descenso del edificio y ayudando a mantener el contacto suelo-estructura.

El material ideal para una celda de deformación es aquel con un comportamiento elastoplástico perfecto, ya que una vez que alcanza su punto de fluencia, trabaja a carga constante. Originalmente, González-Flores propuso utilizar cubos de madera de *caoba* cuyo comportamiento mecánico (elastoplástico con endurecimiento) es similar al elastoplástico perfecto (Figura 2.11). Posteriormente, debido a la escasez y en especial al costo de la caoba, se cambió su uso por cubos de madera de *caobilla*, debido a la similitud de sus propiedades mecánicas y menor costo (López-Acosta & Martínez-Hernández, 2017a).

La *caoba* (*Swietenia cahany*) es un árbol de tamaño medio a alto que puede superar los 20 m de altura (Lamb, 1963). Existen tres tipos de caoba: (a) estadounidense (con distribución en EE. UU., Bahamas, Jamaica y Cuba), (b) africana (con distribución en África occidental y central) y (c) filipina (con distribución en Malasia, Indonesia y

las Filipinas). La caoba estadounidense fue la madera principal para la fabricación de muebles finos y la construcción naval en Europa en el siglo XVII (Ross, 2010). La caoba americana es apreciada por su alta durabilidad natural, estabilidad dimensional inusual, trabajabilidad, belleza (color marrón rojizo y alto brillo), textura fina y excelentes cualidades de acabado (Lamb, 1963). La caoba africana tiene propiedades y apariencia similares a la caoba americana y se usa para los mismos fines. La caoba filipina tiene una textura más gruesa y es la que se encuentra con mayor regularidad en el mercado debido a su precio más bajo (Ross, 2010).

La *caobilla* (*Swietenia humilis* Zuccarini) es un árbol caducifolio de tamaño pequeño a mediano de 15 a 20 m de altura (Schmidt & Joker, 2000). Tiene un tronco corto (a menudo torcido), un diámetro entre 30 y 50 cm y una corteza fisurada longitudinalmente de color gris oscuro o marrón oscuro (Orwa, Mutua, Kindt, Jamnadass, & Anthony, 2009). La *caobilla* crece en las zonas tropicales más secas de México (en los estados de Guerrero, Michoacán, Colima, Sinaloa, Oaxaca y Chiapas), también en Guatemala, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Haití, a altitudes inferiores a 1200 m (Blake, 1920; Gordon, Hawthorne, Sandoval, & Barrance, 2003; Segura-Correa *et al.*, 1993). La estructura anatómica de la *caobilla* es similar a la de la caoba (Panshin, 1933).

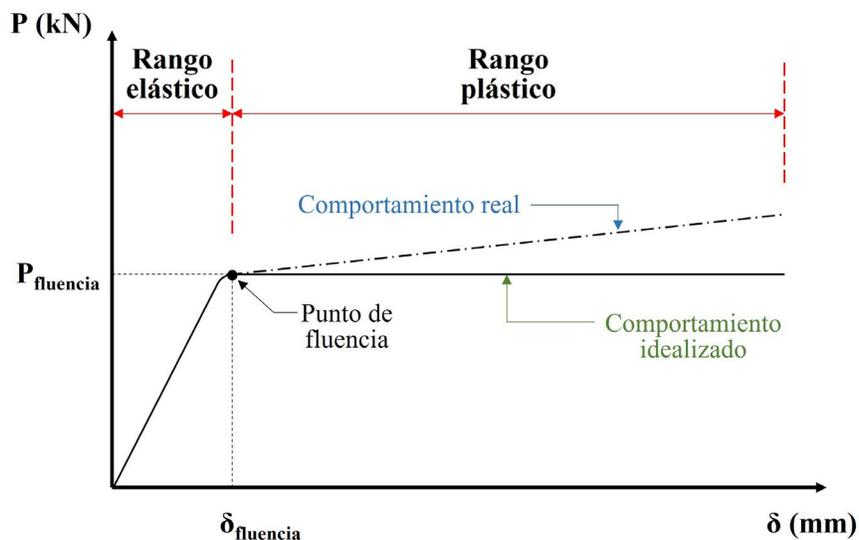


Figura 2.11 Comportamiento de una celda de deformación

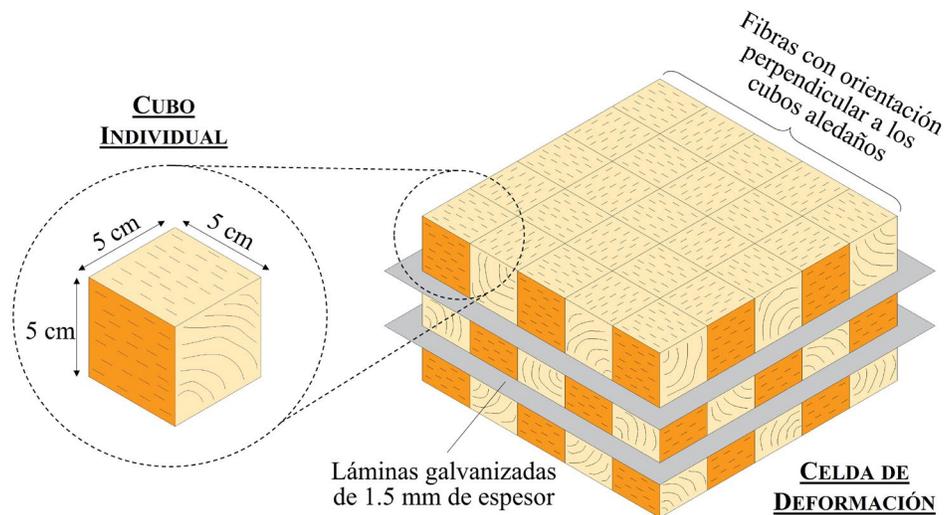


Figura 2.12 Cubo de madera individual y celda de deformación

Desde la concepción de los pilotes de control en 1948 a la actualidad, las celdas de deformación más utilizadas son las conformadas por arreglos de cubos de madera. Así, una celda de deformación de un sistema de control tradicional es un conjunto de cubos de madera de *caobilla* de 5 cm de lado dispuestos en tres niveles (Figura 2.12).

Debido principalmente a la dificultad del mantenimiento que requieren los dispositivos de control (el ambiente húmedo o inundado en las celdas de cimentación de los edificios corroe los elementos de acero del sistema y afecta el comportamiento mecánico de los cubos de madera, entre otros, ver Capítulo 6) se ha buscado sustituir la madera por otros materiales que requieran mantenimiento con menos regularidad, como el *neopreno de rigidez controlada* (Segovia, 2001) o los *cilindros poliméricos* con capacidades nominales de 490, 735 y 980 kN (50, 75 y 100 t, respectivamente) (López-Acosta & Martínez-Hernández, 2017b).

En la Figura 2.13a y Figura 2.13b se muestran las características geométricas del tación de neopreno y el cilindro polimérico, respectivamente. Asimismo, en los siguientes párrafos se proporcionan descripciones detalladas de los distintos materiales utilizados como celda de deformación.

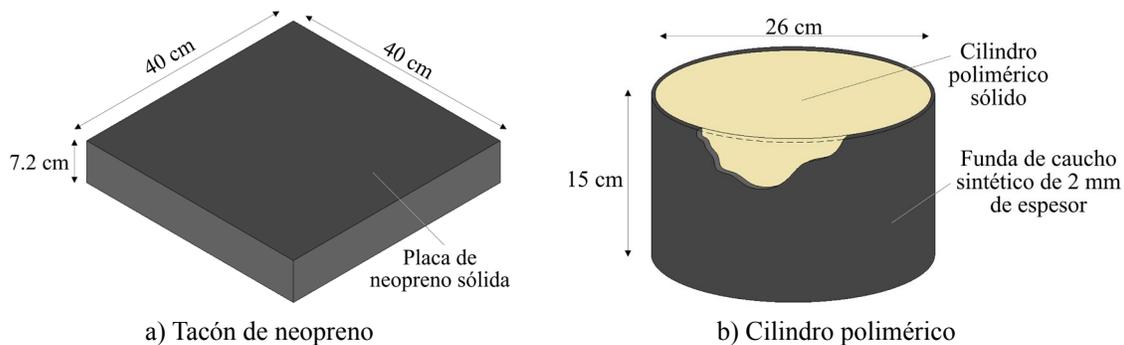


Figura 2.13 Celdas de deformación a base de otros materiales distintos a la madera

2.2.3.1 Arreglo de cubos de madera

Las celdas de deformación más utilizadas son las compuestas por un arreglo de tres niveles de cubos de madera de *caobilla*, cada nivel separado por una lámina de acero galvanizado (Figura 2.14). La cantidad de cubos es variable, según se desee suministrar mayor o menor carga a cada pilote. En la práctica, el número de cubos de un solo nivel determina la carga nominal de la celda de deformación, ya que dicho número multiplicado por la carga de fluencia media de un cubo proporciona la capacidad de todo el arreglo de cubos. El hecho de que las celdas de deformación estén constituidas generalmente por tres niveles es para dejar la posibilidad de que el pilote las aplaste o deforme contra el marco de carga o cabezal (hasta aproximadamente 4.5 cm), para posteriormente sustituir el arreglo deformado por uno nuevo (Martínez-Hernández, 2017). Considerando que los pilotes de control son fijos (pues son pilotes de punta apoyados en un estrato resistente), un edificio puede bajar o subir con respecto a ellos. Así, si la carga que se aplica en la cabeza de los pilotes se reduce (porque se disminuye el número de cubos) o se anula (cuando se liberan las tuercas de los espárragos o tornillos), el edificio puede descender debido al incremento en la presión aplicada a la masa de suelo a través de la losa o el cajón de cimentación. En caso contrario, cuando se incrementa la carga que se aplica en la cabeza de los pilotes (porque se aumenta el número de cubos) se restringe el movimiento del edificio. También es posible subir un edificio a un nivel deseado para corregir problemas de hundimientos diferenciales, empleando gatos hidráulicos colocados entre el marco de carga y los pilotes (ver Capítulo 9).

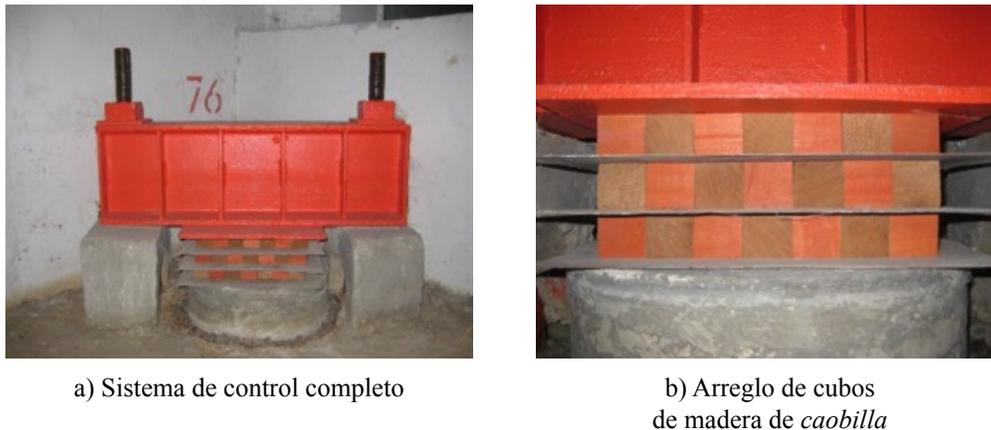


Figura 2.14 Sistema de control *in situ* con arreglo de cubos de madera de *caobilla*

2.2.3.2 Cilindros poliméricos

El cilindro polimérico es un elemento deformable hecho a base de resinas elastoméricas copolimerizadas, propuesto para su uso como celda de deformación en los sistemas de control (Patent Núm. 328256, 2015) (Figura 2.15). Los cilindros poliméricos tienen capacidades nominales de 490, 735 y 980 kN (50, 75 y 100 t). Los cilindros de 490 kN (50 t) equivalen aproximadamente a un arreglo de tres niveles de 5×4 cubos de madera, los de 735 kN (75 t) a un arreglo de tres niveles de 6×5 cubos, y los de 980 kN (100 t) equivalen a un arreglo de tres niveles de 7×6 cubos de madera. Los tres tipos de cilindros son homogéneos, macizos (sin huecos) y tienen las mismas dimensiones (diámetro medio de 26 cm, altura media de 15 cm, y una funda de caucho sintético de 2 mm de espesor; Figuras 2.13b y 2.15). De una muestra de 12 cilindros poliméricos (cuatro de cada una de las tres capacidades nominales mencionadas) se determinaron los pesos volumétricos medios del polímero siguientes: a) 6.53 kN/m³ en los cilindros de 490 kN, b) 7.23 kN/m³ en los cilindros de 735 kN, y c) 8.82 kN/m³ en los cilindros de 980 kN. Los cilindros poliméricos ya se han utilizado en algunos edificios de la Ciudad de México para reemplazar los cubos de madera (mantenimiento con intervención de rutina), y solamente en un caso se han utilizado para renivelar un edificio (mantenimiento con intervención especial) (Martínez-Hernández, 2017). Sin embargo, su comportamiento *in situ* no ha sido evaluado ni documentado.



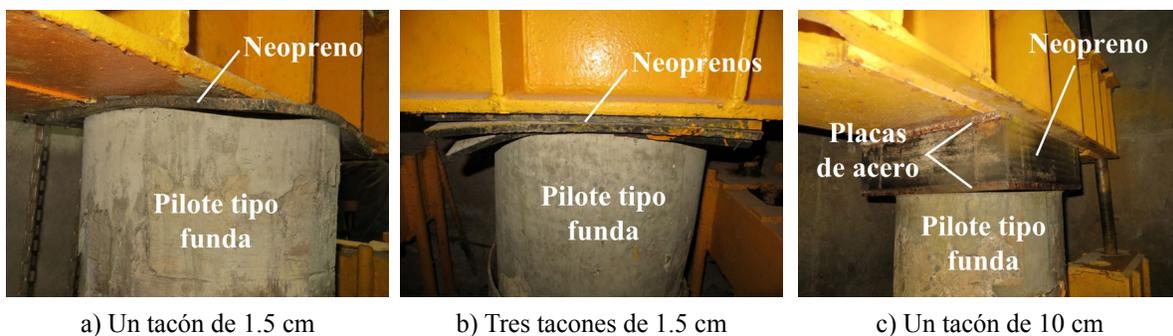
a) Sistema de control completo con cilindro polimérico

b) Detalle del cilindro polimérico

Figura 2.15 Pilote de control con cilindro polimérico en un edificio de la Ciudad de México

2.2.3.3 Tacones de neopreno

En la Ciudad de México existe un edificio histórico que utiliza tacones de neopreno como celda de deformación. Los dispositivos de control en esta edificación tienen marcos de carga tipo Tamez (Santoyo & Alanís, 2013). Los neoprenos empleados en estos dispositivos tienen más de 15 años sin sustituirse, lo que hace que en esta situación se controle solamente la carga y no las deformaciones o hundimientos diferenciales del edificio. Las características de este tipo de neopreno son las siguientes: acabado liso en ambas caras, resistencia a la tensión de 600 PSI (4.14 MPa), peso volumétrico de 14.5 kN/m³ y dureza 65° Shore A +/-5° (ASTM-D2240, 2015). Todos los elementos de neopreno utilizados son cuadrados de 40×40 cm, pero variables en espesor (Figura 2.16). Se desconoce la razón de dicha variación.



a) Un tacón de 1.5 cm

b) Tres tacones de 1.5 cm

c) Un tacón de 10 cm

Figura 2.16 Dispositivo de control con tacones de neopreno con distintos espesores en un edificio de la Ciudad de México

Por otra parte, en el norte del Estado de México existe un edificio industrial, cuyos pilotes de control también utilizan tacones de neopreno como celda de deformación. Este edificio (Figura 2.17a) fue recimentado con pilotes de control mediante la transformación de los pilotes de fricción existentes a pilotes de control (Orozco-Rivas & Mendoza-Pérez, 2017). Se desconoce si las propiedades mecánicas de estos neoprenos son similares a los utilizados en el edificio histórico que se describió en el párrafo anterior. Solamente se tiene documentado que los neoprenos son de geometría circular y su espesor es de aproximadamente 7.5 cm (Figura 2.17b).



a) Fachada sur



b) Dispositivo de control con neopreno circular

Figura 2.17 Edificio industrial con pilotes de control (Orozco-Rivas & Mendoza-Pérez, 2017)

3. Funcionamiento del dispositivo de control

La característica primordial de los pilotes de control es permitir que una edificación descienda simultáneamente con la superficie del suelo por efecto del hundimiento regional y así mantener el contacto suelo-estructura (Juárez-Badillo & Rico, 1967). De este modo, los esfuerzos generados por la edificación se transmiten al suelo, es decir que, parte de la carga de la estructura es soportada por el suelo, y la otra parte por los pilotes de control.

Para lograr que la estructura descienda en correspondencia con el hundimiento regional, los pilotes deben *penetrar* de manera aparente a través de la losa de fondo del cajón de cimentación del edificio. Esta penetración aparente depende de varios factores: a) los relacionados con el subsuelo del sitio (hundimiento regional y capacidad de carga del suelo), y b) los relacionados con el comportamiento de la edificación (hundimientos diferenciales o desniveles y desplomos del edificio). Con base en estos factores se calcula la carga de trabajo de cada pilote, misma que es equivalente a la carga de fluencia del arreglo de cubos.

Es importante tomar en cuenta que, si la estructura tiende a descender más rápido con respecto a la superficie del suelo (hundimiento regional), los pilotes de control experimentan un incremento de carga y, por tanto, los cubos de madera del arreglo se deforman. Por lo anterior, se debe incrementar el número de cubos para limitar la deformación de los mismos y restringir el descenso de la estructura. Contrariamente, si la estructura tiende a una emersión aparente, es necesario disminuir la carga en la cabeza de los pilotes para transmitir mayor carga al cajón de cimentación, de modo que el asentamiento de la estructura se acelere (Juárez-Badillo & Rico, 1967).

Como se observa en la Figura 3.1, durante el proceso de descenso de la estructura, los pilotes penetran a través de la losa del cajón de cimentación y deforman verticalmente los cubos de madera contra el cabezal (Figura 3.1). Esta deformación no debe exceder aproximadamente el 30 % de la altura inicial del arreglo (equivalente a 4.5 cm;

ver justificación en Inciso 6.1.2), ya que puede generarse una sobrecarga en el cabezal y provocar la falla del mismo o dañar algunos componentes del dispositivo de control, como los espárragos o anclas. Por lo anterior, la celda de deformación debe sustituirse cuando haya alcanzado una disminución en la altura inicial del arreglo de cubos de 4.5 cm, y si se requiere, se debe recortar la cabeza del pilote para que el cabezal y los estabilizadores conserven entre ellos una separación de aproximadamente 1 cm (Figura 3.1). Al sustituir la celda de deformación, es necesario precargar el pilote utilizando el sistema *doble puente*, que está conformado por un sistema hidráulico y un segundo cabezal (Figuras 3.2 y 3.3). La precarga permite al pilote contribuir al soporte inmediato del edificio.

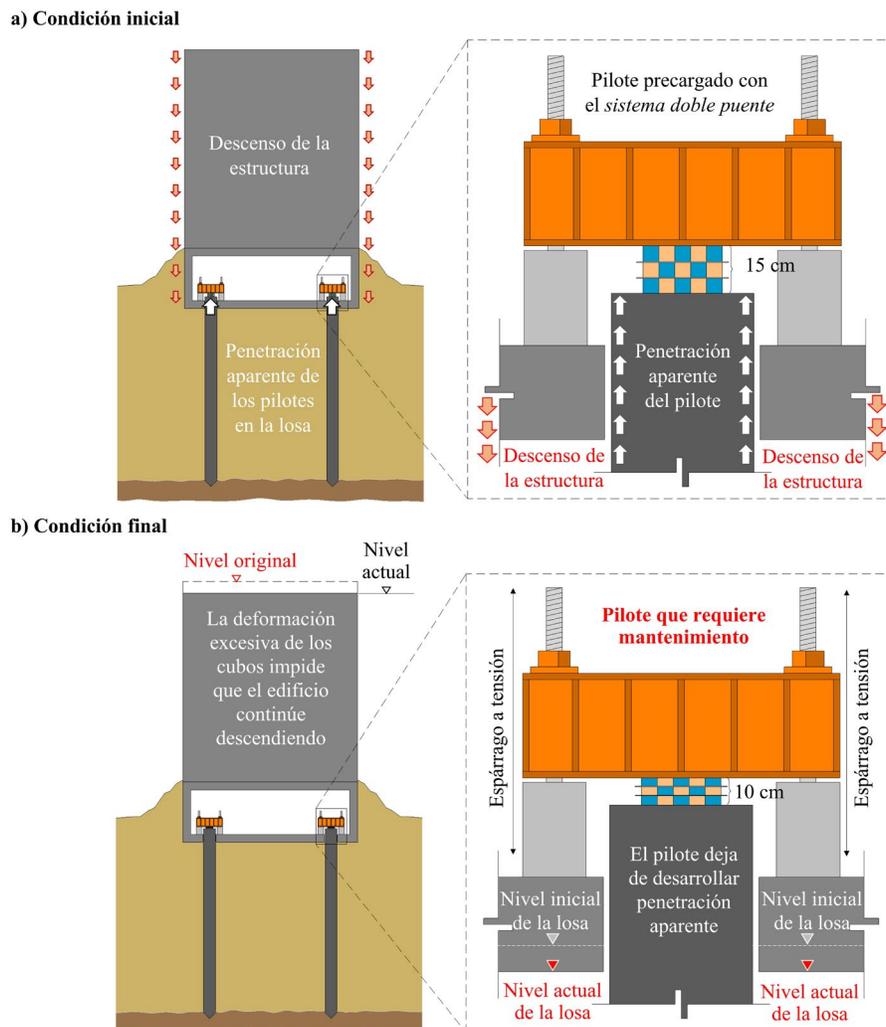


Figura 3.1. Funcionamiento de los pilotes de control



Figura 3.2. Sistema *doble puente* utilizado para precargar un pilote de control con cabezal sencillo (PICOSA, 2010)



Figura 3.3. Sistema *doble puente* utilizado para precargar un pilote de control con cabezal doble

4. Procedimientos de cimentación y recimentación con pilotes de control

En la Ciudad de México existen más de 700 edificios con cimentaciones a base de pilotes de control, entre los que destacan templos, hoteles, tanques de almacenamiento, iglesias, sitios y monumentos históricos, escuelas, edificios, entre otros. Este tipo de cimentación especial es reconocida y preferida por muchos geotecnistas mexicanos para tratar problemas de hundimientos diferenciales en los edificios, aun reconociendo el mantenimiento constante que requieren los pilotes de control durante la vida útil de las edificaciones. Los dispositivos de control no solamente se utilizan para recimentar edificios, sino que todavía en la actualidad se proponen como nueva cimentación en edificios por construirse. Tal es el caso de diversas edificaciones y tanques de almacenamiento que se concibieron como parte del Centro Aeroportuario de Servicios y del Almacén de Combustibles del que sería el Nuevo Aeropuerto Internacional de México (NAIM), cuya construcción se había proyectado en el antiguo Lago de Texcoco con un total de poco más de 3300 pilotes de control.

Las características de los edificios y las cargas que éstos transmiten al subsuelo son los factores que definen el número de pilotes de control a colocar en una cimentación. En la Tabla 4.1 se presenta un resumen del número de pilotes de control que tienen algunos edificios de la Ciudad de México que han sido recimentados con estos dispositivos.

La mayoría de las recimentaciones efectuadas en diversos edificios de la Ciudad de México se ha realizado mediante el hincado de nuevos pilotes de punta. Sin embargo, en algunos edificios la recimentación ha consistido en la transformación de pilotes existentes (de punta y de fricción) a pilotes de control. El procedimiento que se realiza en cada caso se explica a continuación.

Tabla 4.1 Resumen del número de pilotes de control instalados en la recimentación de algunos edificios de la Ciudad de México

Edificio	No. de Pilotes de control	Altura (m)
Consejo de la Judicatura Federal (10 edificios)	942	22.00
Reforma 476 (tres edificios)	632	53.30
Hospital General de Zona 1-A Los Venados	240	28.50
Hospital General Centro Médico Nacional La Raza	215	40.00
Estacionamiento Central Centro Médico Nacional Siglo XXI	157	9.00
Reforma 211	151	74.49
Hospital de Traumatología	144	33.00
Hospital de Ortopedia	143	28.00
Reforma 213	94	60.82
Hospital General de Zona 2-A Troncoso	93	25.50
Torre UNAM Tlatelolco	88	86.30
Tokio No. 80	78	33.50
Hospital de Ginecología y Obstetricia 3-A	67	28.00
Reforma Anexo 213	36	21.79
Escuela Comercial de la Ciudad de México	26	24.30

El tiempo de los trabajos de recimentación depende del número de pilotes de control a instalar, de los accesos existentes, del número de cuadrillas de trabajo, de la dimensión de la construcción y si los pilotes del sistema son nuevos o los pilotes existentes en la edificación se transforman a pilotes de control. Los trabajos de recimentación se realizan generalmente en un periodo de nueve a doce meses.

4.1. Hincado de nuevos pilotes de control

La recimentación efectuada en diversos edificios consiste en el hincado de nuevos pilotes dentro del cajón de cimentación de un edificio, siempre que exista el espacio suficiente para su instalación (Figura 4.1a). En caso contrario, es posible construir un nuevo cajón de cimentación pequeño (conformado por un dado y muros de concreto armado) debajo de la losa de fondo del cajón de cimentación existente (Figura 4.1b).

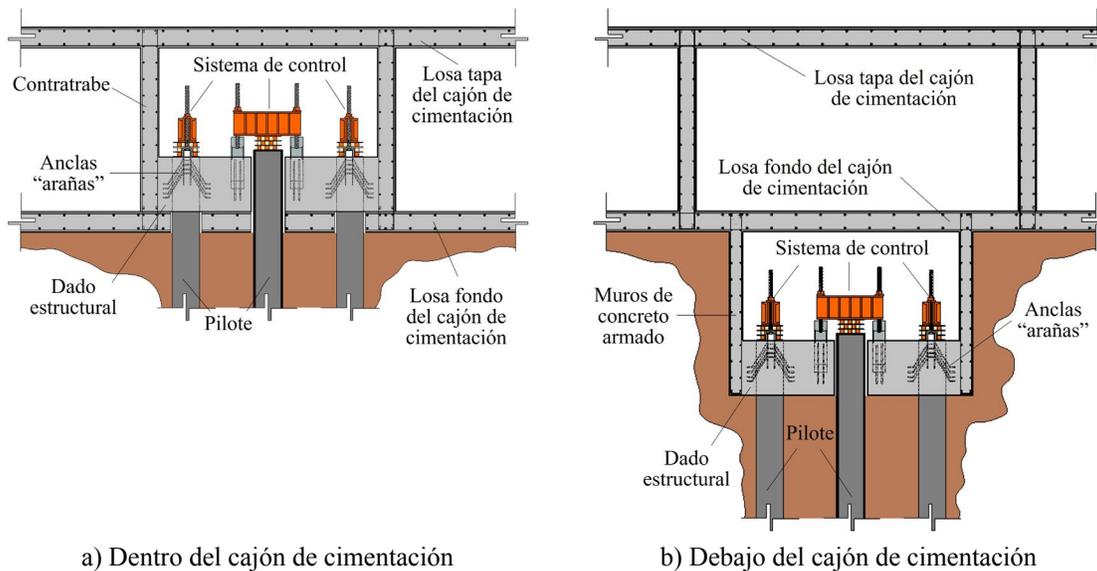
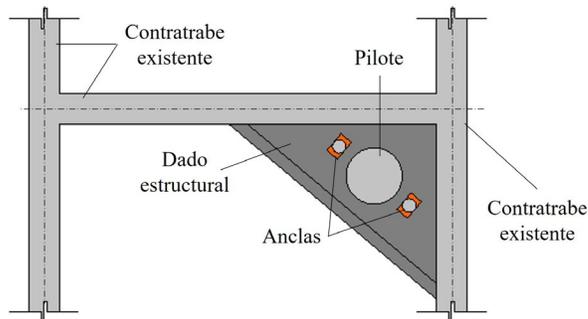


Figura 4.1. Ubicación de los sistemas de control (Martínez-Hernández, 2017)

Generalmente, los pilotes de control se colocan excéntricos a los ejes o columnas de un edificio cuando se trata de nuevos pilotes hincados. Para evitar una falla estructural en la zona circundante al pilote, es necesario construir un dado de concreto armado, ligado estructuralmente a las contratraves del cajón de cimentación. Los dados estructurales más empleados son de forma triangular, aunque también se utilizan los de forma cuadrada. La forma depende de varios factores, entre los que destacan: a) el espacio disponible, b) la distancia entre pilotes de control, y c) la carga de diseño del dado estructural. El dado triangular está ligado en cada extremo a una contratrabe (Figura 4.2). El dado cuadrado puede construirse de la misma forma, aunque en algunos casos se requiere de una pequeña contratrabe longitudinal ligada en cada extremo a las contratraves existentes y una más que va del centro a la tercera contratrabe ya existente, como se muestra en la Figura 4.3. En ambos casos, las anclas del sistema de control (Figura 4.4a) se colocan durante el habilitado del armado del dado estructural (Figura 4.4b) y posteriormente, se realiza el colado del mismo (Figura 4.4c).

Para ayudar a la verticalidad de los pilotes tipo *Mega* (hincados a presión por tramos), se realiza una perforación previa al hincado (Figura 4.5). Una forma de evaluar la verticalidad del pilote es comparar la longitud hincada (tomada de los registros de hincado del pilote) con la longitud de la perforación y con la profundidad a la que se

encuentra el estrato resistente (obtenida mediante exploración geotécnica en el sitio de interés). Cuando el espacio existente es reducido, se utiliza un equipo de perforación rotatorio de 2 m de altura. La perforación debe realizarse después de que el concreto de los dados estructurales haya alcanzado su resistencia máxima.

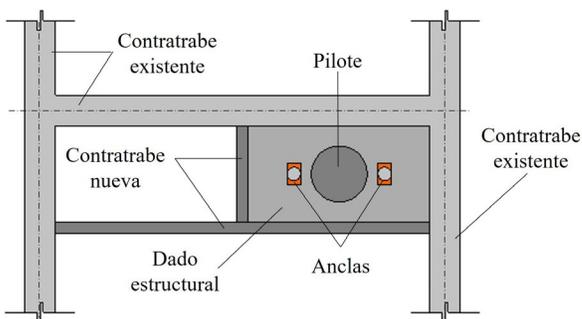


a) Esquema en planta



b) Construcción en sitio (PICOSA, 2010)

Figura 4.2. Dado estructural de forma triangular (excéntrico a los ejes del edificio)



a) Esquema en planta



b) En sitio

Figura 4.3. Dado estructural de forma cuadrada con contratraveses nuevas



a) Anclas con rótula



b) Colocación de anclas en el armado



c) Colado de dado estructural

Figura 4.4. Anclaje del sistema de control como parte de la construcción de un dado estructural



a) Equipo de perforación



b) Broca para perforación

Figura 4.5. Perforación previa al hincado de pilotes

Los pilotes a instalarse en espacios con altura restringida pueden fabricarse previamente en tramos de 91 cm (pilote tipo *Mega*, Figura 4.6) e hincarse en el lugar con equipo de presión hidráulica (Figura 4.7) utilizando como reacción un marco de carga (en el pasado se llegó a utilizar lastre). Ha sido una práctica común: a) hincar los pilotes hasta alcanzar una carga de 980 kN (100 t) suponiendo que con esta carga se garantiza apoyo en el estrato resistente, y b) colocar varillas (Santoyo & Segovia, 1995) en la parte cilíndrica hueca de los segmentos del pilote que, a su vez, se rellena con arena (Figura 4.7a). No obstante, hincar los pilotes con 980 kN (100 t) de carga no garantiza que queden apoyados en el estrato resistente. Una forma de verificar que los pilotes están apoyados en un estrato resistente es mediante pruebas de carga, o bien, comparando la longitud hincada del pilote (obtenida de los registros de hincado) con la profundidad a la que se encuentra el estrato resistente (profundidad obtenida en la exploración geotécnica del sitio). Por otra parte, la colocación de varillas en la parte central del pilote (tipo *Mega*) no garantiza su buen funcionamiento durante sismos intensos, pues este tipo de pilotes no son capaces de resistir tanto las fuerzas cortantes como las de tensión inducidas por momentos sísmicos. Una opción para que los pilotes puedan soportar fuerzas cortantes y de tensión ante eventos sísmicos es utilizar pilotes machimbrados con torones, los cuales al final del hincado, son postensados y dan mayor rigidez al elemento. Además, si se opta por hincar los pilotes antes de construir la cimentación y el propio edificio, éstos pueden hincarse a percusión o con presión hidráulica. Al hincarse los pilotes a presión y no utilizar el sistema tradicional a percusión, no se agrede al pilote por el golpe, ni se causan molestias ni daños a las construcciones colindantes (PICOSA, 2010).



a) Vista lateral

b) Vista en planta

Figura 4.6. Tramo de pilote de 91 cm de altura (pilote tipo *Mega*)



a) Colocación de pilote con varillas en el centro

b) Hincado de pilote a presión

Figura 4.7. Hincado de un pilote tipo *Mega* con equipo de presión hidráulica

Después del hincado de los pilotes, se monta el marco de carga o cabezal y se coloca la celda de deformación. Posteriormente, se precarga el pilote con el sistema *doble puente*, para que el pilote contribuya de inmediato al soporte del edificio (Figura 4.8).



Figura 4.8. Sistema *doble puente* con equipo hidráulico utilizado para precargar un pilote de control con cabezal tradicional

Es importante garantizar la verticalidad de los pilotes tipo *Mega* hincados a presión por tramos, pues cabe la posibilidad de que durante la instalación se inclinen involuntariamente. En la Figura 4.9 se presenta una interpretación esquemática del estado de los pilotes de control instalados durante la recimentación de un edificio en la Ciudad de México. Con base en los registros de hincado (pilotes tipo *Mega* hincados a presión por tramos de 91 cm), la interpretación estaría indicando variaciones importantes de la profundidad del supuesto estrato resistente (capa dura), lo que geológicamente no es posible. En este caso, al parecer algunos de los tramos de los pilotes se inclinaron durante el hincado. Para prevenir lo anterior, se debe asegurar la correcta unión de los tramos de pilotes, así como, su verticalidad. El empleo de pilotes machimbrados-postensados (Figura 2.5b) puede ayudar a este fin.

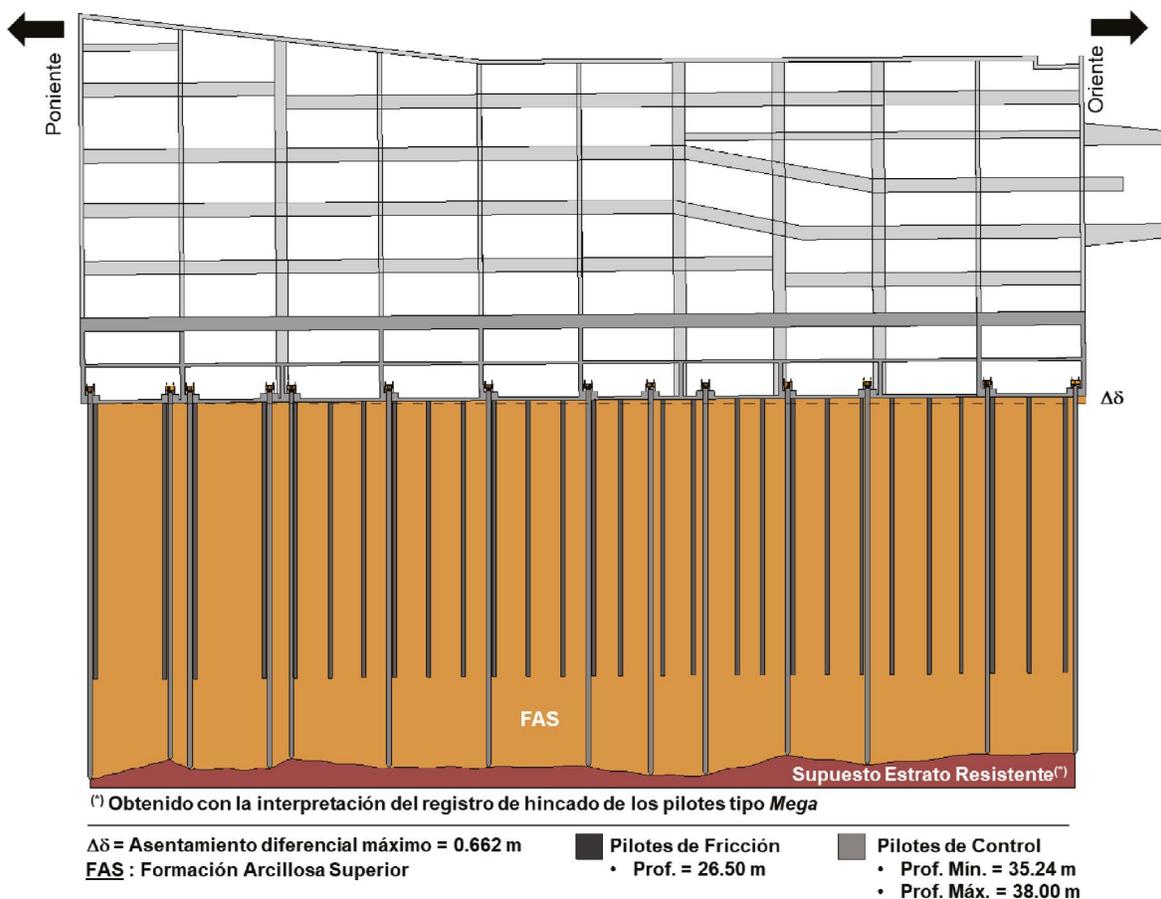


Figura 4.9. Interpretación de los registros del hincado de pilotes tipo *Mega* (a presión por tramos) en un edificio de la CDMX

4.2. Transformación de pilotes existentes a pilotes de control

Aunque un número importante de edificaciones en la Ciudad de México se han recimentado mediante el hincado de nuevos pilotes de punta, se sabe que es posible habilitar el sistema de control en los pilotes de punta existentes en un edificio, transformándolos así en pilotes de control. Actualmente se tiene conocimiento que el sistema de control también se ha implementado en pilotes de fricción. Algunos ejemplos son el Hospital Regional General Ignacio Zaragoza (dos torres de 8 y 10 niveles, respectivamente), la Unidad de Congresos del Centro Médico Nacional (cuerpo B de 6 niveles más planta baja), algunos tanques de almacenamiento de hidrocarburos en las instalaciones de ASA (Aeropuertos y Servicios Auxiliares) (López-Acosta & Martínez-Hernández, 2018a) y el conjunto de edificios del Palacio de Justicia Federal en San Lázaro (PICOSA, 2014a). Sin embargo, el comportamiento *in situ* de los pilotes de fricción transformados a pilotes de control no ha sido suficientemente evaluado y documentado a la fecha.

Para efectuar la recimentación aprovechando los pilotes existentes, es necesario construir un nuevo cajón de cimentación por debajo de la subestructura existente (sea losa de cimentación o cajón de cimentación) que permita tener contacto con los pilotes existentes y así poder realizar la transformación a pilotes de control. Para ello, se requieren ejecutar las siguientes actividades:

- a) Realizar la excavación por debajo de la subestructura existente (Figura 4.10) para tener contacto con los elementos estructurales (lecho inferior de la losa de cimentación, contratrabes y pilotes existentes).
- b) Una vez realizada la excavación, se coloca una plantilla de concreto (Figura 4.11).
- c) Para habilitar el armado del nuevo cajón de cimentación, es necesario retirar el recubrimiento en algunas zonas de las contratrabes para poder anclar el nuevo armado al ya existente (Figura 4.12). Hecho lo anterior, se habilita el armado del nuevo cajón de cimentación (Figura 4.13).

- d) Antes de realizar el colado del nuevo cajón de cimentación, se deben colocar las anclas con rótula a los costados de los pilotes existentes que serán transformados a pilotes de control. Posteriormente, se efectúa el colado de los elementos estructurales (Figura 4.14).
- e) Cuando el concreto haya alcanzado su resistencia máxima, se comienzan a desligar los pilotes existentes para transformarlos a pilotes de control (Figura 4.15).
- f) Una vez desligados los pilotes originales, se recortan a la altura apropiada y se realiza el *cabeceo* del pilote (Figura 4.16). El *cabeceo* se refiere a darle un acabado apropiado a la cabeza del pilote. Después se monta el marco de carga y se coloca la celda de deformación. Una vez habilitado todo el sistema de control (Figura 4.17), se precarga el pilote utilizando el sistema *doble puente*.

Cabe señalar que la transformación de los pilotes existentes a pilotes de control debe realizarse elemento por elemento (uno a la vez), o bien, los pilotes deben estar lo suficientemente alejados entre sí, de modo que se garantice la seguridad del personal y la estabilidad general del edificio en condiciones estática y sísmica.



a) Excavación manual

Figura 4.10. Proceso de transformación de pilotes existentes a pilotes de control (fotografías cortesía de PICOSA)



b) Colocación de plantilla de concreto



c) Retiro de recubrimiento en elementos estructurales



d) Habilitado de acero

Figura 4.10. (Continuación) Proceso de transformación de pilotes existentes a pilotes de control (fotografías cortesía de PICOSA)



e) Colado del nuevo cajón de cimentación



f) Desligue de pilotes existentes



g) Cabeceo del pilote existente

Figura 4.10. (Continuación) Proceso de transformación de pilotes existentes a pilotes de control (fotografías cortesía de PICOSA)



h) Pilote existente transformado a pilote de control

Figura 4.10. (*Continuación*) Proceso de transformación de pilotes existentes a pilotes de control (fotografías cortesía de PICOSA)

5. Tipos de mantenimiento y su importancia

Los pilotes de control requieren de un mantenimiento constante durante toda la vida útil de la estructura. Con el mantenimiento adecuado se logra un funcionamiento eficiente del sistema de control, que se refleja en el buen comportamiento de la edificación. Contrariamente, la falta de mantenimiento o el mantenimiento inapropiado en pilotes de control puede propiciar asentamientos diferenciales e inclinación en la edificación. La existencia de más de 700 edificios con cimentaciones a base de pilotes de control en la Ciudad de México ha obligado a establecer criterios para el mantenimiento de estos dispositivos, pues en la actualidad no existen lineamientos que establezcan las actividades que deben realizarse para dar mantenimiento a los pilotes de control ni con qué periodicidad debe efectuarse este mantenimiento.

En el presente capítulo se establecen los tipos de mantenimiento que se propone dar a los pilotes de control, las actividades a realizar en cada uno de ellos y los periodos en los que debe efectuarse. Estos tipos de mantenimientos se han clasificado en tres categorías:

- a) Mantenimiento preventivo
- b) Mantenimiento de rutina
- c) Intervención especial

Particularmente, el mantenimiento de rutina y la intervención especial deben realizarse por personal especializado y con experiencia en este tipo de dispositivos, para evitar un mantenimiento inadecuado que pueda derivar en un mal comportamiento de la estructura (asentamientos diferenciales, desplomos, etc.).

En la Figura 5.1 se muestra la clasificación de los tipos de mantenimiento en pilotes de control, las acciones a realizar y cuándo deben realizarse.

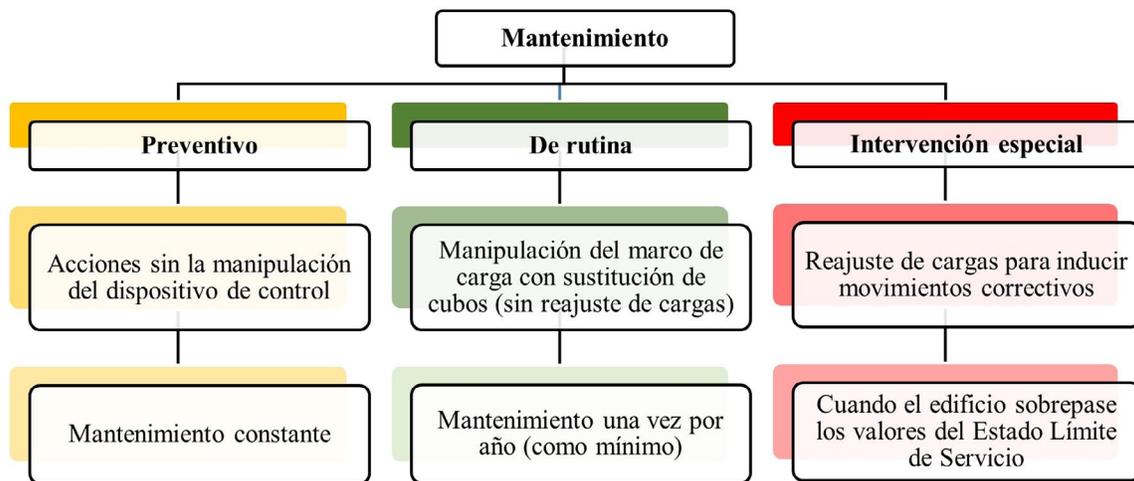


Figura 5.1. Clasificación de los tipos de mantenimiento en pilotes de control

5.1. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo tiene como finalidad prevenir el deterioro de los elementos que conforman el dispositivo de control. Este mantenimiento, que debe darse de forma constante, no involucra la manipulación del marco de carga (mover las tuercas), por lo que no genera una modificación en la carga del pilote. Las actividades a realizar en el mantenimiento preventivo se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Mantenimiento preventivo en los pilotes de control

Actividad	Descripción	Foto
1	Bombeo del agua infiltrada del nivel freático en los cajones de cimentación, para evitar el humedecimiento de los cubos y oxidación o corrosión de los elementos metálicos	

Actividad	Descripción	Foto
2	Aplicación de pintura anticorrosiva en el cabezal y las tuercas ^(*)	
3	Engrasado de espárragos o tornillos	
4	Retiro de <i>estopero</i> deteriorado y colocación de un nuevo estopero ^(*) . Nota: El estopero es un sello hidráulico a base de estopa y breá.	

^(*) Fotografía cortesía de PICOSA

5.2. Mantenimiento de rutina

Este mantenimiento consiste en manipular y retirar el marco de carga con la finalidad de sustituir los arreglos de cubos deformados o húmedos por un arreglo con el mismo número de cubos para no modificar la carga de trabajo del pilote. Además, en el mantenimiento de rutina también se efectúa el cambio de elementos del marco de carga que están deteriorados (espárragos o husillos y estabilizadores) y se retira el óxido de los elementos metálicos.

Se deben realizar nivelaciones topográficas del edificio antes y después del mantenimiento de rutina en los dispositivos de control, con la finalidad de dar seguimiento al comportamiento del edificio, particularmente, evaluar si existen hundimientos diferenciales y desplomos de importancia que ameriten una intervención especial del sistema.

Las actividades que se realizan en un mantenimiento de rutina se muestran en la Tabla 5.2. La periodicidad de este mantenimiento depende principalmente de la velocidad del hundimiento regional del primer estrato arcilloso (la FAS, Formación Arcillosa Superior), puesto que los pilotes de punta al estar apoyados en un estrato resistente (Capa Dura) propician que los cubos de madera se deformen de acuerdo con la velocidad del hundimiento de la FAS (ver Figura 2.2a) del sitio de interés.

La velocidad de hundimiento regional es variable dependiendo de la zona de la Ciudad de México. Por ejemplo, en la zona del Ex-lago de Texcoco (al noreste de la CDMX) se ha medido recientemente una velocidad de hundimiento regional de la FAS de 4.5 cm por año (Mendoza *et al.*, 2018).

Otros factores que influyen en la periodicidad del mantenimiento son la estanqueidad de las celdas de cimentación, la modificación de las cargas en un edificio (porque se modifican los usos de ciertas áreas con transmisión de cargas distintas para las que fueron diseñados), etc.

En un número importante de edificios de la Ciudad de México, el mantenimiento a los dispositivos de control debe darse al menos una vez al año.

Tabla 5.2. Mantenimiento de rutina en los pilotes de control

Actividad	Descripción	Foto
1	Descargar el pilote de control utilizando el <i>sistema doble puente</i> para poder aflojar las tuercas.	
2	Desmontar el sistema de control (cabezal, cubos deformados y espárragos) (*).	

Actividad	Descripción	Foto
3	Limpieza para retirar óxido y pintura de los espárragos y cabezal.	
4	Sustitución de espárragos o tornillos con la cuerda desgastada, o que tengan más de 20 años sin sustituirse.	
5	Aplicación de pintura anticorrosiva en el cabezal.	
6	Retiro de estopero deteriorado y colocación de un nuevo estopero.	
7	Recorte del pilote cuando éste haya penetrado más de 15 cm la losa de fondo del cajón de cimentación ^(*) .	

Actividad	Descripción	Foto
8	<p>Cabeceo del pilote^(*). El <i>cabeceo</i> se refiere a darle un acabado apropiado a la cabeza del pilote, después de su recorte.</p>	
9	<p>Cambio de estabilizadores de concreto deteriorados por estabilizadores nuevos.</p>	
10	<p>Montaje del marco de carga: espárragos engrasados, cabezal y tuercas (sin apretar)^(*).</p>	
11	<p>Colocación del arreglo de tres niveles con el mismo número de cubos del arreglo anterior (para no modificar la carga de trabajo del pilote)^(*).</p>	
12	<p>Precarga del pilote de control utilizando el sistema <i>doble puente</i> hasta alcanzar la carga de fluencia del arreglo de cubos (celda de deformación)^(*).</p>	

^(*) Fotografía cortesía de PICOSA

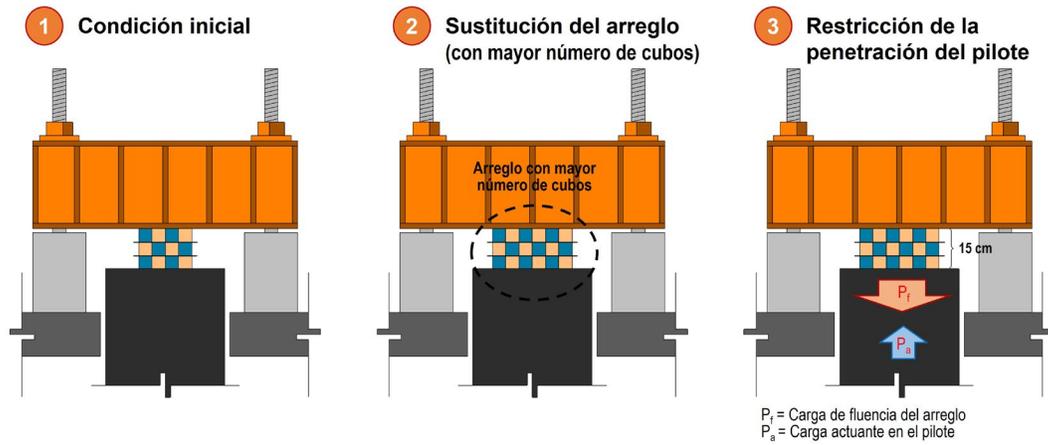
5.3. Intervención especial

La intervención especial tiene como finalidad generar movimientos correctivos en las edificaciones mediante el reajuste de cargas en los pilotes. Este reajuste se realiza modificando el número de cubos de los arreglos (celdas de deformación) o a través de la manipulación de las tuercas del marco de carga. Con lo anterior, es posible:

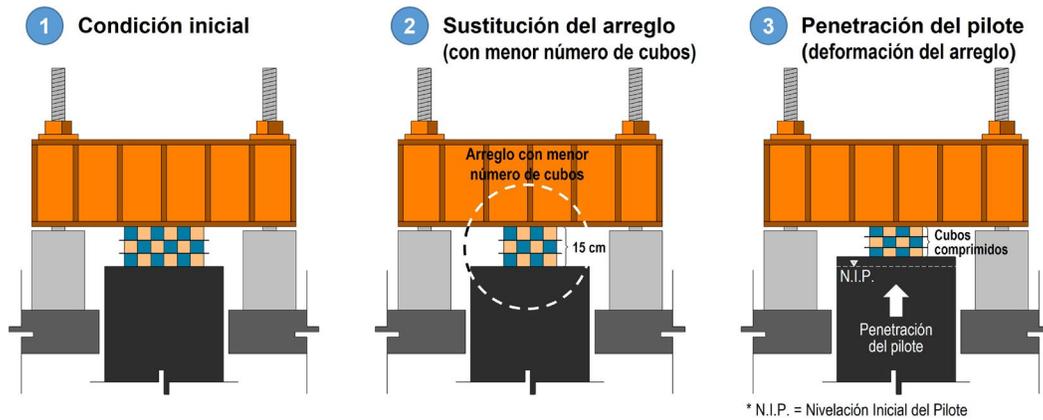
- Restringir la penetración aparente del pilote en la losa de fondo del cajón de cimentación, impidiendo el desplazamiento vertical descendente de la estructura.
- Permitir la penetración aparente del pilote con mayor facilidad para generar el descenso de la estructura.

La restricción a la penetración aparente del pilote en la losa se logra mediante el aumento del número de cubos en el arreglo. De esta forma, se incrementa la resistencia a la compresión del arreglo impidiendo así la penetración aparente del pilote (Figura 5.2a). Contrariamente, la penetración aparente del pilote se puede lograr mediante: a) la reducción del número de cubos del arreglo para permitir una deformación mayor aplicando menor carga (Figura 5.2b), y b) la liberación de las tuercas del marco de carga (Figura 5.2c). Disminuir el número de cubos del arreglo es poco usual, ya que la penetración aparente del pilote se lleva a cabo en meses (incluso, años). Además, se debe tener cuidado de proveer la cantidad suficiente de cubos en el arreglo para que éste funcione como un fusible en caso de sismo y así evitar daños en el marco de carga. Por lo anterior, es importante que cualquier reajuste de cargas en los pilotes de control esté apoyado en diseños específicos tanto geotécnico como estructural por parte de un consultor especializado con experiencia en el funcionamiento de pilotes de control.

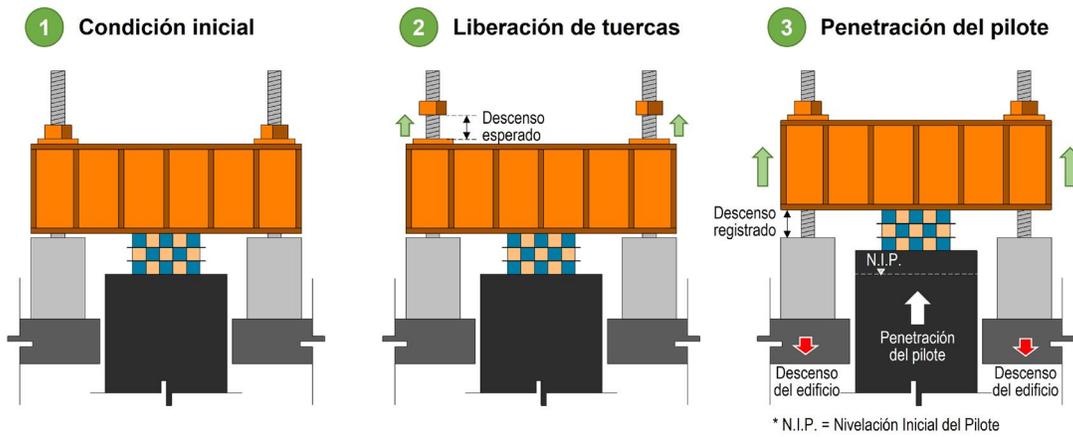
Adicionalmente, es necesario realizar nivelaciones topográficas antes, durante y después de la intervención especial de los pilotes de control, para dar seguimiento al comportamiento del edificio, y también como un apoyo en la toma de decisiones para la modificación del número de cubos de la celda de deformación (cuando los hundimientos diferenciales y desplomos excedan los límites admisibles señalados en las Normas vigentes (NTCDCC, 2017)).



a) Restricción de la penetración aparente del pilote aumentando el número de cubos de la celda de deformación



b) Penetración aparente del pilote disminuyendo el número de cubos de la celda de deformación



c) Penetración aparente del pilote aflojando las tuercas del marco de carga

Figura 5.2. Intervención especial

La mayoría de las renivelaciones efectuadas en edificios de la Ciudad de México se han realizado mediante la liberación de las tuercas del dispositivo de control, complementando el proceso con ayuda de *subexcavación*. Lo anterior, permite disminuir el tiempo requerido para la renivelación. La *subexcavación* es una técnica que consiste en retirar secciones de suelo ubicado debajo de la cimentación para inducir asentamientos controlados en la estructura (Figura 5.3). El término *subexcavación* fue asignado por el ingeniero italiano Fernando Terracina (Santoyo & Santoyo, 2013). El caso más simbólico conocido sobre la aplicación de esta técnica en México es el de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México (Aguilera-Jiménez, 2013). Sin embargo, para demostrar su viabilidad, la *subexcavación* se utilizó previamente en la Iglesia de San Antonio Abad (Santoyo & Ovando, 2008). También se tiene registro que esta técnica era usada por el ingeniero González-Flores mucho antes de que se acuñara el término *subexcavación* (Santoyo & Santoyo, 2013).

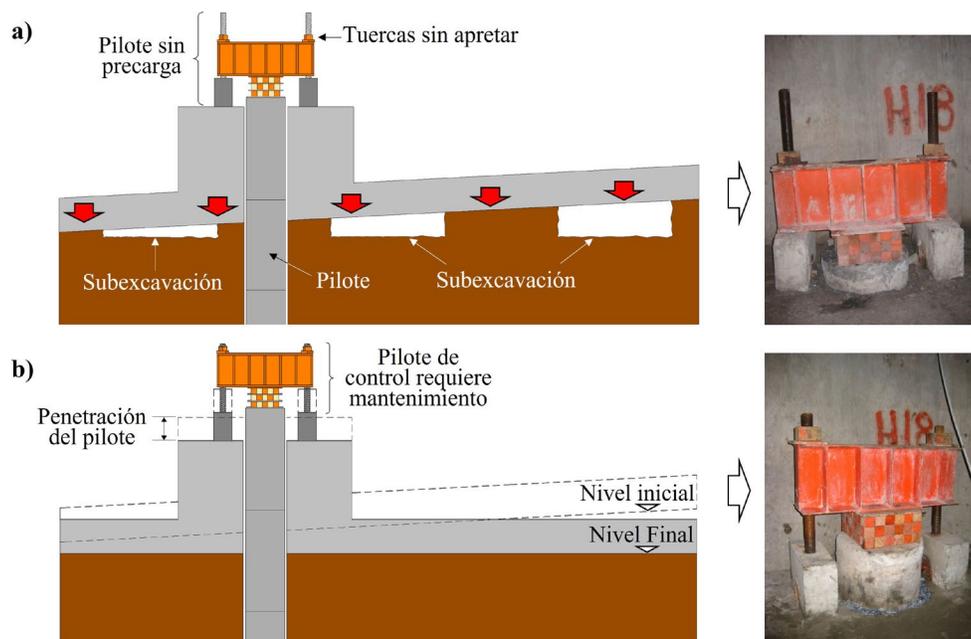


Figura 5.3 Proceso de *subexcavación*: a) condición inicial y b) después de aplicar la técnica de *subexcavación*

La subexcavación puede realizarse de forma manual o mecánica con equipo especial (Figura 5.4). La *subexcavación manual* (también llamada localmente *covacheo*) consiste en hacer huecos (de dimensiones variables: ancho, alto y profundidad) mediante el uso de palas.

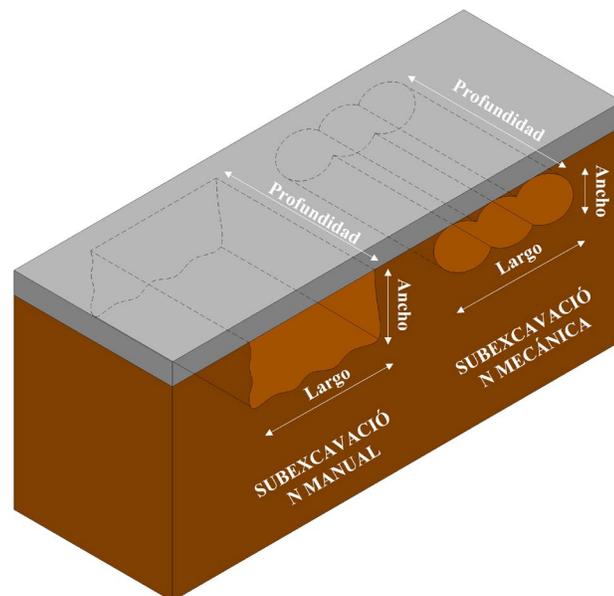
La *subexcavación mecánica* consiste en hacer horadaciones con equipo mecánico especial (rotor e hidrotopo) en la periferia de la estructura o en lumbreras. El uso de una técnica u otra depende de las dimensiones de acceso, del espacio disponible y de las propiedades del suelo. Asimismo, las propiedades mecánicas del suelo y el asentamiento que se desea inducir, son parámetros que definen el volumen de suelo a retirar. Es importante que para la aplicación de esta técnica se garantice la seguridad del edificio y del personal que la realiza, pues si no se tiene cuidado de controlar los movimientos verticales durante la renivelación, se corre el riesgo de que ocurran asentamientos súbitos de importancia. Los pilotes de control ayudan a controlar estos desplazamientos verticales. Adicionalmente, el personal que realice la subexcavación debe ser especializado y las propiedades mecánicas del suelo deben permitir la aplicación de la técnica.



a) Manual con pala
(cortesía de PICOSA)



b) Mecánica con hidrotopo
(Santoyo & Santoyo, 2013)



c) Esquema representativo

Figura 5.4 Tipos de *subexcavación*

5.4. Dispositivos carentes de mantenimiento y con mantenimiento inadecuado

El mantenimiento de los pilotes de control tiene un papel primordial en el comportamiento de los edificios. Por tanto, debe reconocerse que los edificios con pilotes de control en sus cimentaciones implican la necesidad de efectuar labores de mantenimiento periódicas durante toda la vida útil del edificio. Es común que, en las edificaciones se realicen mantenimientos inadecuados de los sistemas de control (Figura 5.5), los cuales, generalmente se deben a una incomprensión y desconocimiento del funcionamiento y comportamiento del propio sistema.

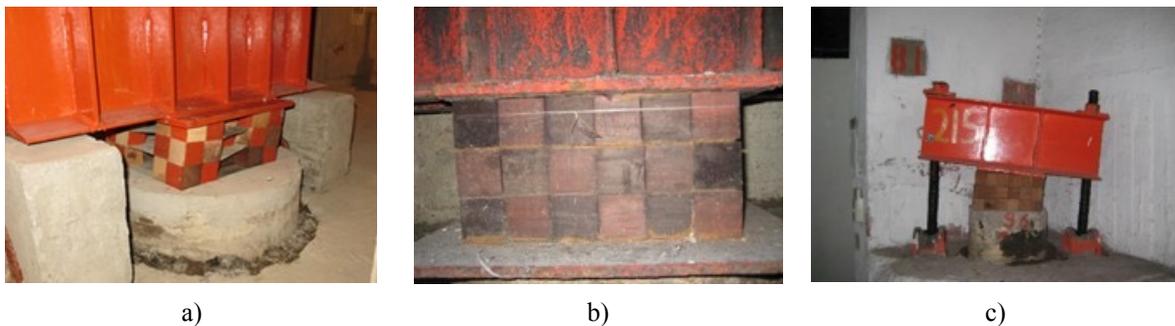


Figura 5.5 Celdas de deformación en edificios de la CDMX con un mantenimiento inadecuado: a) arreglo con cubos espaciados; b) arreglo sin láminas galvanizadas; c) liberación de tuercas en la zona con mayor asentamiento diferencial

Al igual que el mantenimiento inadecuado, la falta de mantenimiento en los dispositivos de control (Figura 5.6) puede propiciar un incremento considerable tanto en los asentamientos diferenciales como en los desplomos de un edificio. En la Ciudad de México existen diversos edificios con severos problemas de desplomos ocasionados por la falta de mantenimiento en los pilotes de control. En la Figura 5.7 se ilustra la historia de desplomos de un edificio ubicado en la Zona III Lacustre de la CDMX (NTCDCC, 2017) que tuvo un periodo de dos años y medio sin mantenimiento en sus pilotes de control. Como resultado, el edificio registró un incremento en los desplomos con dirección al oriente de aproximadamente 25 cm. Con lo anterior, se ratifica la relevancia de dar mantenimiento a los pilotes de control y se deja en claro que cuando no

se da este mantenimiento, las consecuencias repercuten esencialmente en el aumento de hundimientos diferenciales y desplomos en los edificios, en condición estática y, además aumenta su vulnerabilidad ante acciones sísmicas.

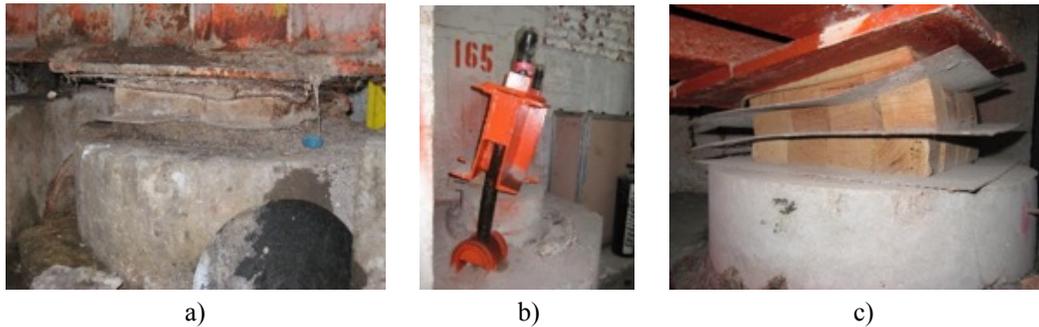


Figura 5.6 Dispositivos de control sin mantenimiento: a) cabezal oxidado y cubos húmedos deformados en exceso; b) cabezal inclinado; c) cubos con deformación excesiva

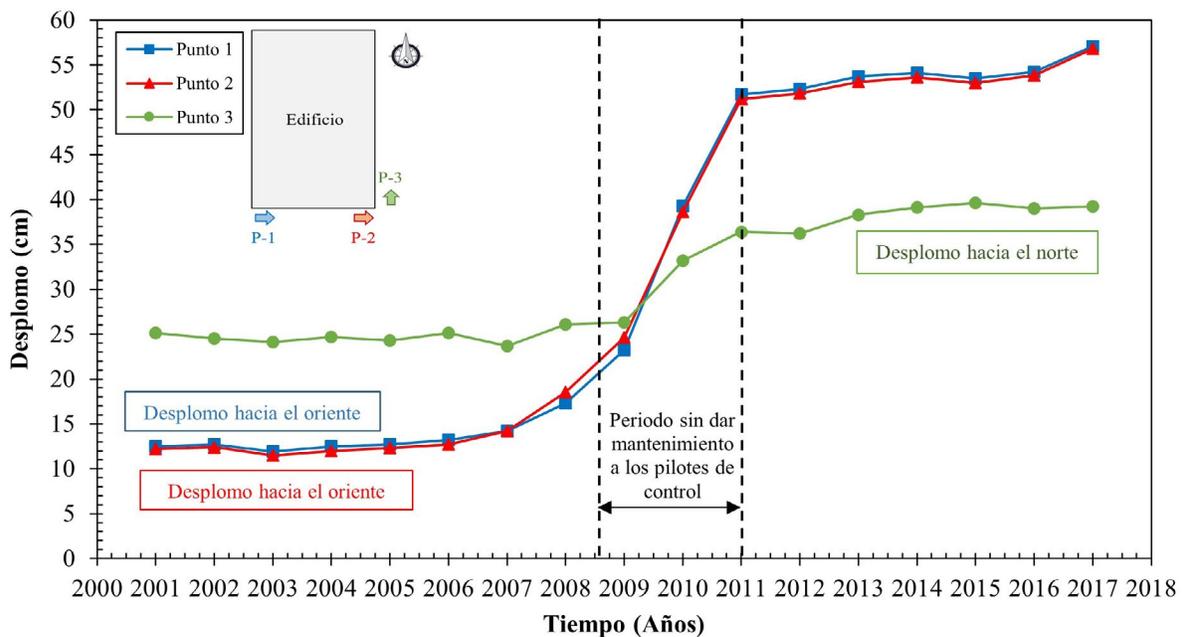


Figura 5.7 Historia de desplomos de un edificio ubicado en la Zona III Lacustre de la CDMX

Otro problema muy común relacionado con el mantenimiento preventivo, es la falta de bombeo del agua freática que generalmente se acumula en las celdas de cimentación (Figura 5.8a). En efecto, el agua freática se infiltra a las celdas de cimentación de los edificios

a través de grietas, o bien, a través de pilotes sin estopero (Figura 5.8b) o con estopero dañado debido al movimiento relativo entre el pilote y la losa (el estopero tiene como función impedir la filtración de agua del subsuelo a la celda de cimentación). El agua o simplemente un ambiente húmedo afectan el comportamiento mecánico de los cubos de madera de los dispositivos de control, pues reduce su carga de fluencia hasta aproximadamente un 50 %. Esta debilidad en los cubos de madera puede generar una sobrecarga en el marco de carga y propiciar la falla de los cabezales o espárragos, o bien, de las anclas (Figura 5.9a), lo que hace necesaria la sustitución de todo el sistema de anclaje (Figura 5.9b).



Figura 5.8 Pilote de control en un ambiente húmedo: a) cubos húmedos; b) pilote de control sin estopero (sello hidráulico a base de estopa y brea)



Figura 5.9 Pilote de control en condiciones severas de abandono (cortesía de G. Verano): a) condición inicial, y b) condición final (después de una intervención especial)

6. Evaluación de celdas de deformación de distintos materiales

Para evaluar el comportamiento mecánico de los distintos materiales utilizados como celdas de deformación en los pilotes de control (Figura 6.1), se efectuaron pruebas de compresión en: a) cubos de madera (individuales y en conjunto), b) cilindros poliméricos de 490, 735 y 980 kN (50, 75 y 100 t, respectivamente), y c) tacones de neopreno. Los ensayos se realizaron en la máquina universal con capacidad de 2452 kN del Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Los resultados obtenidos en los ensayos en cada material se describen en los párrafos siguientes.



Figura 6.1 Celdas de deformación ensayadas en laboratorio

6.1. Cubos de madera

6.1.1. Pruebas realizadas

Los cubos de madera de *caobilla* ensayados tienen 5 cm de lado y se obtienen del duramen del árbol de *caobilla*. El peso volumétrico γ de estos cubos presentó una variabilidad considerable, con un valor máximo de 7.66 kN/m³ y mínimo de 4.06 kN/m³ (López-Acosta

& Martínez-Hernández, 2018b). Esta variabilidad es producto de la heterogeneidad natural típica de la madera (Vidal, Velásquez, Toro, & Gómez, 2011), cuyo peso volumétrico depende de varios factores, entre ellos: a) la parte del árbol donde se obtienen los cubos (base del tronco, copa del árbol, albura o duramen), b) la edad del árbol, c) su forma, d) diferencias genéticas, e) tasa de crecimiento, e f) historia evolutiva (de Kort, Loeffen, & Baas, 1991; Gordon *et al.*, 2003; Pittermann, Sperry, Wheeler, Hacke, & Sikkema, 2006; Zobel & Talbert, 1984). Factores externos como la luz, el suelo, la humedad y la temperatura también pueden influir en este parámetro (Dalla-Salda, Martinez-Meyer, Cochard, & Rozenberg, 2009; Jane, 1970). El análisis estadístico de una muestra de 665 cubos de madera de *caobilla* proporcionó el histograma de pesos volumétricos que se muestra en la Figura 6.2a. El peso volumétrico medio es $\bar{\gamma} = 5.59 \text{ kN/m}^3$ y la desviación estándar es $s_{\gamma} = 0.56 \text{ kN/m}^3$. A partir de esta información, los cubos se clasificaron en tres tipos: a) cubos estándar con peso volumétrico en el intervalo $\bar{\gamma} \pm s_{\gamma}$ (i.e. $5.03 < \gamma < 6.15 \text{ kN/m}^3$), b) cubos pesados con peso volumétrico mayor que $\bar{\gamma} + s_{\gamma}$ (i.e. $\gamma > 6.15 \text{ kN/m}^3$), y c) cubos ligeros con peso volumétrico menor que $\bar{\gamma} - s_{\gamma}$ (i.e. $\gamma < 5.03 \text{ kN/m}^3$). La Figura 6.2b muestra los diagramas de caja de los pesos volumétricos obtenidos en los cubos pesados, estándar y ligeros.

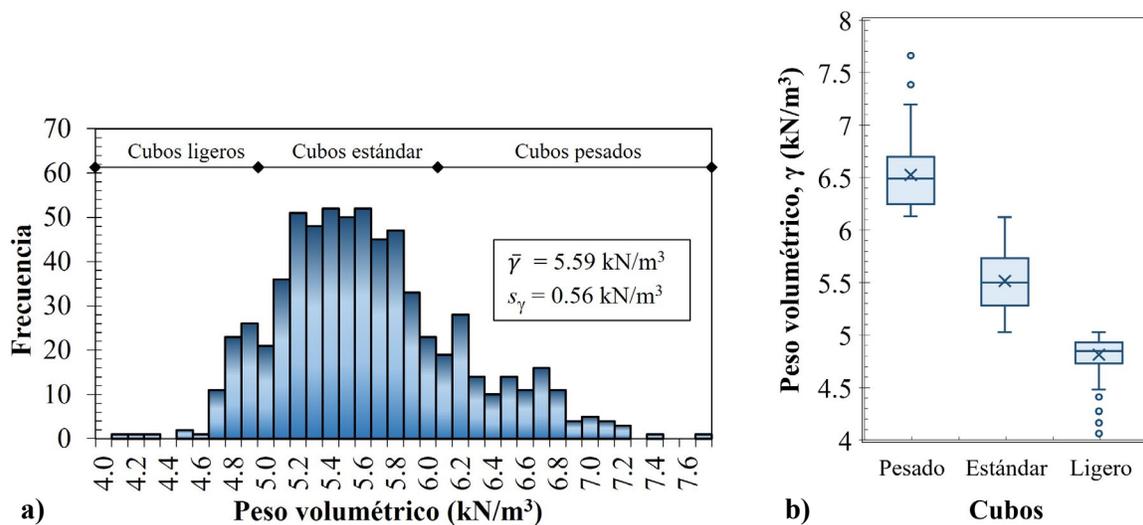


Figura 6.2 a) Histograma de pesos volumétricos de cubos de caobilla ensayados, y b) diagramas de caja de los pesos volumétricos obtenidos en cubos pesados, estándar y ligeros

Para analizar el comportamiento mecánico de las celdas de deformación se realizaron 53 pruebas de compresión, de las cuales 24 se ejecutaron en cubos individuales, 5 en cubos individuales apilados en tres niveles, 5 en arreglos de un nivel y 19 en arreglos de tres niveles. Los detalles de las pruebas se presentan en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Características de las pruebas de laboratorio realizadas en cubos de madera de *caobilla*

Descripción	Láminas galvanizadas	Velocidad de carga (kN/min)	Número de cubos por ensaye	Número de ensayes	Número total de cubos
Cubos secos individuales (fibras en posición vertical)	---	5	1	5	5
Cubos secos individuales (fibras en posición horizontal)	---	5	1	10	10
Cubos saturados individuales (fibras en posición horizontal)	---	5	1	9	9
Cubos individuales apilados en tres niveles	No	5	3	5	15
Arreglo de un nivel de 3×3 cubos	---	20	9	5	45
Arreglo de tres niveles de 3×3 cubos	Sí	20	27	5	135
Arreglo de tres niveles de 3×3 cubos	No	20	27	3	81
Arreglo de tres niveles de 3×3 cubos (carga cíclica) ^(*)	Sí	20	27	5	135
Arreglo de tres niveles de 4×4 cubos	Sí	20	48	3	144
Arreglo de tres niveles de 5×4 cubos	Sí	20	60	2	120
Arreglo de tres niveles de 8×7 cubos	Sí	20	168	1	168
Total				53	867

^(*) Las descargas se realizaron a 147, 196 y 245 kN (15, 20 y 25 t).

Para determinar la relación entre el esfuerzo de fluencia y el peso volumétrico de los cubos secos individuales de *caobilla* con fibras orientadas horizontalmente, se realizaron pruebas en las diferentes clasificaciones de cubos (pesado, estándar y ligero). Para cubos secos con fibras orientadas verticalmente, solamente se evaluaron los clasificados como cubos estándar. El contenido de agua (ASTM-D4442, 2016) de los cubos de madera analizados osciló entre $0.5 < w < 1$ %, condición que se asumió como el estado seco de los cubos (*cubos secos*). Para evaluar la influencia del agua en el comportamiento mecánico de los cubos, se almacenaron cinco cubos estándar durante 26 días en un cuarto húmedo (cuya humedad relativa es de 120 %) y cuatro cubos más fueron sumergidos dentro de un recipiente con agua también durante 26 días. El contenido de agua final en los cinco cubos almacenados en el cuarto

húmedo varió de 40 a 49% con un grado de saturación entre 91 y 100%. Para los cuatro cubos sumergidos en agua, su contenido de agua final osciló entre 35 y 59% con un grado de saturación de 100%. Ambos casos representan la peor condición en la que los cubos podrían estar funcionando, esto es, cuando el cajón de cimentación está inundado debido a la infiltración de agua subterránea. En consecuencia, esta condición se asumió como el estado saturado de los cubos en esta investigación (*cubos saturados*). Además, se observó que, entre los diferentes tipos de cubos, los cubos con menor peso volumétrico tienen un mayor contenido de agua cuando están saturados (Figura 6.3). Todos los ensayos se detuvieron cuando el cubo individual alcanzó la falla. Asimismo, para evaluar el comportamiento mecánico de los cubos en conjunto, primero se realizaron dos tipos de pruebas: a) en cubos individuales apilados en tres niveles, y b) en arreglos de 3×3 cubos en un nivel. Posteriormente, se conformaron diversos arreglos de tres niveles con cubos: a) pesados, b) estándar, y c) ligeros (inicialmente con láminas galvanizadas y posteriormente sin ellas). En adición, con la finalidad de analizar el comportamiento de los cubos de madera ante un sismo, se realizaron ensayos en arreglos de cubos bajo carga cíclica. En todos los arreglos ensayados los cubos se colocaron con las fibras orientadas horizontalmente.

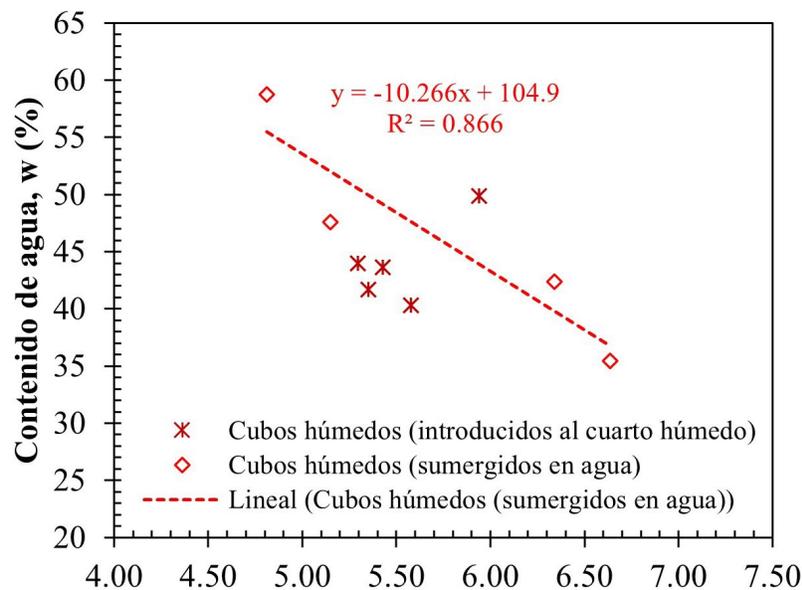


Figura 6.3 Relación entre el contenido de agua y el peso volumétrico de los cubos de madera saturados

6.1.2. Resultados y discusión

6.1.2.1. Cubos individuales secos y saturados

Los resultados obtenidos en cubos individuales secos con fibras en posición vertical muestran una falla frágil caracterizada por un esfuerzo máximo (pico) y posteriormente un esfuerzo residual (Figura 6.4a). Los cubos con fibras en posición horizontal exhiben un comportamiento mecánico elastoplástico con endurecimiento, caracterizado por una falla dúctil (Figura 6.4b). La falla frágil es inapropiada para el funcionamiento del dispositivo de control (Figura 6.5a). En cambio, la falla dúctil permite absorber mejor los desplazamientos verticales generados por el descenso de la estructura en correspondencia con el hundimiento regional (Figura 6.5b), lo que resulta más apropiado para el correcto funcionamiento de los pilotes de control. Por lo anterior, en los edificios con este tipo de cimentación los cubos se colocan comúnmente con las fibras en posición horizontal.

Los cubos con fibras en posición vertical presentan un esfuerzo de fluencia mayor respecto a los cubos con fibras en sentido horizontal. En ambos casos se distingue que el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo máximo tienden a aumentar con el peso volumétrico de los cubos (Figura 6.2). No obstante, se observa que hay una gran variación en el esfuerzo de fluencia de cada cubo. La incertidumbre en la carga nominal de la celda de deformación se reduce por efecto estadístico, pero sigue siendo importante y puede llevar a una sobrestimación de la carga nominal de la celda de deformación.

Con base en los resultados de los ensayos de laboratorio (Figura 6.4) se determinaron las propiedades mecánicas de la *caobilla* que se indican en la Tabla 6.2. Tomando en cuenta las propiedades de las maderas de caoba (Brimm & Boggess, 1940) y de pino (Kretschmann, 2010), en la Tabla 6.2 anterior se observa que los cubos pesados de *caobilla* tienen puntos de fluencia similares a la madera de caoba (fibras en posición vertical y horizontal), mientras que los cubos ligeros de *caobilla* tienen puntos de fluencia similares a la madera de pino (fibras en posición vertical y horizontal). Lo anterior influye en la carga de fluencia de una celda de deformación, pues si la celda de deformación tiene una mayor cantidad de cubos ligeros, la carga de fluencia del conjunto es menor que la carga nominal prevista en el diseño del pilote de control, lo que hace necesario un mayor número

de cubos ligeros en la celda de deformación respecto a los que se requieren si los cubos son pesados (ver inciso 6.1.2.3). Lo anterior, demuestra la importancia del control de calidad en la instalación de pilotes de control.

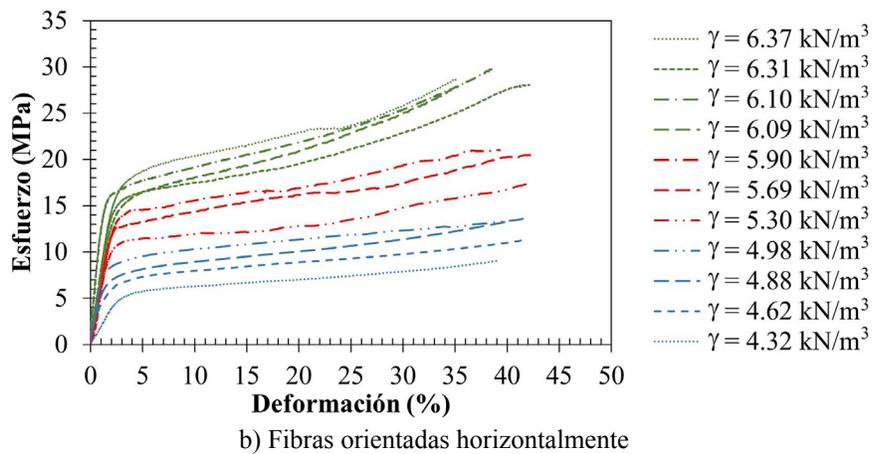
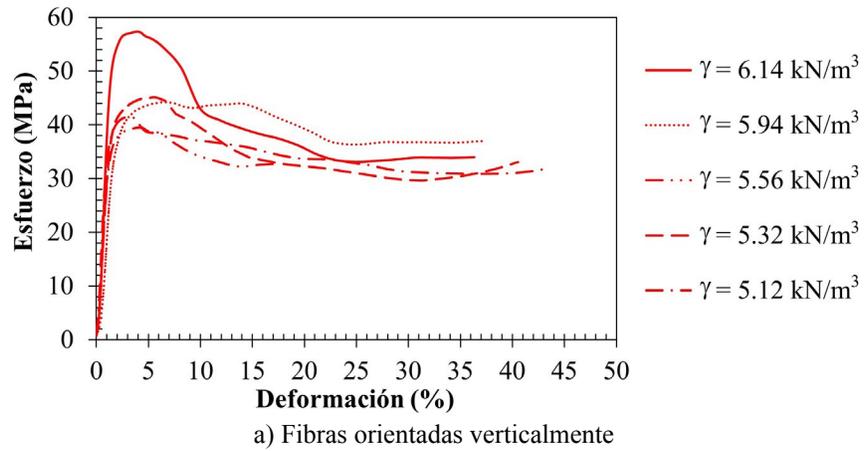


Figura 6.4 Comportamiento mecánico de cubos individuales secos



a) Falla frágil
(fibras orientadas verticalmente)



b) Falla dúctil
(fibras orientadas horizontalmente)

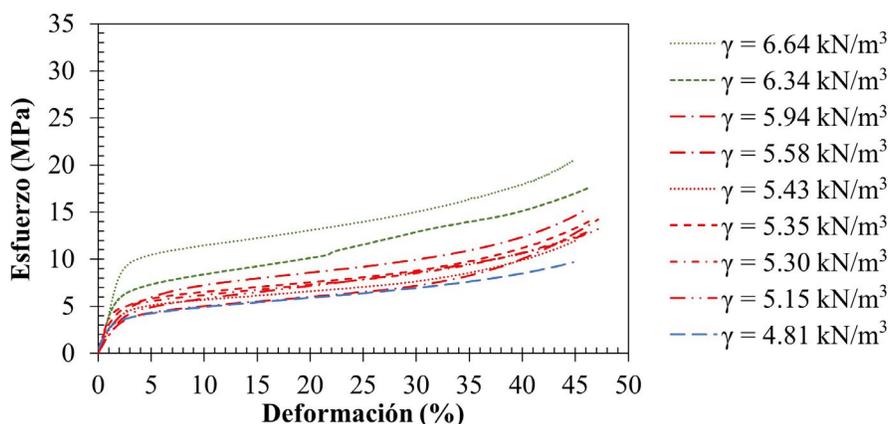
Figura 6.5 Fallas en cubos individuales secos

Tabla 6.2 Propiedades mecánicas de las maderas de *caobilla*, caoba y pino

Cubo	Posición de las fibras	<i>Caobilla</i> ^(a)				<i>Caoba</i> ^(b)	<i>Pino</i> ^(c)
		Peso volumétrico γ (kN/m ³)	Límite elástico L_e (kPa)	Módulo de elasticidad E (MPa)	Punto de fluencia σ_f (kPa)	Punto de fluencia σ_f (kPa)	Punto de fluencia σ_f (kPa)
Pesado	Vertical	6.14	4,1678	4,988.6	53,152	45,800	-----
	Horizontal	6.65	1,4612	1,386.9	18,534	12,400	-----
Ligero	Vertical	5.12	3,3539	3,473.2	39,030	-----	36,700
	Horizontal	4.62	3,874	477.3	5,296	-----	4,000

^(a) Obtenidas en esta investigación, ^(b) (Brimm & Boggess, 1940), ^(c) (Kretschmann, 2010)

Por otra parte, los resultados obtenidos en las pruebas en cubos individuales saturados indican una reducción en el esfuerzo de fluencia respecto a los resultados obtenidos en cubos en estado seco. En efecto, la Figura 6.6 muestra que un cubo con un peso volumétrico inicial de 5.58 kN/m³ que permaneció en el cuarto húmedo, presenta un esfuerzo de fluencia 51 % menor que el obtenido en un cubo seco con peso volumétrico similar ($\gamma = 5.59$ kN/m³).

**Tabla 6.6** Comportamiento mecánico de cubos individuales saturados con fibras orientadas horizontalmente

Los resultados obtenidos en las pruebas con cubos de madera saturados de esta investigación (Figura 6.6) son aproximadamente iguales a los obtenidos en pruebas con cubos de madera saturados con agua freática del ex-Lago de Texcoco que en su momento fueron realizadas por los autores para el Proyecto del NAIM (Nuevo Aeropuerto Internacional de México; Figura 6.7). Por lo que, los resultados obtenidos en esta investigación representan un comportamiento similar a la condición real a la que están expuestos los cubos de madera *in situ*.

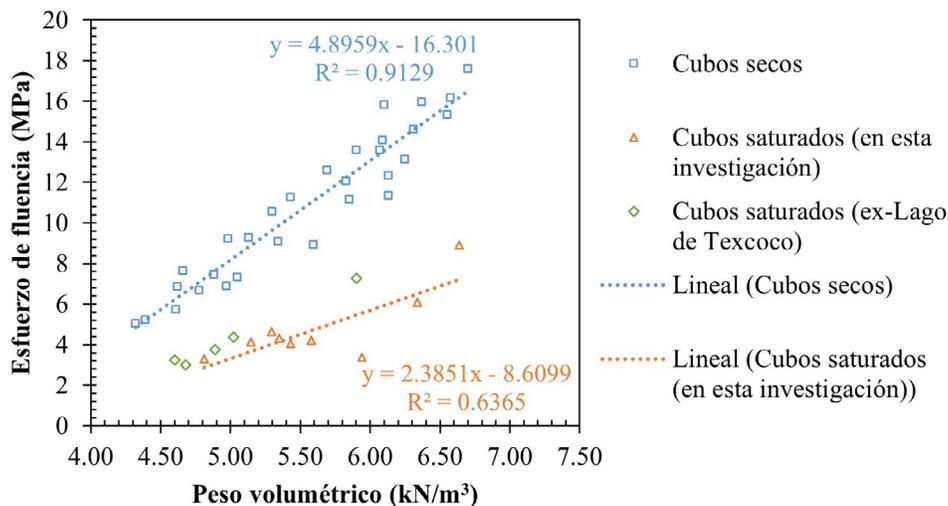


Figura 6.7 Esfuerzo de fluencia vs peso volumétrico obtenido en los cubos individuales saturados de esta investigación y en los cubos saturados con agua freática del ex-Lago de Texcoco

Con la finalidad de evaluar a un nivel microscópico la madera de *caobilla* y comprender mejor la variación del esfuerzo de fluencia en los cubos de madera respecto al peso volumétrico y al efecto del agua en la madera, se visualizaron en un microscopio electrónico tres muestras diferentes de madera de *caobilla*: a) cubo pesado seco, b) cubo ligero seco, y c) cubo estándar saturado.

Para la visualización de la madera (Figura 6.8a), las muestras se deshidrataron con una solución de etanol de concentración creciente en tres etapas: 75 %, 95 % y 100 %, durante 60 minutos cada etapa. Posteriormente, se llevó a cabo un secado de punto crítico. Debido a que la madera no es un material conductor, fue necesario aplicar una capa nano-delgada de metal conductor que permite obtener imágenes con mayor resolución y aumentos sin preocuparse por los efectos de carga de electrones. Esta capa se aplicó en un *Ion Sputter Coat* (Figura 6.8b), para después visualizar las muestras en el microscopio electrónico (Figura 6.8c).

Las imágenes obtenidas en el microscopio electrónico se ilustran en las Figuras 6.9a-c, en ellas se distingue que el cubo pesado seco (Figura 6.9a) posee fibras y poros mejor definidos en comparación con lo que se observa en el cubo ligero seco (Figura 6.9b). Asimismo, en el cubo estándar saturado las fibras y los poros no están bien definidos (Figura 6.9c).

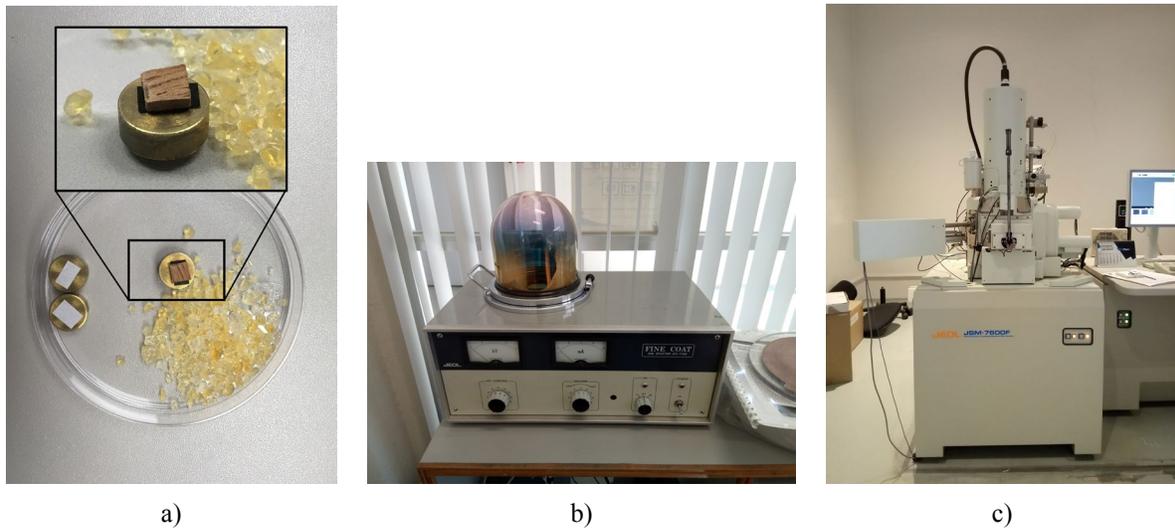


Figura 6.8 a) Colocación de las muestras en el porta muestras, b) muestras en el *Ion Sputter Coat*, y c) microscopio electrónico

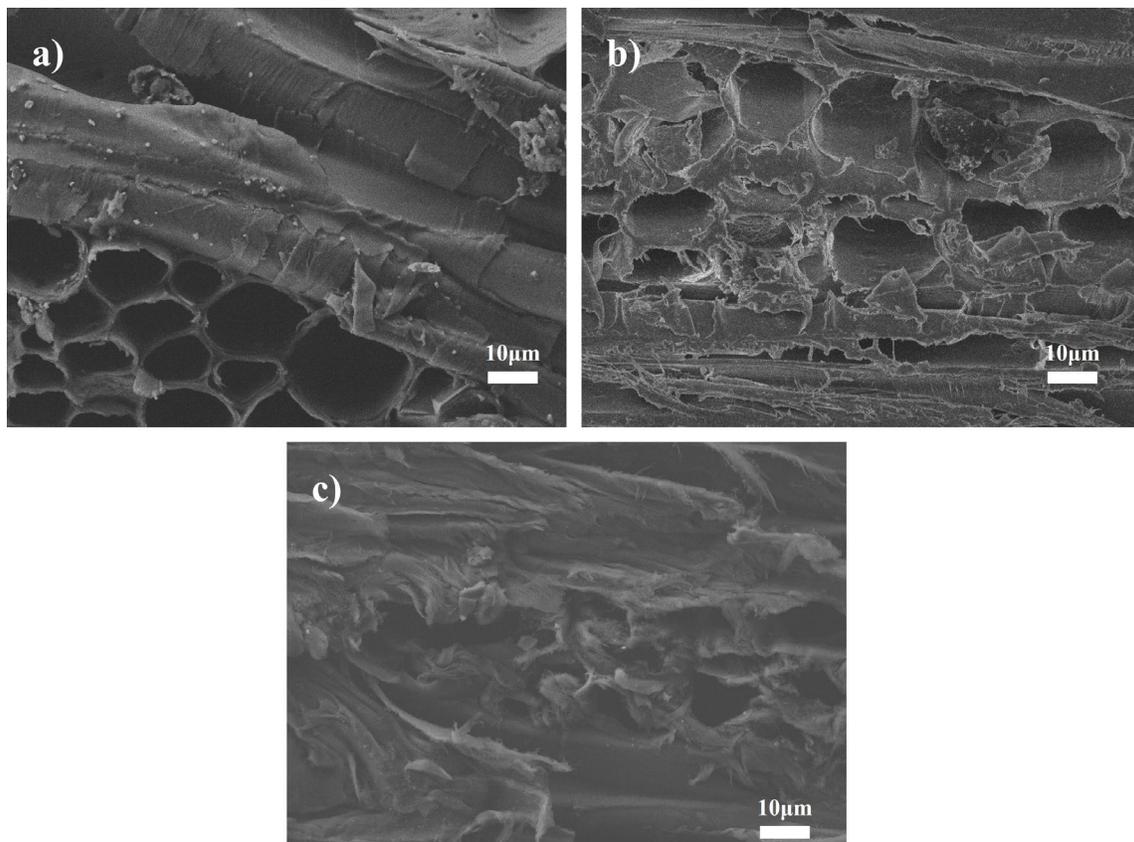
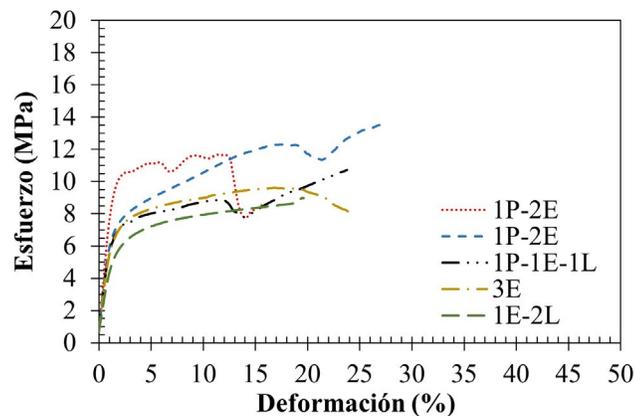


Figura 6.9 Imágenes SEM de muestras de madera de *caobilla*: a) cubo pesado seco, b) cubo ligero seco, c) cubo estándar saturado

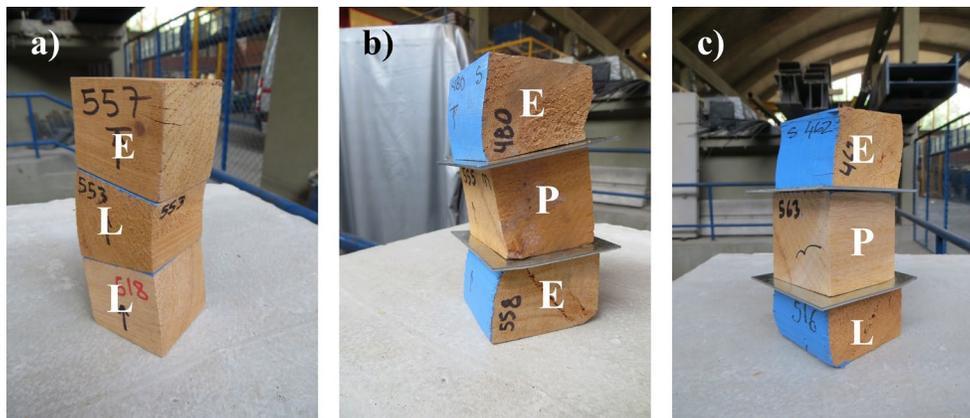
6.1.2.2. Cubos individuales apilados en tres niveles

La Figura 6.10 muestra el comportamiento mecánico de diversos arreglos de cubos individuales apilados en tres niveles. En ella, se distingue que los arreglos con cubos de menor peso volumétrico (estándar y ligeros) son los que exhiben menor esfuerzo de fluencia, en comparación con los arreglos que tienen un cubo pesado. En cuanto a la deformación de los cubos, se observa que los cubos de menor peso volumétrico son los que experimentan mayor deformación vertical (Figura 6.11).



Nota : P = cubo pesado, E = cubo estándar, y L = cubo ligero

Figura 6.10 Comportamiento mecánico de cubos individuales apilados en tres niveles



Nota : P = cubo pesado, E = cubo estándar, y L = cubo ligero

Figura 6.11 Deformación vertical en cubos individuales apilados en tres niveles

6.1.2.3. Arreglos de $m \times n$ cubos en tres niveles

La Figura 6.12a muestra el comportamiento mecánico de arreglos de un nivel de 3×3 cubos. Se aprecia que también existe una relación entre el peso volumétrico de los cubos en conjunto y el esfuerzo de fluencia. Esto es, el mayor esfuerzo de fluencia se obtiene en el arreglo de cubos pesados. En contraste, el arreglo de cubos ligeros presenta el menor esfuerzo de fluencia. Comparando los resultados anteriores con lo obtenido en los ensayos de arreglos de tres niveles de 3×3 cubos (Figura 6.12b, con láminas de acero galvanizado), se observa que los esfuerzos de fluencia son similares. No obstante, el módulo de la rama plástica es mayor en los arreglos de tres niveles (tiene mayor pendiente). En ambos casos, los cubos de los arreglos que experimentan mayor deformación son los de menor peso volumétrico (Figuras 6.13).

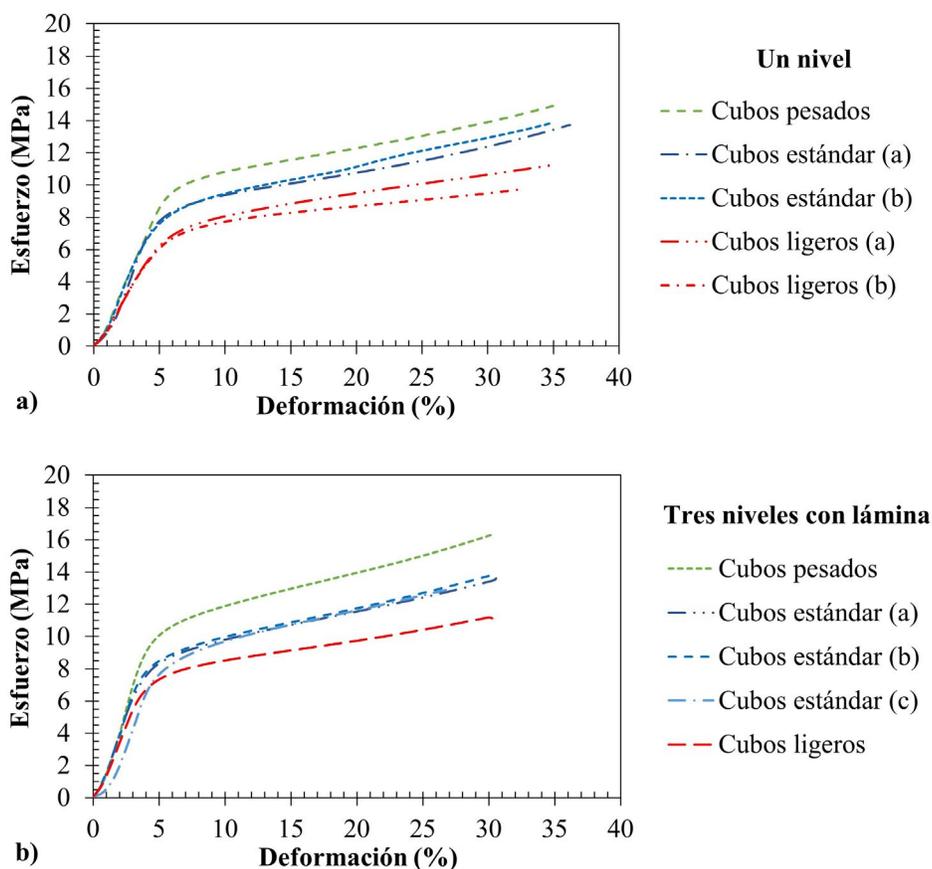


Figura 6.12 Comportamiento mecánico en arreglos de 3×3 cubos: a) un nivel, y b) tres niveles con láminas de acero galvanizado



Figura 6.13 Deformación de arreglos de 3×3 cubos

Por otra parte, comparando los resultados obtenidos en arreglos de tres niveles con láminas galvanizadas (Figura 6.12b) y sin láminas galvanizadas (Figura 6.14) se observa que el arreglo de cubos pesados sin láminas galvanizadas experimenta una reducción en el esfuerzo de fluencia de 15 % respecto al valor obtenido con láminas galvanizadas. En el arreglo con cubos estándar sin láminas, la reducción es de 3%, mientras que para cubos ligeros es de 6%. En todos los casos, el comportamiento mecánico de los arreglos es elastoplástico con endurecimiento. La deformación generada en los arreglos con láminas galvanizadas (Figura 6.15a) presenta mayor uniformidad en contraste con los arreglos que no tienen láminas galvanizadas (Figura 6.15b). Incluso se observa que, cuando no se tienen láminas galvanizadas, algunos de los cubos se fisuran (Figura 6.15b).

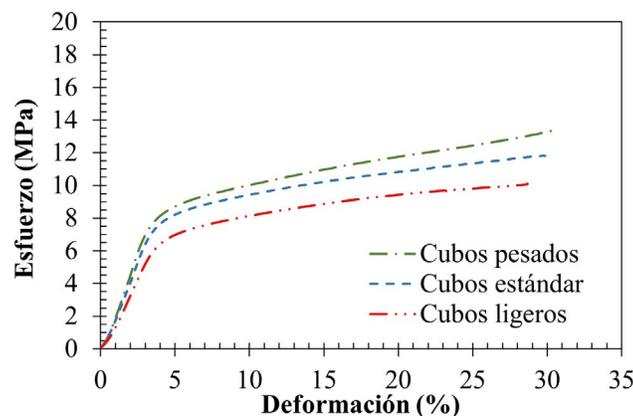


Figura 6.14 Comportamiento mecánico de arreglos de tres niveles de 3×3 cubos sin láminas de acero galvanizado



Figura 6.15 Comparación de deformación de arreglos de 3×3 cubos: a) con láminas galvanizadas, y b) sin láminas galvanizadas

En adición, los resultados obtenidos en ensayos de compresión simple en distintos arreglos de tres niveles de $m \times n$ cubos con láminas galvanizadas se presentan en la Figura 6.16. En dicha figura se corrobora la relación que existe entre el peso volumétrico de los cubos en conjunto y el esfuerzo de fluencia, esto es, mayor esfuerzo de fluencia en el arreglo de cubos pesados y menor esfuerzo de fluencia en el arreglo de cubos ligeros. Asimismo, se observa que el esfuerzo de fluencia obtenido en los arreglos de tres niveles de $m \times n$ cubos (Figura 6.16) es menor que el esfuerzo de fluencia obtenido en los ensayos de cubos individuales secos (Figura 6.4b). La explicación de lo anterior se da con detalle en los párrafos finales del Inciso 6.1.3.

En cuanto a la magnitud de la deformación vertical, se distingue que los arreglos alcanzan una deformación vertical máxima de aproximadamente 30 % de la altura total del conjunto (equivalente a 4.5 cm). Esta es la razón por la que los cubos de las celdas de deformación de los dispositivos de control deben reemplazarse cuando alcanzan este valor (para no poner en riesgo el cabezal o marco de carga). De igual forma, en un arreglo con cubos de distinto tipo, los cubos de menor peso volumétrico son los que presentan la mayor deformación (Figura 6.17). En el arreglo que se ensayó con el mayor número de cubos, correspondiente a 8×7 cubos, solamente se alcanzó una deformación total de 18 % por motivos de seguridad, ya que la fuerza correspondiente (2108 kN) es similar a la capacidad de la máquina donde se realizaron los ensayos.

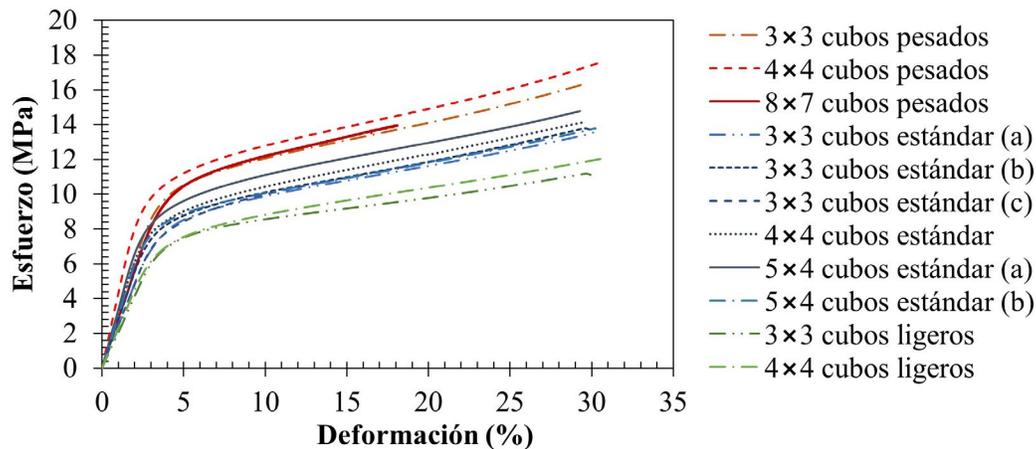


Figura 6.16 Comportamiento mecánico obtenido en las pruebas de compresión en distintos arreglos de tres niveles de $m \times n$ cubos con láminas galvanizadas



Figura 6.17 Deformación en distintos arreglos de tres niveles de $m \times n$ cubos con láminas galvanizadas

Adicionalmente, la Figura 6.18 ilustra el comportamiento mecánico obtenido en las pruebas cíclicas en arreglos de tres niveles de 3×3 cubos (con láminas galvanizadas). La carga cíclica aplicada fue de 20 kN/min (2 t/min), con tres descargas: a) en la rama elástica, b) en la rama plástica, y c) cercana al punto de fluencia. En general, se distingue que, ante carga cíclica los distintos arreglos exhiben un comportamiento elastoplástico con endurecimiento, similar al que se obtiene en pruebas de compresión simple. Asimismo, se aprecia que la deformación plástica en el primer ciclo es casi nula, predominando la deformación elástica. En el segundo ciclo se observa que la deformación elástica sigue siendo mayor que la plástica, a excepción del arreglo de cubos ligeros. Contrariamente, en el tercer ciclo la deformación plástica es mayor que la elástica. Con respecto al esfuerzo de fluencia, se aprecia que el arreglo de cubos pesados experimenta el mayor esfuerzo de

fluencia (9.6 MPa), mientras que el menor esfuerzo de fluencia (6.8 MPa) ocurre en los cubos ligeros.

Ante carga cíclica, los cubos de madera no ponen en riesgo el dispositivo de control gracias a la falla dúctil que presentan. Sin embargo, las Figuras 6.18 y 6.19 muestran que los cubos de madera pueden experimentar deformación plástica durante los ciclos de carga y quedar con poca carga o incluso con carga nula. Es decir que, después de un sismo, los cubos de los pilotes de control pueden presentar deformación, pero esto no garantiza que el pilote continúe transmitiendo carga al suelo. Por ello, es recomendable que después de un sismo se verifique la carga en los pilotes utilizando un sistema hidráulico y con ello, garantizar su contribución al soporte del edificio.

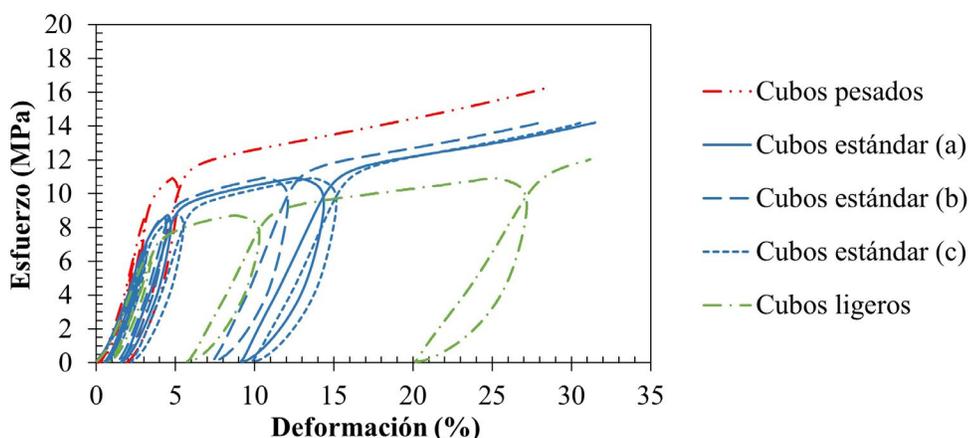


Figura 6.18 Comportamiento mecánico obtenido en las pruebas cíclicas de distintos arreglos de tres niveles de 3×3 cubos con láminas galvanizadas

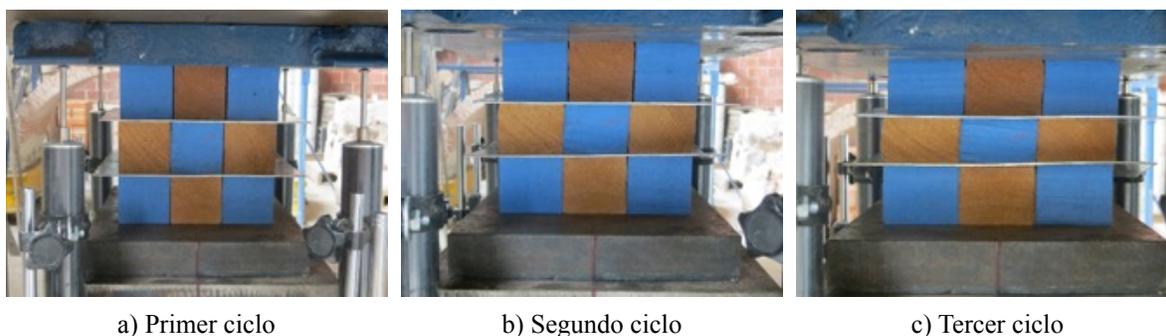


Figura 6.19 Deformación de los cubos de madera con carga nula (al término de la descarga en cada ciclo) en arreglos de tres niveles de 3×3 cubos

6.1.3. Criterio para la estimación de la carga de fluencia de las celdas de deformación

En la práctica, la carga de fluencia de una celda de deformación se estima multiplicando el número de cubos de un nivel por la carga de fluencia obtenida en un ensaye de un cubo individual seco. No obstante, los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio de cubos de madera muestran que considerar la carga de fluencia obtenida en ensayos de cubos individuales para el diseño de la celda de deformación propicia una sobrestimación de la carga (ver Figuras 6.4b y 6.16). Para evitar lo anterior, se propone un criterio para estimar la carga de fluencia y la carga máxima de una celda de deformación. El criterio sugerido en la Tabla 6.3 considera cargas por cubo que se obtuvieron a partir de los resultados en los ensayos de arreglos de tres niveles de $m \times n$ cubos de madera.

Para calcular la carga de fluencia de la celda de deformación, se sugiere que el número de cubos de un nivel se multiplique por la carga de fluencia por cubo P_f que se indica en la Tabla 6.3. Tomando en cuenta que el comportamiento elastoplástico con endurecimiento observado en las pruebas genera un incremento en la carga conforme aumenta la deformación, también se sugiere calcular la carga máxima del conjunto de cubos utilizando la carga máxima por cubo P_m que se indica en la Tabla 6.3. La carga máxima de la celda de deformación no debe exceder la capacidad del marco de carga o cabezal del dispositivo de control, para evitar que el cabezal o los espárragos (también conocidos como tornillos o husillos) fallen (López-Acosta, Martínez-Hernández, Peña, & Auvinet-Guichard, 2020).

Tabla 6.3 Carga de fluencia y carga máxima de un cubo de madera

Carga por cubo	Cubos utilizados en celdas de deformación		
	Pesados	Estándar	Ligeros
P_f (kN)	23.88	19.60	16.93
P_m (kN)	42.77	34.38	27.95

Nota: P_f = carga de fluencia por cubo; y P_m = carga máxima por cubo

6.1.4. Análisis del comportamiento de una celda de deformación

Tomando en cuenta todos los resultados anteriores obtenidos en las pruebas de laboratorio, se puede explicar el comportamiento de una celda de deformación con distintos tipos de cubos (pesados, ligeros y estándar) de la siguiente manera:

En un arreglo de un nivel de $n \times n$ cubos de madera, la deformación de cada cubo es la misma (pero la carga en cada cubo es diferente, debido a la variabilidad del módulo de elasticidad). Por tanto, las propiedades mecánicas equivalentes del arreglo de cubos deberían ser similares al promedio de las propiedades mecánicas de todos los cubos en el arreglo de un nivel (denominado *arreglo en paralelo*) (Figura 6.20).

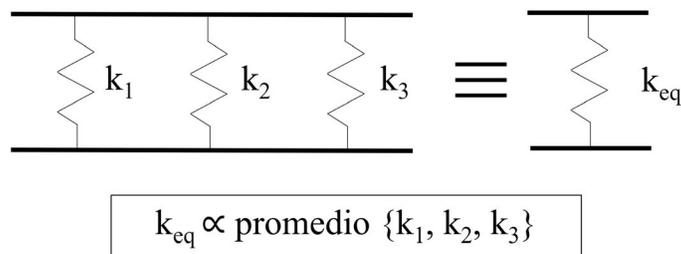


Figura 6.20 Evaluación de las propiedades mecánicas de un *arreglo en paralelo*

En contraste, en un arreglo de tres niveles 1×1 cubo de madera, la carga en cada cubo 1257 es la misma (pero la deformación en cada cubo es diferente). En este caso, el cubo con las 1258 propiedades mecánicas más bajas controla el comportamiento mecánico de la columna de 1259 cubos (denominado arreglo en serie, Figura 6.21).

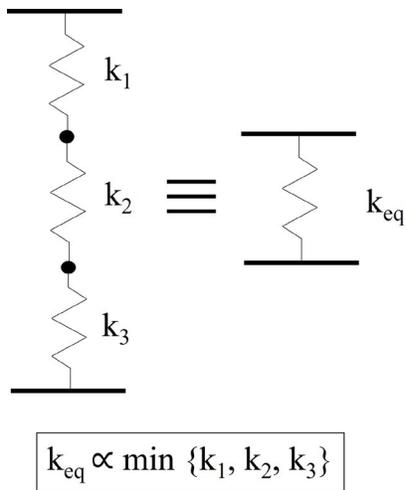


Figura 6.21 Evaluación de las propiedades mecánicas de un *arreglo en serie*

La inclusión de láminas de acero galvanizado en un arreglo de tres niveles de $n \times n$ cubos de madera uniformiza las deformaciones en cada nivel (Figura 6.22). En este tipo de arreglo, cada nivel puede considerarse como un elemento equivalente con propiedades mecánicas iguales al promedio de las propiedades mecánicas de todos los cubos en el nivel (*arreglo en paralelo*), y el comportamiento general de la celda de deformación puede simplificarse como un *arreglo en serie* de tres elementos equivalentes *en paralelo*. En este caso, el elemento equivalente con las propiedades mecánicas más bajas es el que controla el comportamiento de toda la celda de deformación (el mínimo de los tres promedios, ver Figura 6.22).

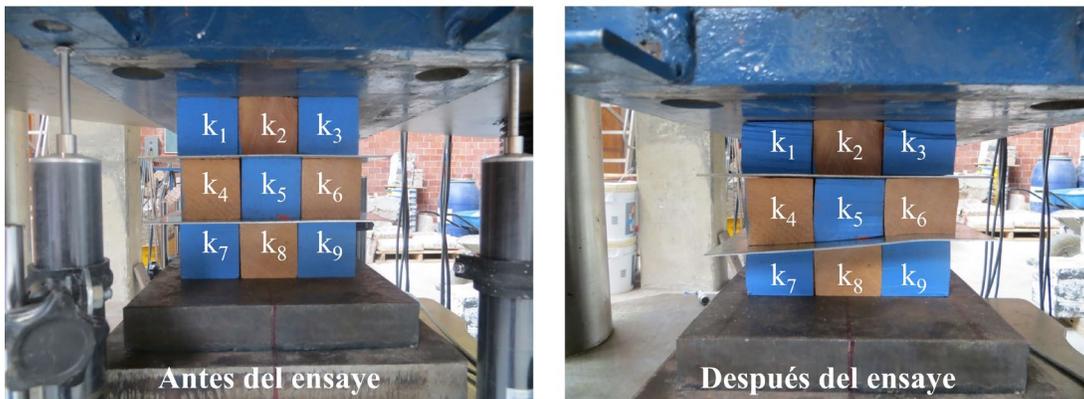
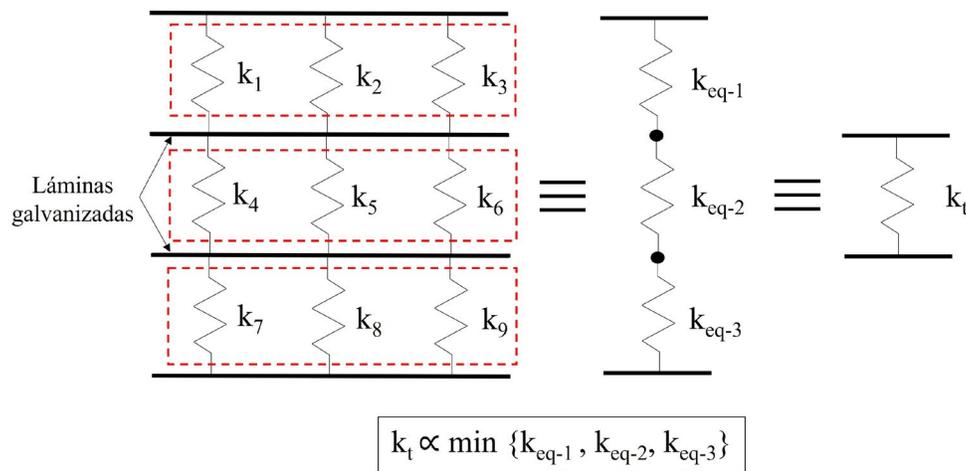


Figura 6.22 Evaluación de las propiedades mecánicas de un arreglo de tres niveles de $n \times n$ cubos con láminas galvanizadas

En contraste, cuando no hay láminas de acero galvanizado, las deformaciones de los cubos no dependen de los niveles, sino de las columnas (Figura 6.23). Cada columna puede considerarse como un elemento equivalente con propiedades similares a las del cubo con las propiedades mecánicas más bajas de la columna. En este caso, el comportamiento general de la celda deformable puede simplificarse como una disposición paralela de $n \times n$ elementos equivalentes (*arreglo en serie*), y su comportamiento se rige por el promedio de las propiedades mecánicas de estos elementos equivalentes (promedio de los mínimos, ver Figura 6.23).

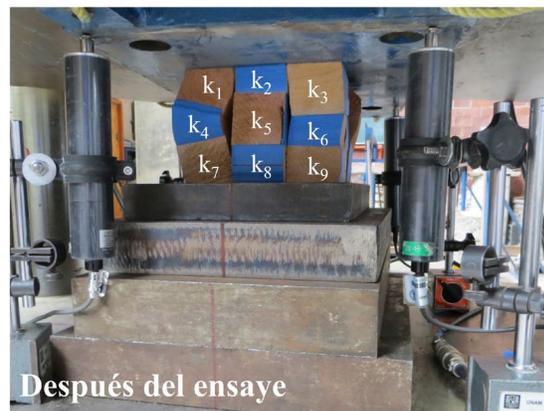
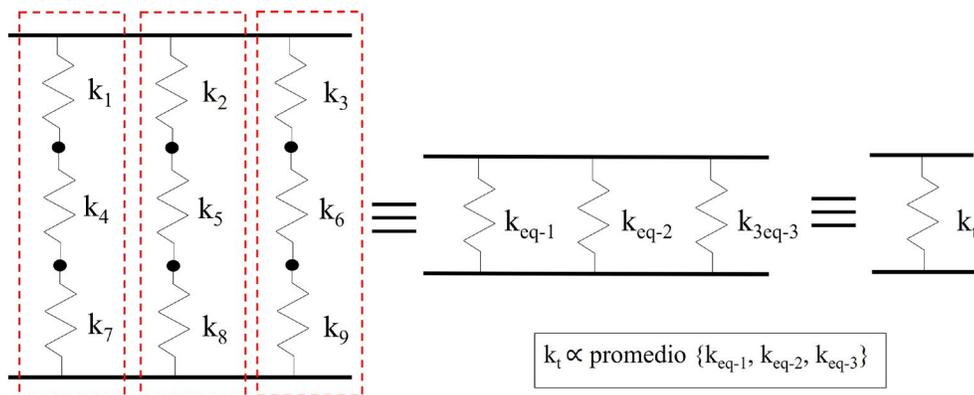


Figura 6.23 Evaluación de las propiedades mecánicas de un arreglo de tres niveles de $n \times n$ cubos sin láminas galvanizadas

Lo anterior, explica la razón por la que las propiedades mecánicas de los arreglos de cubos son menores comparadas con las propiedades mecánicas promedio obtenidas en los cubos individuales. Asimismo, justifica por qué las propiedades mecánicas de los arreglos con láminas de acero galvanizado son mayores que las de los arreglos que no las tienen.

6.2. Cilindros poliméricos

Para estudiar el comportamiento mecánico de los cilindros poliméricos (CP) y verificar su carga nominal (490, 735 y 980 kN), se realizaron 21 pruebas de laboratorio, de las cuales 12 fueron de compresión simple con carga controlada (20 kN/min) y 9 fueron cíclicas (carga y descarga). De las pruebas de compresión simple, tres fueron realizadas en cilindros que permanecieron en el cuarto húmedo durante 78 días, con la finalidad de evaluar la influencia que tiene el agua en el comportamiento mecánico de los cilindros (CPH).

Los resultados indican que los cilindros poliméricos tienen un comportamiento mecánico elastoplástico con endurecimiento, pero que no está tan bien definido como en la madera. Además, los cilindros poliméricos con capacidad nominal de 490 y 980 kN (50 y 100 t, respectivamente) presentan una variación considerable en su carga de fluencia y éstas resultan en general menores que su capacidad nominal (Figuras 6.24a y 6.26a). Los cilindros de 735 kN (75 t) presentan un comportamiento mecánico con mayor uniformidad respecto a los dos anteriores (Figura 6.25a).

Por otra parte, la humedad en los cilindros poliméricos (CPH), no tiene mayor repercusión en su comportamiento mecánico como sucede en los cubos de madera, a excepción del cilindro de 490 kN (50 t), ya que en él provoca una reducción en su carga de fluencia de aproximadamente 42%, respecto a la obtenida en los cilindros secos.

En cuanto a la deformación vertical, tanto los cilindros poliméricos como los arreglos de cubos de madera alcanzan una deformación vertical máxima de 30 % (equivalente a 4.5 cm). Además, los cilindros poliméricos (secos y húmedos) exhiben mayor uniformidad (Figura 6.27) respecto a lo observado en los arreglos de cubos de madera (Figura 6.17).

En las pruebas cíclicas, los cilindros de 490 y 735 kN conservan su comportamiento elastoplástico con endurecimiento y presentan falla dúctil (Figuras 6.24b y 6.25b).

Contrariamente, los cilindros de 980 kN muestran vulnerabilidad ante cargas cíclicas y presentan falla frágil (López-Acosta & Martínez-Hernández, 2017b) (Figura 6.26b).

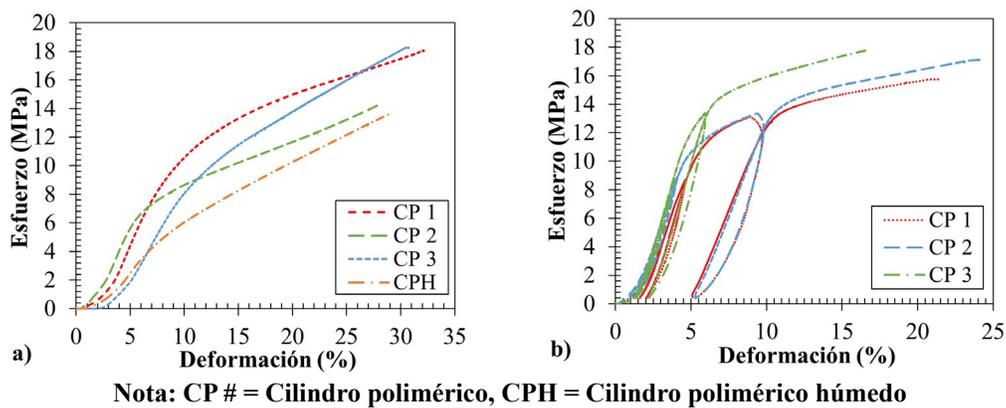


Figura 6.24 Resultados obtenidos en cilindros de 490 kN: a) carga simple, y b) carga cíclica

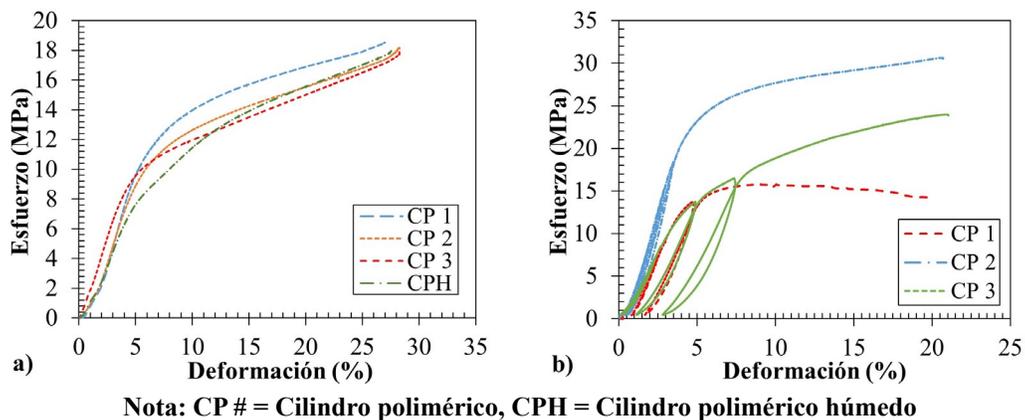


Figura 6.25 Resultados obtenidos en cilindros de 735 kN: a) carga simple, y b) carga cíclica

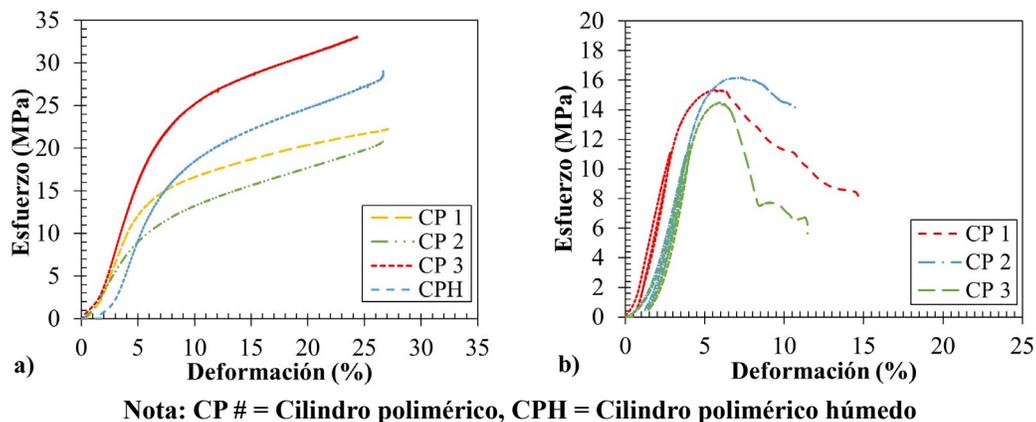


Figura 6.26 Resultados obtenidos en cilindros de 980 kN: a) carga simple, y b) carga cíclica

Debido a la variabilidad observada en el comportamiento mecánico de los distintos cilindros poliméricos evaluados tanto en pruebas de compresión simple como de carga cíclica, se prevé conveniente mejorar la calidad de las resinas elastoméricas copolimerizadas que los constituyen y realizar estudios adicionales para evaluar la mejoría en la uniformidad de su comportamiento.



Figura 6.27 Cilindros poliméricos ensayados

6.3. Tacones de neopreno

Para estudiar el comportamiento del neopreno empleado en pilotes *tipo funda* con el marco de carga diseño de Tamez (ver Figura 2.9d, Inciso 2.2.2), se realizaron cinco ensayos de compresión simple con carga controlada de 20 kN/min: a) tres en tacones de neopreno nuevos, y b) dos en tacones usados. La finalidad de estos últimos ensayos fue analizar si el material presenta variación en su comportamiento mecánico con el paso del tiempo, ya que se sabe que los tacones de neopreno empleados en los sistemas de control de un inmueble de la CDMX tienen más de 15 años sin reemplazarse.

Los resultados de las pruebas en los tacones de neopreno indican que su comportamiento es elástico no lineal (Figura 6.28). El esfuerzo máximo en el neopreno 1 es 13.16 MPa (correspondiente a una carga de 2106 kN, similar a la capacidad de la máquina universal donde se realizan dichos ensayos). Las demás pruebas se limitaron a un esfuerzo máximo de 7.95 MPa (correspondiente a una carga de 1275 kN), por razones de seguridad del equipo de laboratorio y del personal que realiza las pruebas.

En este estudio se clasifica el comportamiento de los neoprenos en tres zonas: a) la Zona 1 donde el comportamiento es lineal, b) la Zona 2 donde el comportamiento deja de ser lineal, y c) la Zona 3 que se caracteriza por un aumento de esfuerzo significativo con un menor incremento en la deformación.

La Figura 6.28 muestra que los tacones de neopreno tienen un comportamiento muy parecido entre sí, incluso en los neoprenos usados.

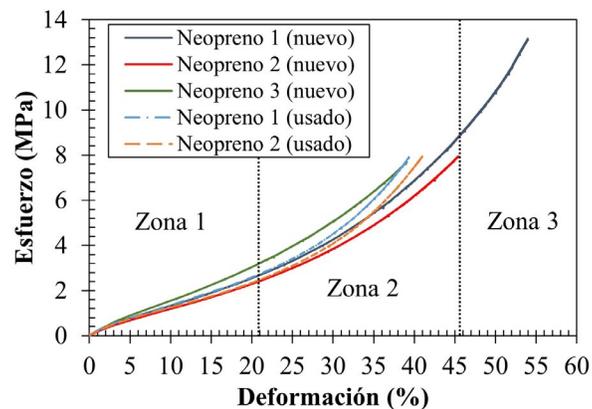


Figura 6.28 Comportamiento mecánico en tacones de neopreno

El proceso de deformación generado en el neopreno 1 se muestra en la Figura 6.29. En dicha figura se observa que la deformación vertical máxima fue de 53.96% (correspondiente a 3.9 cm; Figura 6.29b), misma que se recupera en su totalidad después de retirar la carga (Figura 6.29c). Tanto en los tacones de neopreno nuevos como usados, se observó una recuperación total de la deformación generada durante la prueba.



a) Inicio de la prueba



b) Final de la prueba



c) Posterior a la prueba

Figura 6.29 Proceso de deformación en un tacón de neopreno de 7.2 cm de espesor

7. Comportamiento de los pilotes de control ante sismos

Los sismos tienen un gran impacto en los edificios ubicados en la Zona Lacustre de la Ciudad de México, debido a que las ondas sísmicas se amplifican en las arcillas del subsuelo. Dos de los sismos más relevantes para la ingeniería de cimentaciones de la CDMX fueron los ocurridos el 19 de septiembre de 1985 y 2017.

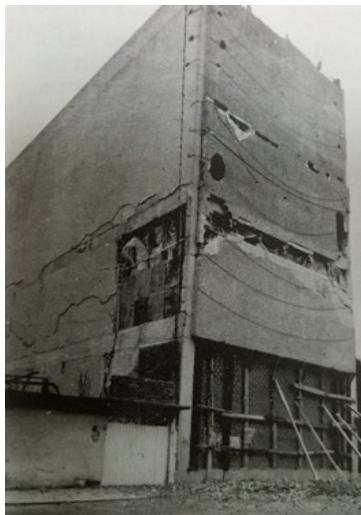
El sismo del 19 de septiembre de 1985 se originó bajo las costas del estado de Michoacán (a 400 km de la CDMX). Dicho sismo fue interplaca (de falla normal) y tuvo una magnitud M8.1. Este sismo mostró la vulnerabilidad de los edificios con cimentaciones mixtas con cajón y pilotes de fricción de la Ciudad de México (Mendoza, 2007), incluidos aquellos recimentados con pilotes de control (Tamez, 1988). Los daños registrados en cimentaciones mixtas fueron desplomos, asentamientos muy significativos y el volteo total.

Por otra parte, el sismo del 19 de septiembre de 2017 se originó a 57 km de profundidad con epicentro en Axochiapan, Morelos (a 120 km de la CDMX) con una magnitud M7.1 (SSN, 2017). El sismo fue intraplaca y generó en el occidente de la Ciudad de México grandes aceleraciones espectrales horizontales con periodos entre 0.8 y 1.5 s, causando daños significativos en muchas estructuras de entre cinco y ocho pisos de altura (Mayoral, Hutchinson, & Franke, 2017). Lo anterior, provocó el colapso de 44 edificios, un puente peatonal y un puente que ligaba a dos inmuebles (Galvis, Miranda, Heresi, Dávalos, & Silos, 2017). No obstante, los daños geotécnicos ocasionados por este sismo fueron considerablemente menores que los del temblor del 19 de septiembre de 1985 (Auvinet, 2017).

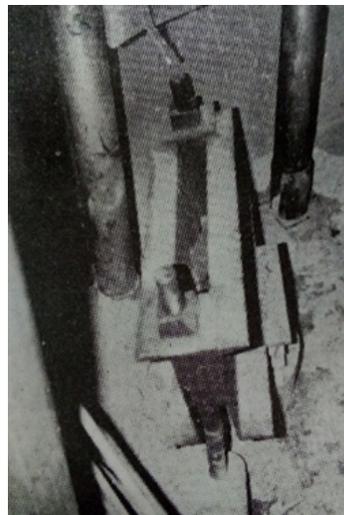
Algunos de los daños observados en edificios recimentados con pilotes de control durante los sismos de 1985 y 2017 se presentan en los párrafos siguientes.

7.1. Sismo de 1985

Durante el sismo de 1985, diversos edificios de la Ciudad de México que habían sido recimentados con pilotes de control, presentaron daños considerables, principalmente, los edificios de Centrales Telefónicas. Algunos de ellos, como la Central Hidalgo (Figura 7.1), únicamente presentó daños considerables en la superestructura (columnas y trabes), ya que en su cimentación a base de pilotes de control sólo se observó una ligera inclinación en los cabezales (Murray, 1988). Sin embargo, otros edificios presentaron fallas en los cabezales y en los espárragos ocasionadas por: a) el momento de volteo agravado por la excentricidad entre el pilote y el marco de carga (Figura 7.2a), y b) la sobrecarga generada por el sismo que propició el asentamiento de las estructuras y, por tanto, la excesiva penetración aparente del pilote provocando que los cubos de madera se deformaran más del 75% en conjunto (Figura 7.2b). Otros dispositivos de control (distintos a los tradicionales), de marco tipo STAG con celda hidráulica, también presentaron falla durante los sismos de 1985. En este caso, la celda hidráulica generó una sobrecarga en el cabezal que propició su falla (Figura 7.2c). En condiciones normales, estos últimos dispositivos controlan la carga en los pilotes mediante la celda hidráulica, pero no controlan los asentamientos de la estructura y son vulnerables en condición sísmica, como se muestra en la Figura 7.2c.

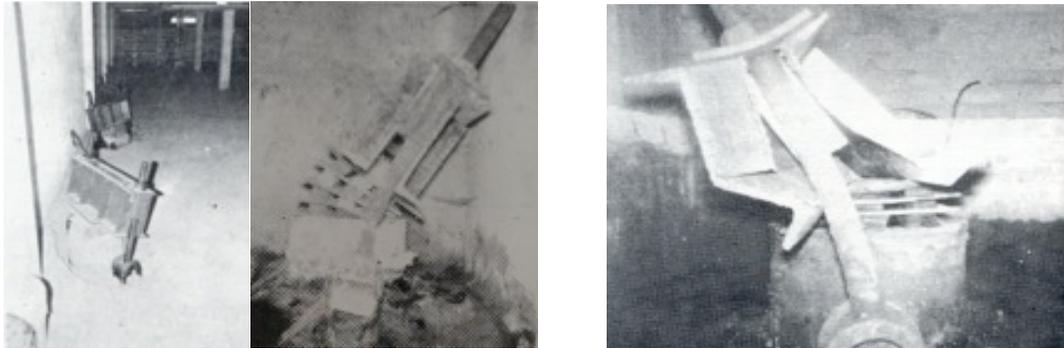


a) Daños en la superestructura



b) Ligera inclinación del marco de carga

Figura 7.1 Daños documentados en la Central Telefónica Hidalgo (Murray, 1988)



a) Inclinación del marco de carga
(Aguilar & Rojas, 1986)

b) Falla del cabezal de acero
(Aguilar & Rojas, 1990)



c) Falla de marco tipo STAG
con celda de hidráulica (Santoyo & Alanís, 2013)

Figura 7.2 Efectos del sismo de 1985 en dispositivos de control

7.2. Sismo de 2017

Los daños en edificios recimentados con pilotes de control fueron considerablemente menores respecto a los observados en el sismo de 1985. Los daños observados después del sismo de septiembre de 2017 en los edificios evaluados fueron cabezales inclinados (Figura 7.3a), cubos de la celda de deformación sueltos (Figura 7.3b), cubos con deformación excesiva (Figura 7.3c), espárragos sueltos (Figura 7.3d), y cabezales con atiesadores deformados (Figura 7.3e). Aun cuando estos daños no representan un riesgo considerable, sí requirieron atención inmediata.

Por otra parte, se tiene conocimiento que los pilotes de control de los edificios evaluados después del sismo tenían un mantenimiento constante, por lo que éste contribuyó a que los edificios no sufrieran daños mayores. Con lo anterior, se remarca la importancia del mantenimiento periódico que debe darse a los pilotes de control durante la vida útil de la edificación, así como la evaluación regular del comportamiento de la estructura (mediante levantamientos topográficos) que permita determinar si se requiere una intervención especial para corregir problemas de hundimientos diferenciales o desplomos.



a) Inclinación del cabezal



b) Cubos de la celda de deformación sueltos



c) Cubos con deformación excesiva



d) Espárrago suelto por la tensión generada



e) Atiesadores deformados

Figura 7.3 Efectos del sismo de 2017 en dispositivos de control

8. Criterios de diseño y de revisión de pilotes de control

Desde su concepción y al día de hoy no existe ningún criterio ni método para el diseño y construcción de pilotes de control que esté normalizado en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal ni en sus Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones vigentes (NTCDCC, 2017). De hecho, los pilotes de control se reconocen en las normas actuales como una *cimentación especial*, cuyo diseño y evaluación debe realizarse para cada caso particular. Esta falta de regulación ha propiciado que, en la práctica de la ingeniería de la Ciudad de México, el diseño de los pilotes de control se realice asumiéndolos como pilotes de punta convencionales, consideración que subestima los asentamientos reales de la estructura. La evaluación de los pilotes de control como pilotes de punta es inapropiada porque los pilotes de control no están ligados rígidamente a la cimentación y además, permiten el descenso de la estructura acorde al hundimiento regional. Lo anterior, implica que para el diseño de pilotes de control se deben tomar en cuenta otros aspectos como: 1) la carga que transmite la losa de cimentación al suelo, 2) la fricción negativa en el pilote (que contribuye al soporte del edificio), y 3) la carga aplicada con el dispositivo de control en la cabeza del pilote.

Con la finalidad de proporcionar una guía de las acciones a considerar para el diseño y revisión de una cimentación a base de pilotes de control, en este capítulo se presentan los criterios que distintos autores han propuesto para el diseño y revisión de pilotes de control (Figura 8.1). Los criterios que existen para el diseño de una cimentación nueva a base de pilotes de control son: a) Criterio de diseño de González-Flores, y b) Criterio de diseño de Tamez. Por su parte, los criterios para la revisión del diseño de una cimentación existente con pilotes de control son: a) Criterio de revisión de Zeevaert (que permite analizar el diseño en condición estática), y b) Criterio de revisión de Auvinet y López-Acosta (que permite evaluar el diseño en condición sísmica).

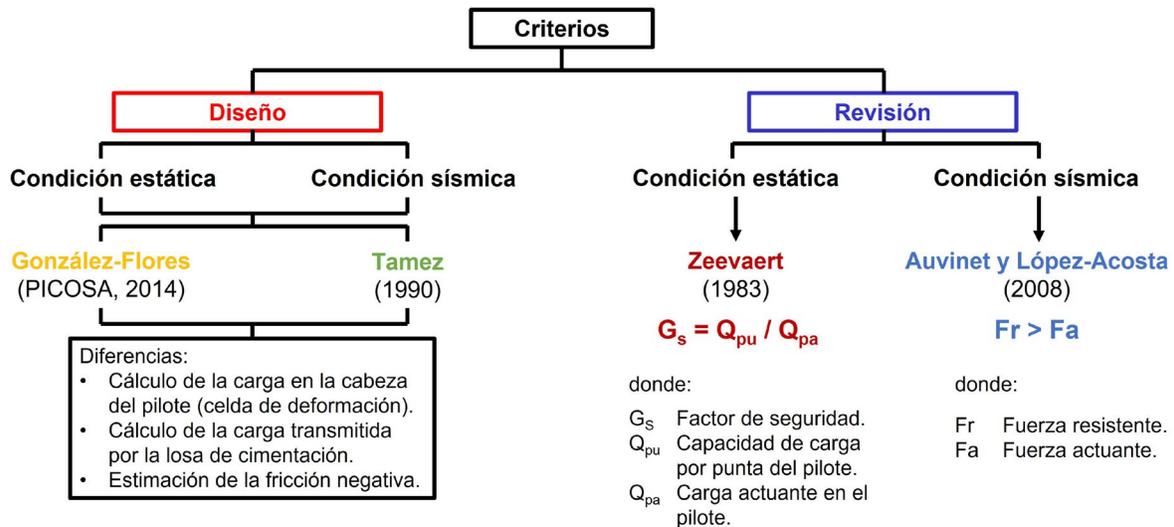


Figura 8.1 Criterios de diseño y de revisión de pilotes de control

En los párrafos siguientes se describen inicialmente los criterios de diseño y de revisión para edificios cimentados con pilotes de control. Posteriormente, se presenta un caso de estudio con la finalidad de ilustrar la aplicación de todos los criterios descritos previamente y constituir una guía que ayude a un mejor entendimiento del comportamiento de los pilotes de control.

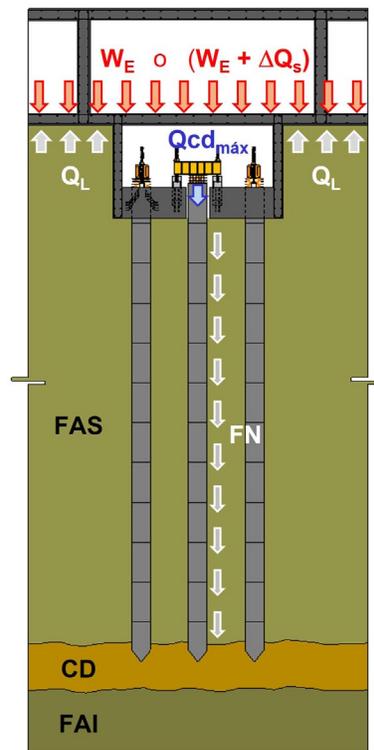
8.1 Criterio de diseño de González-Flores

El criterio de González-Flores (PICOSA, 2014b) permite considerar condiciones estática (Ecuación 8.1) y sísmica (Ecuación 8.2) en el diseño de pilotes de control, tomando como dato inicial la carga de fluencia de la celda de deformación $Q_{cd_{m\acute{a}x}}$. En ambos casos se considera la transmisión de carga al suelo mediante la losa de cimentación Q_L , es decir, se asume el contacto suelo-estructura (Figura 8.2).

$$\text{Condición estática: } [N_{pil}]Q_{cd_{m\acute{a}x}} = W_E (F_C) - [N_{pil}] FN - Q_L \quad (8.1)$$

$$\text{Condición sísmica: } [N_{pil}]Q_{cd_{m\acute{a}x}} = (W_E + \Delta Qs) F_C - [N_{pil}] FN - Q_L \quad (8.2)$$

De acuerdo con este criterio, en la condición estática (Ecuación 8.1) el número de pilotes de control N_{pil} multiplicado por la carga de fluencia de la celda de deformación $Q_{cd_{m\acute{a}x}}$ debe ser igual a la suma de acciones verticales de la estructura W_E afectada por un factor de carga F_C (asumido con base en las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones vigentes (NTCCADEE, 2017)), a la que se resta la fricción negativa FN que se desarrolla en todos los pilotes de control y la carga transmitida al terreno a través de la losa de cimentación Q_L . Como parte de este criterio, González-Flores propuso que la carga Q_L es equivalente al área de la cimentación multiplicada por 14.71 kPa (PICOSA, 2014b). En la condición sísmica (Ecuación 8.2) se consideran las mismas variables, pero la diferencia radica en que se considera un incremento de carga por sismo ΔQ_s en la suma de acciones verticales.



donde W_E y $(W_E + \Delta Q_s)$ es la suma de las acciones verticales afectadas por sus factores de carga en condiciones estática y sísmica, respectivamente, $Q_{cd_{m\acute{a}x}}$ es la carga de fluencia de la celda de deformación, Q_L es la carga transmitida por la losa al suelo, FN es la fricción negativa, FAS es la formación arcillosa superior, CD es el estrato resistente (capa dura) y FAI es la formación arcilla inferior.

Figura 8.2 Acciones consideradas en el criterio de diseño de González-Flores

Para calcular la fricción negativa FN en los pilotes de control, González-Flores propone utilizar la Ecuación 8.3 (PICOSA, 2014b):

$$FN = P_p L c_u (0.75) \quad (8.3)$$

donde P_p es el perímetro del pilote, L es la longitud del pilote, y c_u es la cohesión media de la Formación Arcillosa Superior (FAS). El valor de 0.75 se debe a que el criterio de diseño de González-Flores considera que en el pilote solamente se desarrolla el 75% de la fricción negativa (PICOSA, 2014b).

8.2 Criterio de diseño de Tamez

El criterio de diseño de Tamez (1990) considera que, para que un pilote de control funcione adecuadamente en condición estática (Figura 8.3b), se deben satisfacer las siguientes dos condiciones:

- 1) Desarrollar el equilibrio límite para permitir que la losa de cimentación descienda a la misma velocidad que la superficie del terreno vecino. Esto implica que, la capacidad de carga por adherencia lateral del pilote Q_f debe ser igual a la suma de la carga transmitida por la losa al suelo W_{se} más la fricción negativa necesaria F_{nn} para alcanzar el equilibrio límite (Ecuación 8.4):

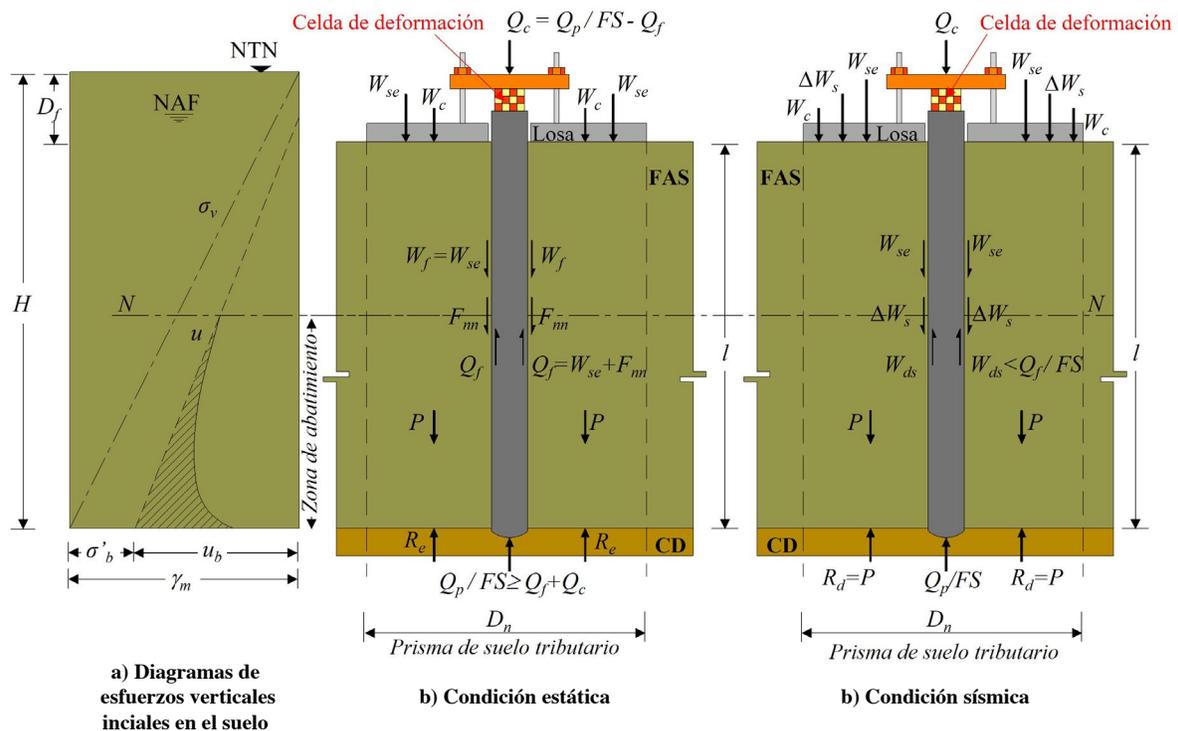
$$Q_f = W_{se} + F_{nn} \quad (8.4)$$

- 2) La capacidad de carga en la punta del pilote debe ser suficiente para impedir que la punta penetre en el estrato resistente. Esta condición se expresa con la Ecuación 8.5, la cual indica que la suma de la carga de fluencia de la celda de deformación Q_c más la capacidad de carga por adherencia lateral del pilote Q_f debe ser menor o igual que la capacidad por punta del pilote Q_p dividida entre un factor de seguridad FS:

$$Q_c + Q_f \leq (Q_p / FS) \quad (8.5)$$

Por otra parte, el criterio de Tamez (1986) considera que la capacidad de carga de los pilotes en condición sísmica W_{dta} debe ser igual a la suma de la carga de fluencia de la celda de deformación Q_c más la capacidad de carga por adherencia lateral del pilote Q_f dividida entre un factor de seguridad FS (Ecuación 8.6; Figura 8.3c):

$$W_{\text{dta}} = Q_c + (Q_f / \text{FS}) \quad (8.6)$$

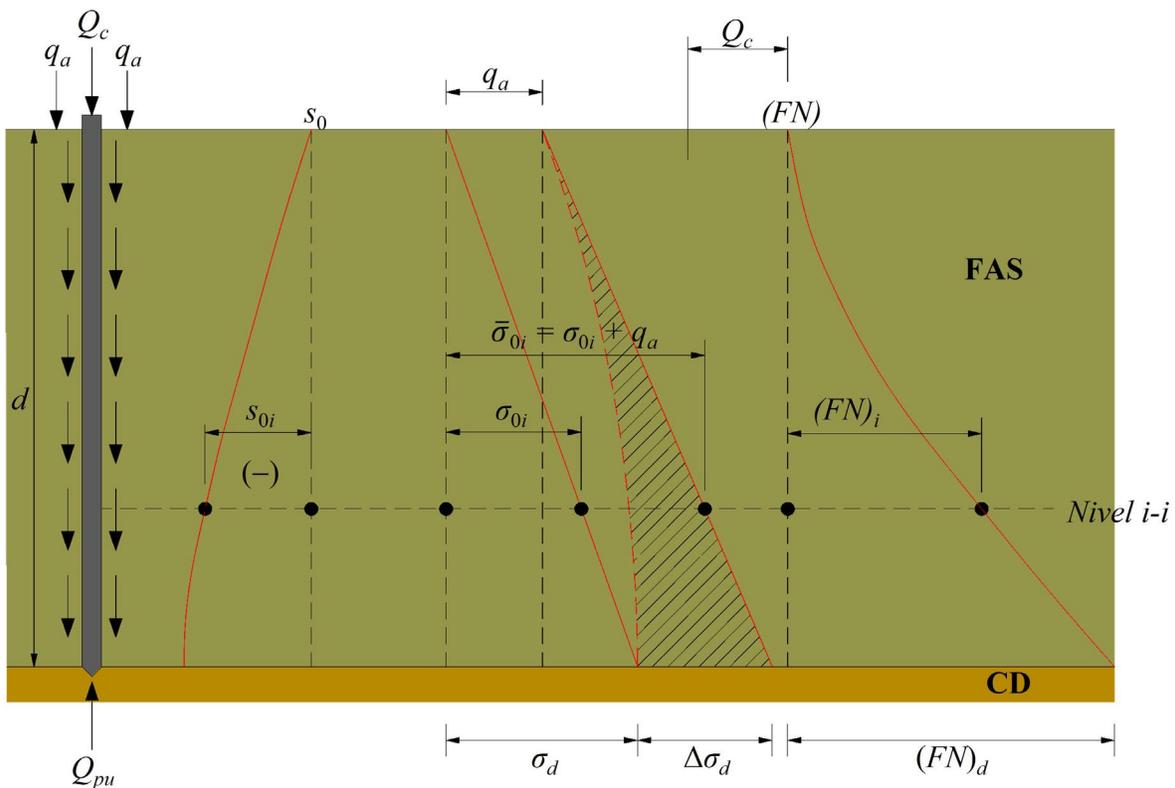


Nota: D_f = profundidad de desplante, NAF = nivel de aguas freáticas, H = profundidad a la que se encuentra el estrato resistente, NTN = nivel de terreno natural, u = presión de poro, σ_v = esfuerzo total vertical, σ'_b = esfuerzo vertical efectivo, u_b = presión de poro a la profundidad del estrato resistente. γ_m = peso volumétrico saturado promedio, Q_c = carga de fluencia de la celda de deformación, Q_p = capacidad por punta del pilote, FS = factor de seguridad, Q_f = capacidad de carga por adherencia lateral del pilote, W_{se} = carga estática transmitida al suelo, W_c = carga compensada, W_f = fuerza friccionante descendente, F_{mn} = fricción negativa necesaria para desarrollar el equilibrio límite, P = peso total del prisma de arcilla, R_e = reacción estática del estrato resistente, D_n = Prisma tributario del suelo, ΔW_s = incremento de carga por sismo, W_{ds} = carga sísmica transmitida al suelo, R_d = reacción sísmica del estrato resistente, FAS = formación arcillosa superior, CD = estrato resistente (capa dura).

Figura 8.3 Criterio de diseño de Tamez para condiciones estática y sísmica (modificado de Tamez 1990)

8.3 Criterio de revisión de Zeevaert

El criterio de revisión de Zeevaert (1983) se fundamenta en los análisis en condición estática del comportamiento de un pilote de punta convencional y un pilote de punta con dispositivo de control en la cabeza. En el análisis de un pilote de punta convencional, Zeevaert evalúa la fricción negativa $(FN)_d$ desarrollada en el pilote debido a una carga aplicada en la superficie del terreno q_a en cierta área tributaria (Figura 8.4).



Nota: FAS = formación arcillosa superior, CD = Capa dura, Q_c = carga aplicada mediante el dispositivo de control, q_a = carga aplicada en la superficie de suelo, d = espesor del estrato arcilloso, Q_{pu} = capacidad de carga por punta, s_0 = esfuerzo cortante en el pilote, (FN) = fricción negativa, $\bar{\sigma}_{0i}$ = esfuerzo vertical efectivo con sobrecarga, σ_{0i} = esfuerzo vertical efectivo (sin considerar la sobrecarga), σ_d = esfuerzo vertical efectivo a nivel de desplante, $\Delta\sigma_d$ = incremento de esfuerzo vertical efectivo debido a la sobrecarga a nivel de desplante, $(FN)_d$ = fricción negativa a nivel de desplante.

Figura 8.4 Fricción negativa en cimentaciones (modificado de Zeevaert 1983)

En el análisis de un pilote de punta con dispositivo de control en la cabeza, Zeevaert establece que la carga total actuante en el pilote Q_{pa} equivale a la suma de la carga en la cabeza del pilote aplicada mediante el dispositivo de control Q_c (equivalente a la carga de fluencia de la celda de deformación) y la fricción negativa $(FN)_d$ (Ecuación 8.7).

$$Q_{pa} = Q_c + (FN)_d \quad (8.7)$$

Como parte de la revisión, este criterio considera el cálculo de un factor de seguridad de la cimentación G_s que está controlado por la capacidad de carga de punta Q_{pu} , y se expresa de la siguiente forma:

$$G_s = Q_{pu} / Q_{pa} \quad (8.8)$$

8.4 Criterio de revisión de Auvinet y López-Acosta

En revisiones que se han realizado en edificios construidos con cimentaciones a base de pilotes de control (Auvinet & López-Acosta, 2008), se ha considerado que la seguridad del inmueble se satisface si las cargas actuantes afectadas por un factor de carga son menores que la capacidad de carga total de los pilotes.

El trabajo de los pilotes de control en condición sísmica se ha evaluado comparando las fuerzas resistentes Fr y actuantes Fa a nivel de desplante de la cimentación (Auvinet & López-Acosta, 2008):

$$Fr > Fa \quad (8.9)$$

Siendo:

$$Fr = C_{pilotes} + E_w + FN \quad (8.10)$$

$$Fa = [W_{mue} + W_{vinst} + W_{pilotes}] * F_c \quad (8.11)$$

donde: Fr = fuerza resistente, Fa = fuerza actuante, $C_{pilotes}$ = capacidad de carga de los pilotes de control (regida por la carga de fluencia de las celdas de deformación), E_w = empuje del agua, FN = fricción negativa desarrollada al 100 %, W_{mue} = carga muerta (incluyendo la cimentación), W_{vinst} = carga viva instantánea, $W_{pilotes}$ = carga debida a los pilotes y F_c = factor de carga.

En condición sísmica (Figura 8.5a), además de la carga vertical actuante Fa , la cimentación de un edificio está sometida a momentos M que originan que, la distribución de la presión sobre el suelo debida a la cimentación no sea uniforme, generándose una excentricidad $e = (M / Fa)$.

Se acepta que esta excentricidad reduce el ancho B de la cimentación del edificio en un valor de $2e$, es decir: $B' = B - 2e$ (ancho efectivo de la cimentación) (NTCDCC, 2017). Puesto que el ancho efectivo de la cimentación del edificio se modifica cuando cambia la excentricidad debido a la acción de un sismo, esto ocasiona que, en cada análisis, un número diferente de pilotes de control contribuya a la fuerza resistente del edificio F_r . Es posible construir gráficas como la de la Figura 8.5b para revisar la seguridad de un edificio con pilotes de control.

En esta Figura 8.5b se muestra la variación de la fuerza resistente F_r en función de la excentricidad, considerando la aportación de los pilotes en el ancho efectivo en condiciones sísmicas. En la misma, el punto de intersección de la curva de la fuerza resistente y la fuerza actuante se ha denominado excentricidad crítica e_{crit} , que indica el valor a partir del cual, la fuerza resistente es menor que la fuerza actuante ($F_r < F_a$), que es lo que debe evitarse. Adicionalmente, si los pilotes del edificio no tienen una distribución simétrica, resulta importante tomar en cuenta el sismo actuando en una dirección y en la contraria, porque el número de pilotes que contribuye en cada caso puede ser diferente.

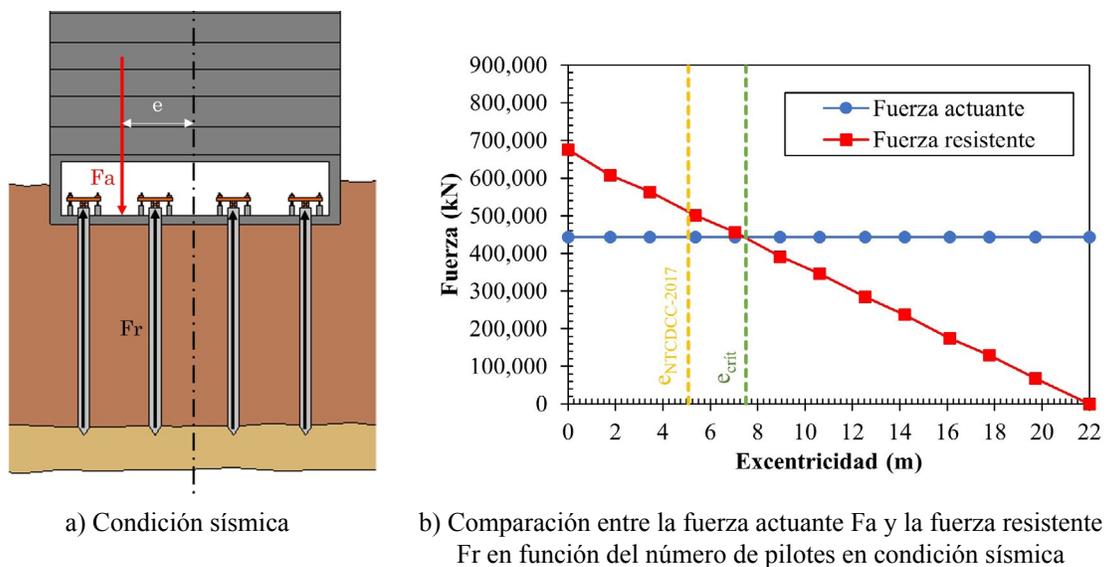


Figura 8.5 Consideraciones para la revisión en condición sísmica (Auvinet & López-Acosta, 2008)

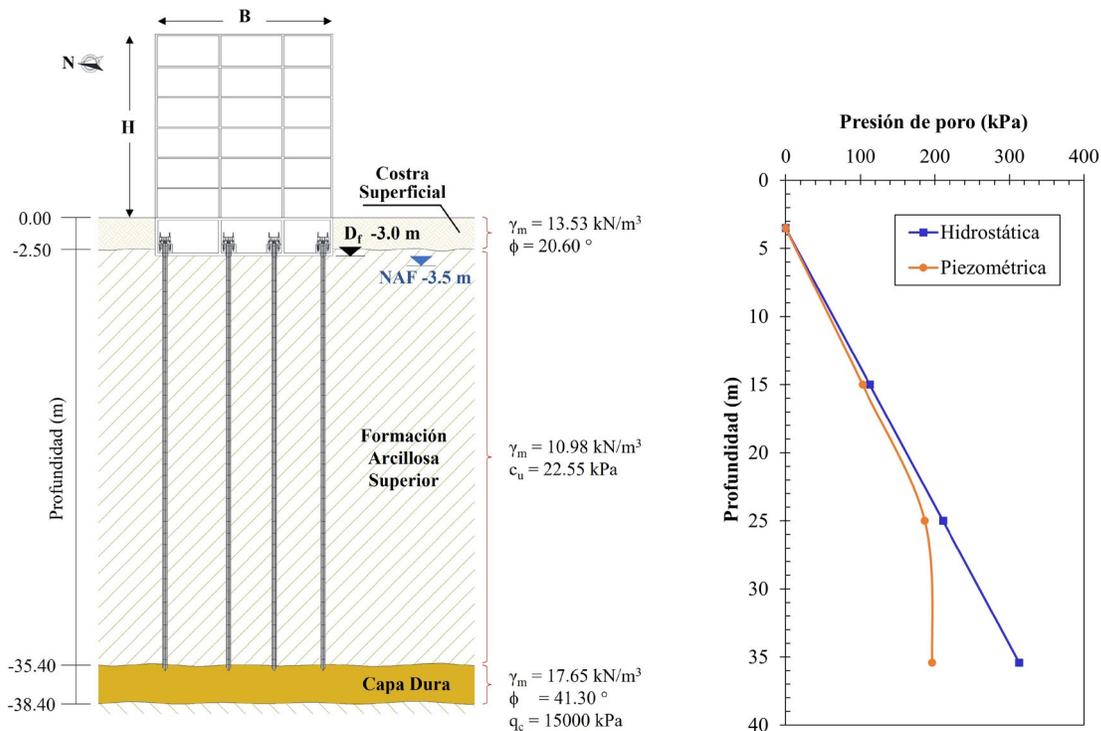
8.5 Aplicación de los criterios de diseño y de revisión

8.5.1 Consideraciones generales

Con la finalidad de demostrar la aplicabilidad de los criterios de diseño y de revisión y favorecer un mejor entendimiento del funcionamiento de los pilotes de control, se describe a continuación un caso de estudio paso a paso.

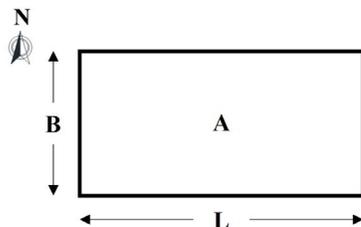
El caso de estudio corresponde a un edificio de oficinas con una altura de 14.55 m y localizado en la Zona III (Lacustre) de la Ciudad de México (NTCDCC, 2017), con dimensiones en planta de 15.0 m por 25.5 m y cuyas cargas se presentan en la Figura 8.6. El edificio tiene una cimentación a base de un cajón (desplantado a 3 m de profundidad) complementado con pilotes de control apoyados en un estrato resistente (localizado a 35.4 m de profundidad). Para la caracterización geotécnica del suelo del sitio, se toma en cuenta la información obtenida de un sondeo mixto y un sondeo con cono eléctrico que indica que la estratigrafía del sitio está constituida por una costra superficial (de 2.5 m de espesor), una formación arcillosa superior (de 32.9 m de espesor) y un estrato resistente (Figura 8.6). El nivel de aguas freáticas (NAF) se localiza a 3.5 m de profundidad y la distribución piezométrica de la presión de poro del sitio se muestra en la Figura 8.6b.

Para la aplicación de los criterios de diseño se utilizan los factores de carga F_c definidos en las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones vigentes (NTCCADEE, 2017)). Por otra parte, en los criterios de revisión, para el cálculo de la fricción negativa FN y la capacidad de carga por punta de un pilote C_p se utilizan los métodos descritos en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones (NTCDCC, 2017).



a) Vista en corte

b) Distribución piezométrica de la presión de poro



c) Vista en planta

Medidas del proyecto		Cargas sin factorizar	
Altura (H)	14.55 m	W_{cm}	23106.50 kN
Ancho (B)	15.00 m	W_m	4424.93 kN
Largo (L)	25.50 m	W_a	2443.41 kN
D_f	3.00 m	ΔQ_s	13120.64 kN
Área (A)	382.50 m ²		

d) Datos del proyecto

Nota: D_f = profundidad de desplante, NAF = Nivel de aguas freáticas, γ_m = peso volumétrico total del suelo, c_u = cohesión aparente determinada en ensaye triaxial no-consolidado no-drenado (UU), q_c = resistencia por punta del cono eléctrico, ϕ = ángulo de fricción interna del material, q_c = resistencia a la penetración del cono en el estrato resistente, W_{cm} = Carga muerta, W_m = Carga viva máxima, W_a = Carga viva instantánea y ΔQ_s = Incremento de carga por sismo.

Figura 8.6 Propiedades del suelo, geometría y cargas del edificio asumidas en el caso de estudio

8.5.2 Aplicación del criterio de diseño de González-Flores

El criterio de diseño de González-Flores (PICOSA, 2014b) consiste en evaluar las condiciones estática (Ecuación 8.1) y sísmica (Ecuación 8.2) para determinar el número de pilotes necesarios para el diseño.

Para lo anterior, se debe proponer inicialmente la geometría del pilote (cuadrada o circular) y su dimensión transversal (necesaria para calcular la fricción negativa con el criterio de González-Flores (PICOSA, 2014b), misma que contribuye al soporte del edificio). Posteriormente, en función de la capacidad de carga por punta del pilote C_p (calculada con base en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones (NTCDCC, 2017)) se propone la carga de fluencia de la celda de deformación $Qcd_{m\acute{a}x}$. El último paso es determinar el número de pilotes de control N_{pil} y la separación mínima entre ellos s_{min} .

Para este caso, se propone un pilote circular con diámetro $D = 0.45$ m desplantado en el estrato resistente (capa dura). Después, se calcula la fricción negativa FN utilizando la Ecuación 8.3 (ver Inciso 8.1 de este documento) establecida por González-Flores (PICOSA, 2014b) y considerando los siguientes datos: $L = 32.4$ m y $c_u = 22.55$ kPa. Como resultado se obtiene una fricción negativa $FN = 774.67$ kN.

$$FN = (\pi \times 0.45)(32.4)(22.55)(0.75) = 774.67 \text{ kN}$$

Posteriormente, se propone una carga de fluencia de la celda de deformación $Qcd_{m\acute{a}x}$ que sumada a la fricción negativa FN y al peso propio del pilote W_p (en este caso $W_p = 122.96$ kN) debe ser menor o igual que la capacidad de carga por punta del pilote C_p (en este caso $C_p = 1675.96$ kN, calculada con las NTCDCC (2017)). Lo que da como resultado que la carga de fluencia de la celda de deformación debe ser $Qcd_{m\acute{a}x} \leq 778.33$ kN. Con base en lo anterior, se propone un arreglo de 6×6 cubos, equivalente a una carga de fluencia de la celda de deformación $Qcd_{m\acute{a}x} = 705.60$ kN (considerando una carga de fluencia por cubo de 19.60 kN, como se establece en el Inciso 6.1.3 de esta investigación). Posteriormente, se procede a calcular el número de pilotes necesarios para las condiciones estática y sísmica mediante las Ecuaciones 8.1 y 8.2 del Inciso 8.1, respectivamente.

Para el análisis en condición estática (Ecuación 8.1) se consideran los factores de carga $F_c = 1.3$ para acciones permanentes y $F_c = 1.5$ para acciones variables definidos en las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones vigentes (NTCCADEE, 2017). El análisis consiste en sustituir los valores conocidos ($Qcd_{m\acute{a}x} = 705.60$ kN, $W_{cm} = 23106.50$ kN, $W_m = 4424.93$ kN, $FN = 774.67$ kN, y

$Q_L = 5626.54$ kN) en la Ecuación 8.1, se realizan las operaciones matemáticas correspondientes y despejando se obtiene el número total de pilotes de control N_{pil} :

$$\begin{aligned} [N_{pil}] Qcd_{(m\acute{a}x)} &= W_E (F_C) - [N_{pil}] FN - Q_L \\ [N_{pil}] Qcd_{(m\acute{a}x)} &= [W_{cm} (F_C) + W_m (F_C) - [N_{pil}] FN - Q_L \\ [N_{pil}] 705.60 &= [23106.50(1.3) + 4424.93(1.5)] - [N_{pil}] 774.67 - 5626.54 \\ [N_{pil}] 705.6 + [N_{pil}] 774.67 &= [36675.85] - 5626.54 \\ [N_{pil}] 1480.27 &= 31049.31 \\ [N_{pil}] &= 20.97 \approx 21 \text{ pilotes} \end{aligned}$$

Por otro lado, en la condición sísmica, el número de pilotes de control se determina de forma análoga, pero aplicando la Ecuación 8.2 y considerando el factor de carga $F_C = 1.1$ definido en las NTCCADEE (2017). Sustituyendo los datos conocidos ($Qcd_{m\acute{a}x} = 705.60$ kN, $W_{cm} = 23106.50$ kN, $W_a = 2443.41$ kN, $\Delta Q_s = 13120.64$ kN, $FN = 774.67$ kN, y $Q_L = 5626.54$ kN), realizando operaciones matemáticas y despejando se obtiene el número de pilotes N_{pil} :

$$\begin{aligned} [N_{pil}] Qcd_{(m\acute{a}x)} (W_E + \Delta Q_s) F_C &- [N_{pil}] FN - Q_L \\ [N_{pil}] Qcd_{(m\acute{a}x)} &= (W_{cm} + W_a + \Delta Q_s) F_C - [N_{pil}] FN - Q_L \\ [N_{pil}] 705.60 &= [(23106.50 + 2443.41 + 13120.64)(1.1)] - [N_{pil}] 774.67 - 5626.54 \\ [N_{pil}] 705.60 + [N_{pil}] 774.67 &= [42537.61] - 5626.54 \\ [N_{pil}] 1480.27 &= 36911.07 \\ [N_{pil}] &= 24.93 \approx 25 \text{ pilotes} \end{aligned}$$

Con base en los resultados del análisis previo, rige la condición sísmica. Por lo que se propone cimentar el edificio con 25 pilotes de control de 0.45 m de diámetro, cuya separación mínima entre ellos s_{min} está definida por la Ecuación 8.12 establecida por González-Flores (PICOSA, 2014b).

$$s_{min} = \sqrt{\pi D \left[\frac{F_{fr}}{\gamma_m} + \frac{D}{4} \right]} \quad (8.12)$$

donde F_{fr} es la adherencia lateral que puede desarrollarse en el fuste del pilote y γ_m es el peso volumétrico del suelo. De acuerdo con el criterio de González-Flores (PICOSA, 2014b), la adherencia lateral F_{fr} es equivalente a la cohesión media de la Formación Arcillosa Superior (FAS). Sustituyendo los datos conocidos ($F_{fr} = 22.55$ kPa; $\gamma_m = 10.98$ kN/m³; $D = 0.45$ m) en la ecuación anterior, se obtiene la siguiente separación mínima:

$$s_{\min} = \sqrt{\pi(0.45) \left[\frac{22.55}{10.98} + \frac{0.45}{4} \right]} = 1.75 \text{ m}$$

Una vez obtenido el número de pilotes de control requeridos en el diseño y su separación mínima, se propone la ubicación de los pilotes.

En la Figura 8.7 se presenta el diseño propuesto con 25 pilotes de control de 0.45 m de diámetro, cumpliendo con la separación mínima de 1.75 m.

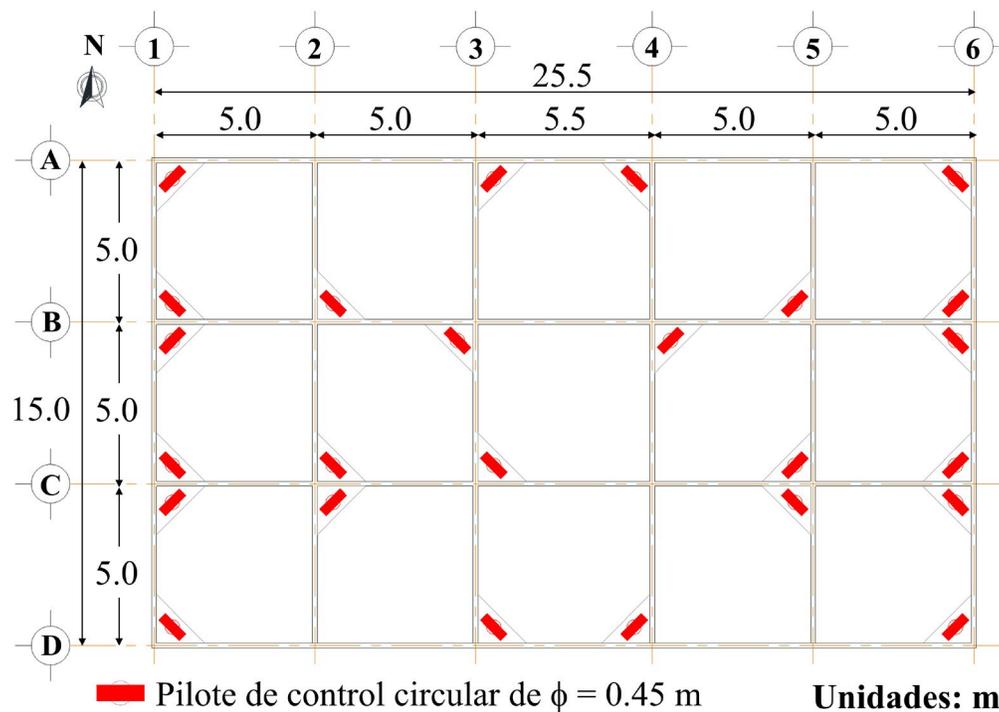


Figura 8.7 Diseño de pilotes de control propuestos utilizando el criterio de González-Flores

8.5.3 Aplicación del criterio de diseño de Tamez

El criterio de diseño de Tamez (1990) consiste en diseñar una cimentación a base de pilotes de control que cumpla con dos condiciones: a) desarrollar el equilibrio límite para permitir que la losa de cimentación descienda a la misma velocidad que la superficie del terreno vecino, y b) la capacidad de carga en la punta del pilote debe ser suficiente para impedir que la punta penetre en el estrato resistente.

Para lo anterior, inicialmente se debe proponer la geometría del pilote para poder calcular su dimensión transversal. Posteriormente, utilizando las ecuaciones propuestas por Tamez (1990) se calculan la capacidad de carga por punta del pilote Q_{pa} , la capacidad de carga por adherencia lateral Q_r . También, se define la capacidad de carga de la celda de deformación Q_c (equivalente a la carga de fluencia de un arreglo de cubos, como se define en el Inciso 6.1.3 de esta investigación) con la ecuación establecida por Tamez (1990). A partir de los datos anteriores (Q_c y Q_r) se obtiene la capacidad de carga del pilote W_i utilizando la ecuación propuesta por Tamez (1990). Finalmente, se calcula el número de pilotes de control N , la fricción negativa necesaria para el equilibrio límite F_{mn} y la separación mínima s_{min} entre los pilotes de control.

Para este caso de estudio se proponen pilotes de sección cuadrada cuyo lado b está definido por la Ecuación 8.13 (Tamez, 1990).

$$b = \frac{6.8(1+n)l\bar{f}}{q_c} \quad (8.13)$$

donde n es la relación entre la capacidad de carga de la celda de deformación Q_c y la capacidad por adherencia lateral Q_r , l es la longitud del pilote, \bar{f} es la cohesión media del estrato arcilloso (FAS), y q_c es la resistencia a la penetración del cono en el estrato resistente.

Aplicando la Ecuación 8.13 y considerando los siguientes valores: $q_c = 15,000$ kPa, $l = 32.4$ m, $\bar{f} = 22.55$ kPa, además proponiendo una relación $n = 0.5$ (valor sugerido por Tamez (1990)), se obtiene un lado $b=0.50$ m:

$$b = \frac{6.8(1+0.5)(32.4)(22.55)}{15000} = 0.50 \text{ m}$$

Una vez determinada la dimensión transversal del pilote, se utilizan las ecuaciones propuestas por Tamez (1990) para calcular la capacidad de carga por punta del pilote Q_{pa} , la capacidad de carga por adherencia lateral Q_f y la capacidad de carga de la celda de deformación Q_c (equivalente a la carga de fluencia de la celda de deformación) con las Ecuaciones 8.14, 8.15 y 8.16, respectivamente (Tamez, 1990):

$$Q_{pa} = b^2 \left(\frac{q_c}{FS} \right) \quad (8.14)$$

$$Q_f = p l \bar{f} \quad (8.15)$$

$$Q_c = n Q_f \quad (8.16)$$

donde FS es el factor de seguridad equivalente a 1.7 (valor propuesto por Tamez), y p es el perímetro de la sección transversal del pilote.

Sustituyendo los valores conocidos ($b = 0.5$ m, $q_c = 15000$ kPa, $l = 32.4$ m, $\bar{f} = 22.55$ kPa y $n = 0.5$ –valor sugerido por Tamez–) en las Ecuaciones 8.14, 8.15 y 8.16, se obtiene como resultado:

$$Q_{pa} = (0.5)^2 \left(\frac{15000}{1.7} \right) = 2205.88 \text{ kN}$$

$$Q_f = (4 \times 0.5)(32.4)(22.55) = 1461.24 \text{ kN}$$

$$Q_c = (0.5)(1461.24) = 730.62 \text{ kN}$$

Posteriormente, se calcula la capacidad de carga del pilote en condición sísmica W_{dta} utilizando la Ecuación 8.17 propuesta por Tamez (1990), que involucra la capacidad de carga por adherencia lateral del pilote Q_f (obtenida con la Ecuación 8.15), la capacidad de carga de la celda de deformación Q_c (obtenida con la Ecuación 8.16), y un factor de seguridad (Tamez propone un FS = 1.7).

$$W_{dta} = Q_c + \left(\frac{Q_f}{FS} \right) \quad (8.17)$$

Sustituyendo los valores correspondientes ($Q_c = 730.62$ kN; $Q_f = 1461.24$; FS = 1.7) en la Ecuación 8.17, se obtiene una capacidad de carga del pilote en condición sísmica W_{dta} :

$$W_{dta} = 730.62 + \frac{1461.24}{1.7} = 1590.17 \text{ kN}$$

Posteriormente, para determinar el número de pilotes de control N con la ecuación establecida por Tamez (1990), se debe dividir la carga del edificio en condición sísmica W_{dt} (equivalente a la segunda combinación de carga: carga muerta W_{cm} , carga viva instantánea W_a e incremento de carga por sismo ΔQ_s) afectada por el factor de carga $F_C=1.1$ definido en las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones (NTCCADEE, 2017) entre la capacidad de carga del pilote en condición sísmica W_{dta} (Ecuación 8.18).

$$N = \frac{W_{dt}}{W_{dta}} \quad (8.18)$$

Sustituyendo los datos correspondientes ($W_{cm} = 23106.50$ kN, $W_a = 2443.41$ kN, $\Delta Q_s = 13120.64$ kN, $W_{dta} = 1590.17$ kN, $F_C = 1.1$), se obtiene el número total de pilotes de control N :

$$N = \frac{(23106.50 + 2443.41 + 13120.64)(1.1)}{1590.17} = 26.75 \approx 27 \text{ pilotes}$$

Con base en el cálculo anterior, se requieren 27 pilotes de control de sección cuadrada de lado $b = 0.50$ m. Asimismo, la capacidad de carga de la celda de deformación $Q_c = 730.62$ kN obtenida con la Ecuación 8.16 de Tamez (1990) debe ser igual o cercana a la carga de fluencia Q_{ca} de un arreglo de cubos de madera que represente este mismo orden de magnitud ($Q_c \approx Q_{ca}$). Por lo anterior, se propone un arreglo de 6×6 cubos equivalente a una carga de fluencia de la celda de deformación $Q_{ca} = 705.6$ kN (considerando una carga de fluencia por cubo de 19.6 kN como se establece en el inciso 6.1.3 de esta investigación).

Ahora bien, para calcular la carga transmitida al suelo mediante la losa W_{se} y obtener la fricción negativa necesaria f_{nn} para el equilibrio estático límite se utilizan las Ecuaciones 8.19 y 8.20, respectivamente, propuestas por Tamez (1990).

$$W_{se} = \frac{W_{ne}}{N} - Q_{ca} \quad (8.19)$$

$$f_{nn} = Q_f - W_{se} \quad (8.20)$$

Sustituyendo los datos correspondientes en las Ecuaciones 8.19 y 8.20, y considerando una carga neta estática $W_{ne} = 21634.24$ kN y una carga de fluencia de la celda de deformación $Q_{ca} = 705.6$ kN, se obtiene como resultado:

$$W_{se} = \frac{21634.24}{27} - 705.6 = 95.66 \text{ kN}$$

$$f_{nn} = 1461.24 - 95.66 = 1365.59 \text{ kN}$$

Para conocer la separación mínima s_{min} entre los pilotes de control se utiliza la Ecuación 8.21 definida por Tamez (1990), que involucra el peso volumétrico saturado promedio γ_m , la profundidad a la que se encuentra el estrato resistente H y la presión de poro a la profundidad del estrato resistente u_b .

$$s_{min} = 1.25 \sqrt{\frac{f_{nn}}{(\gamma_m H - u_b)}} \quad (8.21)$$

Considerando los siguientes valores $\gamma_m = 12.25$ kN/m³, $H = 35.4$ m, $u_b = 192.13$ kPa (ver Figura 8.6b), y sustituyendo datos en la Ecuación 8.21, se obtiene:

$$s_{min} = 1.25 \sqrt{\frac{1365.59}{(12.25)(35.4) - 192.13}} = 2.97 \text{ m}$$

Una vez calculado el número de pilotes de control requerido en el diseño y su separación mínima, se propone la ubicación de los pilotes. En la Figura 8.8 se presenta el diseño propuesto con 27 pilotes de control de sección cuadrada de lado $b = 0.50$ m y satisfaciendo la separación mínima de 2.97 m.

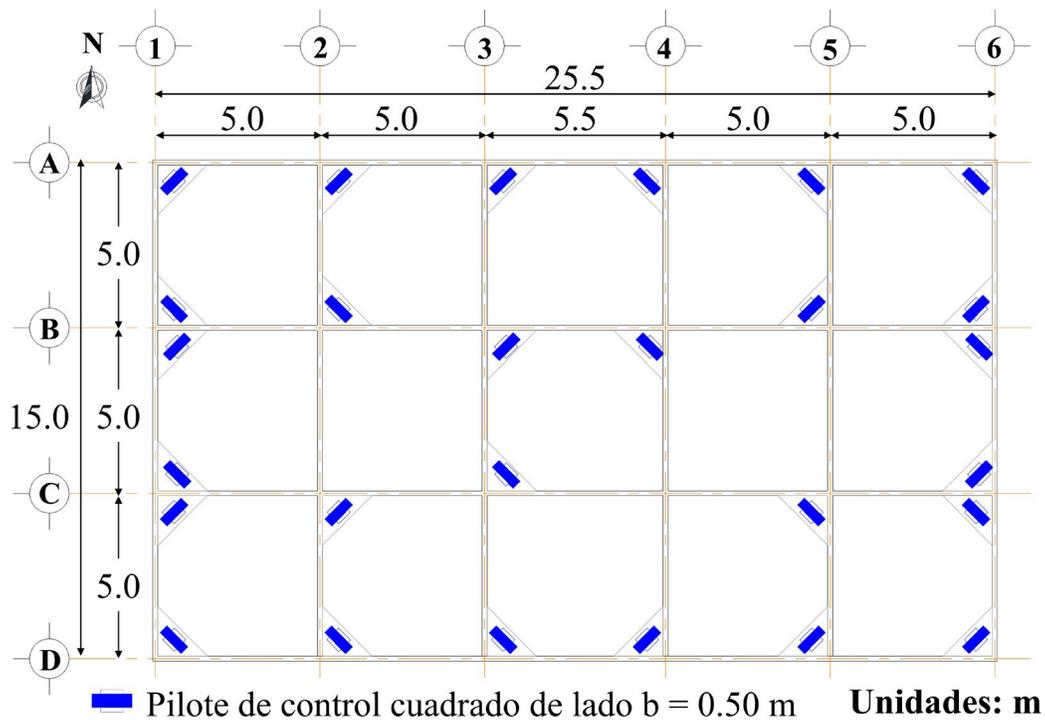


Figura 8.8 Diseño de pilotes de control propuestos utilizando el criterio de Tamez

8.5.4 Aplicación del criterio de revisión de Zeevaert

El criterio de revisión de Zeevaert (1983) permite analizar en condición estática una cimentación con pilotes de control determinando un factor de seguridad $G_s = Q_{pu} / Q_{pa}$. Este factor G_s está dado por la división de la capacidad de carga por punta del pilote Q_{pu} entre la carga actuante del pilote $Q_{pa} = Q_c + FN$ (ver Ecuación 8.7).

La capacidad de carga por punta del pilote Q_{pu} y la fricción negativa FN se calculan con base en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones vigentes (NTCDCC, 2017). En la Tabla 8.1 se proporcionan los factores de seguridad G_s obtenidos para los diseños realizados con los criterios de González-Flores y Tamez, que se expusieron en los incisos precedentes.

En la Tabla 8.1 se muestra que el factor de seguridad del diseño realizado con el criterio de Tamez es mayor respecto al diseño realizado con el criterio de González-Flores. Lo anterior, se debe a que el criterio de diseño de Tamez es más conservador al considerar un factor de seguridad.

Tabla 8.1 Factores de seguridad G_s obtenidos con el criterio de Zeevaert

Criterio	Fricción negativa FN (kN)	Carga de fluencia de la celda de deformación Q_c (kN)	Carga total actuante en el pilote $Q_{pa} = Q_c + FN$ (kN)	Capacidad de carga por punta Q_{pu} (kN)	Factor de seguridad $G_s = Q_{pu} / Q_{pa}$
González-Flores	926.44	705.60	1632.04	1675.96	1.03
Tamez	1302.61	705.60	2008.21	2520.52	1.25

Por otra parte, si se desea aumentar el factor de seguridad, es posible: a) considerar una menor carga en la cabeza de los pilotes de control y por tanto, un mayor número de pilotes, o bien, b) incrementar la profundidad de empotramiento para aumentar la capacidad por punta.

8.5.5 Aplicación del criterio de revisión de Auvinet y López-Acosta

Con la finalidad de conocer el comportamiento en condición sísmica de las cimentaciones a base de pilotes de control diseñadas con los criterios de González-Flores y de Tamez descritos previamente, se efectúa a continuación la revisión aplicando el criterio de Auvinet y López-Acosta (2008) que consiste en comparar la fuerza actuante (F_a) con la fuerza resistente (F_r) a nivel de desplante de la cimentación. La fuerza actuante F_a corresponde a la suma de la carga muerta W_{mue} (incluyendo el peso de la cimentación), la carga viva instantánea W_{vinst} , y la carga debida a los pilotes $W_{pilotes}$, todas ellas afectadas por un factor de carga F_c establecido en las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones vigentes (NTCCADEE, 2017)) (ver Ecuación 8.8). Por otra parte, la fuerza resistente corresponde a la suma de la capacidad de carga de los pilotes de control $C_{pilotes}$ (regida por la carga de fluencia de las celdas de deformación), el empuje del agua E_w , y fricción negativa FN desarrollada al 100 % (ver Ecuación 8.9).

En la Tabla 8.2 se presentan la fuerza actuante F_a (sin factor de carga) y la fuerza resistente F_r consideradas en el criterio de Auvinet y López-Acosta para revisar los diseños de cimentación a base de pilotes de control realizados con los criterios de González-Flores y de Tamez.

Tabla 8.2 Fuerza actuante F_a y fuerza resistente F_r consideradas en la revisión

Criterio	Fuerza actuante (sin factor de carga) F_a			Fuerza resistente F_r		
	W_{mue} (kN)	W_{vinst} (kN)	$W_{pilotes}$ (kN)	$C_{pilotes}$ (kN)	E_w (kN)	F_N (kN)
González-Flores	23106.51	2443.41	3074.00	17640.00	0	23161.00
Tamez			5147.16	19051.20		35170.47

Nota: Para la aplicación del criterio de revisión de Auvinet y López-Acosta (2008), la fuerza actuante F_a se afecta por el factor de carga $F_c = 1.1$ como lo indican las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones vigentes (NTCCADEE, 2017).

El estudio se enfoca al caso más crítico, correspondiente a la condición sísmica en la dirección transversal del edificio (sismo actuando hacia el norte, ver Figura 8.9). En condición sísmica, además de la carga vertical actuante (F_a), la cimentación del edificio está sometida a momento de volteo (M). Estas acciones originan que la distribución de la presión sobre el suelo debida a la cimentación no sea uniforme, generándose una excentricidad: $e_{diseño} = M/F_a$. Las excentricidades de diseño obtenidas de esta manera, se proporcionan en la Tabla 8.3.

Tabla 8.3 Excentricidades de diseño obtenidas para los criterios utilizados

Criterio	Excentricidad de diseño $e_{diseño}^{(**)}$
	(m)
González-Flores	1.77
Tamez	1.65

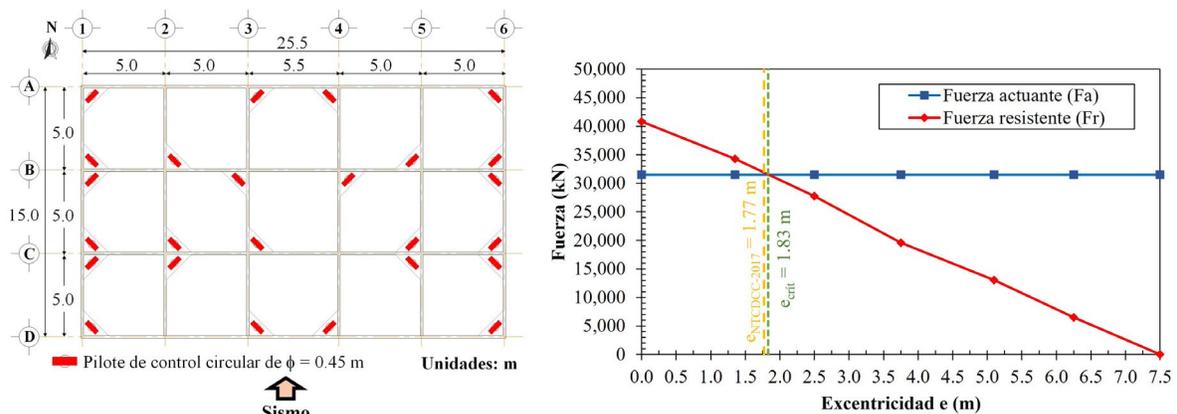
(**) Con base en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones vigentes (NTCDCC, 2017)

Puesto que el ancho efectivo de la cimentación del edificio se modifica cuando cambia la excentricidad debido a la acción de un sismo, esto ocasiona que en cada análisis un número diferente de pilotes de control contribuya a la fuerza resistente del edificio.

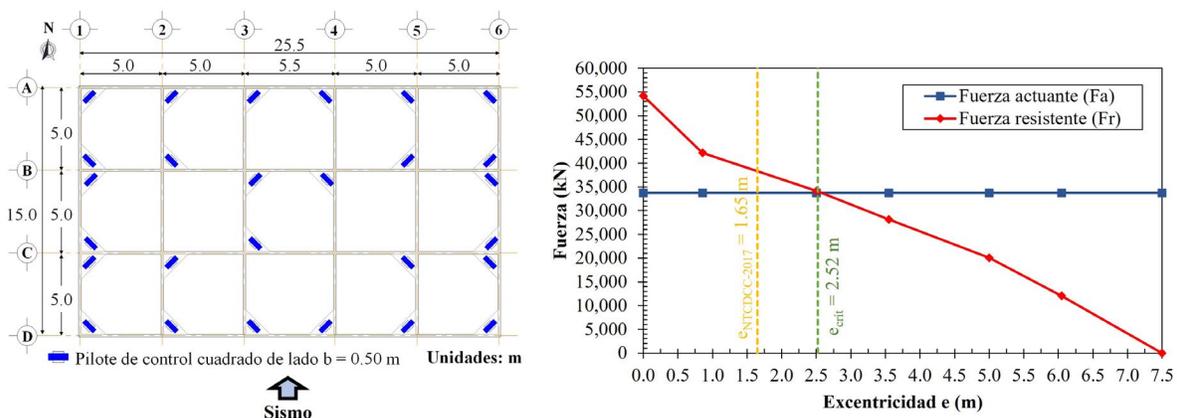
En las gráficas de las Figuras 8.9a y b se muestra la variación de la fuerza resistente (F_r) en función de la excentricidad considerando los pilotes de control propuestos en el edificio en estudio y el aporte de la fricción negativa que se desarrolla en el fuste de los

pilotes (25 pilotes para el diseño con el criterio de González-Flores y 27 pilotes para el diseño con el criterio de Tamez). En esta gráfica también se dibuja la fuerza actuante en el edificio en estudio. El punto donde se interseca la curva de la fuerza resistente con la línea de la fuerza actuante se denomina en este estudio excentricidad crítica (e_{crit}), que indica el valor a partir del cual la fuerza resistente es menor que la fuerza actuante.

Como se aprecia en las gráficas de las Figuras 8.9a y b, la excentricidad crítica es mayor que la excentricidad de diseño en ambos criterios. Por lo anterior, tanto el criterio de González-Flores como el de Tamez cumplen con la revisión en condición sísmica.



a) Diseño realizado con el criterio de González-Flores



b) Diseño realizado con el criterio de Tamez

Figura 8.9 Comparación entre la fuerza actuante F_a y la fuerza resistente F_r en función del número de pilotes de control en condición sísmica

8.5.6 Comentarios referentes a los criterios aplicados

Los criterios de diseño de González-Flores y de Tamez, permiten realizar el diseño de una cimentación nueva o de una recimentación a base de pilotes de control. Ambos criterios permiten considerar condiciones estática y sísmica. El criterio de diseño de González-Flores resulta fácil y práctico en su aplicación. El criterio de diseño de Tamez, al ser más conservador, permite realizar un diseño con mayor factor de seguridad.

Por otra parte, los criterios de revisión permiten analizar cimentaciones o recimentaciones a base de pilotes de control ya construidas, o bien, evaluar los diseños realizados con los criterios de González-Flores y de Tamez. El criterio de revisión de Zeevaert permite realizar análisis en condición estática. Para análisis en condición sísmica es posible utilizar el criterio de revisión de Auvinet y López-Acosta. Cabe señalar, que los criterios de revisión solamente son aplicables para revisar cimentaciones (o diseños de las mismas) y no para realizar diseños, debido a que no contienen ecuaciones que evalúen: a) si la carga aplicada en los pilotes de control es mayor que la capacidad de carga del propio pilote, b) la separación mínima que debe existir entre pilotes, y c) el número de pilotes requeridos para el diseño.

La Tabla 8.4 proporciona un resumen de las ventajas, desventajas y recomendaciones para la aplicación de los criterios de diseño y de revisión de pilotes de control, con base en lo observado en el caso de estudio descrito previamente.

Tabla 8.4 Ventajas, desventajas y recomendaciones para la aplicación de los criterios de diseño y de revisión de pilotes de control

Criterios	Ventajas	Desventajas	Recomendaciones
Criterio de diseño de González-Flores	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Establece ecuaciones generales que no dependen de la geometría del pilote. ▶ El criterio permite considerar factores de carga de las NTCCADEE vigentes (2017). 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ El criterio considera que los pilotes de control trabajan al límite de su capacidad de carga. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Se recomienda aplicar un factor para evitar que el pilote trabaje al límite de su capacidad de carga. ▶ Se sugiere calcular la fricción negativa y la capacidad de carga por punta de acuerdo con las NTCDCDCC vigentes (2017).

Criterios	Ventajas	Desventajas	Recomendaciones
Criterio de diseño de Tamez	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Considera factores que incrementan la seguridad del diseño en condición sísmica. ▶ El criterio permite un mejor entendimiento del funcionamiento de los pilotes de control. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ El criterio original no considera factores de carga. ▶ Las ecuaciones utilizadas en el criterio cambian en función de la geometría del pilote, por lo que se debe tener precaución al momento de su aplicación. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Se recomienda calcular la fricción negativa y la capacidad de carga por punta de acuerdo con las NTCDCD vigentes (2017).
Criterio de revisión de Zeevaert	<ul style="list-style-type: none"> ▶ El criterio permite utilizar las NTCDCD (2017) para el cálculo de la fricción negativa y la capacidad de carga por punta del pilote. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ El criterio no permite evaluar el comportamiento de un edificio en condición sísmica. ▶ El criterio se fundamenta en calcular factores de seguridad, que no están reconocidos en las NTCDCD vigentes (2017). 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Se requiere una actualización del criterio que permita apearse a las NTCDCD vigentes (2017).
Criterio de revisión de Auvinet y López-Acosta	<ul style="list-style-type: none"> ▶ El criterio permite utilizar las NTCDCD vigentes (2017) para calcular la fricción negativa y la capacidad de carga por punta del pilote. ▶ El criterio permite llevar a cabo la revisión del edificio en condición estática. 	-----	<ul style="list-style-type: none"> ▶ El criterio se desarrolló considerando las NTCDCD de 2004. No obstante, es posible actualizarlo sin ningún problema a las NTCDCD vigentes (2017).

Nota: NTCDCD = Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones (NTCDCD, 2017), NTCCADEE = Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones (NTCCADEE, 2017)

9. Casos de recimentación y renivelación con pilotes de control

Con base en los casos documentados, se sabe que la mayoría de las renivelaciones de edificios mediante el uso de pilotes de control consisten en hacer descender la parte más alta del edificio (la zona con menor asentamiento diferencial). Sin embargo, también se tiene documentado un caso donde se llevó a cabo la renivelación del edificio levantando la parte más baja del edificio (la zona con mayor asentamiento diferencial), con ayuda de gatos hidráulicos en lugar de hacerlo a través de las celdas de deformación de los pilotes de control.

Ambas formas de renivelar son factibles, sin embargo, la elección de un método u otro depende principalmente del costo, ya que el levantamiento de una estructura implica mayor inversión debido a los gatos hidráulicos y a la rigidización de la cimentación. A continuación, se presentan algunos casos de estudio donde se llevó a cabo la recimentación y renivelación del inmueble.

9.1 Recimentación y levantamiento de un templo del siglo XVIII

El Templo de las Capuchinas es uno de los casos más emblemáticos del uso de pilotes de control, ya que además de corregir un desnivel de aproximadamente 3.5 m, es considerado el primer caso a nivel mundial donde se llevó a cabo el levantamiento de un edificio de mampostería hasta recuperar su nivel original (PICOSA, 2010).

El Templo de las Capuchinas fue construido en el siglo XVIII y se localiza a un costado de la antigua Basílica de Guadalupe. Sus dimensiones en planta son 58 m de largo y 17 m de ancho, con un peso estimado de 130,428 kN (13,300 t) (González-Flores, 1981). La cimentación original del templo está conformada por zapatas corridas de mampostería de geometría trapezoidal.

De acuerdo con la zonificación geotécnica de la Ciudad de México, el templo se localiza en la denominada Zona III Lacustre (NTCDCC, 2017), integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Debido a su ubicación geotécnica y aunado al hundimiento regional del sitio, el Templo de las Capuchinas presentó un problema de asentamiento diferencial de 3.472 m en la esquina suroriente.

La solución para corregir el problema de asentamiento diferencial consistió en recimentar el templo rigidizando la cimentación original (constituida por zapatas corridas de mampostería), mediante contratraveses de concreto armado y colocando 159 pilotes de control, para lo cual, se construyeron un total de 159 dados estructurales que permitieron hincar el mismo número de pilotes de concreto reforzado (Figura 9.1). Al estar la construcción apoyada totalmente en los pilotes, se colocaron la misma cantidad de gatos hidráulicos de 100 t de capacidad, con la finalidad de levantar la construcción hasta el nivel original (Figura 9.2).

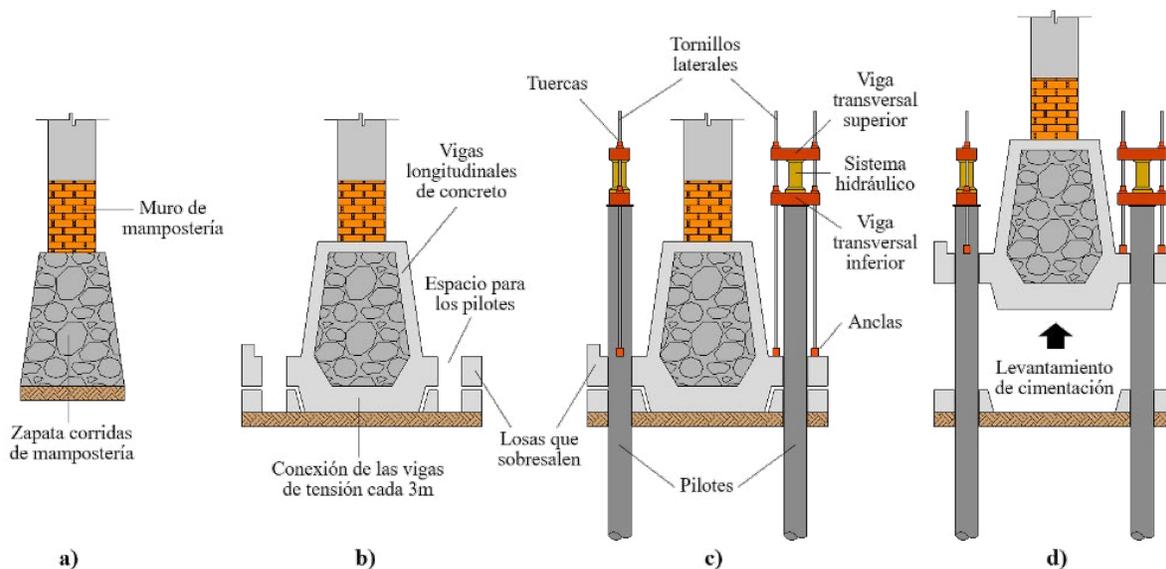


Figura 9.1 Procedimiento de recimentación y levantamiento del templo: a) cimentación original, b) refuerzo de la cimentación, c) recimentación con pilotes de control, y d) levantamiento de la estructura

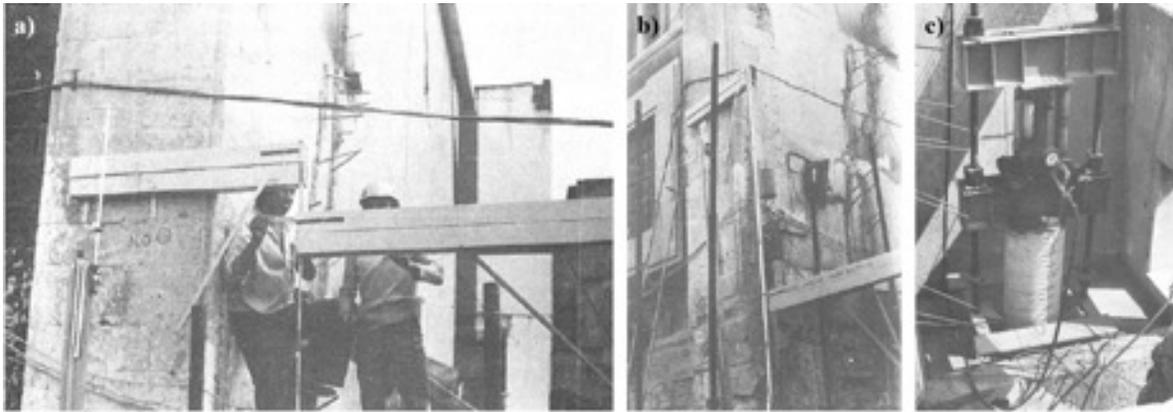


Figura 9.2 Indicadores de levantamiento (González-Flores, 1981): a) condición inicial, b) condición final, y c) pilote de control con un gato hidráulico

El levantamiento del templo duró 75 días, iniciando el 31 de mayo de 1978 y terminando el 14 de agosto de ese mismo año (Figura 9.3). La renivelación fue proporcional a los desniveles medidos, de tal forma que la parte que más se elevó fue la esquina suroriente con 3.47 m, la esquina surponiente 0.51 m y la esquina nororiente 2.97 m. Después de la renivelación, se construyó debajo del templo un nuevo cajón de cimentación (PICOSA, 2010).

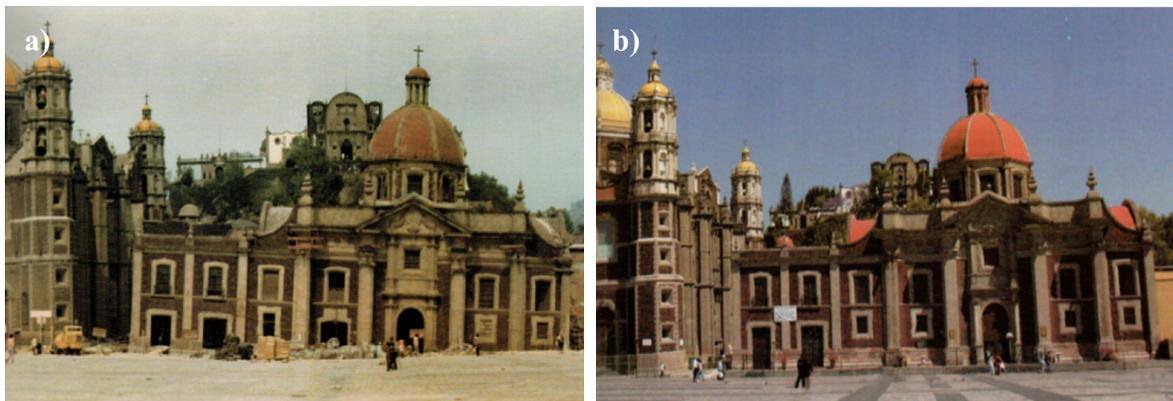


Figura 9.3 Recimentación y renivelación del Templo de las Capuchinas (PICOSA, 2010): a) antes de los trabajos, b) después de los trabajos

9.2 Recimentación de la torre de un conjunto de edificios en Tlatelolco

El inmueble en estudio se proyectó (1964) como parte del conjunto Nonoalco-Tlatelolco (Figura 9.4) y fue destinado originalmente para las oficinas de la Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE), quien lo ocupó hasta 2006, cuando se donó el conjunto a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) para constituir el Centro Cultural Universitario Tlatelolco (CCUT), que más recientemente se convirtió en la Torre UNAM Tlatelolco. El predio colinda al sur con la Avenida Flores Magón, al poniente con el eje central Lázaro Cárdenas, al oriente con el jardín de San Marcos y al norte con la zona arqueológica de Tlatelolco (conocida como *Plaza de las Tres Culturas*).

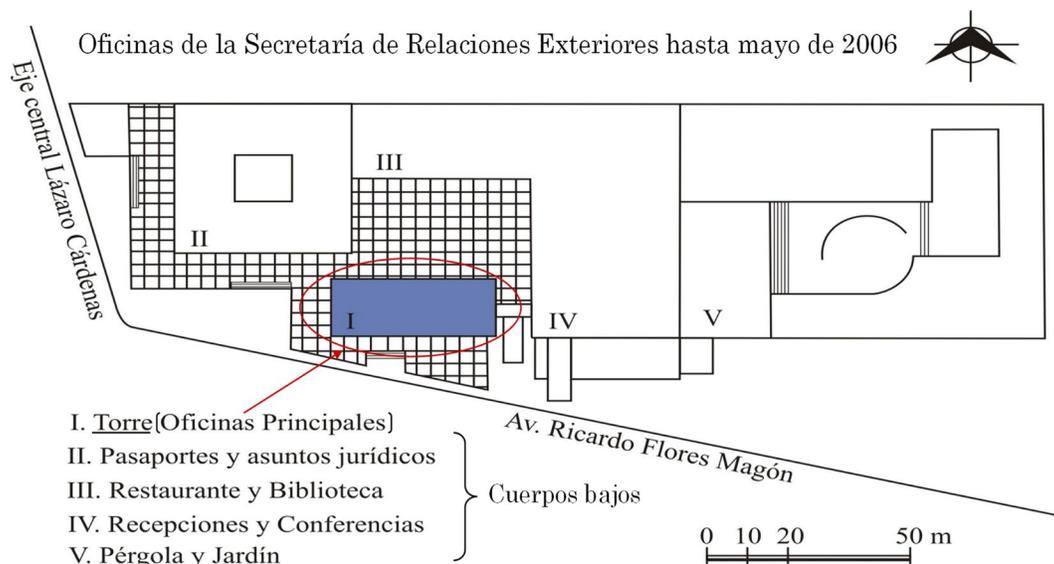


Figura 9.4 Localización y características generales del conjunto de edificios

En 1983 la Torre UNAM Tlatelolco fue recimentada mediante el hincado de 52 pilotes de punta con sistema de control en la cabeza de 100 y 150 t, ubicados en el lado sur de la torre en la que se presentaban los máximos desplomos y hundimientos del edificio en esa época. Años después (de noviembre 2008 a abril 2009), para contribuir al mejoramiento en el comportamiento de la torre, en la ampliación del cajón de cimentación de la torre se colocaron los 36 pilotes de control nuevos que se indican en la Figura 9.5.

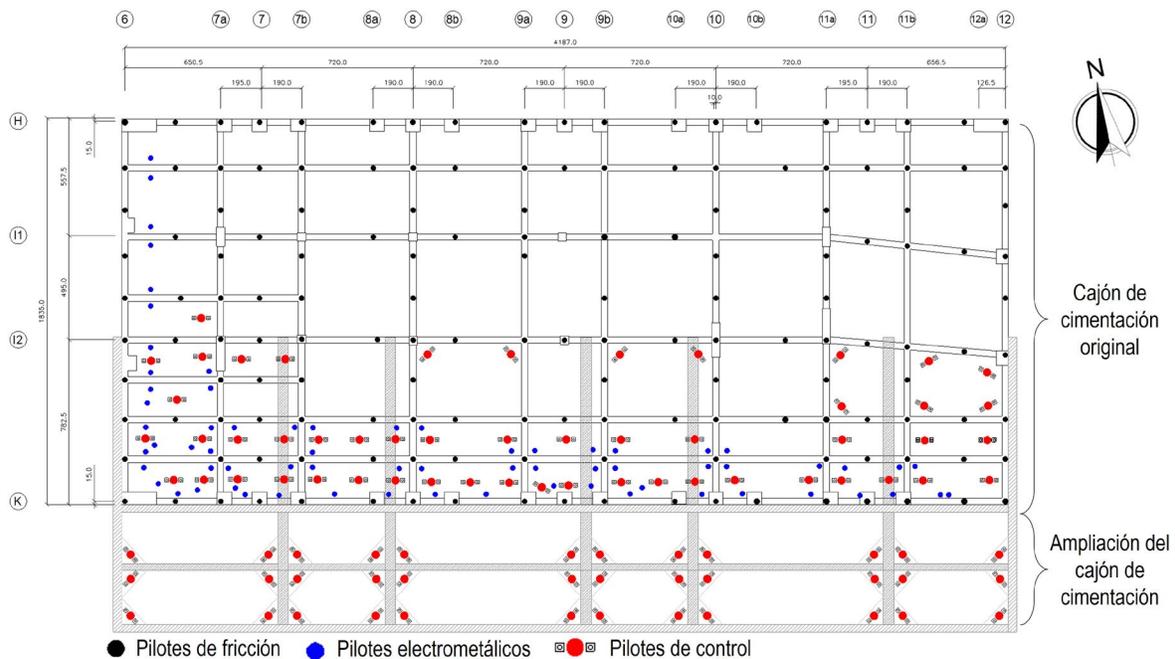


Figura 9.5 Ubicación de los pilotes de control en la Torre UNAM Tlatelolco

Para tener un mejor panorama del comportamiento que ha presentado la Torre UNAM Tlatelolco en cuanto a los desplomos (Figura 9.6), a continuación, se presenta un breve resumen histórico:

- Desde el inicio de la construcción (1964) se comenzaron a presentar movimientos horizontales pronunciados con tendencia hacia el sur desde el octavo piso. Se tomaron varias medidas correctivas durante su construcción: desde la instalación de bajo alfombras en los entrepisos hasta la colocación de lastre de arena en la cimentación. Aún con estas medidas, al finalizar la construcción de la torre, incluyendo los recubrimientos de mármol colocados (septiembre de 1965), la magnitud de los desplomos era de 32 cm en la esquina suroeste y de 29.2 cm en la esquina sureste.
- Con el transcurso del tiempo estos desplomos siguieron incrementándose: en marzo de 1977 se tenía un desplomo promedio de 64.4 cm en las cuatro esquinas de la torre. En diciembre de 1983 ya se alcanzaban valores promedio de 77.9 cm. Presentándose los valores máximos en las esquinas suroeste y noroeste de la torre.
- Durante la instalación de los pilotes de control (1983; Figuras 9.6 y 9.7a), los desplomos aumentaron hasta 94 y 95 cm en la dirección suroeste y noroeste, respectivamente.

- Después del sismo de 1985 estos valores aumentaron a 99 y 101 cm también en las esquinas suroeste y noroeste, respectivamente.
- Posterior a la ampliación del cajón de cimentación al sur de la torre (mayo de 1987) los desplomos ya eran de 102 cm en estas mismas aristas.
- Al inicio del funcionamiento de los pozos de extracción e inyección de agua (mayo de 1991) los desplomos se incrementaron hasta 104 cm, pero después disminuyeron hasta llegar a valores de 97 a 99 cm; permaneciendo así de 1991 a 2001. Después de este año los desplomos volvieron a aumentar.
- Cuando el inmueble (ocupado previamente por la Secretaría de Relaciones Exteriores) fue donado a la UNAM (en 2006) hubo un periodo en el que no se dio mantenimiento a los pilotes de control de la torre (se estima de 2006 a 2009). Así mismo, previo a esta donación (en agosto 2005) se suspendió el bombeo de agua que se había venido efectuando en los pozos existentes alrededor del inmueble. El desplomo en la torre aumentó, se asume que por la falta de mantenimiento principalmente, como se aprecia en la Figura 9.6, alcanzando los valores más altos registrados en la torre (106 cm).
- En el período 03-noviembre-2008 a 30-abril-2009 la torre se recimentó con 36 pilotes de control nuevos en la ampliación del cajón de cimentación existente (Figuras 9.6 y 9.7b), apoyados en la capa dura.
- Con base en los levantamientos topográficos, se sabe que a partir de esta recimentación se dio mantenimiento a los dispositivos de control en 2010, 2012, 2013, 2014 y 2016.
- En 2010 el máximo desplomo en la historia del edificio lo presentó la esquina sureste con un valor de 106 cm. Sin embargo, este desplomo se redujo a 100.7 y 100.2 cm en 2014 y 2016 respectivamente.
- En un levantamiento realizado en marzo 2016, la esquina suroeste tuvo el mayor desplomo con un valor de 101.4 cm.
- El levantamiento topográfico realizado el 8 de mayo de 2018 muestra que el mayor desplomo continua en la esquina sureste con un valor de 101.2 cm.

- Con base en las lecturas registradas en julio 2019 mediante un sistema GPS ubicado en las equinas suroeste y noroeste del edificio, se tiene conocimiento que la esquina suroeste presenta el mayor desplomo con 104.1 cm.

En la Figura 9.6 se distingue que cuando no se da mantenimiento a los pilotes de control los desplomos aumentan en condición estática y son aún más significativos después de un sismo, tornándose más vulnerables en condición sísmica. Lo anterior confirma la importancia del mantenimiento periódico que debe darse a los pilotes de control, para que éstos funcionen adecuadamente durante toda la vida útil de una edificación.

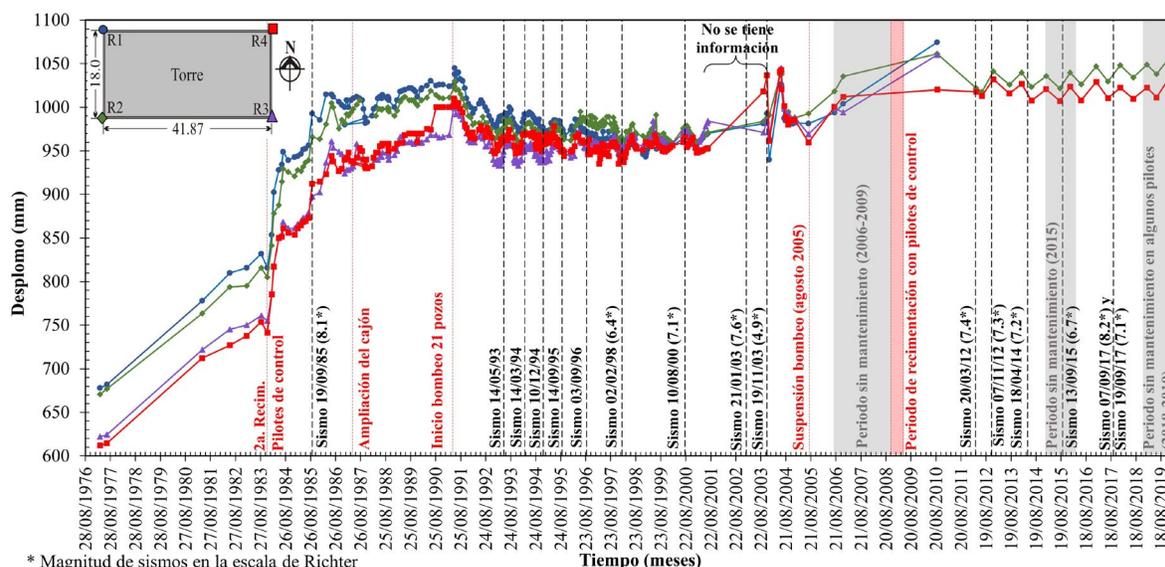


Figura 9.6 Historia de desplomos en la Torre UNAM Tlatelolco en el Período: marzo 1977 a julio 2019 (López-Acosta, Martínez-Hernández, & Espinosa-Santiago, 2021)

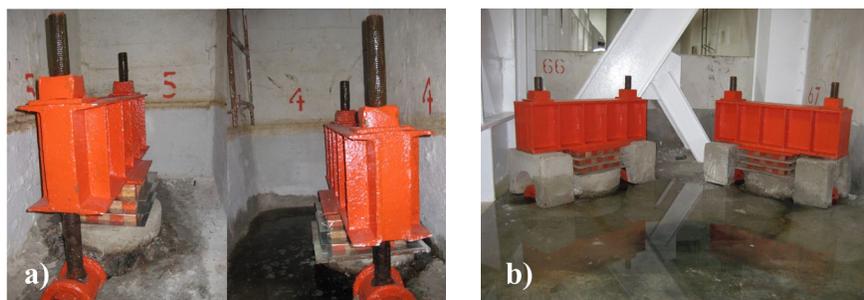


Figura 9.7 Pilotes de control en la Torre UNAM Tlatelolco: a) ubicados en el cajón de cimentación original, y b) ubicados en la ampliación del cajón de cimentación

9.3 Recimentación de tanques de almacenamiento

La Estación de Combustibles México se encuentra ubicada a un costado del actual Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (Figura 9.8a), cuya zonificación geotécnica se clasifica como Zona III Lacustre (NTCDCC, 2017), integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. La estación está conformada por 9 tanques de almacenamiento (siete tanques de turbosina y dos más de agua, Figura 9.8b), los cuales, debido al hundimiento regional de la Ciudad de México, presentaron desplomos y desniveles con valores considerables. Ello obligó a reducir en un 34% la capacidad operativa del tanque 8; en los tanques 5 y 7 se suspendió su operación por motivos de seguridad (PICOSA, 2018a).



(a) Localización de los tanques de almacenamiento



(b) Tanques recimentados con pilotes de control

Figura 9.8 Tanques de almacenamiento (Google-Maps, 2018)

Con la finalidad de solucionar los problemas de hundimientos diferenciales y así reestablecer el funcionamiento óptimo de los tanques de almacenamiento, se llevó a cabo una recimentación con pilotes de control en los nueve tanques. La Tabla 9.1 muestra las especificaciones físicas de los tanques de almacenamiento que fueron recimentados.

Tabla 9.1 Especificaciones de los tanques y su recimentación (PICOSA, 2018a)

Tanque	Características de los tanques			Cimentación original	Periodo de intervención	Cimentación actual			
	Líquido	Diámetro (m)	Altura (m)			Volumen (m ³)	Pilotes de fricción	Pilotes originales con sistema de control	Pilotes de control nuevos (de punta)
1	Agua	15.7	10.5	1955.78	52	(2011)	20	Ninguno	32
2	Turbosina	15.7	10.5	1955.78	52	(2000-2001)	20	Ninguno	32
3	Turbosina	15.7	10.5	1955.78	52	(2000-2001)	20	Ninguno	32
4	Turbosina	15.7	10.5	1955.78	52	(2000-2001)	20	Ninguno	32
5	Turbosina	15.7	10.5	1955.78	52	(2010)	20	Ninguno	32
6	Turbosina	15.7	10.5	1955.78	76	(2010)	Ninguno	12	76
7	Turbosina	15.7	10.5	1955.78	77	(2010)	32	Ninguno	45
8	Turbosina	36.5	11.5	12033.00	53	(2011)	Ninguno	87	53
13	Agua	15.84	4.53	850.00	Ninguno	(2013)	Ninguno	4	Ninguno

La recimentación en tres de los tanques de almacenamiento consistió en el hincado de nuevos pilotes de punta (Figura 9.9a y 9.10). En los otros seis tanques consistió en la transformación de los pilotes de fricción (de la cimentación original) a pilotes control (Figura 9.9b y 9.11). Una vez recimentados los tanques, se llevó a cabo su renivelación.



Figura 9.9 a) Pilote de control nuevo hincado en segmentos de 91 cm, y b) pilote de fricción existente transformado a pilote de control

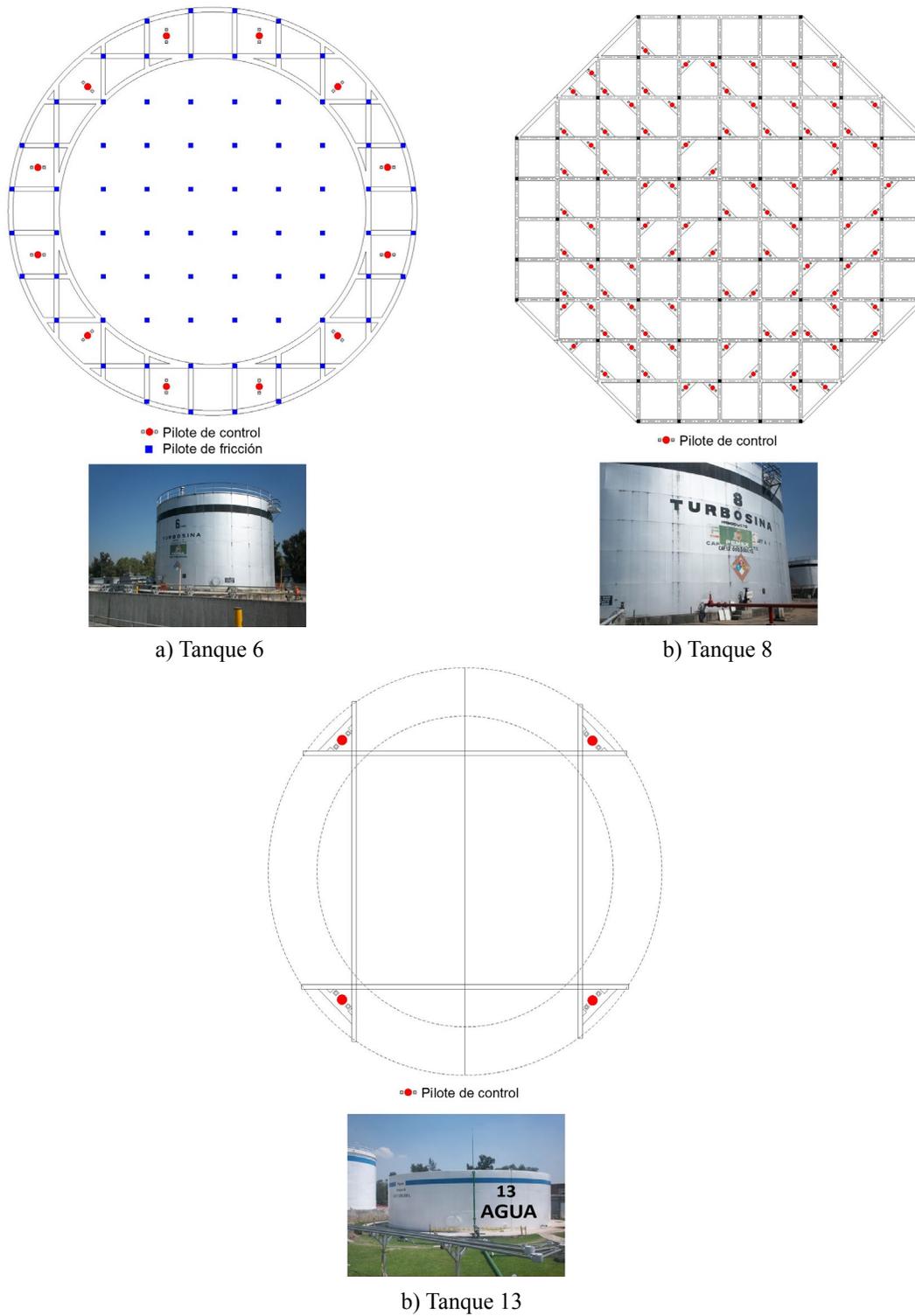
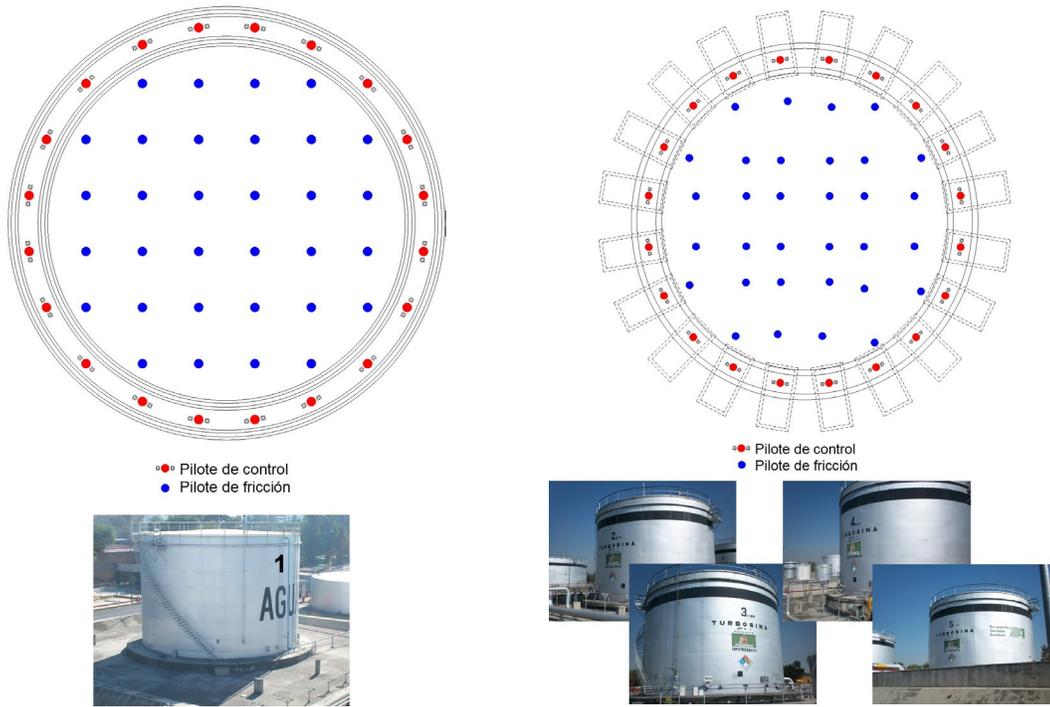
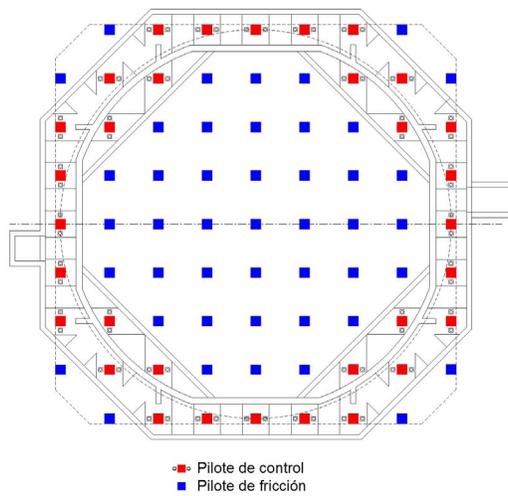


Figura 9.10 Tanques recimentados con hincado de pilotes de control nuevos



a) Tanque 1

b) Tanque 2, 3, 4, y 5



b) Tanque 7

Figura 9.11 Tanques con transformación de pilotes de fricción existentes a pilotes de control

Con base en la información de los levantamientos topográficos de los tanques de almacenamiento (PICOSA, 2018a), se obtuvieron las gráficas de desniveles máximos y desplomos que se indican en las Figuras 9.12 y 9.13, respectivamente. El primer punto representa el valor previo a los trabajos de renivelación (2010), el segundo punto muestra el valor registrado en el último mantenimiento realizado (2015), y el tercer punto exhibe los valores obtenidos en el último levantamiento topográfico ejecutado (2018).

Las mediciones topográficas de 2015 en las Figuras 9.12 y 9.13, muestran que, en general, tanto los desniveles como los desplomos máximos disminuyeron con los trabajos de mantenimiento y renivelación. Sin embargo, en los levantamientos topográficos de 2018 se distingue que en la mayoría de los tanques aumentaron los desniveles y desplomos. Si bien, el sismo ocurrido del 19 de septiembre de 2017 (ver Inciso 7.2) pudo haber contribuido con un ligero incremento en los desniveles y desplomos máximos de los tanques, la mayor parte del incremento se atribuye principalmente a la falta de mantenimiento en los pilotes de control.

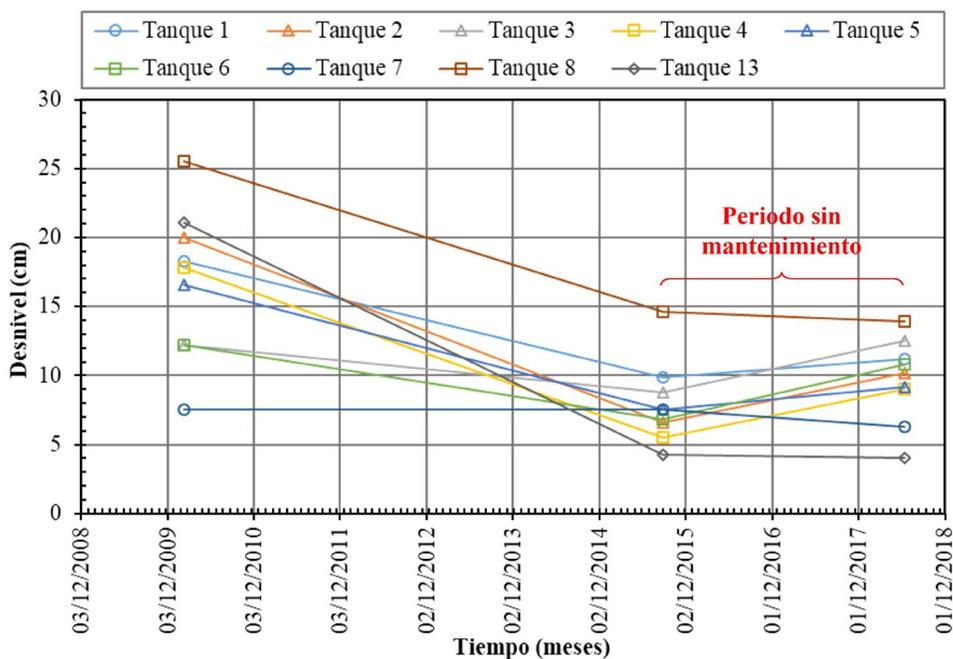


Figura 9.12 Registro de desniveles en los tanques de almacenamiento

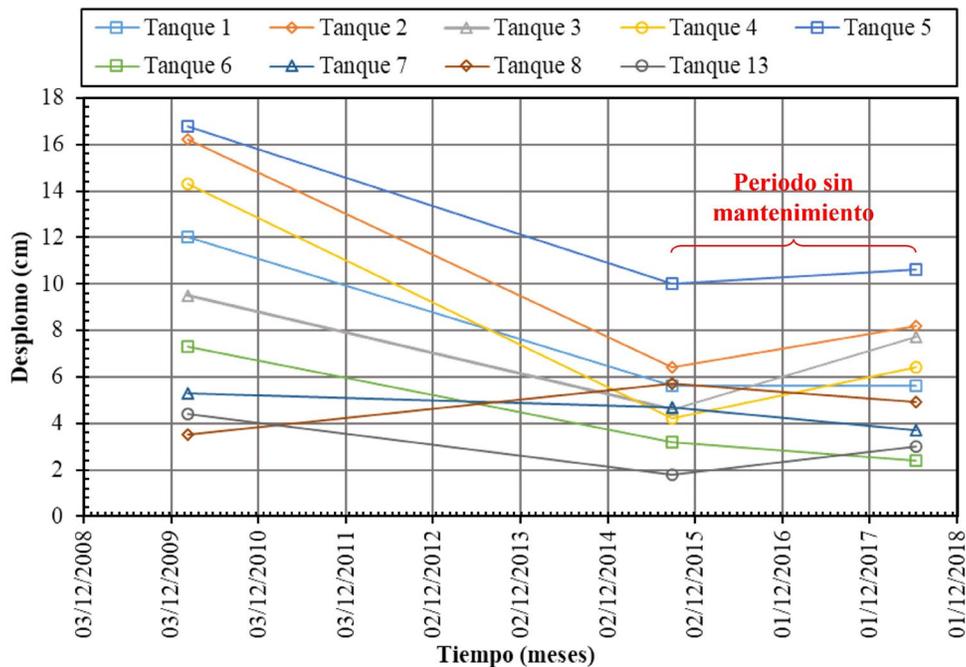


Figura 9.13 Registro de desplomos en los tanques de almacenamiento

Si bien en la práctica se han habilitado dispositivos de control en los pilotes de fricción existentes en una cimentación, como en el caso descrito en este inciso, de acuerdo con la concepción original de los pilotes de control lo más conveniente es el empleo de pilotes de punta como pilotes de control, porque con ellos se garantiza un control en la carga de los pilotes, lo que con los pilotes de fricción no parece posible. Finalmente, el comportamiento *in situ* de los pilotes de fricción transformados a pilotes de control no ha sido suficientemente estudiado a la fecha, por lo que se requieren mayores estudios y documentar los casos existentes.

9.4 Recimentación y renivelación de un edificio en la Zona III Lacustre de la CDMX

El edificio fue diseñado en 1980 y forma parte de un conjunto de nueve edificios comunicados entre sí, pero con cimentaciones independientes, que se localizan en la Ciudad de México. El edificio tiene una altura total de 24.60 m y un área de 4245.8 m² (Figura 9.14). Además, tiene un sótano que se utiliza como estacionamiento. La cimentación original está conformada por un cajón de cimentación complementado con 227 pilotes de fricción de sección cuadrada de 0.4×0.4 m y una longitud de 26.5 m. De acuerdo con la zonificación

geotécnica de la Ciudad de México, el edificio se localiza en la denominada Zona III Lacustre (NTCDCC, 2017), caracterizada por series de arcilla muy blanda y sedimentos arcillosos, ampliamente conocidos por su alto contenido de agua y gran compresibilidad, interpuestas por unidades de material clástico cementado (Marsal & Mazari, 1959).

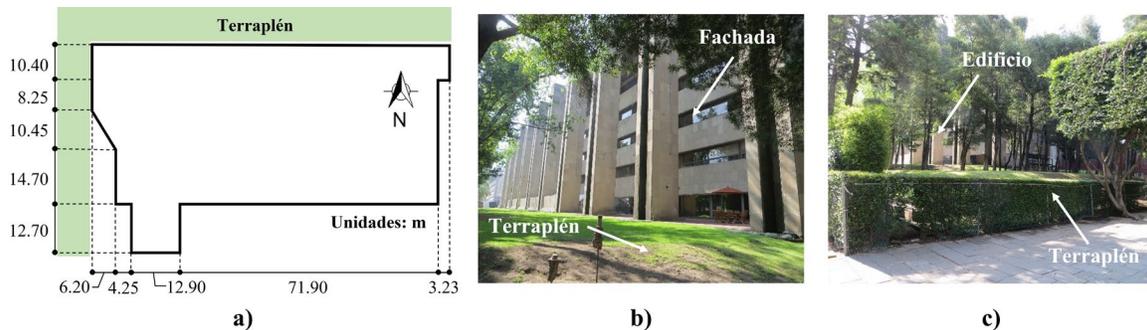


Figura 9.14 a) Dimensiones del edificio intervenido, b) Fachada del edificio (septiembre 2018), y c) Terraplén ubicado al norponiente del edificio (septiembre 2018)

Durante la primera evaluación del comportamiento del edificio en 2005 se observó un asentamiento diferencial con dirección al norponiente de aproximadamente 80.0 cm. Este asentamiento continuó aumentando hasta alcanzar en 2014 un valor de 90.7 cm. El incremento se atribuye a: i) el peso generado por un terraplén (colocado en 1981) localizado en el norponiente del edificio (Figura 9.14c), y ii) la alta compresibilidad de las arcillas de la FAS, cuyo espesor es mayor en el lado poniente del edificio (debajo del terraplén). El edificio no presentó daños de elementos estructurales (vigas, columnas y losas) a pesar de la magnitud del asentamiento diferencial.

Distintas medidas fueron evaluadas para solucionar la problemática anterior, entre ellas: a) la colocación de inclusiones rígidas en la parte norponiente del edificio (la zona con mayor asentamiento), b) el retiro del terraplén y la colocación de inclusiones en la parte poniente, c) la recimentación con pilotes de control, y d) la instalación de un sistema de pozos de extracción e inyección. Fue hasta después de ocurrido el sismo del 19 de septiembre de 2017 (ver Inciso 7.2), con epicentro en Axochiapan, Morelos a 120 km de la CDMX y una magnitud M7.1 (SSN, 2017) que las autoridades del inmueble decidieron recimentar el edificio con pilotes de control. Este sismo contribuyó al incremento del

asentamiento diferencial máximo del inmueble (Figura 9.15) y de los desplomos (siendo algunos de ellos mayores que 1% de la altura del edificio), excediendo los límites permisibles (en condiciones sísmicas) de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones vigentes (NTCDCC, 2017).

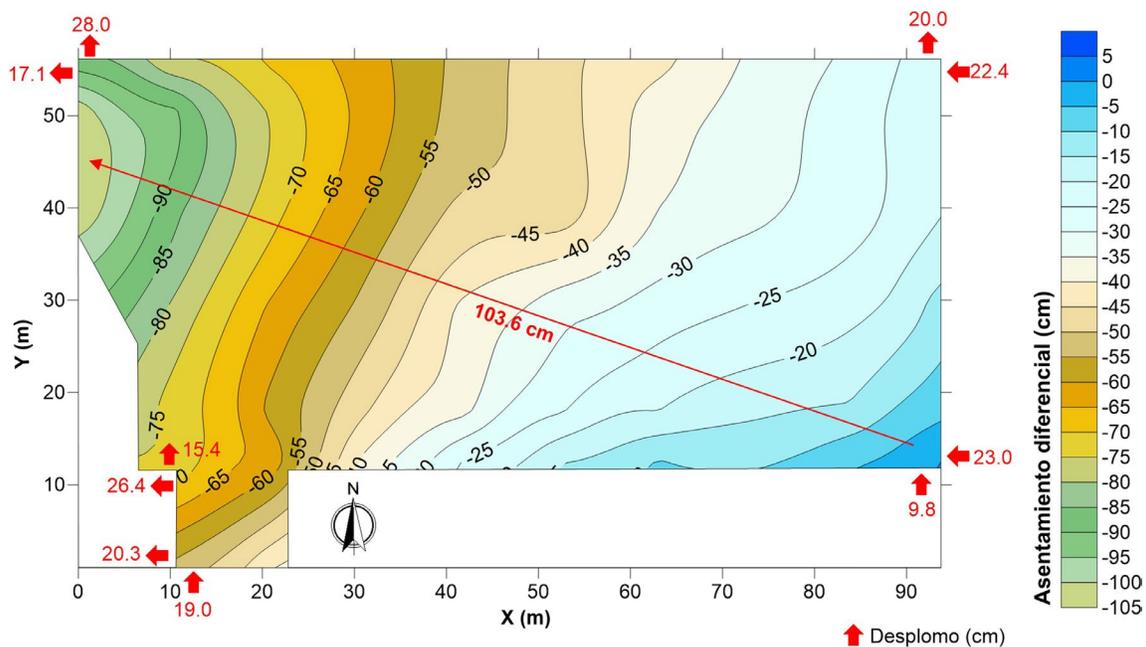


Figura 9.15 Hundimiento diferencial y desplomos en las esquinas del edificio en estudio antes de su recimentación y renivelación (noviembre 2017)

Para solucionar el problema, se recimentó el edificio con el hincado de 192 pilotes de punta nuevos con mecanismo de control, los cuales se instalaron en el cajón de cimentación existente en el inmueble. Para la instalación de los dispositivos de control, fue necesario reforzar la cimentación con 192 dados ligados estructuralmente a la losa de fondo del cajón de cimentación y a las contratrabes existentes (PICOSA, 2018b).

Una vez construidos los dados estructurales, se realizaron los siguientes trabajos:

- Montaje y nivelación del equipo de perforación mecánica para perforar hasta alcanzar el estrato resistente (capa dura, aproximadamente a 34 m).
- Hincado del pilote a presión (de 45 cm de diámetro y seccionado en tramos de 91 cm) mediante un sistema constituido por un marco de carga y gato hidráulico, y en cuya parte central se colocaron 4 varillas de 1/2".

- Instalación de la celda de deformación (conformada por un arreglo de tres niveles de 6×6 cubos de madera de *caobilla*) y del cabezal del dispositivo de control para posteriormente precargarlo empleando el sistema denominado *doble puente*.

Los trabajos de *recimentación* antes mencionados se ejecutaron en un periodo de ocho meses (diciembre 2017 a julio 2018). Con el procedimiento anterior se instalaron 192 nuevos pilotes de control con una carga nominal de 980 kN (100 t) por pilote.

Posteriormente, se ejecutaron trabajos de *renivelación* que consistieron en hacer descender la parte más alta del edificio. Para ello, fue necesario: a) realizar túneles debajo de la losa de fondo del cajón de cimentación (Figura 9.16 y Figura 9.17a) para llegar al fuste de los pilotes de fricción de la cimentación original, y b) desconectar algunos de los pilotes originales ubicados en zonas específicas (Figura 9.17b) para permitir el movimiento vertical de la estructura.

Después, se aplicó la técnica de subexcavación manual en las zonas con menor asentamiento o más altas (Figura 9.16 y Figura 9.17c) en donde se retiró un volumen de aproximadamente 210.3 m³ de suelo debajo de la losa de fondo del cajón de cimentación para inducir los movimientos verticales de la estructura. La subexcavación se complementó con la liberación de las tuercas de los sistemas de control, con la finalidad de favorecer el descenso de la estructura hasta llegar al nivel deseado. Una vez alcanzado dicho nivel, se recortaron las cabezas de los pilotes de control para que el cabezal quedara a aproximadamente 10 milímetros de los estabilizadores de concreto. Después, se precargó cada pilote a su carga nominal de 980 kN (100 t).

Después de los trabajos de *recimentación* y *renivelación*, y con base en un levantamiento topográfico realizado en diciembre de 2018, se midió un desnivel máximo de 50.7 cm. Es decir que, con la instalación de los pilotes de control complementada con la subexcavación, el asentamiento diferencial disminuyó del orden de 50 % en aproximadamente un año (Figura 9.18). A partir del último levantamiento topográfico se determinó que el edificio se encuentra dentro de los valores admisibles establecidos en la normatividad vigente (NTCDCC, 2017). En el edificio se estimó un hundimiento diferencial máximo de 0.004 (que es el valor máximo tolerable para edificios con marcos de concreto reforzado hasta cuatro pisos, expresado en radianes) y se midieron desplomos menores que 1% de la altura del edificio. Puesto que el inmueble forma parte de un

conjunto de nueve edificios comunicados entre sí por medio de juntas constructivas, no fue posible alcanzar un desnivel nulo en una primera etapa de trabajos, ya que dificultaría el acceso a los edificios colindantes. Inicialmente, se requirió la colocación de rampas de acceso (Figura 9.19), sin embargo, conforme se proceda a recimentar y renivelar los edificios restantes del conjunto, estas rampas no serán necesarias.

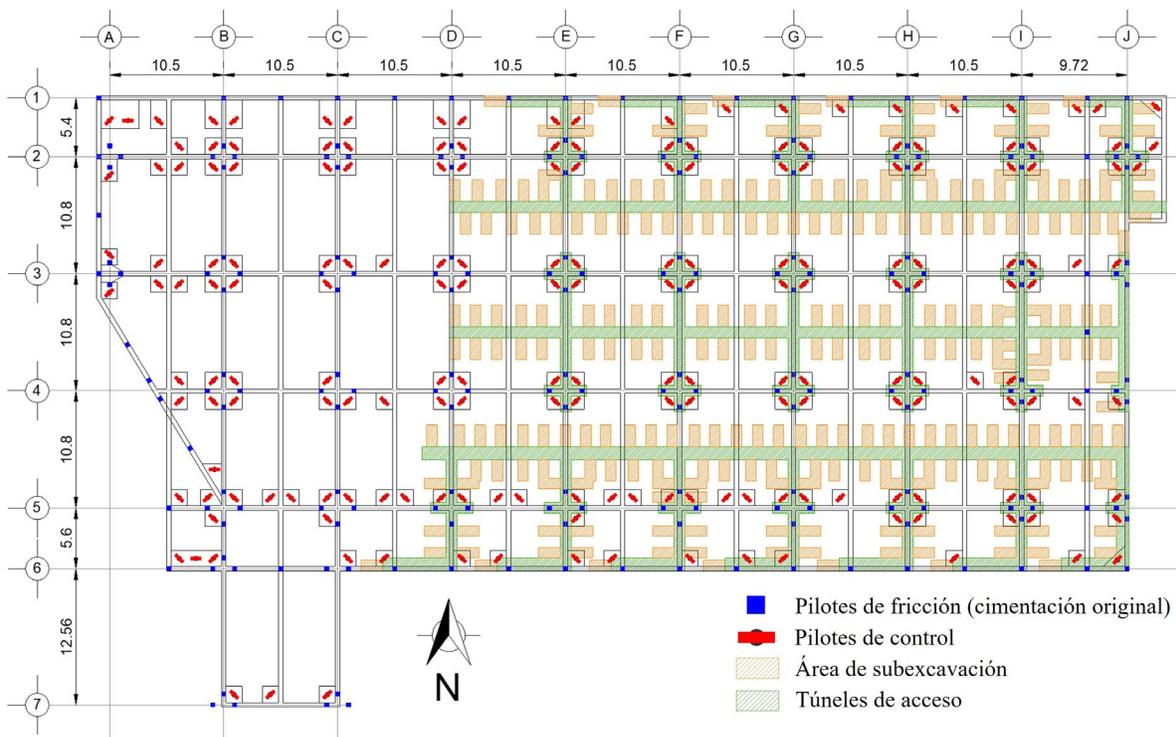


Figura 9.16 Recimentación de un edificio con pilotes de control, túneles de acceso y zonas de subexcavación



Figura 9.17 Figura 9.17 a) Túnel de acceso y zonas de subexcavación, b) desconexión de un pilote de fricción de la cimentación original, y c) técnica de subexcavación manual

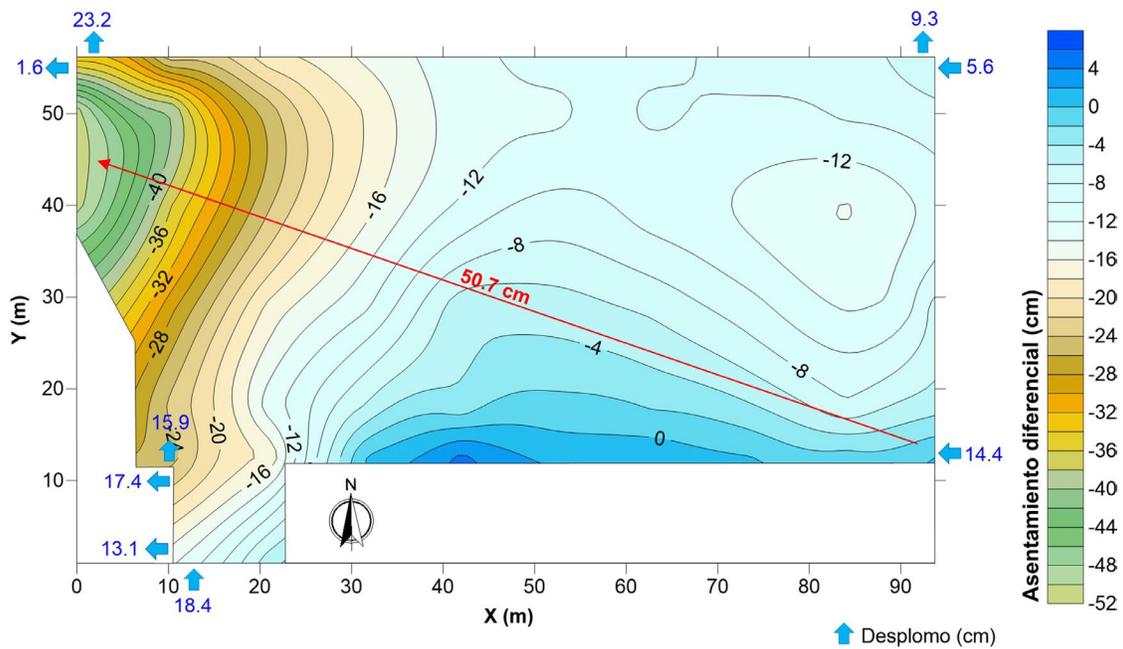


Figura 9.18 Hundimiento diferencial y desplomos en las esquinas del edificio en estudio después de su recimentación y renivelación (diciembre 2018)

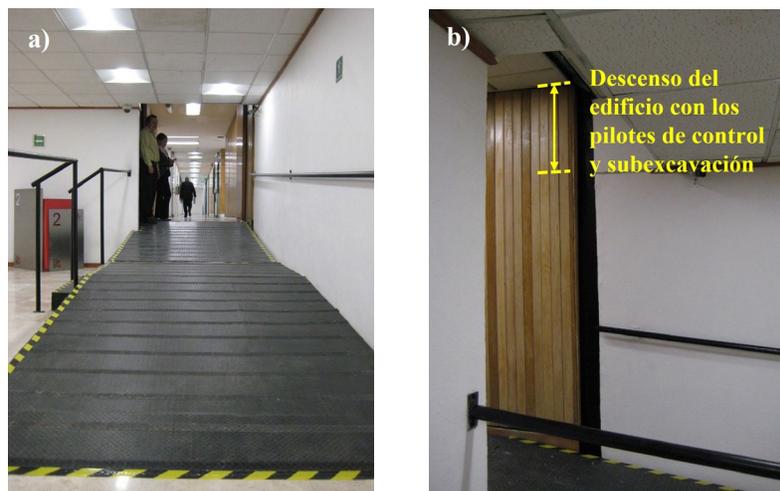


Figura 9.19 Condición actual de uno de los pasillos que comunica con el edificio colindante (noviembre 2019): a) vista frontal, y b) vista lateral

10. Conclusiones y recomendaciones generales

Los pilotes de control son un tipo de cimentación especial que no cuenta en la actualidad con lineamientos reglamentarios oficiales para su diseño, ni criterios que indiquen la forma apropiada de darles mantenimiento. Tampoco existen indicaciones que definan el momento adecuado para reemplazar los cubos de madera, o cuándo hacer intervenciones especiales para nivelar un edificio. El objetivo de este trabajo fue contribuir a un mejor entendimiento del sistema de control, describiendo los componentes del dispositivo y explicando el funcionamiento del mismo. Asimismo, se establecieron lineamientos para llevar a cabo un mantenimiento adecuado en los dispositivos (mantenimientos preventivo, de rutina e intervención especial) y así generar un desempeño eficiente en los pilotes de control.

En esta investigación, también se describieron los procedimientos de cimentación y recimentación con pilotes de control aplicados en la práctica de la ingeniería de la Ciudad de México (CDMX). Se mostró el comportamiento de los pilotes de control ante sismos a partir de las evidencias en algunos edificios de la CDMX. También se describieron los criterios existentes para el diseño y revisión de una cimentación con pilotes de control, los cuales, fueron complementados con ejemplos explicados paso a paso que sirven de guía para la aplicación de estos criterios y, además, contribuyen a una mayor comprensión en el comportamiento de este tipo de cimentaciones. También, se expusieron algunos casos de recimentación y renivelación de edificios con pilotes de control en la CDMX. Todo lo anterior, se fundamentó con los resultados obtenidos de las pruebas experimentales descritas en la parte principal de esta investigación, y con las que se evaluó el comportamiento mecánico de los distintos materiales utilizados como celda de deformación en los dispositivos de control (cubos de madera, cilindros poliméricos y tacones de neopreno), de las que se concluye lo siguiente:

- El comportamiento mecánico en los cubos de madera de caobilla con fibras en posición horizontal (individual y en conjunto) resultó elastoplástico con endurecimiento. Los cilindros poliméricos también exhibieron un comportamiento mecánico elastoplástico con endurecimiento, pero que no está tan bien definido como en la madera. Este comportamiento genera en la celda de deformación una falla dúctil apropiada para el correcto funcionamiento del sistema de pilotes de control, permitiendo controlar tanto carga como hundimiento. En cambio, los tacones de neopreno exhibieron un comportamiento elástico no lineal, inapropiado para el funcionamiento de los pilotes de control.
- En el caso de los distintos cilindros poliméricos evaluados tanto en pruebas de compresión simple como de carga cíclica, se observó variabilidad en su comportamiento mecánico. Por lo que, se prevé conveniente mejorar la calidad de las resinas elastoméricas copolimerizadas que los constituyen y realizar estudios adicionales para evaluar la mejoría en la uniformidad de su comportamiento.
- Con base en un análisis estadístico del peso volumétrico de los cubos de madera de *caobilla*, se obtuvo un peso volumétrico medio de los cubos $\bar{\gamma} = 5.59 \text{ kN/m}^3$ y una desviación estándar $s_{\gamma} = 0.56 \text{ kN/m}^3$. A partir de esta información, los cubos se clasificaron en tres tipos: (a) cubos estándar con peso volumétrico en el intervalo $\bar{\gamma} \pm s_{\gamma}$ (i.e. $5.03 < \gamma < 6.15 \text{ kN/m}^3$), (b) cubos pesados con peso volumétrico mayor que $\bar{\gamma} + s_{\gamma}$ (i.e. $\gamma > 6.15 \text{ kN/m}^3$), y (c) cubos ligeros con peso volumétrico menor que $\bar{\gamma} - s_{\gamma}$ (i.e. $\gamma < 5.03 \text{ kN/m}^3$). La importancia de esta distinción estriba en que los cubos pesados experimentan una carga de fluencia similar a la madera de caoba y los cubos ligeros una carga de fluencia similar a la madera de pino (Tabla 6.2). Lo anterior influye en la carga de fluencia de una celda de deformación, pues si la celda de deformación tiene una mayor cantidad de cubos ligeros, la carga de fluencia del conjunto es menor que la carga nominal prevista en el diseño del pilote de control, lo que hace necesario un mayor número de cubos ligeros en la celda de deformación respecto a los que se requieren si los cubos son pesados. Con ello se demuestra la importancia del control de calidad en la instalación de pilotes de control.

- La deformación vertical máxima en los arreglos de cubos de madera y los cilindros poliméricos fue aproximadamente 4.5 cm, siendo físicamente más uniforme en los cilindros poliméricos. La deformación vertical máxima en el tacón de neopreno fue de aproximadamente 4 cm. Sin embargo, la carga correspondiente a la deformación del tacón de neopreno fue de 2106 kN (215 t), suficiente para generar la falla en los cabezales de los dispositivos de control tradicionales.
- Se propuso un criterio para estimar la carga de fluencia y la carga máxima de una celda deformable conformada por cubos de madera. La magnitud de estas cargas es importante para el diseño adecuado de las celdas de deformación que, a su vez, se refleja en el buen comportamiento del dispositivo de control. El criterio considera las cargas por cubo obtenidas a partir de los resultados de los ensayos en arreglos de cubos y no de los resultados de ensayos en cubos individuales (como se hace en la práctica profesional y que sobreestima la carga de fluencia que se transmite a los pilotes). Las cargas de fluencia por cubo resultaron (a) 23.88 kN a partir de los arreglos compuestos por cubos pesados, (b) 16.93 kN a partir de los arreglos compuestos por cubos ligeros, y (c) 19.60 kN a partir de los arreglos compuestos por cubos estándar. Para estimar la carga de fluencia de la celda de deformación del dispositivo de control, se propone multiplicar el número total de cubos en un nivel del arreglo por la carga de fluencia correspondiente por cubo indicada previamente.

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación, se recomienda reemplazar los arreglos de cubos de madera (celda de deformación) cuando éstos hayan alcanzado una disminución en su altura inicial de 4.5 cm, es decir, aproximadamente 30 % de la altura total de la celda de deformación. Con lo anterior, se evita generar una sobrecarga que pueda dañar o incluso provocar la falla del cabezal o de algunos componentes del marco de carga, como los espárragos o anclas. Asimismo, se recomienda precargar el pilote una vez sustituido el elemento deformable por uno nuevo (durante un mantenimiento), utilizando el sistema denominado *doble puente* con gato hidráulico. La precarga genera que el pilote contribuya de inmediato al soporte del edificio.

Si bien en la práctica, como parte de la recimentación de un edificio, se han habilitado dispositivos de control en los pilotes de fricción existentes en una cimentación (como se

describió en este documento) se remarca que, el comportamiento *in situ* de los pilotes de fricción transformados a pilotes de control no ha sido suficientemente estudiado a la fecha, por lo que se requieren mayores estudios y documentar los casos existentes.

Por otra parte, también se establecieron los factores que intervienen en la renivelación de un edificio, siendo éstos: las características del suelo (propiedades índice y mecánicas), las características del edificio, el efecto del hundimiento regional, la sismicidad del sitio, entre otros. La experiencia en la Ciudad de México señala tiempos de renivelación de edificios que pueden durar más de tres años. La técnica de subexcavación permite disminuir este tiempo y contribuir a la nivelación de edificaciones. Sin embargo, es importante que para la aplicación de esta técnica se garantice la seguridad del edificio y del personal que la realiza, pues si no se tiene cuidado de controlar los movimientos verticales durante la renivelación, se corre el riesgo de que ocurran asentamientos súbitos de importancia. Los pilotes de control ayudan a controlar estos desplazamientos verticales.

Finalmente, se enfatiza que el mantenimiento de los pilotes de control tiene un papel primordial en el comportamiento de las edificaciones con este tipo de cimentación especial. Por tanto, debe reconocerse que los edificios con pilotes de control en sus cimentaciones implican la necesidad de efectuar labores de mantenimiento periódicas durante toda la vida útil del edificio. El mantenimiento de los pilotes de control debe estar a cargo de personal especializado y con experiencia en este tipo de dispositivos, y debe apoyarse en diseños geotécnicos y estructurales. También se requiere de un seguimiento topográfico para la evaluación de su comportamiento. Si el mantenimiento no se realiza adecuadamente, el sistema puede tener un funcionamiento deficiente y ocasionar problemas en la edificación.

11. Referencias

- Aguilar, J. M., & Rojas, E. (1986). Hundimiento súbito de un edificio apoyado sobre pilotes de fricción. *Memorias del Simposio Los sismos de 1985: Casos de mecánica de suelos*, 255–268. México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- Aguilar, J. M., & Rojas, E. (1990). Importantes mejoras en los dispositivos de control de pilotes. *Memoria de la XV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, 139–150. San Luis Potosí, México.
- Aguilera-Jiménez, P. (2013). *Catedral Metropolitana. Hundimiento y Rescate*. En *Catedral Metropolitana. Hundimiento y Rescate*. <https://doi.org/10.22201/ii.9786070246470p.2013>
- Aguirre, M. (1991). Device for Control of Building Settlement and for Seismic Protection. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(12), 1848–1859. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:12\(1848\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:12(1848))
- ASTM-D2240. (2015). *Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness*. Unites States of American.
- ASTM-D4442. (2016). *Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials*. United States of American.
- Auvinet, G. (2017). Aspectos geotécnicos de los sismos de septiembre 2017. *Reunión Informativa Anual 2018*, 11–12.
- Auvinet, G., & López-Acosta, N. P. (2008). *Propuesta de recimentación de la torre del Centro Cultural Universitario Tlatelolco (CCUT)*.
- Blake, S. F. (1920). Revision of the true mahoganies (Swietenia). *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 10(10), 286–297.
- Brimm, D., & Boggess, E. (1940). *Aircraft Maintenance*. Pitman Publishing Corp.
- Carrillo, N. (1948). Influence of artesian wells in the sinking of Mexico City. *Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Rotterdam.
- Dalla-Salda, G., Martínez-Meyer, A., Cochard, H., & Rozenberg, P. (2009). Variation of wood density and hydraulic properties of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) clones related to a heat and drought wave in France. *Forest Ecology and Management*, 257(1), 182–189.
- de Kort, I., Loeffen, V., & Baas, P. (1991). Ring width, density and wood anatomy of Douglas fir with different crown vitality. *IAWA Journal*, 12(4), 453–465.
- Gaceta Oficial del Distrito Federal. (2004). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas*. 195–282.
- Galvis, F., Miranda, E., Heresi, P., Dávalos, H., & Silos, J. R. (2017). *Preliminary Statistics of Collapsed Buildings in Mexico City in Puebla-Morelos Earthquake*. 17. Recuperado de http://www.learningfromearthquakes.org/2017-09-19-puebla-mexico/images/2017_09_19_Puebla_Mexico/pdfs/Preliminary_Report_Mexico2017_v7.pdf
- González-Flores, M. (1948). Level control in buildings by means of ajustable piling. *Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 152–156. Rotterdam.

- González-Flores, M. (1959). Setting vertical two buildings; a meter in the most unfavorable case. *Proceedings of the First Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1215–1248. Mexico City.
- González-Flores, M. (1964). Recimentación y enderezado de una iglesia del siglo XVIII, por medio de pilotes de control en México, D.F. *Memoria del Congreso sobre Cimientos Profundos*, 343–360. México, D. F.: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- González-Flores, M. (1981). Raise of a side-settled XVIII Century Church in Mexico City. *Proc. Xth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 101–105. Stockholm, Sweden.
- Google-Maps. (2018). Google Maps. Recuperado el 15 de agosto de 2018, de <https://www.google.com/maps/@19.4461423,-99.0747037,512m/data=!3m1!1e3>
- Gordon, J. E., Hawthorne, W. D., Sandoval, G., & Barrance, A. J. (2003). Trees and farming in the dry zone of southern Honduras II: The potential for tree diversity conservation. *Agroforestry Systems*, 59(2), 107–117. <https://doi.org/10.1023/A:1026360205113>
- Jane, F. W. (1970). *The structure of wood*, London. A & C Black, London.
- Juárez-Badillo, E., & Rico, A. (1967). *Mecánica de Suelos, Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos*. México: LIMUSA.
- Kretschmann, D. E. (2010). Mechanical Properties of Wood. En Robert J. Ross (Ed.), *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material* (pp. 5.1-5.46). Madison, Wisconsin: United States Department of Agriculture Forest Service.
- Lamb, F. B. (1963). On further defining mahogany. *Economic Botany*, 17(3), 217–232.
- López-Acosta, N. P., & Martínez-Hernández, E. (2017a). Caracterización mecánica de materiales empleados como celdas de deformación en pilotes de control. En *Revista Geotecnia*, 243, 5–26. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG).
- López-Acosta, N. P., & Martínez-Hernández, E. (2017b). Pilotes de control: madera y otros materiales en celdas de deformación, y comportamiento ante sismos. *Proceedings of the 4th International Conference on Deep Foundations*, 163–171. Ciudad de México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG).
- López-Acosta, N. P., & Martínez-Hernández, E. (2017c). Pilotes de Control. En W. I. Paniagua (Ed.), *Ingeniería de Cimentaciones Profundas* (pp. 477–527). Ciudad de México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG).
- López-Acosta, N. P., & Martínez-Hernández, E. (2018a). Edificios recimentados con pilotes de control y su comportamiento ante sismos. *Memorias de la XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*, 245–252. León, Guanajuato: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.
- López-Acosta, N. P., & Martínez-Hernández, E. (2018b). Experimental data on the mechanical properties of individual caobilla wood cubes used on control pile systems. *Data in Brief*, 20, 672–679. <https://doi.org/10.1016/J.DIB.2018.08.045>
- López-Acosta, N. P., Martínez-Hernández, E., & Espinosa-Santiago, A. L. (2021). Revisión de una propuesta para recimentar un edificio con pilotes de control en la Ciudad de México. En *Memorias Técnicas de la XXX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica* (pp. 979–986). Ciudad de México.
- López-Acosta, N. P., Martínez-Hernández, E., Peña, F., & Auvinet-Guichard, G. (2020). Mechanical characterization of deformable cells in control piles. *Soils and Foundations*, 60, 139–154. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.01.006>
- Marsal, R., & Mazari, M. (1959). *El subsuelo de la Ciudad de México*. México, D. F.: Universidad Nacional Autónoma de México.

- Martínez-Hernández, E. (2017). *Estudio del comportamiento mecánico de materiales empleados como celdas de deformación en el sistema de pilotes de control* (Universidad Nacional Autónoma de México). Recuperado de: <http://132.248.9.195/ptd2017/noviembre/0768317/Index.html>
- Matsui, T., Oda, K., & Tabata, T. (2003). Structures on and within man-made deposits-kansai airport. *Proceedings of the 13th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 315–328. Prague, Czech Republic.
- Mayoral, J. M., Hutchinson, T. C., & Franke, K. W. (2017). *Geotechnical Engineering Reconnaissance of the 19 September 2017 Mw 7.1 Puebla-Mexico City Earthquake: Version 2.0*. <https://doi.org/10.18118/G6JD46>
- Mendoza, M. (2007). *Comportamiento y diseño de cimentaciones profundas en la Ciudad de México*. Recuperado de: https://www.construccionenacero.com/sites/construccionenacero.com/files/u11/ci_34_34183_comportamiento_y_diseno_de_cimentaciones_profundas_en_ciudad_de_mexico.pdf
- Mendoza, M., Ovando, E., Auvinet, G., López-Acosta, N. P., Botero, E., Ossa, A., Flores, M. (2018). *Investigaciones y Estudios Especiales Relacionados con Aspectos Geotécnicos del Diseño y la Construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM)*. Ciudad de México.
- Murray, R. (1988). Informe gráfico de los daños estructurales de la Central Hidalgo. En G. Ramírez-Hubard (Ed.), *Reto sísmico: incrementar la seguridad y mantener el servicio de las centrales telefónicas* (pp. 179–187). México, D. F.: Editorial IDH, S.A. de C.V.
- NTCCADEE. (2017). Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones. En *Gaceta Oficial de la Ciudad de México* (pp. 689–700).
- NTCDCC. (2017). Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones. En *Gaceta Oficial de la Ciudad de México* (pp. 10–43). Recuperado de <https://www.smig.org.mx/archivos/NTC2017/normas-tecnicas-complementarias-reglamento-construcciones-cdmx-2017.pdf>
- Orozco-Rivas, B., & Mendoza-Pérez, M. (2017). Recimentación y hundimiento inducido de un edificio industrial mediante uso de pilotes de control y extracción de material. *Hormigón y Acero*, 68(281), 57–68. <https://doi.org/10.1016/J.HYA.2016.12.001>
- Orwa, C., Mutua, A., Kindt, R., Jamnadass, R., & Anthony, S. (2009). Agroforestry Data base: a tree reference and selection guide version 4.0. Recuperado de <http://old.worldagroforestry.org/treedb2/speciesprofile.php?Spid=17923>
- Ossa, A., Botero, E., Madrigal, M. C., Ovando, E., Mendoza, M., & López-Acosta, N. P. (2019). Performance of a pavement foundation system based on the partial compensation of masses method. *Soils and Foundations*. <https://doi.org/10.1016/J.SANDF.2018.12.007>
- Panshin, A. J. (1933). Comparative Anatomy of the Woods of the Meliaceae, Sub-Family Swietenioideae. *American Journal of Botany*, 20(10), 638–668. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/2436127>
- Peña, F., Cruz, C. E., & Badajoz, C. A. (2016). *Revisión de la capacidad de marcos de carga de pilotes de control*. Ciudad de México.
- PICOSA. (2010). *Cimentando a México desde 1951*. México, D. F.: Pilotes de Control S. A. (PICOSA).
- PICOSA. (2014a). *Anteproyecto de recimentación de la H. Cámara de Diputados*. México, D. F.
- PICOSA. (2014b). *Ecuaciones para el diseño de capacidad de carga de González-Flores*. Informe propocionado por Pilotes de Control S.A. al Instituto de ingeniería de la UNAM.
- PICOSA. (2018a). *Estación de Combustibles México*. Ciudad de México.

- PICOSA. (2018b). *Renivelación de los edificios A, B, H y escaleras de caracol de la H. Cámara de Diputados*. Ciudad de México.
- Pittermann, J., Sperry, J. S., Wheeler, J. K., Hacke, U. G., & Sikkema, E. H. (2006). Mechanical reinforcement of tracheids compromises the hydraulic efficiency of conifer xylem. *Plant, Cell & Environment*, 29(8), 1618–1628.
- Puzrin, A. M., Alonso, E. E., & Pinyol, N. (2010). *Geomechanics of Failures*. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3531-8>
- Ramos-Kuri, F. (2015). *Patent Núm. 328256*. Recuperado de <https://vidoc.impi.gob.mx/visor?usr=SIGA&texp=SI&tdoc=E&id=MX/a/2010/002653>
- Ross, R. J. (2010). Wood handbook: wood as an engineering material. *USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190*, 190, 509.
- Salazar-Resines, J. (1960). Control de las cargas en la cimentación y de los asentamientos de edificios mediante mecanismos en los pilotes. *Primer Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones*, 405–427. México.
- Santoyo, E., & Alanís, R. (2013). *Monografía sobre los pilotes de control*. México, D. F.
- Santoyo, E., & Ovando, E. (2008). *Mexico City's Cathedral and Sagrario Church*. Mexico: TGC Geotecnia.
- Santoyo, E., & Santoyo, E. (2013). *Retos geotécnicos en edificios ligeros*. Recuperado de <http://tgc.com.mx/tgc/wp-content/uploads/2013/11/art002.pdf>
- Santoyo, E., & Segovia, J. A. (1995). *Recimentación y renivelación de estructuras y monumentos*. México, D. F.: TGC Geotecnia.
- Schmidt, L., & Joker, D. (2000). *Swietenia humilis Zucc. Seed Leaflet*. *Danida Forest Seed Centre*, 33, 1–2.
- Segovia, J. A. (2001). Recimentación de estructuras. En *Manual de Cimentaciones Profundas* (pp. 247–261). México, D. F.: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- Segura-Correa, R., Mata, R., Anaya, A. L., Hernandez-Bautista, B., Villena, R., & Soriano-Garcia, M. (1993). New tetranortriterpenoids from *Swietenia humilis*. *Journal of Natural Products*, 56(9), 1567–1574.
- Singh, S. K., Quaas, R., Ordaz, M., Mooser, F., Almora, D., Torres, M., & Vásquez, R. (1995). Is there truly a “hard” rock site in the Valley of Mexico? *Geophysical Research Letters*, 22(4), 481–484. <https://doi.org/10.1029/94GL03298>
- SSN. (2017). *Sismo del día 19 de Septiembre de 2019, Puebla-Morelos (M 7.1)*. Recuperado de http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf
- Tamez, E. (1986). *Criterios para el diseño sísmico de cimentación sobre pilotes de control*. México, D. F.
- Tamez, E. (1988). Pilotes de control en centrales telefónicas. En G. Ramírez-Hubard (Ed.), *Reto sísmico: incrementar la seguridad y mantener el servicio de las centrales telefónicas* (pp. 103–105). México, D. F.: Editorial IDH, S.A. de C.V.
- Tamez, E. (1990). Criterios para el diseño sísmico de cimentación sobre pilotes de control. En *Recimentaciones* (pp. 5–18). México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- Vidal, J., Velásquez, J., Toro, M. E., & Gómez, L. (2011). Variación natural del peso específico en la madera de *Ficus insipida* Will (Moraceae). *La Revista Forestal Venezolana*, 55(1), 17–23.
- Zeevaert, L. (1983). *Foundation engineering for difficult subsoil conditions*. Unites States of American: Van Nostrand Reinhold Company Inc.
- Zobel, B., & Talbert, J. (1984). *Applied forest tree improvement*. John Wiley & Sons

Las Series del Instituto de Ingeniería describen los resultados de algunas de las investigaciones más relevantes de esta institución. Con frecuencia son trabajos in extenso de artículos que se publican en revistas especializadas, memorias de congresos, etc.

Cada número de estas Series se edita con la aprobación técnica del Comité Editorial del Instituto, basada en la evaluación de árbitros competentes en el tema, adscritos a instituciones del país y/o el extranjero.

Actualmente hay tres diferentes Series del Instituto de Ingeniería:

SERIE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Incluye trabajos originales sobre investigación y/o desarrollo tecnológico. Es continuación de la Serie Azul u Ordinaria, publicada por el Instituto de Ingeniería desde 1956, la cual actualmente tiene nueva presentación y admite textos en español e inglés.

SERIE DOCENCIA

Está dedicada a temas especializados de cursos universitarios para facilitar a estudiantes y profesores una mejor comprensión de ciertos temas importantes de los programas de estudio.

SERIE MANUALES

Abarca manuales útiles para resolver problemas asociados con la práctica profesional o textos que describen y explican el estado del arte o el estado de la práctica en ciertos temas. Incluye normas, manuales de diseño y de laboratorio, reglamentos, comentarios a normas y bases de datos.

Las Series del Instituto de Ingeniería pueden consultarse gratuitamente desde la dirección electrónica del Instituto <http://www.ii.unam.mx> (<http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/Buscarnpublicacion.aspx>) y pueden grabarse o imprimirse en formato PDF desde cualquier computadora.

