



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL- GEOTECNIA**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIALES  
EMPLEADOS COMO CELDAS DE DEFORMACIÓN EN EL SISTEMA DE PILOTES  
DE CONTROL**

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

EDUARDO MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

TUTOR PRINCIPAL:

DRA. NORMA PATRICIA LÓPEZ ACOSTA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. GABRIEL AUVINET GUICHARD  
Secretario: DR. EFRAÍN OVANDO SHELLEY  
Vocal: DRA. NORMA PATRICIA LÓPEZ ACOSTA  
1 er. Suplente: DR. FERNANDO PEÑA MONDRAGÓN  
2 do. Suplente: M. I. WALTER IVÁN PANIAGUA ZAVALA

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA

TUTOR DE TESIS:

Dra. Norma Patricia López Acosta

---

FIRMA

*A mis hijos Eduardo y Alejandro, los grandes motores de mi vida.*

## **AGRADECIMIENTOS**

### ***A Dios***

Por darme la oportunidad de concluir una etapa más en mi vida y poder compartir este logro con las personas que amo y estimo. Gracias por las bendiciones que día a día me brindas.

### ***Mi esposa Liliana***

Por todo el amor, tiempo y apoyo que hasta el día de hoy me has brindado. Por estar conmigo en los buenos y malos momentos, pero sobre todo por ser un gran ejemplo y excelente compañera de vida.

### ***Mis padres***

Por enseñarme que nada es imposible en la vida y que las cosas siempre deben realizarse con mucha dedicación. Gracias por todo su apoyo, el cual ha sido vital en mi vida.

### ***Adrián, Nohemí, Laura, César, Marco Antonio y Sra. Mago***

Por la alegría, entusiasmo y apoyo que me han brindado hasta el día de hoy.

### ***Dra. Norma Patricia López Acosta***

Por darme la oportunidad de colaborar en su equipo de trabajo y por todo su apoyo, tiempo y dedicación. Gracias por la confianza y por enseñarme que cada día debemos ser mejores.

### ***Dr. Gabriel Auvinet, Dr. Fernando Peña, Dr. Efraín Ovando y M. en I. Walter Paniagua***

Por compartir conmigo sus conocimientos y el gusto por la Ingeniería Civil. Asimismo por aceptar ser parte de mi jurado.

### ***Instituto de Ingeniería de la UNAM***

Por la oportunidad de desenvolverme profesionalmente y por brindarme un espacio en donde fue posible realizar esta investigación.

### ***Universidad Nacional Autónoma de México***

Por permitirme escalar un peldaño más en lo académico.

***Ing. Julio Fernández***

Por su tiempo y por compartir conmigo gran parte de su conocimiento acerca de los pilotes de control.

***PICOSA, TCG Y MC Cimentaciones y Estructuras***

Por los materiales proporcionados para esta investigación, por la invitación a diversas visitas técnicas y por compartir conmigo gran parte de su conocimiento.

***CONACYT***

Por el apoyo económico durante mis estudios de maestría, que me permitió enfocarme 100% a esta investigación.

***Raymundo Mondragón Colín***

Por su ayuda en la ejecución de las pruebas de laboratorio.

***A mis compañeros del II-UNAM***

Por hacer amenos los días en el Instituto de Ingeniería, por su apoyo y entusiasmo.



## RESUMEN

Los pilotes de control son un sistema de cimentación o recimentación empleado en aproximadamente 700 edificios de la Ciudad de México. Estos dispositivos permiten solucionar dos de los problemas más comunes en las edificaciones de la ciudad: a) emersión aparente, y b) asentamientos diferenciales. Lo anterior es posible mediante un elemento denominado celda de deformación, conformada por un arreglo de cubos de madera de caobilla que controla: a) la carga que se transmite a los pilotes, y b) los desplazamientos verticales de la estructura. En la práctica profesional, la carga nominal (de fluencia) de las celdas de deformación se ha estimado con base en los resultados de pruebas mecánicas en cubos de madera individuales. Sin embargo, estos resultados no son aplicables a los arreglos de cubos que se utilizan en los pilotes de control, debido entre otras cosas a la heterogeneidad de la madera (distintos pesos volumétricos de los cubos del arreglo), lo que al generalizarse a un conjunto de cubos puede ocasionar que se sobrestime o subestime la carga de diseño. Recientemente se han propuesto cilindros poliméricos y tacones de neopreno como celdas de deformación para sustituir la madera, con la finalidad de eliminar problemas como la deformación no uniforme debido a la heterogeneidad de la madera, la afectación en su comportamiento debido a la humedad, pero también con la intención de disminuir la frecuencia del mantenimiento a los dispositivos. El comportamiento mecánico de materiales distintos a la madera, como los cilindros poliméricos y los tacones de neopreno, no ha sido evaluado y documentado, aun cuando existen algunos inmuebles en la Ciudad de México cuyas cimentaciones con dispositivos de control emplean estos materiales.

El objetivo principal de esta tesis es evaluar experimentalmente el comportamiento mecánico de los materiales empleados actualmente como celdas de deformación, las cuales son uno de los elementos fundamentales para el buen funcionamiento de los pilotes de control. Se estudian tres tipos de materiales: a) cubos de madera de caobilla (individuales y en conjunto), b) cilindros poliméricos, y c) tacones de neopreno, mediante ensayos de compresión simple con carga controlada (representando condiciones normales de operación) y con carga cíclica (representando condiciones sísmicas). En estos ensayos se toman en cuenta diversos factores que intervienen en el comportamiento mecánico de los arreglos de tres niveles de madera, como: a) el peso volumétrico de los cubos, b) la colocación de cubos en el arreglo, c) la colocación de láminas galvanizadas, y d) la humedad en los cubos. Los resultados de los ensayos permiten proponer parámetros para estimar la carga nominal (de fluencia) requerida para el diseño apropiado de celdas de deformación y con ello, obtener un óptimo funcionamiento del sistema de control de este tipo de elementos de cimentación. Asimismo a partir de los resultados de las pruebas experimentales se proponen curvas que permiten estimar en sitio la carga en los pilotes de control, con base en la deformación de la celda (conjunto de cubos de madera, cilindro polimérico o tacón de neopreno), y conocer así los pilotes que reciben mayor carga.

Finalmente, se proporcionan conclusiones generales y recomendaciones para el mantenimiento de pilotes de control.



## ABSTRACT

The control piles are a foundation or underpinning system implemented in approximately 700 buildings in Mexico City. These devices allow solving two of the most common problems in buildings of the city: a) apparent emergence, and b) differential settlements. This is possible by means of a deformable cell constituted by an arrangement of wood cubes (caobilla type) which controls: a) the load transmitted to piles, and b) the vertical displacements of the structure. In professional practice, the nominal load (yield point) of deformation cells has been estimated based on the results of mechanical tests on individual wooden cubes. However, these results are not applicable to the cube arrangements that are used in the control piles, due to the heterogeneity of the wood (different volumetric weights of the cubes), this can cause the design load to be overestimated or underestimated. Recently, polymeric cylinders and neoprene blocks have been proposed as deformable cells to replace wood, in order to eliminate problems such as non-uniform deformation due to the heterogeneity of the wood and the effects on its behavior due to humidity, but also with the intention of decreasing the frequency of maintenance to the cells. The mechanical behavior of materials different to wood, such as polymeric cylinders and neoprene blocks, has not been evaluated and documented, even though there are some buildings in Mexico City whose foundations with control devices use these materials.

The main objective of this thesis is to experimentally evaluate the mechanical behavior of the materials used as deformation cells, which are one of the fundamental elements for the proper functioning of control piles. Three types of materials are studied: a) caobilla wood cubes (individual and arrangement), b) polymeric cylinders, and c) neoprene blocks, through simple compression tests applying controlled load (representing normal operation conditions) and cyclic load (representing seismic conditions). In these tests several factors that influence in the mechanical behavior of the arrangements of three levels of wood are taken into account, such as: a) the volumetric weight of the cubes, b) the placement of cubes in the arrangement, c) the placement of galvanized sheets, and d) moisture in the cubes. The results of the tests allow to propose parameters to estimate the nominal load (yield point) required for the appropriate design of deformation cells and obtain an optimum operation of the control system of this type of foundation elements. Likewise, from the results of the experimental tests, curves are proposed that allow to estimate *in-situ* the load in the control piles, based on the deformation of the cell (wood cubes arrangement, polymeric cylinder or neoprene block).

Finally, general conclusions and recommendations for the maintenance of control piles are provided.

## CONTENIDO

Pág.

<b>RESUMEN .....</b>	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>iii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>vii</b>
<b>SIMBOLOGÍA.....</b>	<b>ix</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2 PILOTES DE CONTROL: DESCRIPCIÓN, CRITERIOS DE DISEÑO, MANTENIMIENTO Y CASOS PRÁCTICOS .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Descripción de los componentes de los pilotes de control tradicionales .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1.1 Pilote .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.2 Marco de carga .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.3 Celda de deformación .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.3.1 Arreglos de cubos de madera .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.3.2 Cilindros poliméricos.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.3.3 Tacones de neopreno .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Otros dispositivos de control.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3 Criterios de diseño de cimentaciones con pilotes de control .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.1 González-Flores .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.2 Zeevaert (1983) .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.3 Tamez (1986).....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.4 Auvinet y López-Acosta (2008) .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4 Mantenimiento de los sistemas de control .....</b>	<b>24</b>
<b>2.4.1 Arreglo de cubos sin láminas de acero galvanizado.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.2 Arreglo con cubos espaciados .....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.3 Cubos húmedos con láminas deformadas .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.4 Excentricidad en el sistema .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.5 Condición sísmica.....</b>	<b>27</b>
<b>2.5 Casos prácticos del uso de pilotes de control.....</b>	<b>28</b>
<b>2.5.1 Caso 1: Recimentación y renivelación del Templo de las Capuchinas.....</b>	<b>28</b>
<b>2.5.2 Caso 2: Recimentación parcial de la torre de un conjunto de edificios con hincado de nuevos pilotes de punta .....</b>	<b>29</b>
<b>2.5.3 Caso 3: Transformación de pilotes existentes en un edificio (de punta o de fricción) a pilotes de control .....</b>	<b>30</b>
<b>2.5.4 Caso 4: Recimentación combinando el hincado de pilotes de punta nuevos y la transformación de pilotes existentes.....</b>	<b>31</b>
<b>2.5.5 Caso 5: Conjunto de edificios en Tlatelolco .....</b>	<b>32</b>
<b>2.5.6 Caso 6: Uso de cilindros poliméricos y arreglos de cubos de madera en los sistemas de control .....</b>	<b>41</b>
<b>3 COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES .....</b>	<b>47</b>

---

3.1 Comportamiento y propiedades de los materiales.....	47
3.1.1 Diagrama esfuerzo-deformación.....	47
3.1.2 Deformación.....	50
3.1.3 Fractura.....	51
3.1.4 Método de esfuerzo de fluencia desplazado ( <i>Método offset</i> ).....	53
3.1.5 Comportamiento mecánico de la madera .....	53
3.1.6 Comportamiento mecánico de los polímeros: elastómeros y elasticidad del hule .....	57
3.2 Estudios previos del comportamiento de cubos individuales de madera .....	59
3.2.1 González-Flores .....	59
3.2.2 Salazar Resines .....	59
3.2.3 Aguilar y Rojas .....	60
3.2.4 Santoyo y Segovia.....	60
<b>4 ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIALES EMPLEADOS COMO CELDAS DE DEFORMACIÓN.....</b>	<b>63</b>
4.1 Equipo e instrumentos de medición .....	63
4.2 Elementos de estudio y pruebas realizadas .....	65
4.2.1 Cubos de madera.....	65
4.2.1.1 <i>Cubos individuales</i> .....	67
4.2.1.2 <i>Cubos apilados</i> .....	72
4.2.1.3 <i>Arreglos de un nivel</i> .....	74
4.2.1.4 <i>Arreglos de tres niveles</i> .....	75
4.2.1.5 <i>Arreglos de tres niveles en prueba cíclica</i> .....	79
4.2.1.6 <i>Parámetros para obtener la capacidad de carga de los arreglos de cubos in situ</i> .....	80
4.2.1.7 <i>Propiedades mecánicas de la caobilla obtenidas experimentalmente</i> .....	82
4.2.2 Cilindros poliméricos .....	82
4.2.2.1 <i>Cilindros con capacidad de 490 kN (50 t)</i> .....	84
4.2.2.2 <i>Cilindros con capacidad de 735 kN (75 t)</i> .....	86
4.2.2.3 <i>Cilindros con capacidad de 980 kN (100 t)</i> .....	89
4.2.2.4 <i>Cilindros en pruebas cíclicas</i> .....	91
4.2.2.5 <i>Parámetros para obtener la carga de cilindros poliméricos en sitio</i> .....	96
4.2.3 Tacones de neopreno.....	97
4.3 Resumen de resultados experimentales .....	100
4.3.1 Cubos de madera tipo caobilla.....	100
4.3.2 Cilindros poliméricos .....	101
4.3.3 Tacones de neopreno.....	102
<b>5 CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>103</b>
5.1 Conclusiones generales .....	103
5.2 Recomendaciones .....	104
<b>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>107</b>

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 2.1 Solución al problema de hundimiento regional mediante el sistema de pilotes de control (modificado de Tamez, 1986). .....	3
Figura 2.2 Sistema de pilotes de control tradicional (modificado de López-Acosta et al., 2015). ...	4
Figura 2.3 Ubicación de los pilotes de control respecto a ejes o columnas.....	5
Figura 2.4 Dado estructural de forma triangular (excéntrico a los ejes del edificio).....	6
Figura 2.5 Dado estructural de forma cuadrada con contratraves nuevas. ....	6
Figura 2.6 Perforación previa al hincado de pilotes (cortesía de PICOSA, 2017).....	6
Figura 2.7 Tramo de pilote de 91 cm de altura.....	7
Figura 2.8 Hincado de pilote con equipo de presión hidráulica (cortesía de PICOSA, 2017).....	7
Figura 2.9 Pilotes en sitio: a) de punta segmentado en tramos de 91 cm, b) de fricción (existente) y de punta (nuevo).....	8
Figura 2.10 Ubicación de los sistemas de control (modificado de PICOSA, 2014).....	8
Figura 2.11 Marco de carga tradicional.....	9
Figura 2.12 Características de un marco de carga tradicional. ....	9
Figura 2.13 Componentes de un marco de carga <i>en sitio</i> . ....	10
Figura 2.14 Otros tipos de marcos de carga. ....	11
Figura 2.15 Marco de carga triangular (modificado de patente MX/E/2010/015050; PICOSA, 2015). ....	13
Figura 2.16 Comportamiento idealizado de una celda de deformación constituida por un arreglo de cubos de madera (López-Acosta y Martínez, 2017a). ....	13
Figura 2.17 Sistema de control <i>en sitio</i> con arreglo de cubos de madera de caobilla.....	14
Figura 2.18 Sistema de control <i>en sitio</i> con cilindro polimérico.....	15
Figura 2.19 Tacones de neopreno en un edificio de la Ciudad de México. ....	15
Figura 2.20 Otros mecanismos de control (Parte 1 de 3).....	18
Figura 2.21 Otros mecanismos de control (Parte 2 de 3).....	19
Figura 2.22 Otros mecanismos de control (Parte 3 de 3).....	20
Figura 2.23 Fricción negativa en cimentaciones (Zeevaert, 1983). ....	21
Figura 2.24 Consideraciones para un análisis sísmico (Auvinet y López-Acosta, 2008).....	24
Figura 2.25 Celda de deformación sin láminas galvanizadas.....	25
Figura 2.26 Arreglo de cubos con separación entre ellos. ....	26
Figura 2.27 Celda de deformación con cubos húmedos y láminas deformadas. ....	26
Figura 2.28 Problemas de excentricidad: a) cabezal inclinado (cortesía de TGC, 2016), y b) falla de varillas de acero (ancladas en la losa) en un sistema sin mantenimiento (cortesía de PICOSA, 2017). ....	27
Figura 2.29 Efectos del sismo de 1985: a) inclinación del marco de carga (Aguilar y Rojas, 1986), b) falla del cabezal de acero (Aguilar y Rojas, 1990), y c) falla de marco tipo STAG con celda de presión (Santoyo y Alanís, 2013).....	27
Figura 2.30 Sistema de control: a) original (González-Flores, 1959), y b) con mejoras en el sistema (PICOSA, 2017). ....	28
Figura 2.31 Recimentación y nivelación del Templo de las Capuchinas: a) antes de los trabajos, b) después de los trabajos (PICOSA, 2010). ....	28

<b>Figura 2.32 Recimentación con 52 pilotes de control de 100 y 150 t, de la torre de un conjunto de edificios.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 2.33 Edificio en la Ciudad de México: a) edificio (Google Earth, 2016), b) arreglo de cubos, c) marco de carga.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 2.34 Hotel en la Ciudad de México: a) edificio (Google Earth, 2016), b) desligue estructural de pilotes de punta existentes, c) pilotes de punta existentes con sistema de control nuevo.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 2.35 Pilotes de punta existentes en un hotel de la Ciudad de México, recortados y habilitados con sistema de control en la cabeza.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 2.36 Hospital ubicado en la zona lacustre: a) edificio (Google Earth, 2016), b) y c) pilotes de fricción con sistema de control nuevo en la cabeza. ....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 2.37 Pilotes de control en tanques de almacenamiento de turbosina. ....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 2.38 Tanques de almacenamiento de turbosina: a) estructura, b) ubicación de pilotes de control nuevos.....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 2.39 Características generales del conjunto de edificios.....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 2.40 Historia de eventos en el conjunto Tlatelolco. ....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 2.41 Recimentación con 52 pilotes de control de 100 y 150 t, de la torre de un conjunto de edificios.....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 2.42 Corte transversal del conjunto. ....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 2.43 Ampliación del cajón de la torre y refuerzo después de 1985.....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 2.44 Corte estratigráfico transversal.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 2.45 Variación de la presión piezométrica frente a la torre en diciembre de 2006.....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 2.46 Movimientos verticales del conjunto, periodo 1994 a 1998 (Auvinet y López-Acosta, 2008). ....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 2.47 Movimientos verticales del conjunto (Período 2010 a 2016).....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 2.48 Historia de desplomos en la TVGUT en el Período: marzo 1977 a marzo 2016 (actualizado de López-Acosta et al., 2007). ....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 2.49 Recimentación en la ampliación sur de la torre del CCUT con 36 nuevos pilotes de control.....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 2.50 Características del edificio intervenido.....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 2.51 Ubicación de los pilotes de control. ....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 2.52 Pilotes de control hincados en el edificio. ....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 2.53 Trabajos de renivelación: a) desconexión de pilotes de fricción, b) subexcavación, c) liberación de tuercas y penetración del pilote y, d) reconexión de los pilotes de fricción.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 2.54 Ubicación de los túneles y zonas de subexcavación manual.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 2.55 Asentamientos diferenciales del edificio. ....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 2.56 Corrección de desplomos del edificio. ....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 3.1 Diagrama convencional esfuerzo-deformación unitaria (modificado de Pilkey y Pilkey, 1974). ....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 3.2 Modelos representativos del comportamiento de materiales (Pilkey y Pilkey, 1974)..</b>	<b>50</b>
<b>Figura 3.3 Deformación: a) elástica, y b) plástica (Bickford, 1995).....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 3.4 Curvas típicas de fluencia (modificado de Pilkey y Pilkey, 1974). ....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 3.5 Comportamiento mecánico y falla: a) dúctil, y b) frágil (Hayden et al, 1964). ....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 3.6 Método de esfuerzo de fluencia desplazado (modificado de ASTM D638-02). ....</b>	<b>53</b>

Figura 3.7 Estructura celular de la madera (modificado de Hayden et al, 1964).....	54
Figura 3.8 Curvas esfuerzo-deformación en ensayo de tensión y compresión en madera (Robles y Echenique-Manrique, 1986). .....	55
Figura 3.9 Diagrama de módulo elástico-temperatura para el poliestireno (Hayden et al, 1964).57	
Figura 3.10 Curva esfuerzo-deformación de un elastómero (Hayden et al, 1964). .....	58
Figura 3.11 Resultados obtenidos en cubos de madera de caobilla (modificado de Salazar-Resines, 1978).....	59
Figura 3.12 Resultados obtenidos en cubos de caoba (modificado de Aguilar y Rojas, 1990). ....	60
Figura 3.13 Comportamiento en cubos individuales de madera de caobilla (Santoyo y Alanís, 2013). .....	60
Figura 3.14 Comportamiento en cubos individuales de madera de caobilla (Santoyo y Alanís, 2013). .....	61
Figura 4.1 Maquina hidráulica de ensayo universal. ....	63
Figura 4.2 Características y dimensiones del sensor de desplazamiento (LVDT).....	64
Figura 4.3 Ubicación de los sensores de desplazamiento (LVDT). .....	64
Figura 4.4 Placas de acero empleadas en los ensayos de laboratorio. ....	65
Figura 4.5 Histograma de peso volumétrico de cubos de caobilla. ....	66
Figura 4.6 Acomodo de los cubos de madera de caobilla en los arreglos de tres niveles.....	67
Figura 4.7 Posición de las fibras en los ensayos de laboratorio.....	67
Figura 4.8 Comportamiento mecánico en cubos individuales de madera en estado seco.....	68
Figura 4.9 Proceso de deformación en un cubo con fibras en posición horizontal.....	69
Figura 4.10 Proceso de deformación en un cubo con fibras en posición vertical. ....	69
Figura 4.11 Cubos individuales húmedos y sumergidos. ....	70
Figura 4.12 Comportamiento mecánico en cubos que estuvieron: a) en el cuarto húmedo, y b) sumergidos. ....	70
Figura 4.13 Proceso de deformación en un cubo que estuvo en el cuarto húmedo. ....	71
Figura 4.14 Proceso de deformación en un cubo que estuvo sumergido en agua.....	71
Figura 4.15 Falla en cubos con menor peso volumétrico. ....	72
Figura 4.16 Deformación en los cubos apilados húmedos. ....	72
Figura 4.17 Comportamiento mecánico en cubos apilados. ....	73
Figura 4.18 Comportamiento mecánico en arreglos de un solo nivel de 3×3 cubos de madera. ..	74
Figura 4.19 Proceso de deformación en un arreglo de 3×3 cubos de un nivel.....	75
Figura 4.20 Comportamiento mecánico en arreglos de 3×3 cubos.....	75
Figura 4.21 Comportamiento mecánico en arreglos de tres niveles de 3×3 cubos.....	76
Figura 4.22 Proceso de deformación en arreglo de 3×3 cubos de tres niveles con lámina. ....	77
Figura 4.23 Proceso de deformación en arreglo de 3×3 cubos de tres niveles sin lámina. ....	77
Figura 4.24 Comparación de deformación de arreglos de 3×3 cubos con y sin lámina.....	77
Figura 4.25 Comportamiento mecánico de diversos arreglos de tres niveles de 3×3, 4×4, 5×4 y 8×7 cubos. ....	78
Figura 4.26 Deformación en arreglos de tres niveles de cubos de madera de caobilla. ....	79
Figura 4.27 Comportamiento mecánico en arreglos de tres niveles de 3×3 cubos en prueba cíclica. ....	79
Figura 4.28 Deformación en arreglo de tres niveles de 3×3 cubos durante una prueba cíclica... 80	
Figura 4.29 Curvas medias de los arreglos de tres niveles de cubos de madera.....	81

<b>Figura 4.30 Dimensiones de los cilindros poliméricos.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 4.31 Cilindros poliméricos.....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 4.32 Comportamiento mecánico en cilindros con capacidad de 490 kN (50 t).....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 4.33 Proceso de deformación de los cilindros poliméricos con capacidad de 490 kN (50 t). .....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 4.34 Comparación entre cilindros poliméricos de 490 kN y un arreglo tipo de 5×5 cubos. .....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 4.35 Comportamiento mecánico en cilindros con capacidad de 735 kN (75 t).....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 4.36 Proceso de deformación en los cilindros poliméricos con capacidad de 735 kN (75 t). .....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 4.37 Comparación entre cilindros poliméricos de 735 kN y un arreglo tipo de 6×5 cubos. .....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 4.38 Comportamiento mecánico en cilindros con capacidad de 980 kN (100 t).....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 4.39 Proceso de deformación de los cilindros poliméricos con capacidad de 980 kN (100 t). .....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 4.40 Comparación entre cilindros poliméricos de 980 kN y un arreglo tipo de 7×6 cubos. .....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 4.41 Comportamiento mecánico en cilindros con capacidad nominal de 490 kN en pruebas cíclicas.....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 4.42 Proceso de deformación de los cilindros poliméricos de 490 kN (50 t) en prueba cíclica. ....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 4.43 Comportamiento mecánico en cilindros con capacidad nominal de 735 kN en pruebas cíclicas.....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 4.44 Deformación generada en cilindros poliméricos 2 y 3 con capacidad nominal de 735 kN (75 t) en prueba cíclica.....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 4.45 Proceso de deformación del cilindro polimérico 1 con capacidad de 735 kN (75 t) en prueba cíclica.....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 4.46 Comportamiento mecánico en cilindros con capacidad nominal de 980 kN en pruebas cíclicas.....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 4.47 Proceso de deformación de un cilindro polimérico de 980 kN (100 t) en prueba cíclica. ....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 4.48 Curvas medias obtenidas en cilindros poliméricos.....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 4.49 Corte de los cuatro tacones de neopreno. ....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 4.50 Dimensiones de los tacones de neopreno.....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 4.51 Comportamiento mecánico en tacones de neopreno.....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 4.52 Proceso de deformación en tacón de neopreno de 7.2 cm de espesor.....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 4.53 Comparación entre un arreglo tipo de 8×7 cubos y un tacón de neopreno.....</b>	<b>100</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Capacidad estructural de distintos tipos de marcos de carga (Peña et al., 2016).....	12
Tabla 2.2 Principales mecanismos de control (modificado de Auvinet y Rodríguez, 1998). ....	17
Tabla 2.3 Movimientos verticales en la esquina suroeste de la torre del CCUT. ....	38
Tabla 3.1 Propiedades de algunas de las maderas mexicanas (Robles y Echenique-Manrique, 1986). ....	56
Tabla 4.1 Especificaciones de las pruebas de laboratorio con cubos de madera.....	66
Tabla 4.2 Resultados obtenidos en cubos individuales en estado seco.....	68
Tabla 4.3 Resultados obtenidos en cubos individuales húmedos. ....	71
Tabla 4.4 Resultados obtenidos en cubos apilados.....	73
Tabla 4.5 Resultados obtenidos en un arreglo de 3×3 cubos de un solo nivel. ....	74
Tabla 4.6 Resultados obtenidos en arreglos de 3×3 cubos de un solo nivel y de tres niveles con láminas galvanizadas. ....	76
Tabla 4.7 Resultados obtenidos en arreglos de tres niveles de 3×3 cubos. ....	77
Tabla 4.8 Resultados obtenidos en diversos arreglos de tres niveles de 3×3, 4×4, 5×4 y 8×7 cubos.....	78
Tabla 4.9 Resultados obtenidos en pruebas cíclicas en arreglos de tres niveles de 3×3 cubos.....	80
Tabla 4.10 Propiedades mecánicas de las curvas medias de los arreglos de tres niveles de cubos de madera.....	81
Tabla 4.11 Parámetros para estimar la carga nominal y carga última en los arreglos de cubos de madera.....	81
Tabla 4.12 Propiedades mecánicas en cubos de madera de caobilla de 5cm de lado.....	82
Tabla 4.13 Especificaciones de las pruebas de compresión simple en cilindros poliméricos. ....	83
Tabla 4.14 Especificaciones de las pruebas cíclicas en cilindros poliméricos. ....	83
Tabla 4.15 Resultados obtenidos en cilindros con capacidad de 490 kN (50 t).....	85
Tabla 4.16 Comparación entre cilindros poliméricos de 490 kN y un arreglo tipo de 5×5 cubos.....	86
Tabla 4.17 Resultados obtenidos en cilindros con capacidad de 735 kN (75 t).....	87
Tabla 4.18 Comparación entre cilindros poliméricos de 735 kN y un arreglo tipo de 6×5 cubos.....	89
Tabla 4.19 Resultados obtenidos en cilindros con capacidad de 980 kN (100 t).....	90
Tabla 4.20 Comparación entre cilindros poliméricos de 980 kN y un arreglo tipo de 7×6 cubos.....	91
Tabla 4.21 Resultados obtenidos en pruebas cíclicas en cilindros poliméricos con capacidad de 490 kN.....	92
Tabla 4.22 Resultados obtenidos en pruebas cíclicas en cilindros poliméricos con capacidad de 735 kN.....	94
Tabla 4.23 Resultados obtenidos en pruebas cíclicas en cilindros poliméricos con capacidad de 980 kN.....	95
Tabla 4.24 Propiedades mecánicas de las curvas medias en los cilindros poliméricos de 490, 735 y 980 kN.....	97
Tabla 4.25 Resultados obtenidos en pruebas de compresión simple en tacones de neopreno.....	99





## SIMBOLOGÍA

$A_0$	Área de la sección transversal del espécimen
$\hat{a}$	Área tributaria del pilote
$C_{pilotes}$	Capacidad de carga de los pilotes de control, regida por la carga de fluencia de las celdas de deformación
$\delta$	Desplazamiento vertical
$\delta_f$	Diminución en la altura del espécimen asociada a la carga de fluencia
$\delta_m$	Diminución en la altura del espécimen asociada a la carga máxima
$E$	Módulo de Young
$E_e$	Módulo tangente en la rama elástica
$E_p$	Módulo tangente en la rama plástica
$E_s$	Módulo secante
$E_t$	Módulo tangente
$E_w$	Empuje del agua
$\varepsilon$	Deformación unitaria
$\varepsilon_e$	Deformación elástica
$\varepsilon_f$	Deformación asociada al esfuerzo de fluencia
$\varepsilon_m$	Deformación asociada al esfuerzo máximo
$\varepsilon_p$	Deformación plástica
$\varepsilon_r$	Deformación asociada al esfuerzo residual
$F$	Fuerza de tensión
$F_a$	Fuerza actuante
$F_c$	Factor de carga (para un análisis en condiciones sísmicas), de acuerdo con NTCDDC (2004) o normas vigentes.
$F_{cp}$	Factor de comportamiento plástico
$F_{fr}$	Fricción negativa (PICOSA)
$FN$	Fricción negativa desarrollada al 100%
$F_n$	Fricción negativa (en el método de Tamez)
$(FN)_d$	Fricción negativa (en el método de Zeevaert)
$Fr$	Fuerza resistente
$FS_d$	Factor de seguridad sísmico
$FS_p$	Factor de seguridad
$G_s$	Factor de seguridad de la cimentación
$L$	Longitud de la muestra
$L_0$	Longitud inicial de un espécimen
$N_{pil}$	Número de pilotes
$P_f$	Carga de fluencia
$P_m$	Carga máxima
$\sigma_f$	Esfuerzo de fluencia
$\sigma_m$	Esfuerzo máximo
$\sigma_r$	Esfuerzo residual
$q_a$	Carga en la superficie del terreno
$Q_{ah}$	Carga aplicada mediante el dispositivo de control
$Q_c$	Carga límite de la celda deformable

---

---

$Q_{cd(rgl)}$	Carga de fluencia mínima en las celdas de deformación
$Q_f$	Capacidad friccionante del pilote
$Q_{fu}$	Carga desarrollada en el fuste del pilote
$Q_{L(rgl)}$	Carga transmitida al terreno a través de la losa de cimentación según especificaciones del reglamento de acuerdo con la zonificación (Zona II o III)
$Q_p$	Capacidad de punta del pilote (Tamez)
$Q_{pa}$	Carga total actuante en el pilote
$Q_{pu}$	Capacidad de punta del pilote
$Q_u$	Carga límite del sistema de control
$\rho$	Relación de Poisson
$S$	Entropía
$T$	Temperatura del sistema y de las fuentes de calor
$U$	Energía interna
$V$	Volumen de la muestra
$w$	Contenido de agua
$W_{dta}$	Carga sísmica total admisible para el diseño
$W_E$	Peso estático de la estructura incluyendo la cimentación (sin factorizar)
$W_{mue}$	Carga muerta incluyendo la cimentación
$W_{ne}$	Carga neta estática
$W_{pilotes}$	Peso de los pilotes
$W_s$	Carga transmitida por la losa al suelo
$W_{vinst}$	Carga viva instantánea (para un análisis en condiciones sísmicas)

## 1 INTRODUCCIÓN

La Ciudad de México experimenta el fenómeno denominado hundimiento regional, ocasionado por el bombeo excesivo de agua del subsuelo y la alta compresibilidad de sus arcillas (Carrillo, 1948). Este fenómeno provoca distintos problemas en las construcciones, dos de los más importantes son:

- *Emersión aparente*. Cuando la cimentación se apoya en un estrato resistente (como la capa dura) mediante pilotes de punta, el suelo que circunda la estructura se hunde debido al hundimiento regional y la estructura parece emerger.
- *Asentamientos diferenciales*. Cuando la cimentación no está apoyada en un estrato firme, y experimenta hundimientos no uniformes debido a las características propias del suelo y de la edificación.

González-Flores creó el sistema de pilotes de control (González-Flores, 1948), que permite el descenso de las estructuras de acuerdo con el hundimiento regional, corrigiendo así tanto la emersión aparente como los asentamientos diferenciales. Actualmente, cerca de 700 edificios en la Ciudad de México emplean este mecanismo de control, el cual está constituido por tres elementos fundamentales: el pilote (originalmente de punta, aunque recientemente se han utilizado de fricción), el marco de carga rígidamente unido a la losa de fondo del cajón de cimentación, y la celda de deformación compuesta por un arreglo de cubos de madera de caobilla. Mediante este último elemento es posible controlar: a) la carga que se transmite a los pilotes, y b) los asentamientos de la estructura.

El comportamiento adecuado de las celdas de deformación influye de forma significativa en el comportamiento de los pilotes de control. Por lo anterior, resulta importante el estudio de estos elementos; por una parte, de su proceder mecánico debido a la heterogeneidad de la madera, y por otra, de la estimación de sus cargas de diseño. En cuanto a estas últimas, su comportamiento se ha analizado en el pasado mediante pruebas de laboratorio de compresión simple en cubos individuales de madera de caobilla, es decir, su estudio no se ha extendido a arreglos de cubos.

Recientemente se han propuesto cilindros poliméricos y tacones de neopreno como celdas de deformación para sustituir la madera, con la finalidad de eliminar problemas como la deformación no uniforme debido a la heterogeneidad de la madera, la repercusión que genera la humedad en su comportamiento, pero también pretendiendo disminuir la frecuencia con la que se debe dar mantenimiento a los dispositivos. El comportamiento mecánico de materiales distintos a la madera, como los cilindros poliméricos y los tacones de neopreno, no había sido evaluado y documentado, aun cuando existen algunas edificaciones en la Ciudad de México cuyas cimentaciones con dispositivos de control emplean estos materiales.

El objetivo principal de esta tesis es evaluar el comportamiento mecánico de estos tres elementos empleados como celdas de deformación: cubos de madera (individuales y en conjunto), cilindros poliméricos y tacones de neopreno, con la finalidad de establecer parámetros que permitan obtener su carga nominal. Asimismo proponer curvas que permitan estimar la carga en los pilotes de control con base en la deformación registrada en la celda de deformación.

Esta tesis se divide en cinco capítulos:

*Capítulo 1.-* Se da una breve descripción y se define el objetivo general de la investigación.

*Capítulo 2.-* Se describe la composición del sistema de pilotes de control creado por González-Flores y las características de los elementos que conforman los sistemas de control. Asimismo se presentan de manera general algunos casos prácticos donde se han empleado este tipo de sistemas de control. Adicionalmente, se exponen otros dispositivos de control creados por distintos autores y se explica su funcionamiento. Se resumen algunos criterios para el diseño de cimentaciones con pilotes de control. También se discute el mantenimiento que se ha dado a los dispositivos de control y se presentan recomendaciones para su funcionamiento adecuado.

*Capítulo 3.-* Se explican los conceptos de esfuerzo y deformación. Además, se describen los parámetros obtenidos mediante la curva esfuerzo-deformación. Se presentan también algunos criterios para el diseño de cimentaciones con pilotes de control.

*Capítulo 4.-* Se dan las características de los materiales estudiados, el equipo empleado y las pruebas de laboratorio realizadas. Asimismo se presentan los resultados obtenidos mediante curvas esfuerzo-deformación. Se establecen parámetros para estimar la carga nominal a partir de los resultados obtenidos de los ensayos y se proponen curvas idealizadas que permiten conocer la carga actuante con base en la deformación generada en las celdas de deformación. Al final, se resumen los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio en los cubos de madera, cilindros poliméricos y tacones de neopreno.

*Capítulo 5.-* Se presentan las conclusiones generales del trabajo y algunas recomendaciones para el funcionamiento óptimo de los sistemas de control.

## 2 PILOTES DE CONTROL: DESCRIPCIÓN, CRITERIOS DE DISEÑO, MANTENIMIENTO Y CASOS PRÁCTICOS

González-Flores creó el sistema de pilotes de control (González-Flores, 1948), que permite el descenso de las estructuras de acuerdo con el hundimiento regional, corrigiendo así tanto la emersión aparente como los asentamientos diferenciales. El sistema de pilotes de control se utiliza tanto en cimentaciones nuevas como en recimentaciones. Se tiene conocimiento que aproximadamente 700 edificios en la Ciudad de México emplean el sistema de pilotes de control, entre los que destacan el Templo de las Capuchinas (localizado a un costado de la antigua Basílica de Guadalupe), el Hotel Camino Real Aeropuerto (ubicado frente a la Terminal 1 del Aeropuerto Internacional Benito Juárez de la Ciudad de México), y el edificio de la ex Secretaría de Relaciones Exteriores en Tlatelolco (PICOSA, 2010). El dispositivo tradicional está constituido por tres elementos fundamentales: el pilote (originalmente de punta, aunque recientemente se han utilizado de fricción), el marco de carga rígidamente unido a la losa de fondo del cajón de cimentación, y la celda de deformación compuesta por un arreglo de cubos de madera de caobilla. Gracias a este último elemento es posible controlar la carga que se transmite a los pilotes y los asentamientos de la estructura.

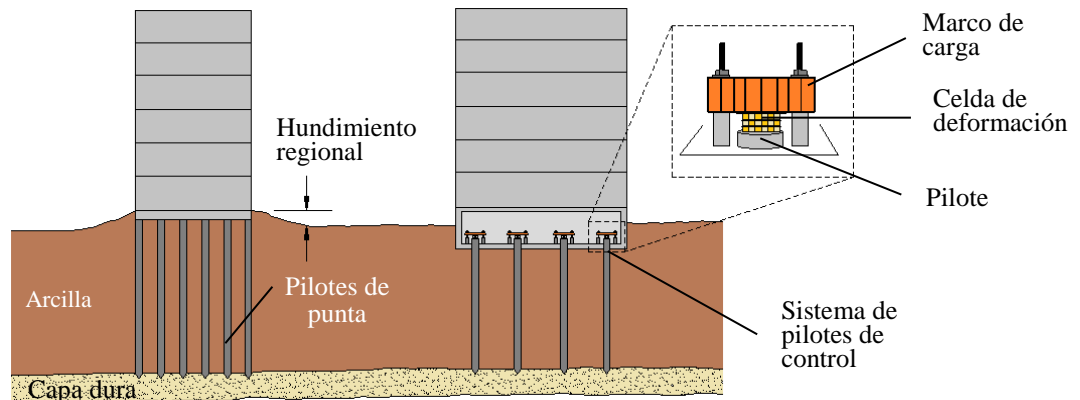


Figura 2.1 Solución al problema de hundimiento regional mediante el sistema de pilotes de control (modificado de Tamez, 1986).

## 2.1 Descripción de los componentes de los pilotes de control tradicionales

El sistema consiste en pilotes que atraviesan libremente la losa de fondo de una cimentación y en cuya cabeza se apoya un marco de carga unido rígidamente a la losa de cimentación mediante anclas (Salazar-Resines, 1978). Entre la cabeza del pilote y el marco de carga se coloca una celda de deformación constituida por un arreglo de cubos de madera de caobilla de 5 cm de lado (González-Flores, 1964; Aguirre, 1981), acomodados en tres niveles o camas y separados por láminas galvanizadas de 1.5 mm de espesor (Figura 2.2).

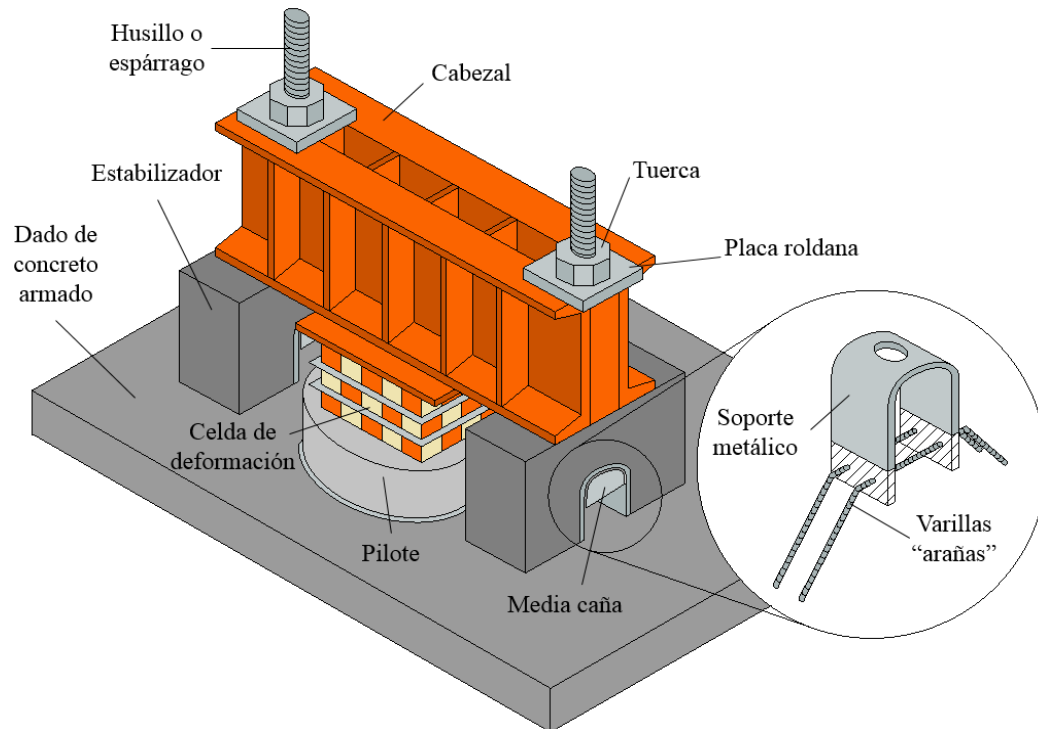


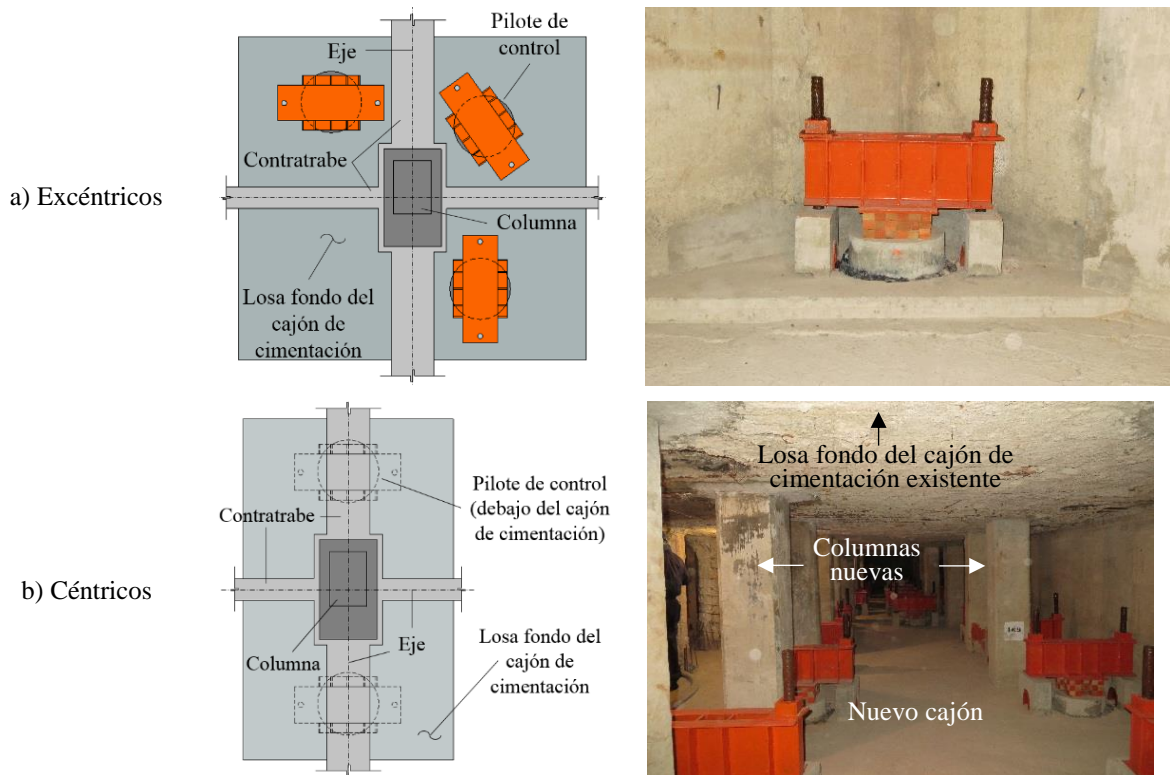
Figura 2.2 Sistema de pilotes de control tradicional (modificado de López-Acosta et al., 2015).

El funcionamiento del sistema de control depende de varios factores:

- a) Relacionados con el subsuelo del sitio:
  - Hundimiento regional del sitio.
  - Capacidad de carga del suelo.
  
- b) Relacionados con la edificación:
  - Hundimientos diferenciales o desniveles
  - Desplomos del edificio.
  - Carga en el pilote.

### 2.1.1 Pilote

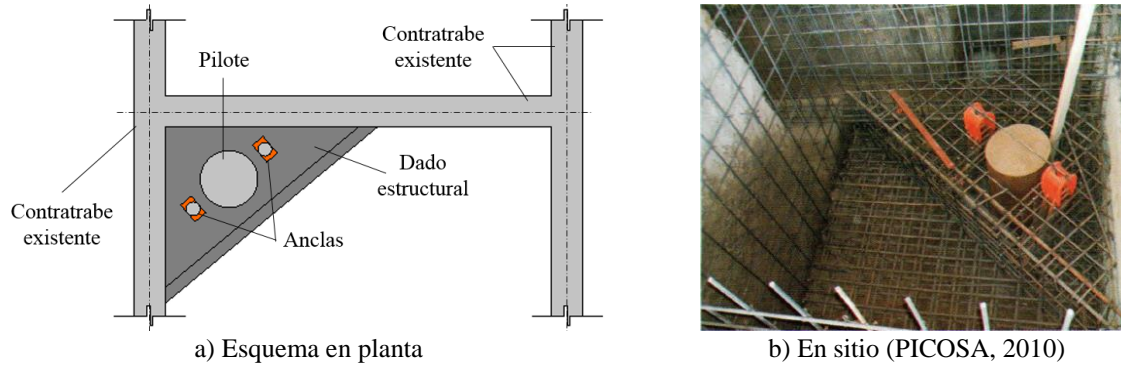
Los pilotes empleados para la recimentación pueden ser de acero o de concreto, en su mayoría de geometría circular (aunque pueden emplearse también los cuadrados). El diámetro, profundidad y armado de los pilotes dependen de las condiciones particulares de diseño de cada cimentación (cargas estáticas y dinámicas, profundidad del cajón de cimentación, etc.) y de las características específicas del suelo. Sin embargo, 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) (PICOSA, 2010). Los pilotes de control se colocan excéntricos a los ejes o columnas de un edificio cuando se trata de nuevos pilotes hincados (Figura 2.3a). Cuando se realiza la transformación de pilotes existentes (de punta o de fricción) a pilotes de control, éstos quedan céntricos a los ejes o columnas (como fueron diseñados originalmente) pero por debajo de la losa fondo del cajón de cimentación en un nuevo cajón que se construye expresamente para la instalación del nuevo sistema de control (Figura 2.3b).



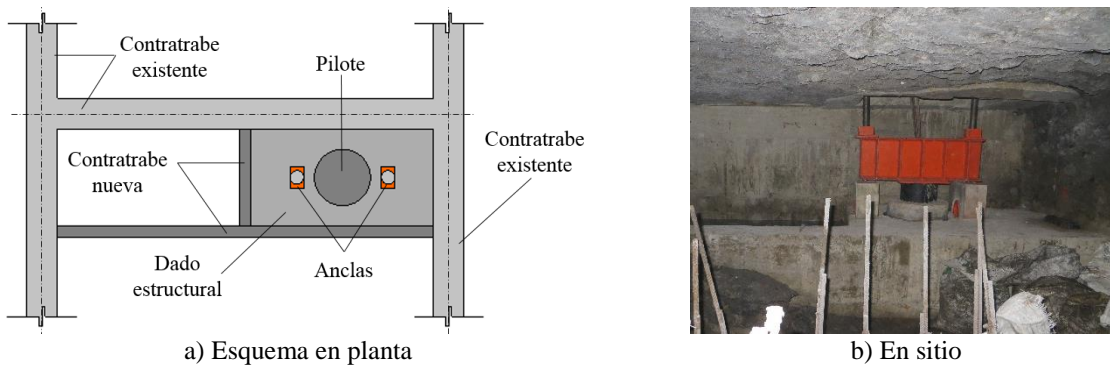
**Figura 2.3 Ubicación de los pilotes de control respecto a ejes o columnas.**

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 y cuadrada. El dado triangular está ligado en cada extremo a una contratrabe (Figura 2.4). En el caso de los dados cuadrados se recomienda la construcción 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 2.5.





**Figura 2.4 Dado estructural de forma triangular (excéntrico a los ejes del edificio).**



**Figura 2.5 Dado estructural de forma cuadrada con contratraves nuevas.**

Para garantizar la verticalidad de los pilotes, se realiza una perforación previa al hincado hasta la capa de apoyo (Figura 2.6). Si el espacio para colocar la perforadora es reducido, se puede utilizar un equipo de perforación rotatorio que tiene 2 m de altura. La perforación debe realizarse después de que el concreto de los dados estructurales haya alcanzado su resistencia máxima.

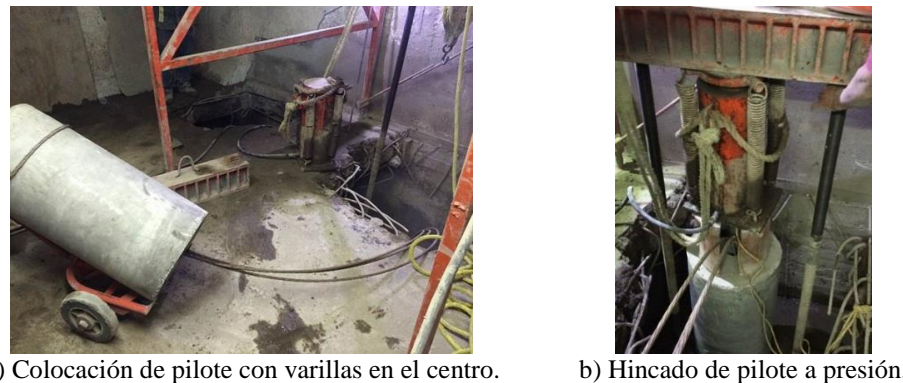


**Figura 2.6 Perforación previa al hincado de pilotes (cortesía de PICOSA, 2017).**

Los pilotes a instalarse en espacios con altura restringida pueden fabricarse previamente en tramos de 91 cm (Figura 2.7) e hincarse en el lugar con equipo de presión hidráulica (Figura 2.8) utilizando como reacción la estructura del edificio (en el pasado se llegó a utilizar lastre). Estos tramos están ligados mediante varillas empalmadas dentro de un cilindro hueco (Santoyo y Segovia, 1995). 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).



**Figura 2.7** Tramo de pilote de 91 cm de altura.



**Figura 2.8** Hincado de pilote con equipo de presión hidráulica (cortesía de PICOSA, 2017).

Aunque un número importante de edificaciones en la Ciudad de México se han recimentado mediante el hincado de nuevos pilotes de punta (Figura 2.9), se sabe que es posible colocar el sistema de control en los pilotes de punta ya existentes transformándolos en pilotes de control. Actualmente se tiene conocimiento que el sistema de control también se ha instalado 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) y el conjunto de edificios del Palacio de Justicia Federal en San Lázaro (PICOSA, 2014).

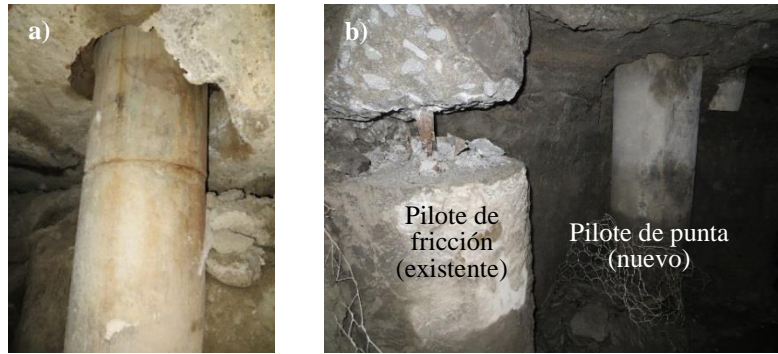


Figura 2.9 Pilotes en sitio: a) de punta segmentado en tramos de 91 cm, b) de fricción (existente) y de punta (nuevo)

### 2.1.2 Marco de carga

El marco de carga forma parte del sistema de control que usualmente se encuentra alojado dentro del cajón de cimentación de un edificio, siempre que exista el espacio suficiente para su instalación (Figura 2.10a). En caso contrario, es posible construir un nuevo dado estructural con muros de concreto armado debajo de la losa de fondo del cajón de cimentación existente (Figura 2.10b).

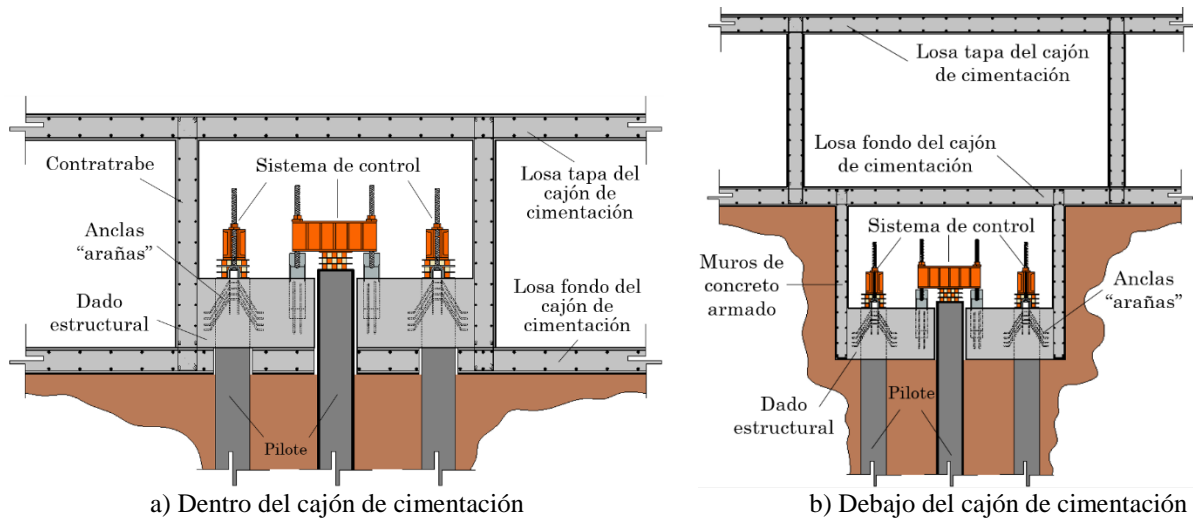


Figura 2.10 Ubicación de los sistemas de control (modificado de PICOSA, 2014).

El marco de carga propuesto originalmente (González-Flores, 1948; Figuras 2.11 y 2.12a) está constituido por un cabezal de acero (Figura 2.12c), en cuyos extremos se ubican unos husillos (tornillos) o espárragos que están anclados a soportes metálicos localizados en la parte inferior del sistema. Los soportes están embebidos y ligados estructuralmente a la losa fondo del cajón de cimentación mediante varillas denominadas anclas (Figura 2.12b). Con la finalidad de tener estabilidad en condiciones sísmicas, al sistema original se agregaron dos estabilizadores de concreto, uno en cada extremo (Santoyo y Alanís, 2013) (Figuras 2.11 y 2.12d).



Figura 2.11 Marco de carga tradicional

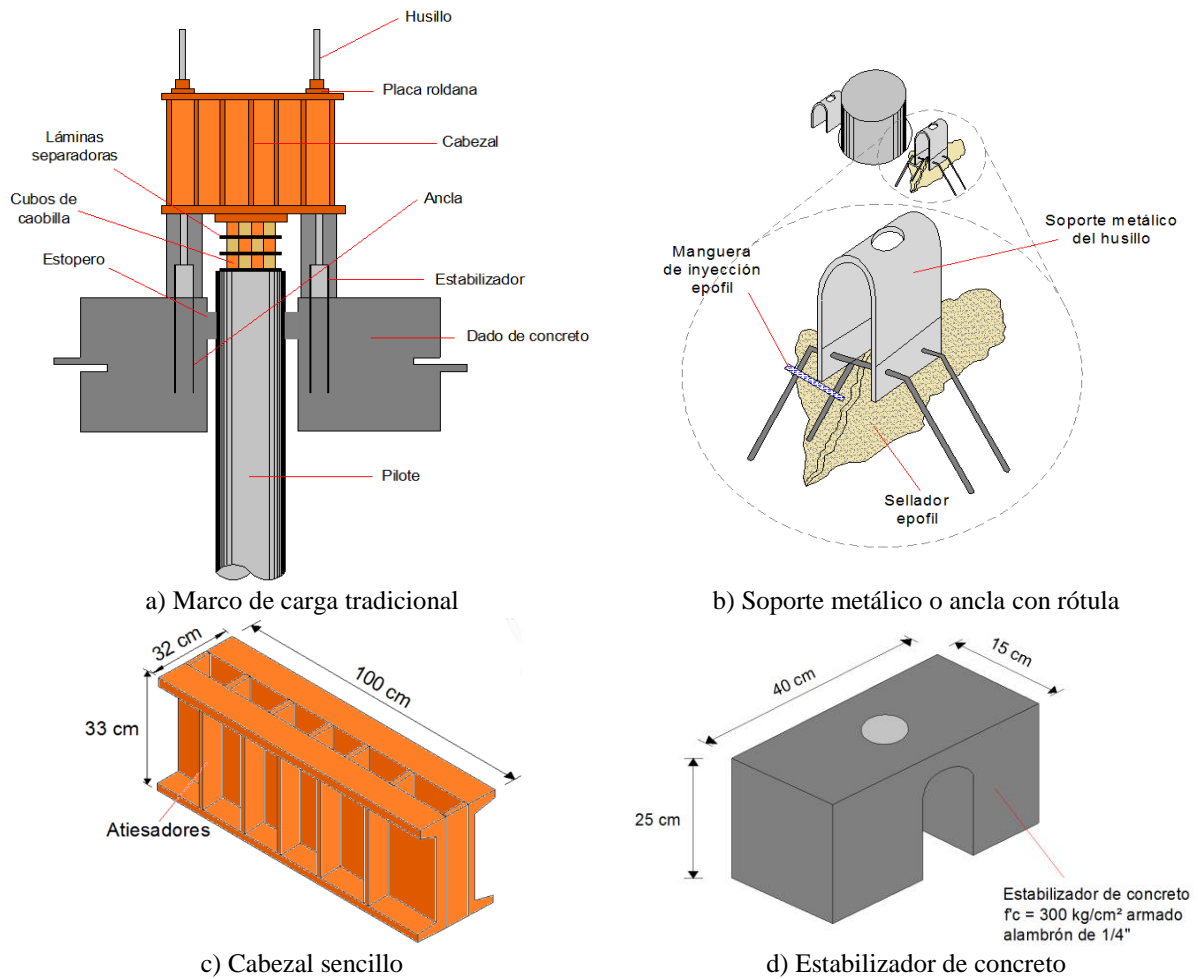
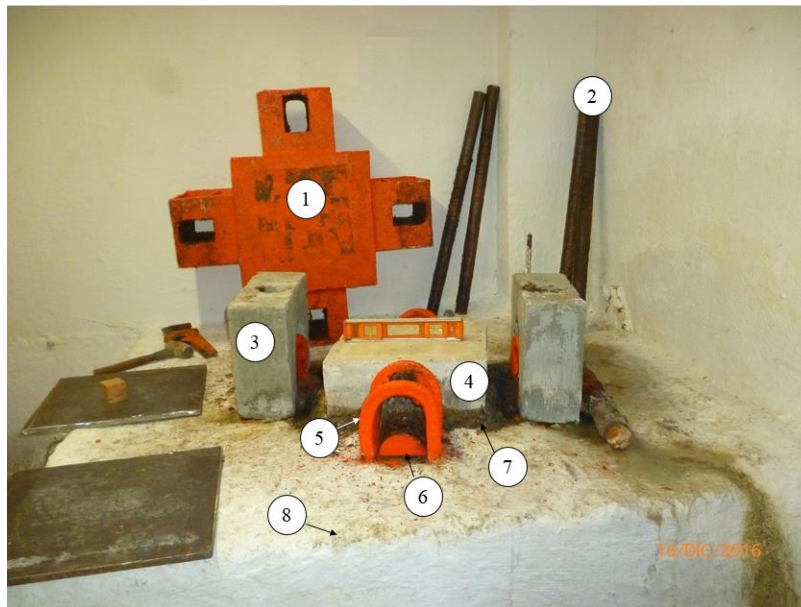


Figura 2.12 Características de un marco de carga tradicional.

En la Figura 2.13 se muestran los componentes de un marco de carga en sitio y otros elementos que complementan el sistema. Se trata de un marco diferente al tradicional, puesto que en este caso el cabezal es doble, los demás componentes son los mismos: espárragos, anclas, media caña y estabilizadores de concreto. Asimismo en este caso se distingue el estopero en el hueco

existente entre el pilote y la losa de cimentación, que tiene como finalidad impedir la infiltración de agua del nivel freático a la celda de cimentación.



- 1) Cabezal (doble)
- 2) Espárragos o husillos
- 3) Estabilizadores de concreto
- 4) Pilote cuadrado
- 5) Ancla con rótula
- 6) Media caña
- 7) Estopero
- 8) Dado estructural de concreto armado (excéntrico a los ejes del edificio)

**Figura 2.13 Componentes de un marco de carga *en sitio*.**

Con la finalidad de mejorar el comportamiento e incrementar la capacidad de carga del sistema de control, se han realizado modificaciones al marco de carga creado por González-Flores:

- a) *Marco con cabezal doble*. Permite transmitir mayor carga al pilote (Figura 2.14a).
- 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 2.14b). El marco tipo STAG se ha empleado en varios edificios de la Ciudad de México con celdas hidráulicas (Santoyo y Segovia, 1995) y con arreglos de cubos de madera.
- c) *Diseño de Aguilar (Aguilar y Rojas, 1990)*. Es muy similar al marco propuesto por González-Flores (1948), pero en este caso se sustituyen los estabilizadores de concreto por estabilizadores de acero (Figura 2.14c), los cuales se anclan rígidamente a la losa de cimentación mediante cuatro varillas (eliminando la rótula).
- d) *Diseño de Tamez (Santoyo y 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  $8 \times 7$  cubos de madera (Figura 2.14d).



a) Cabezal doble



b) Tipo STAG



c) Diseño de Aguilar (Aguilar y Rojas, 1990)

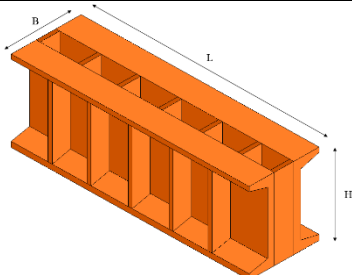
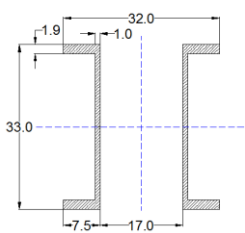
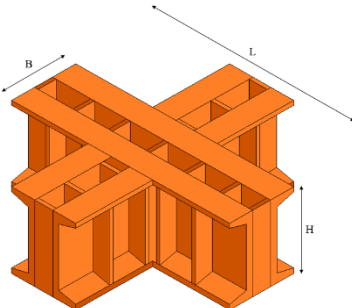
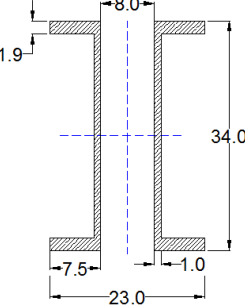
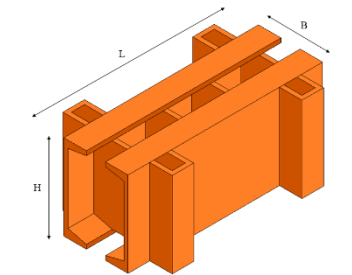
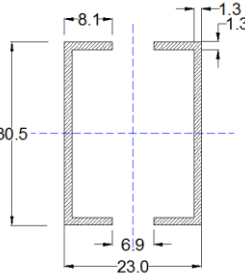


d) Diseño de Tamez (TGC, 2016)

**Figura 2.14 Otros tipos de marcos de carga.**

Una serie de estudios se ha realizado para obtener la resistencia de distintos marcos de carga (Peña *et al.*, 2016). En la Tabla 2.1 se presentan los tipos de marcos evaluados, sus características físicas y la capacidad aproximada obtenida en cada uno de ellos. Las capacidades de los sistemas se obtuvieron de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas vigentes (RCDF, 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 considera 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. De tal forma que la capacidad de carga del marco debe estar acorde 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 que se señalan en la Tabla 2.1.

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

Marco de carga	Esquema	Corte transversal	Largo	Ancho	Altura	Capacidad del sistema
			<i>L</i>	<i>B</i>	<i>H</i>	CS
			(m)	(m)	(m)	(t)
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
Tipo STAG			0.7	0.23	0.31	158.2
			0.7	0.24	0.21	107.8

En 2010 una empresa dedicada al mantenimiento e intervención de los pilotes de control (patente MX/E/2010/015050; PICOSA, 2015) patentó un nuevo cabezal como una mejoría 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 2.15). No se tiene registro de que este cabezal ya esté siendo utilizado en algún edificio de la Ciudad de México.

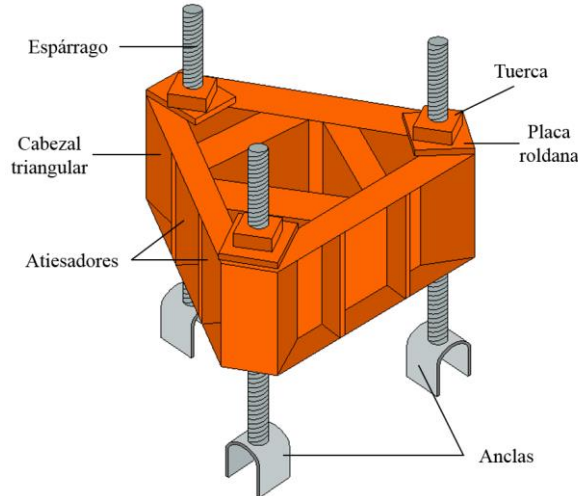
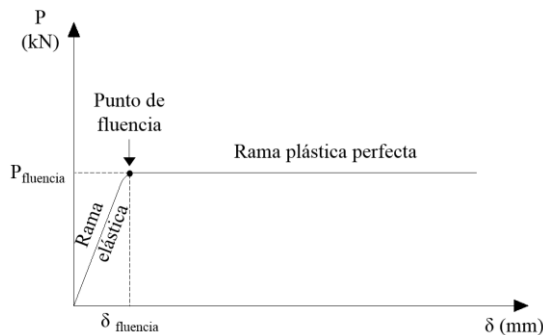


Figura 2.15 Marco de carga triangular (modificado de patente MX/E/2010/015050; PICOSA, 2015).

### 2.1.3 Celda de deformación

Se considera como la parte primordial del sistema de control, puesto que este elemento absorbe los desplazamientos verticales de la estructura generados por el hundimiento regional y controla las cargas que se transmiten a los pilotes. La celda de deformación tiene la función de comprimirse en igual magnitud que el hundimiento regional del suelo, para permitir el descenso del edificio y mantener el contacto suelo-estructura.

La idea original de González-Flores fue emplear un material elastoplástico perfecto (Figura 2.16) que tuviera como característica principal un factor de comportamiento plástico  $F_{cp}$  igual a la unidad (cociente de la carga al inicio de la respuesta plástica entre la carga máxima), para garantizar que el pilote trabaje a carga constante una vez que la celda de deformación alcanza su punto de fluencia. Por esta razón, González-Flores propuso emplear cubos de caoba, debido a que presentaban un comportamiento similar pero no igual al elastoplástico perfecto. 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 al menor costo (López-Acosta y Martínez, 2017a).



a) Gráfica carga vs. desplazamiento vertical



b) Celda de deformación

Figura 2.16 Comportamiento idealizado de una celda de deformación constituida por un arreglo de cubos de madera (López-Acosta y Martínez, 2017a).



Con la finalidad de mejorar el comportamiento mecánico del sistema en su conjunto y debido a la no uniformidad en la deformación de los cubos de madera, se ha buscado sustituir la madera por neopreno de dureza controlada (Segovia, 2001) o por cilindros poliméricos con capacidades nominales de 490, 735 y 980 kN (50, 75 y 100 t) (López-Acosta *et al.*, 2016). A continuación, se describen las características de los materiales empleados como celda de deformación en los sistemas de pilotes de control de los edificios de la Ciudad de México.

### 2.1.3.1 Arreglos de cubos de madera

Las celdas de deformación están constituidas por un arreglo de tres niveles de cubos de madera de caobilla (Figura 2.17), separados cada nivel por una lámina galvanizada. 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. 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 puente o marco de carga (hasta aproximadamente 5 cm), para posteriormente sustituir el arreglo deformado por uno nuevo. Teniendo en cuenta que los pilotes de control son fijos, un edificio puede bajar o subir con respecto a ellos. Así, si la carga que soportan los pilotes se reduce o se anula (cuando se liberan las tuercas de los espárragos), el edificio puede descender. En caso contrario, cuando se incrementa la carga (porque se aumenta el número de cubos) se restringe el movimiento del edificio. También es posible hacer subir al edificio a su nivel original, empleando gatos hidráulicos colocados entre el puente y los pilotes.



a) Sistema de control completo



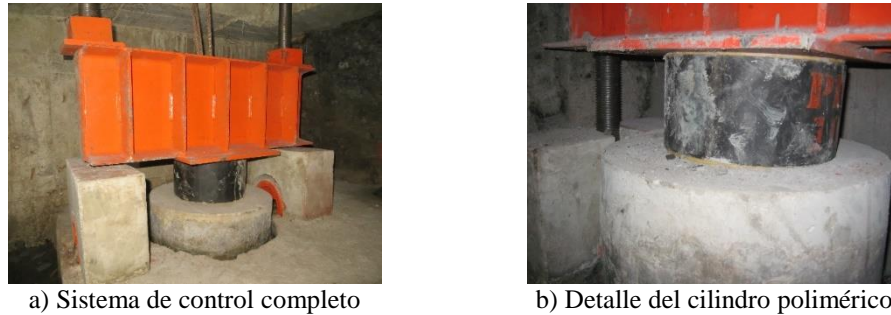
b) Arreglo de cubos de madera de caobilla

**Figura 2.17 Sistema de control *en sitio* con arreglo de cubos de madera de caobilla.**

### 2.1.3.2 Cilindros poliméricos

Recientemente se ha propuesto un elemento deformable de resinas elastoméricas copolimerizadas (patente MX/E/2010/015050; PICOSA, 2015) para emplearse en los sistemas de control (Figura 2.18a). Estos 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 cilindros son homogéneos, macizos (sin huecos) y tienen las mismas dimensiones (un diámetro medio de 26 cm, altura media de 15 cm, y una funda de caucho sintético de 2 mm de espesor; Figura 2.18b). De una muestra de 12 cilindros poliméricos (cuatro de cada una de

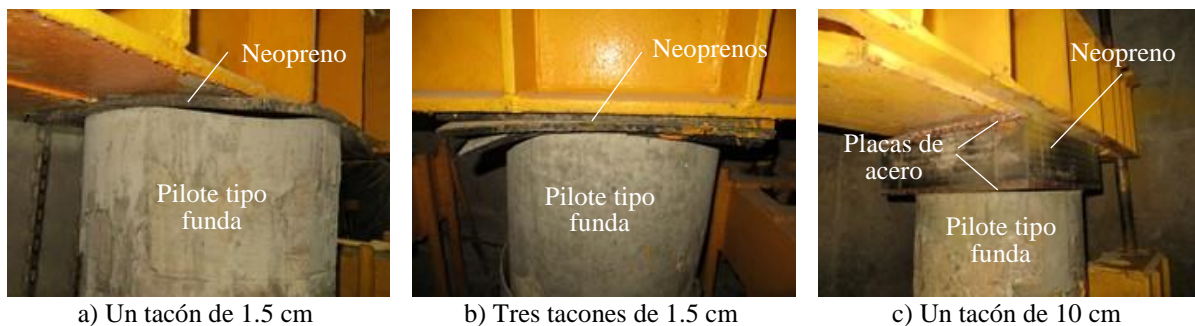
las tres capacidades nominales mencionadas) se determinaron los pesos volumétricos medios del polímero siguientes: a)  $6526.5 \text{ kN/m}^3$  en los cilindros de 490 kN, b)  $7232.0 \text{ kN/m}^3$  en los cilindros de 735 kN, y c)  $8823.2 \text{ kN/m}^3$  en los cilindros de 980 kN. La capacidad nominal de los cilindros es distinta debido a sus diferentes pesos volumétricos medios. Se tiene conocimiento que este elemento ya se ha implementado en diversos edificios de la Ciudad de México con el fin de reemplazar la madera por este material como parte de un mantenimiento de rutina, y solamente en un caso se ha empleado para renivelar un edificio (PICOSA, 2017).



**Figura 2.18 Sistema de control *en sitio* con cilindro polimérico.**

### 2.1.3.3 Tacones de neopreno

Se tiene conocimiento que dos edificios de la Ciudad de México emplean tacones de neopreno como celda de deformación en los pilotes de control, con un marco de carga de diseño tipo Tamez (Santoyo y Alanís, 2013, véase inciso 2.1.2). Los neoprenos empleados en estos dispositivos de control 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 (TGC, 2016): acabado liso en ambas caras, resistencia a la tensión de 600 PSI (4137 kPa), peso volumétrico de  $14500 \text{ kN/m}^3$  y dureza  $65^\circ \text{ Shore}^1$  “A”  $\pm 5^\circ$  (ASTM D-2240). Todos los elementos de neopreno empleados son cuadrados de  $40 \times 40 \text{ cm}$ , sin embargo, varían en espesor (Figura 2.19). Se desconoce la razón de dicha variación.



**Figura 2.19 Tacones de neopreno en un edificio de la Ciudad de México.**

<sup>1</sup> Escala de medida de la dureza elástica de los materiales, determinada a partir de la reacción elástica del material cuando se deja caer un objeto sobre él (ASTM D-2240).

## 2.2 Otros dispositivos de control

Además del sistema de control tradicional creado por González-Flores (1948), existen otros dispositivos de control. En la Tabla 2.2 se presenta un compendio de los principales mecanismos de control para pilotes. Entre los más conocidos se encuentran:

- a) *Disipador de energía (en forma de J)*. Es un sistema de control ubicado en la cabeza del pilote, constituido por soleras metálicas confinadas mediante un tubo de acero (Aguirre, 1981). Este dispositivo permite el control de hundimientos, no requiere de un mantenimiento constante y no presenta pandeo ante carga cíclica (Aguirre, 1991). No se tiene registro de edificios que empleen este sistema en su cimentación (Figura 2.20a).
- b) *Pilote telescópico*. A diferencia del pilote de control tradicional, éste tiene la celda deformable localizada en el cuerpo del pilote (Figura 2.20b) y su funcionamiento es a base de la fricción generada entre un relleno de arena compactado y el concreto del pilote (Correa, 1980). Cuando el relleno alcanza cierta altura, se desarrolla un efecto de arqueado que permite la transmisión de esfuerzos de la parte superior a la parte inferior. Controlando la altura de arena es posible controlar la capacidad de punta del pilote (Auvinet y Rodríguez, 1998).
- c) *Sistema mecánico de autocontrol*. Es un sistema de fricción regulado con placa y tornillo opresor (Figura 2.20c). Los tirantes cruzados que posee hacen que el sistema sea estable en condición sísmica, sin embargo, no es capaz de transmitir tensiones al pilote (Aguilar y Rojas, 1990).
- d) *Celda de fricción constante con anclas metálicas*. La característica principal de este sistema, creado por Tamez (1988), es que es capaz de transmitir tensiones y compresiones al pilote (Figura 2.20d).
- e) *Pilote funda*. Estos pilotes fueron creados por Santoyo (Santoyo y Segovia, 1995). Se trata de pilotes con funda de acero, segmentados en tramos de 3 m, unidos por medio de camisas de neopreno cuya finalidad es absorber las deformaciones generadas por la consolidación regional (Figura 2.21a). Este tipo de pilotes se emplearon en la recimentación de los patios Marianos del Palacio Nacional.
- f) *Arena confinada en una cápsula*. Es un sistema de control similar al pilote telescópico (Figura 2.21b). La diferencia radica en que la arena confinada se encuentra en la cabeza del pilote, y además puede extraerse a través de un tubo ubicado en la parte superior, para liberar la presión generada por la penetración del pilote en la losa. Este sistema fue creado por Creixel y Correa (1975). Al ser un sistema que en condición sísmica puede resultar inestable, no ha sido muy empleado.
- g) *Casquillo metálico*. Creado por Aguilar (1960), es un elemento de control ubicado en la parte superior del pilote, constituido por un casquillo metálico y opresor que permite regular la fricción con un tope que trabaja en condición sísmica (Figura 2.21c). Este elemento puede transmitir tensión o compresión al pilote (Aguilar y Rojas, 1990).
- h) *Marco de carga con gatos hidráulicos planos*. Consta de un marco de carga tipo STAG anclado rígidamente a la losa mediante cuatro espárragos (Figura 2.21d). Entre el cabezal y el pilote cuenta con gatos hidráulicos planos que permiten regular la carga del pilote. En condiciones sísmicas resulta inestable, tanto que puede generar falla en el cabezal. Este sistema fue creado por Streu (1963) y se ha implementado en algunos edificios de la Ciudad de México.

- i) *Tornillo sinfín con celda hidráulica*. Es un sistema anclado rígidamente a la losa mediante perfiles metálicos y tiene en la parte superior un tornillo sinfín (Figura 2.22a). Entre el tornillo y el pilote se ubica un gato hidráulico que en condiciones sísmicas lo hace inestable.
- j) *Tensores metálicos*. Creado por González (1957), es un sistema constituido por un ancla tipo *I* ligada mediante varillas a un cabezal de la misma sección (Figura 2.22b). Entre los dos cabezales se ubica un cubo de concreto. Este material se caracteriza por tener una gran resistencia pero ausencia de deformabilidad, por lo que en condición sísmica puede presentar falla frágil. No se tiene conocimiento de que se haya empleado en la cimentación de algún edificio de la Ciudad de México.
- k) *Perfiles metálicos con láminas de acero*. Es un dispositivo creado por Zeevaert (1983). Está constituido por dos perfiles metálicos colocados entre la cabeza de los pilotes perimetrales de una cimentación y la losa de concreto armado (Figura 2.22c). Este sistema restringe el movimiento vertical mediante el incremento de carga en los pilotes con la colocación de láminas de acero entre los perfiles de las zonas con mayor asentamiento, generando un momento de contrapeso que induce movimientos verticales correctivos. Se tiene conocimiento que un edificio ubicado en la zona lacustre de la Ciudad de México cuenta con este dispositivo de control.
- l) *Sistema Jack-up*. Empleado actualmente en el aeropuerto de Kansai con la finalidad de renivelar los edificios que conforman la terminal de pasajeros. Esto se logra mediante el funcionamiento de 900 sistemas *Jack-up* que levantan con ayuda de gatos hidráulicos las columnas de las zonas con mayor hundimiento diferencial para colocar placas de acero entre las columnas y la placa base (Figura 2.22d).

**Tabla 2.2 Principales mecanismos de control (modificado de Auvinet y Rodríguez, 1998).**

Mecanismo	Referencia
Marco con cubos de madera	González-Flores (1948); Salazar-Resines (1978)
Marco de carga con gatos de émbolo y válvula de alivio automática	A. Pilatowsky, citado por J.J. Correa (1980)
Disipador de energía (en forma de <i>J</i> )	M. Aguirre (1981); D. Reséndiz (1976)
Pilote telescópico	Correa (1980)
Sistema mecánico de autocontrol	M.A. Jiménez (1980)
Celda de fricción constante con anclas metálicas	E. Tamez (1988), citado por Aguilar (1990)
Pilote funda	E. Santoyo (1992), citado por Santoyo y Segovia (1995)
Arena confinada en una cápsula	J. Creixell y J.J. Correa C. (1975), citado por Aguilar (1990)
Casquillo metálico opresor con tope	Aguilar (1960), citado por Aguilar (1990)
Marco de carga con gatos hidráulicos planos	W. Streu (1963), citado por J.J. Correa (1980) y Aguilar (1990)
Tornillo sinfín con celda hidráulica	Citado por Aguilar y Rojas (1990)
Tensores metálicos	P. González (1957), citado por Aguilar (1990)
Cuña móvil	P. Girault (1986), citado por Aguilar (1990)
Gatos hidráulicos comunicantes	F. Zamora Millán, citado por A. Rico A. (1991)
Celda con dientes que permiten transmisión de tensiones	A. Rico A. (1991)
Perfiles metálicos con láminas de acero	L. Zeevaert (1983)
<i>Jack-up</i>	<a href="http://www.kansai-airports.co.jp/en/efforts/our-tech/kix/sink/hudou.html">http://www.kansai-airports.co.jp/en/efforts/our-tech/kix/sink/hudou.html</a>

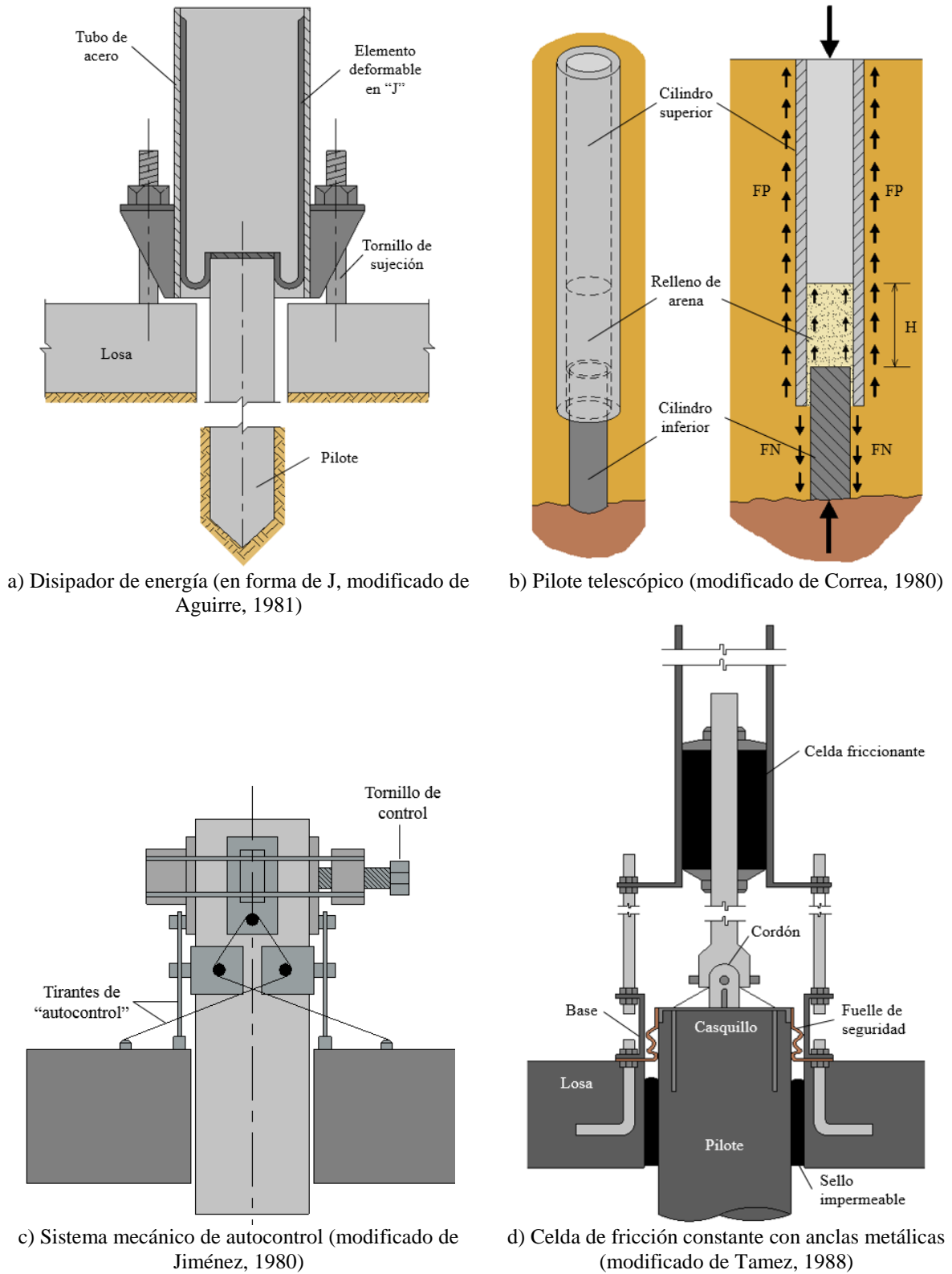
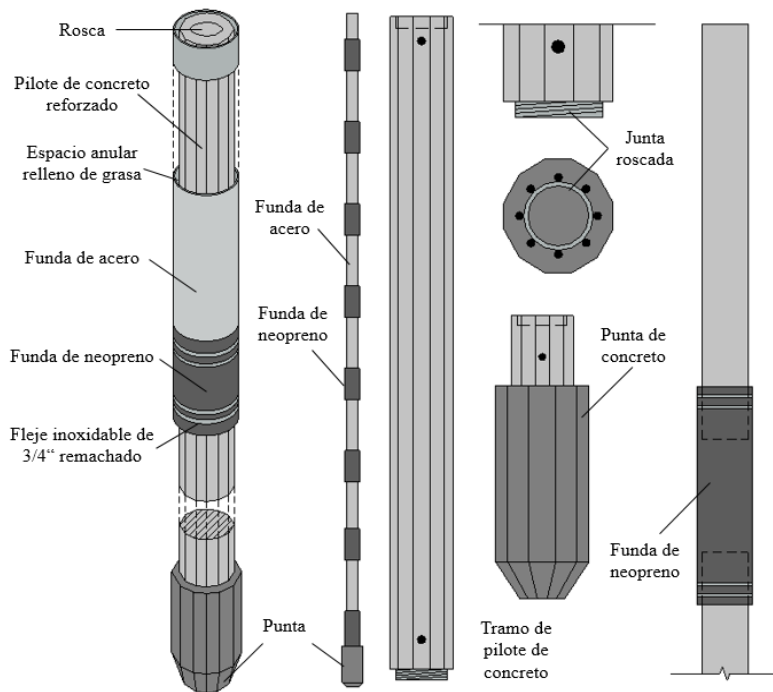
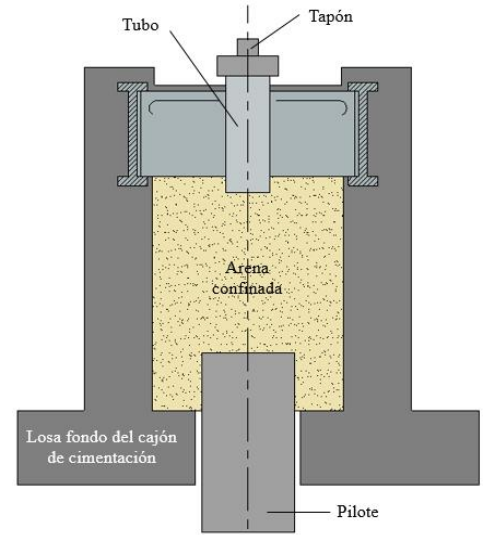


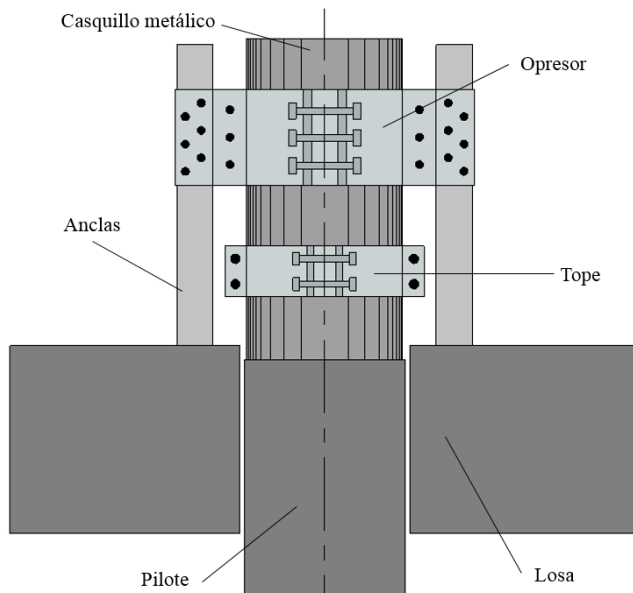
Figura 2.20 Otros mecanismos de control (Parte 1 de 3).



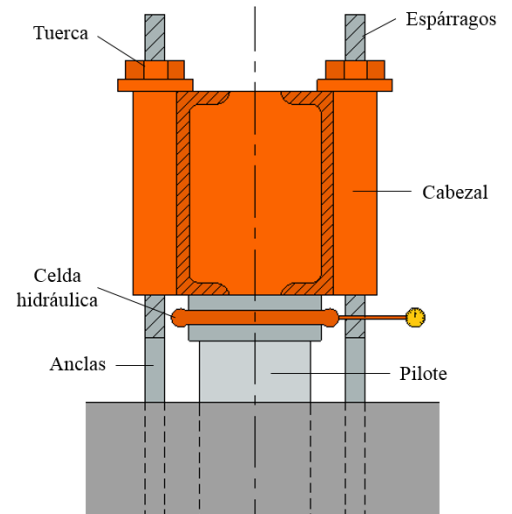
a) Pilote funda (modificado de Santoyo y Segovia, 1995)



b) Arena confinada en una cápsula (modificado de Creixell y Correa, 1975)

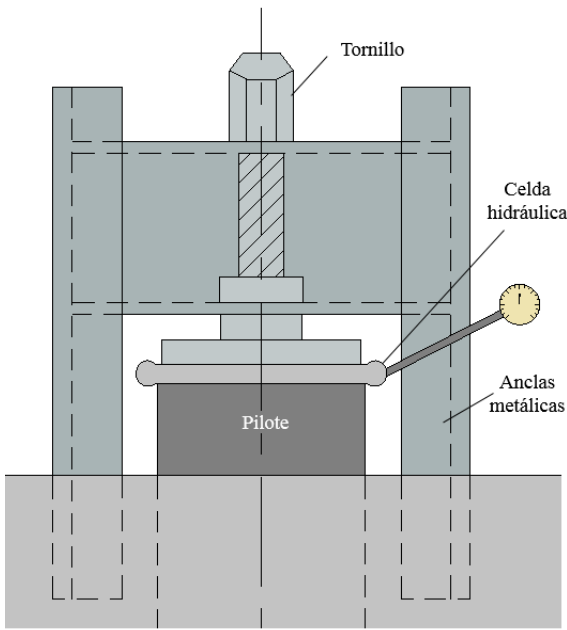


c) Casquillo metálico (modificado de Aguilar, 1960)

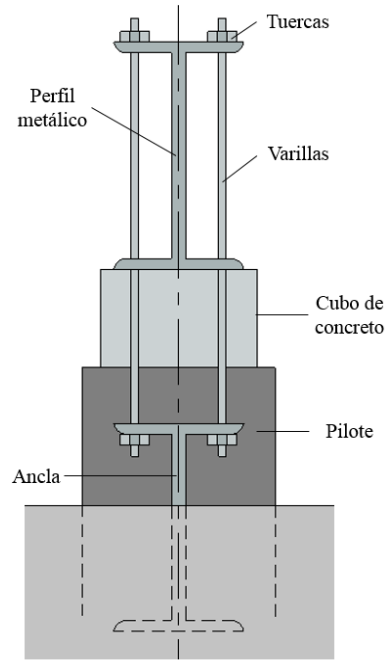


d) Marco de carga con gatos hidráulicos planos (modificado de Streu, 1963)

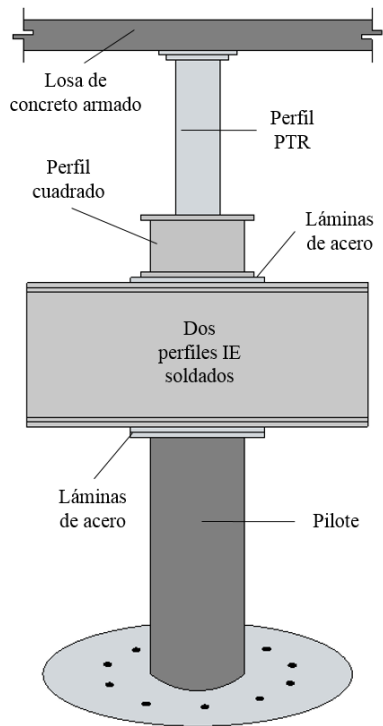
**Figura 2.21 Otros mecanismos de control (Parte 2 de 3).**



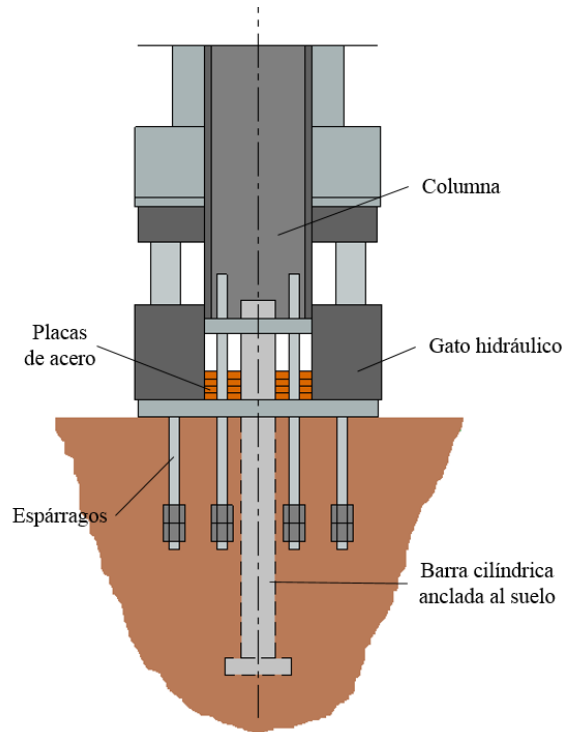
a) Tornillo sinfín con celda hidráulica (modificado de Aguilar y Rojas, 1990)



b) Tensores metálicos (modificado de González, 1957)



c) Perfiles metálicos con láminas de acero (Zeevaert, 1983)



d) Sistema Jack-up (modificado de <http://www.kansai-airports.co.jp/en/efforts/our-tech/kix/sink/hudou.html>)

**Figura 2.22 Otros mecanismos de control (Parte 3 de 3).**

## 2.3 Criterios de diseño de cimentaciones con pilotes de control

### 2.3.1 González-Flores

Para el diseño de cimentaciones con pilotes de control, González-Flores (PICOSA, 2015) dedujo una expresión para garantizar la seguridad del inmueble:

$$[N_{pil}] [Q_{cd(min)}] = [W_E] - N_{pil} [0.75] F_{fr} - [Q_{L(regl)}] \quad (2.1)$$

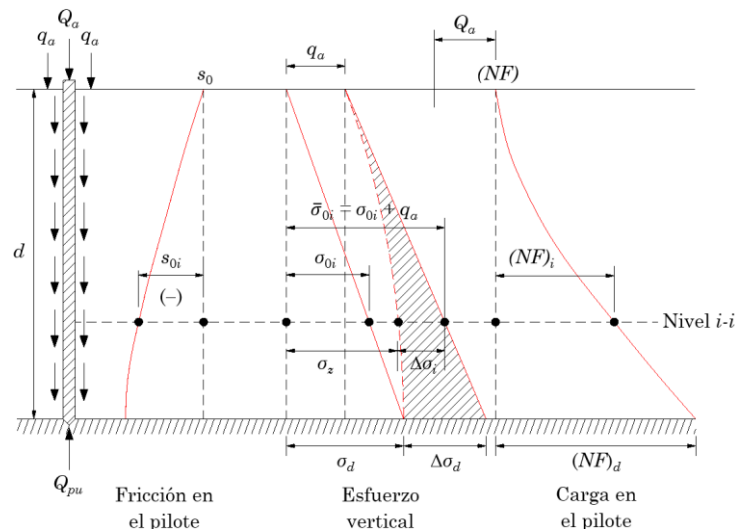
donde:

$N_{pil}$	número de pilotes
$Q_{cd(min)}$	carga de fluencia mínima en las celdas de deformación
$W_E$	peso estático de la estructura incluyendo la cimentación (sin factorizar)
$F_{fr}$	fricción negativa
$Q_{L(regl)}$	carga transmitida al terreno a través de la losa de cimentación según especificación del reglamento de acuerdo con la zonificación (Zona II o III)

En este caso, el autor considera que la fricción negativa  $F_{fr}$  no se desarrolla en su totalidad, sino únicamente el 75%, la cual contrarresta las cargas actuantes. Asimismo en el diseño se busca el aprovechamiento de todas las contribuciones que pueden participar en este tipo de cimentación: a) compensación, b) apoyo por losa, c) fricción, y d) apoyo directo a través del pilote (PICOSA, 2010).

### 2.3.2 Zeevaert (1983)

En 1983, Zeevaert analizó el comportamiento de un pilote de punta bajo la fricción negativa desarrollada debido a una carga aplicada en la superficie del terreno en cierta área tributaria (Figura 2.23), sin considerar la carga en la cabeza del pilote aplicada mediante el dispositivo de control tradicional de González-Flores. Con base en los diagramas obtenidos, Zeevaert propuso algunas ecuaciones que permiten obtener un factor de seguridad de cimentaciones con pilotes de control.



**Figura 2.23 Fricción negativa en cimentaciones (Zeevaert, 1983).**



Zeevaert dedujo que la carga total actuante en el pilote  $Q_{pa}$  es igual a la carga aplicada mediante el dispositivo de control  $Q_c$  más la fricción negativa  $(FN)_d$  generada en los pilotes por la carga superficial, incluyendo el efecto de la subsidencia:

$$Q_{pa} = Q_c + (FN)_d \quad (2.2)$$

El factor de seguridad de la cimentación  $G_s$  está controlado por la capacidad de carga de punta  $Q_{pu}$ , y se expresa de la siguiente forma:

$$G_s = Q_{pu} / Q_{pa} \quad (2.3)$$

### 2.3.3 Tamez (1986)

En 1986, Tamez proporcionó algunos criterios para la evaluación del trabajo de los pilotes de control. En un análisis estático consideró que para que un pilote de control funcione adecuadamente bajo carga estática, se requieren satisfacer dos condiciones:

- 1) La losa de cimentación debe descender a la misma velocidad que la superficie del terreno vecino. Esto implica que la carga transmitida por la losa al suelo  $W_s$  más la fricción negativa  $F_n$  producida por el hundimiento regional de la ciudad, debe ser igual a la capacidad de carga friccionante del pilote  $Q_f$ :

$$Q_f = W_s + F_n \quad (2.4)$$

- 2) La capacidad de carga límite del sistema de control,  $Q_c + Q_f$  (donde  $Q_c$  es la capacidad de carga límite de la celda deformable) multiplicada por un factor de seguridad  $FS_p$ , debe ser menor o igual que la capacidad de punta  $Q_p$  del pilote para impedir que la punta penetre en la capa dura:

$$Q_p \geq (Q_c + Q_f) FS_p \quad (2.5)$$

Para un análisis sísmico, Tamez consideró que la carga sísmica total admisible para el diseño  $W_{dta}$  debe ser igual a la capacidad de carga límite de la celda deformable  $Q_c$  más la capacidad friccionante del pilote  $Q_f$  entre el factor de seguridad sísmico  $FS_d$ :

$$W_{dta} = Q_c + (Q_f / FS_d) \quad (2.6)$$

### 2.3.4 Auvinet y López-Acosta (2008)

En revisiones que se han realizado en edificios construidos con cimentaciones a base de pilotes de control (Auvinet y 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 condiciones sísmicas se ha evaluado comparando las fuerzas resistentes y actuantes a nivel de desplante de la cimentación (Auvinet y López-Acosta, 2008):

$$Fr > Fa \quad (2.7)$$

siendo:

$$Fr = C_{\text{pilotes}} + E_w + FN \quad (2.8)$$

$$Fa = [W_{\text{mue}} + W_{\text{vinst}} + W_{\text{pilotes}}] * F_c \quad (2.9)$$

donde:

Fr	Fuerza resistente
Fa	Fuerza actuante
Cpilotes	Capacidad de carga de los pilotes de control, regida por la carga de fluencia de las celdas de deformación
Ew	Empuje del agua
FN	Fricción negativa desarrollada al 100 %
Wmue	Carga muerta incluyendo la cimentación
Wvinst	Carga viva instantánea (para un análisis en condiciones sísmicas)
Wpilotes	Peso de los pilotes
Fc	Factor de carga (para un análisis en condiciones sísmicas), de acuerdo con NTCDCC (2004) o las normas vigentes

En condiciones sísmicas (Figura 2.24), además de la carga vertical actuante  $F_a$ , 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*  $e = (M / F_a)$ . 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, 2004). 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 2.24b para revisar la seguridad de un edificio con pilotes de control. En dicha figura 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*  $e_{\text{crít}}$ , 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.

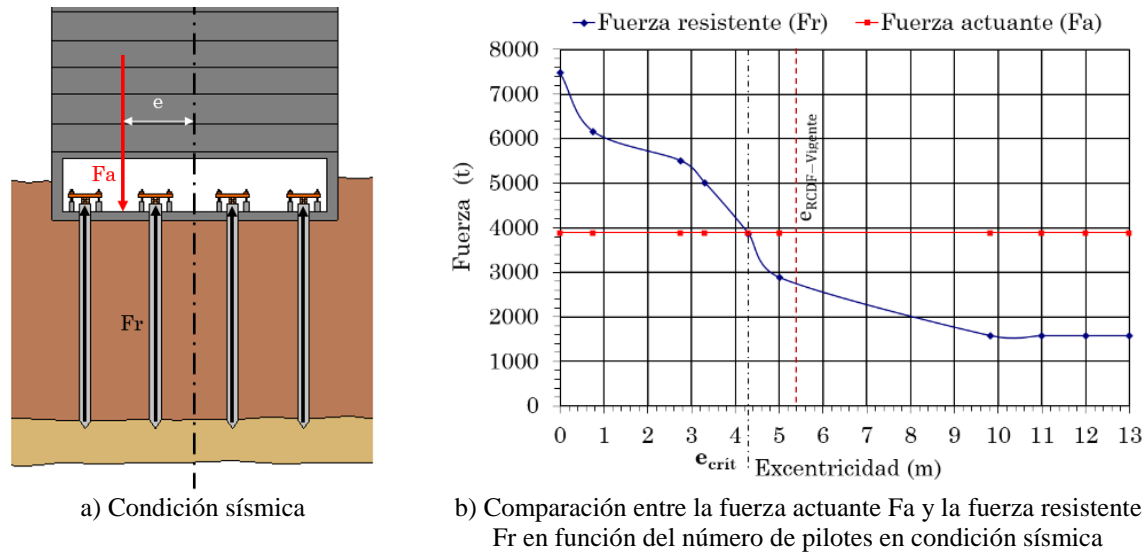


Figura 2.24 Consideraciones para un análisis sísmico (Auvinet y López-Acosta, 2008).

## 2.4 Mantenimiento de los sistemas de control

Para que el sistema de control funcione de manera eficiente, es necesario darle un mantenimiento periódico y apropiado. La periodicidad depende de varios factores, principalmente: la velocidad de hundimiento regional del sitio, y con ello la velocidad de deformación de los cubos de madera, los hundimientos diferenciales del edificio, así como la estanqueidad del cajón de cimentación. El mantenimiento del sistema de pilotes de control debe incluir las siguientes actividades:

- *Mantenimiento rutinario:* a) engrasar los husillos o espárragos, b) corregir problemas de corrosión de las partes de acero del sistema, c) bombear el agua infiltrada del nivel freático en las celdas de cimentación (para evitar el humedecimiento o saturación de los cubos de madera), d) reemplazar estoperos cuando se requiera, y e) cambiar estabilizadores de concreto cuando estén deteriorados.
- *Reemplazo de cubos de madera:* a) cambiar el arreglo de cubos de madera cuando éstos exhiban una disminución en su altura inicial de hasta aproximadamente 5 cm (para restaurar la capacidad de deformación de la celda y permitir la correcta transmisión de carga al pilote), b) colocar láminas de acero galvanizado que separen las camas de cubos (las láminas que se hayan deformado visiblemente deben reemplazarse), y c) precargar el pilote hasta la capacidad de carga nominal del arreglo (con esta precarga, el pilote contribuirá de inmediato al soporte del edificio sin que se presente una deformación no deseada).
- *Revisión o intervención especial:* con cierta periodicidad se debe revisar y, en su caso, reasignar las cargas de los pilotes, es decir, modificar el número de cubos de los arreglos en función de los requerimientos observados; disminuir cubos para corregir hundimientos diferenciales o permitir el descenso de la estructura conforme el

hundimiento regional, o bien, agregar cubos para restringir el movimiento vertical de la estructura (incremento de carga, con base en una revisión estructural apropiada del marco del sistema y de la losa de fondo del cajón de cimentación).

Por otra parte, es necesario dar un seguimiento topográfico periódico y después de eventos importantes (sismos) al comportamiento del edificio y de la cimentación donde se localicen los pilotes de control.

El mantenimiento debe estar a cargo de personal especializado y con experiencia en este tipo de dispositivos, y debe apoyarse en un diseño específico geotécnico y estructural. Si el mantenimiento no se realiza adecuadamente, el sistema puede tener un funcionamiento deficiente. Desafortunadamente, el mal uso de los sistemas de control generalmente se debe a una incomprensión y desconocimiento del propio sistema, lo cual deriva en un mal mantenimiento. A continuación se presentan casos en los que no se ha dado un mantenimiento apropiado a estos dispositivos y se demeritan las bondades para las que fueron concebidos los sistemas de control.

#### 2.4.1 Arreglo de cubos sin láminas de acero galvanizado

Algunos pilotes de control tienen arreglos como el que se muestra en la Figura 2.25a. En rigor, el arreglo debe tener láminas galvanizadas entre los niveles de los cubos. Al no contar con ellas, el conjunto puede presentar una disminución en la carga de diseño y deformaciones más irregulares en los cubos que pueden provocar fallas más aparatosas, como se aprecia en las pruebas experimentales realizadas (véase Inciso 4.2.1).



a) *En sitio*



b) *En laboratorio*

**Figura 2.25 Celda de deformación sin láminas galvanizadas.**

#### 2.4.2 Arreglo con cubos espaciados

Cuando existe una separación entre los cubos de madera (Figura 2.26a), el comportamiento mecánico que se presenta no es el de un arreglo, sino de cubos apilados (Figura 2.26b). Esto implica que sin importar dónde se localicen los cubos con menor masa, éstos serán los primeros en deformarse, como se muestra en el apartado de resultados de las pruebas realizadas (véase Inciso 4.2.1). Lo anterior, puede provocar una falla en los cubos y por tanto, una disminución considerable en la carga de fluencia.

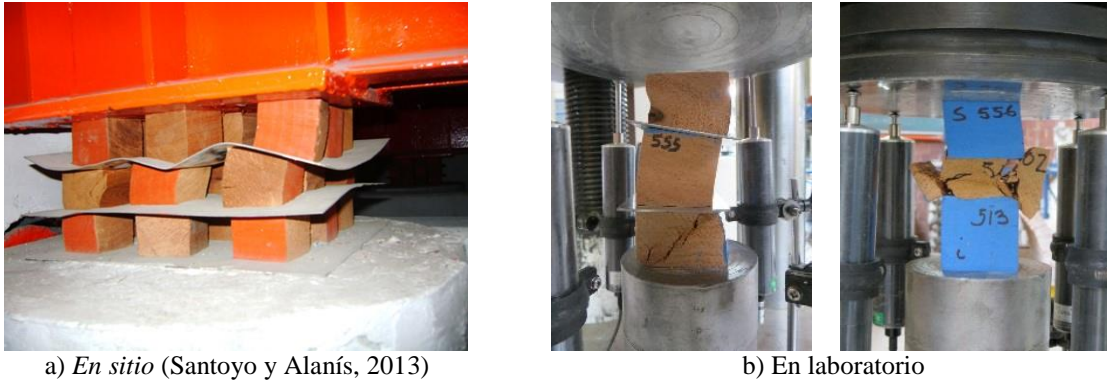


Figura 2.26 Arreglo de cubos con separación entre ellos.

### 2.4.3 Cubos húmedos con láminas deformadas

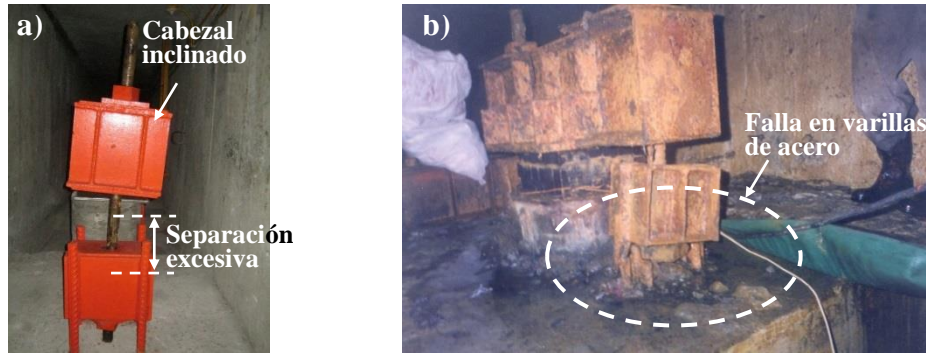
En la Figura 2.27 se distinguen dos aspectos importantes: a) la presencia de humedad en los cubos de madera, que puede generar una reducción de hasta 60% respecto a la carga de diseño del arreglo (López-Acosta y Martínez, 2017a), y b) las láminas separadoras ya deformadas (las cuales deben sustituirse por nuevas o también pueden martillarse para corregir sus deformaciones), que a su vez pueden generar una deformación en los cubos con mayor rapidez a la usual.



Figura 2.27 Celda de deformación con cubos húmedos y láminas deformadas.

### 2.4.4 Excentricidad en el sistema

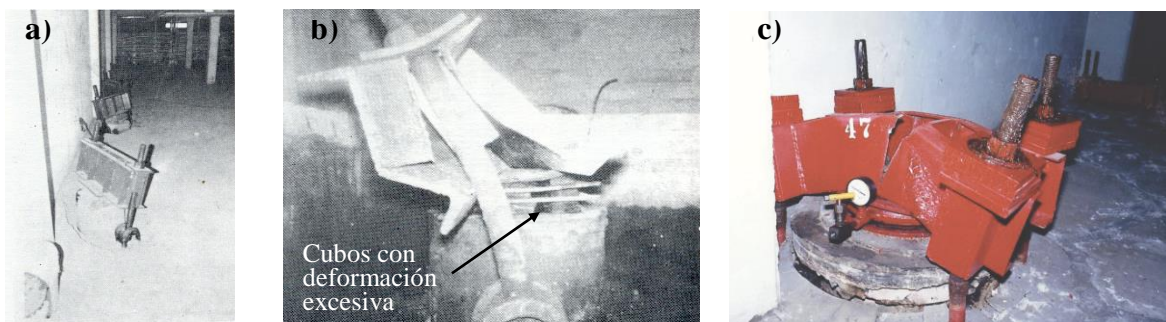
Debido a la excentricidad que puede generarse entre el pilote y el marco de carga, algunos dispositivos de control pueden presentar los problemas siguientes: a) inclinación del cabezal por separación excesiva del cabezal respecto al estabilizador (Figura 2.28a), y b) falla en las varillas de acero cuando los estabilizadores son metálicos por excentricidad y falta de mantenimiento (Figura 2.28b). Por lo anterior, el mantenimiento apropiado y periódico para corregir estos problemas resulta fundamental para el funcionamiento adecuado del sistema. El sistema de control tradicional (González-Flores, 1948), con estabilizadores de concreto, tiene una rótula que permite una ligera inclinación del sistema para evitar que los espárragos y las anclas alcancen la falla (Figuras 2.11 y 2.12).



**Figura 2.28 Problemas de excentricidad: a) cabezal inclinado (cortesía de TGC, 2016), y b) falla de varillas de acero (ancladas en la losa) en un sistema sin mantenimiento (cortesía de PICOSA, 2017).**

### 2.4.5 Condición sísmica

Ante la acción de cargas estáticas y sismos de magnitud y duración menores que los ocurridos en 1985, el sistema de control tradicional ha exhibido un funcionamiento adecuado (Tamez, 1988). Sin embargo, en los sismos de 1985 algunos sistemas de control presentaron fallas en los cabezales y en los espárragos ocasionadas por: a) momento de volteo debido a la excentricidad entre el pilote y el marco de carga (Figura 2.29a), y b) la sobrecarga generada por los cubos que se deformaron más de 75% en conjunto (Figura 2.29b). 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 2.29c). 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 condiciones sísmicas.



**Figura 2.29 Efectos del sismo de 1985: a) inclinación del marco de carga (Aguilar y Rojas, 1986), b) falla del cabezal de acero (Aguilar y Rojas, 1990), y c) falla de marco tipo STAG con celda de presión (Santoyo y Alanís, 2013).**

Con la finalidad de incrementar la seguridad y evitar fallas ante sismos, se implementaron dos mejorías en el sistema de control tradicional (Figura 2.30a): a) colocación de un estabilizador de concreto en cada extremo del sistema (Figura 2.30b), y b) colocación de un mayor número de atiesadores en el cabezal (Figura 2.30b). Los estabilizadores ayudan a restringir el momento de volteo y con ello la inclinación del cabezal, mientras que los atiesadores contribuyen a incrementar la resistencia a la compresión del cabezal en caso de que los cubos generen una sobrecarga en un evento sísmico.

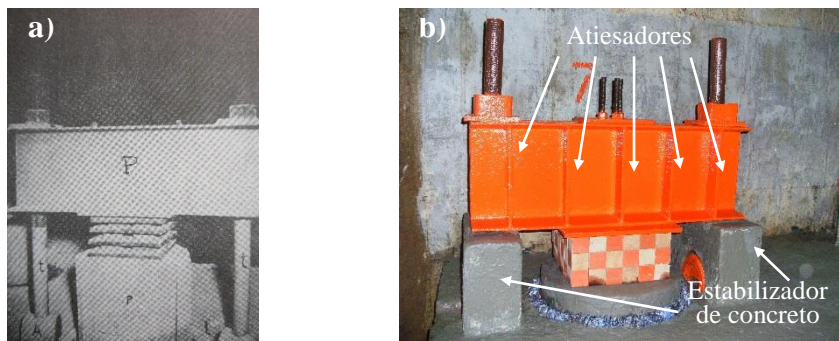


Figura 2.30 Sistema de control: a) original (González-Flores, 1959), y b) con mejoras en el sistema (PICOSA, 2017).

## 2.5 Casos prácticos del uso de pilotes de control

### 2.5.1 Caso 1: Recimentación y renivelación del Templo de las Capuchinas

Uno de los casos más destacados del uso de pilotes de control en la Ciudad de México es el Templo de las Capuchinas (ubicado en el costado oriente de la antigua Basílica de Guadalupe), construido en el siglo XVIII con una cimentación original de mampostería. En esta construcción, además de corregir los asentamientos diferenciales, se logró regresar la estructura a su nivel original concordante con el del atrio del conjunto de la Basílica de Guadalupe (González-Flores, 1981; Figura 2.31). La solución para corregir el problema consistió en recimentar 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. Al estar la construcción apoyada totalmente en los pilotes, se colocaron la misma cantidad de gatos hidráulicos de 150 t de capacidad, con la finalidad de levantar la construcción hasta el nivel original (renivelación). El levantamiento del templo duró 75 días, iniciando el 31 de mayo de 1978 y terminando el 14 de agosto de ese mismo año. La renivelación fue proporcional a los desniveles medidos, de tal forma que la parte que más se elevó fue la esquina suroriente con 3.472 m, la esquina surponiente 0.505 m y la esquina nororiente 2.967 m. Después de la renivelación, se construyó debajo del templo un nuevo cajón de cimentación (PICOSA, 2010).

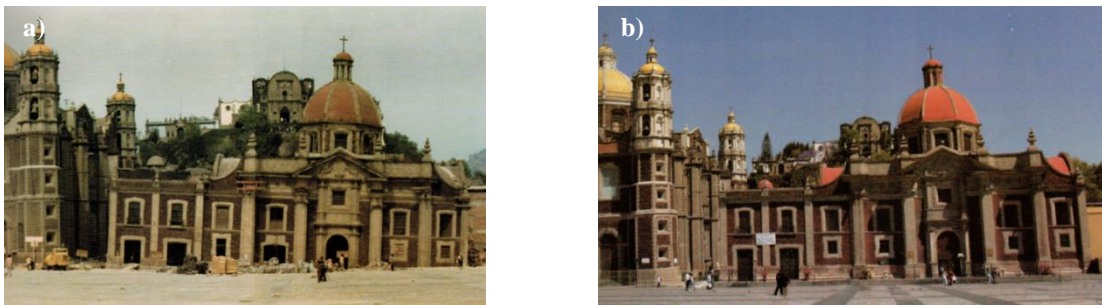


Figura 2.31 Recimentación y renivelación del Templo de las Capuchinas: a) antes de los trabajos, b) después de los trabajos (PICOSA, 2010).

### 2.5.2 Caso 2: Recimentación parcial de la torre de un conjunto de edificios con hincado de nuevos pilotes de punta

La mayoría de las recimentaciones a base de pilotes de control consiste en el hincado de nuevos pilotes de punta apoyados en un estrato resistente, que generalmente es la denominada Capa Dura de la Zona Lacustre típica de la Ciudad de México (NTCDCC, 2004). Un ejemplo de lo anterior es la segunda recimentación parcial que se efectuó en 1983 (antes del sismo de 1985) en la torre de un conjunto de edificios ubicado en la Zona Lacustre de la Ciudad de México (que antiguamente constituyó las oficinas de la Secretaría de Relaciones Exteriores) ubicado en la Plaza de las Tres Culturas en Tlatelolco. En esta recimentación parcial se hincaron 52 pilotes de punta con sistema de control en la cabeza (Figura 2.32) de 100 y 150 t, cuyos arreglos de cubos de madera y marcos de carga se muestran en la Figura 2.33. La zona de colocación de esos 52 nuevos pilotes de punta se ubicó en el lado sur de la torre en la que se presentaban los máximos desplomos y hundimientos del edificio en esa época.

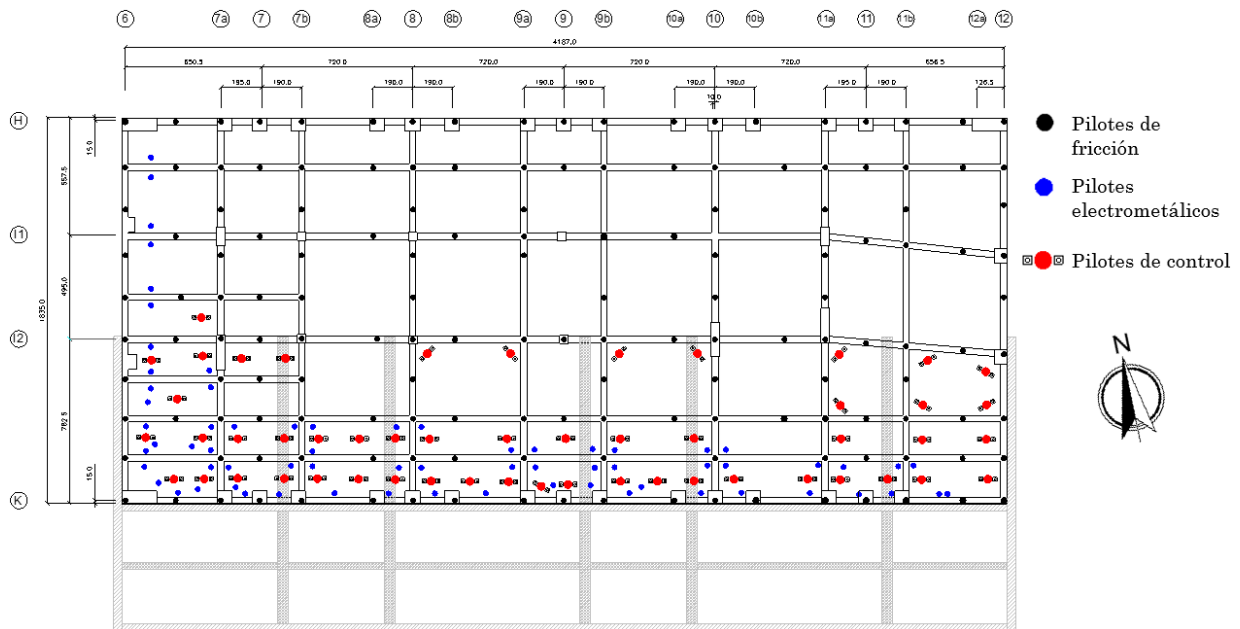


Figura 2.32 Recimentación con 52 pilotes de control de 100 y 150 t, de la torre de un conjunto de edificios

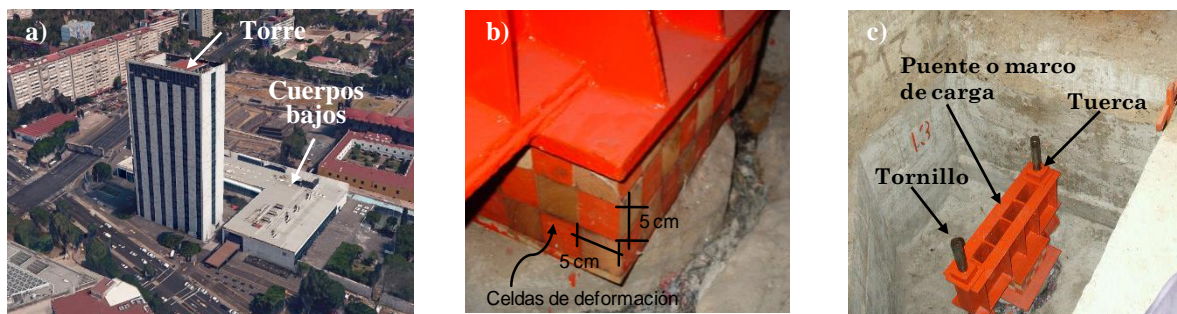


Figura 2.33 Edificio en la Ciudad de México: a) edificio (Google Earth, 2016), b) arreglo de cubos, c) marco de carga.



### 2.5.3 Caso 3: Transformación de pilotes existentes en un edificio (de punta o de fricción) a pilotes de control

El sistema de control (marco de carga y arreglo de cubos) no sólo se puede colocar en la cabeza de los nuevos pilotes hincados, sino también en pilotes existentes en un edificio (ya sean de punta o de fricción). El criterio para decidir la transformación o no de los pilotes existentes depende de sus características físicas, mecánicas y geométricas, pero también de las propiedades y condiciones en que se encuentra el edificio (p. ej. la capacidad estructural de la losa donde se pretenden instalar los pilotes y el espacio disponible) y del subsuelo del sitio, por lo que debe evaluarse cuidadosamente la viabilidad de cada caso.

- a) Un hotel en la Ciudad de México es un ejemplo en el que se realizó la transformación de pilotes de punta existentes a pilotes de control (PICOSA, 2014). Para poder efectuar lo anterior, fue necesario construir un sótano debajo de la cimentación del edificio que permitió: i) desligar estructuralmente algunos de los pilotes existentes (Figura 2.34b), y ii) recortar los pilotes para instalar el sistema de control (Figuras 2.34c y 2.35).

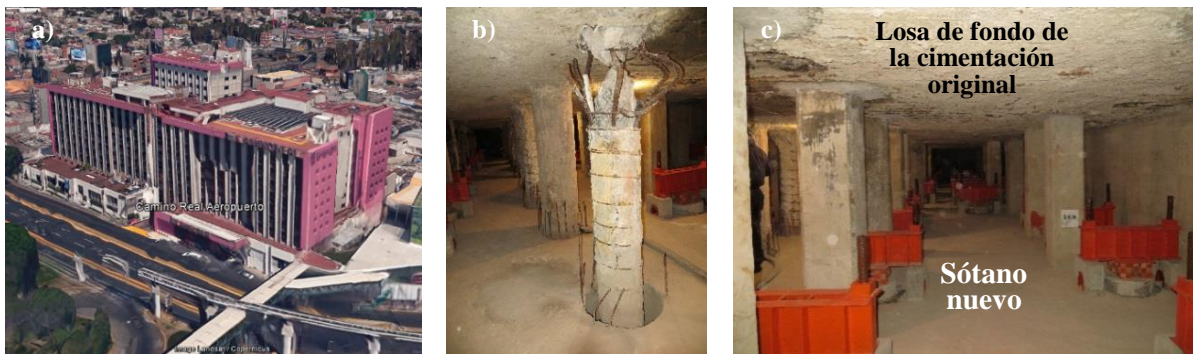


Figura 2.34 Hotel en la Ciudad de México: a) edificio (Google Earth, 2016), b) desligue estructural de pilotes de punta existentes, c) pilotes de punta existentes con sistema de control nuevo.



Figura 2.35 Pilotes de punta existentes en un hotel de la Ciudad de México, recortados y habilitados con sistema de control en la cabeza.

- b) Un hospital ubicado en la zona lacustre de la Ciudad de México (con dos torres de 8 y 10 niveles, respectivamente) es un caso reciente (PICOSA, 2015) en el que el sistema de control se instaló en pilotes de fricción existentes (Figura 2.36).



Figura 2.36 Hospital ubicado en la zona lacustre: a) edificio (Google Earth, 2016), b) y c) pilotes de fricción con sistema de control nuevo en la cabeza.

#### 2.5.4 Caso 4: Recimentación combinando el hincado de pilotes de punta nuevos y la transformación de pilotes existentes

La recimentación de un edificio también puede llevarse a cabo combinando: i) el hincado de nuevos pilotes de punta, y ii) la transformación de pilotes existentes a pilotes de control. En unos tanques de almacenamiento de turbosina, localizados a un costado del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, se realizó la recimentación combinando el hincado de nuevos pilotes de punta (Figura 2.37b) y la transformación de algunos pilotes existentes a pilotes de control (Figura 2.37a) (PICOSA, 2010, 2014).



a) Transformado (pilote cuadrado)



b) Pilotenuevo (circular)

Figura 2.37 Pilotes de control en tanques de almacenamiento de turbosina.

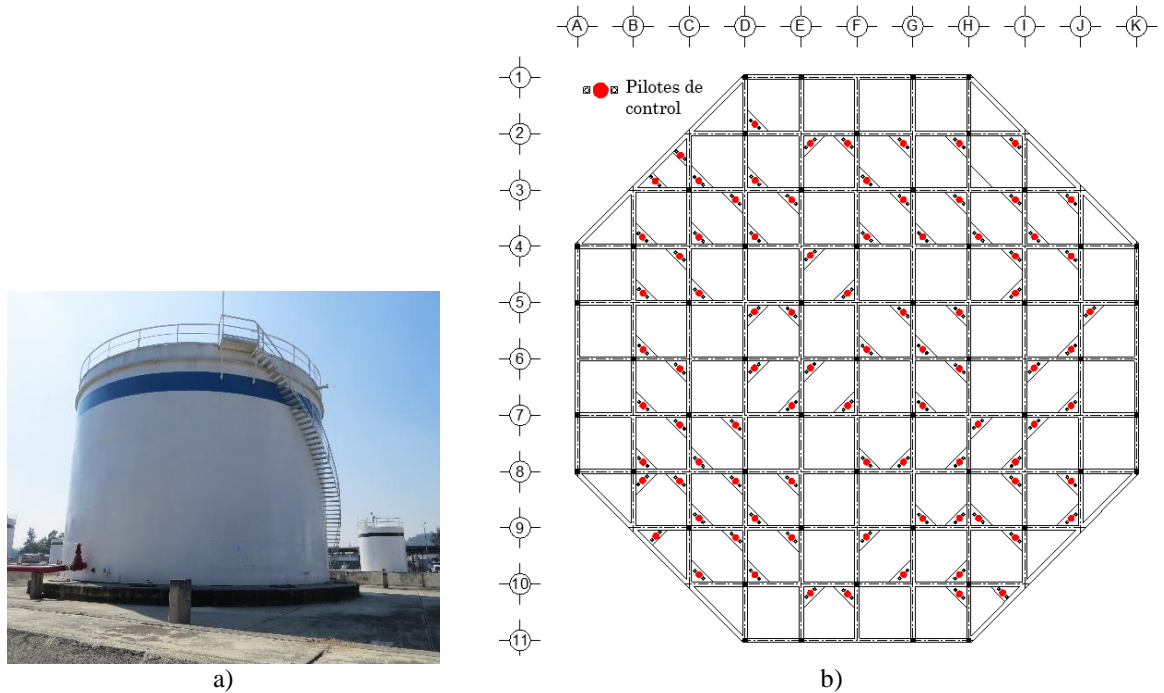


Figura 2.38 Tanques de almacenamiento de turbosina: a) estructura, b) ubicación de pilotes de control nuevos.

### 2.5.5 Caso 5: Conjunto de edificios en Tlatelolco

El inmueble en estudio se proyectó como parte del conjunto Nonoalco-Tlatelolco 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 de Vinculación y Gestión Universitaria Tlatelolco*. El predio colinda al sur con la Av. 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 (Plaza de las Tres Culturas). Los elementos básicos del conjunto son la Torre (Edificio I) y los denominados Cuerpos bajos (Edificios II, III y IV), como se ilustra en la Figura 2.39. Desde el momento de la construcción (1963) los edificios manifestaron diversos problemas: la torre presentaba hundimientos diferenciales y desplomos en la dirección surponiente, y los cuerpos bajos acusaban emersiones. Para tratar de corregir estos problemas desde entonces se han llevado a cabo diversas medidas correctivas (Figura 2.40) consistentes principalmente en varias recimentaciones: a) la primera (1964 y 1965) con 73 pilotes electrometálicos, b) la segunda (1983) con 52 pilotes de control en el lado sur de la torre (Caso 2 expuesto en el inciso 2.5.2), y c) la tercera (1987) con la ampliación del cajón de cimentación de la torre. Adicionalmente, en 1991 se instaló un sistema de 21 pozos de bombeo y 13 de infiltración con la finalidad de generar por una parte asentamientos en el lado norte de la torre mediante la extracción de agua subterránea, y por otra, impedir el hundimiento en el lado sur con la inyección de agua. Este sistema de pozos al inicio de su funcionamiento ayudó a reducir los desplomos, pero en algún momento comenzaron a presentarse agrietamientos principalmente en la parte cercana a la zona

arqueológica, hasta que en agosto de 2005 se suspendió el mantenimiento del sistema de pozos debido al traspaso de las instalaciones que la SRE estaba por efectuar a la UNAM. Además de lo anterior, hubo otros intentos por mitigar la problemática de la torre a través de diversas propuestas de recimentación de varias empresas, pero que no se llevaron a cabo.

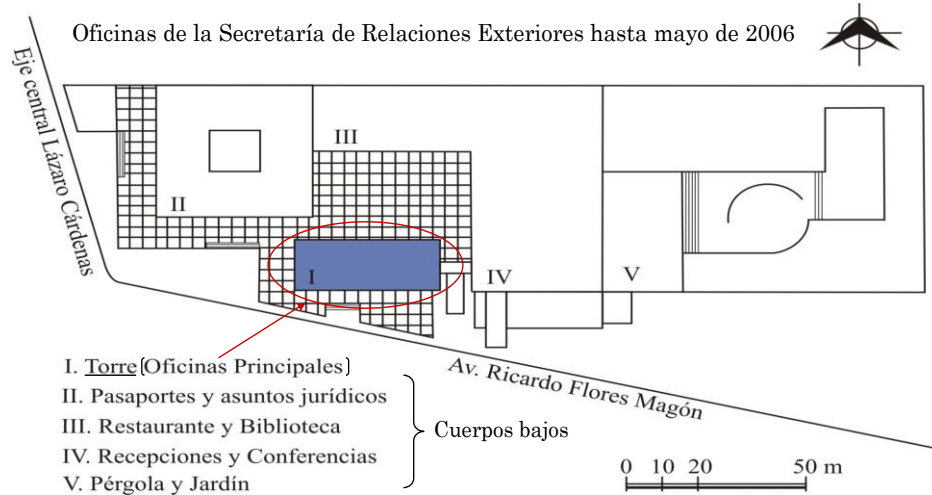


Figura 2.39 Características generales del conjunto de edificios.

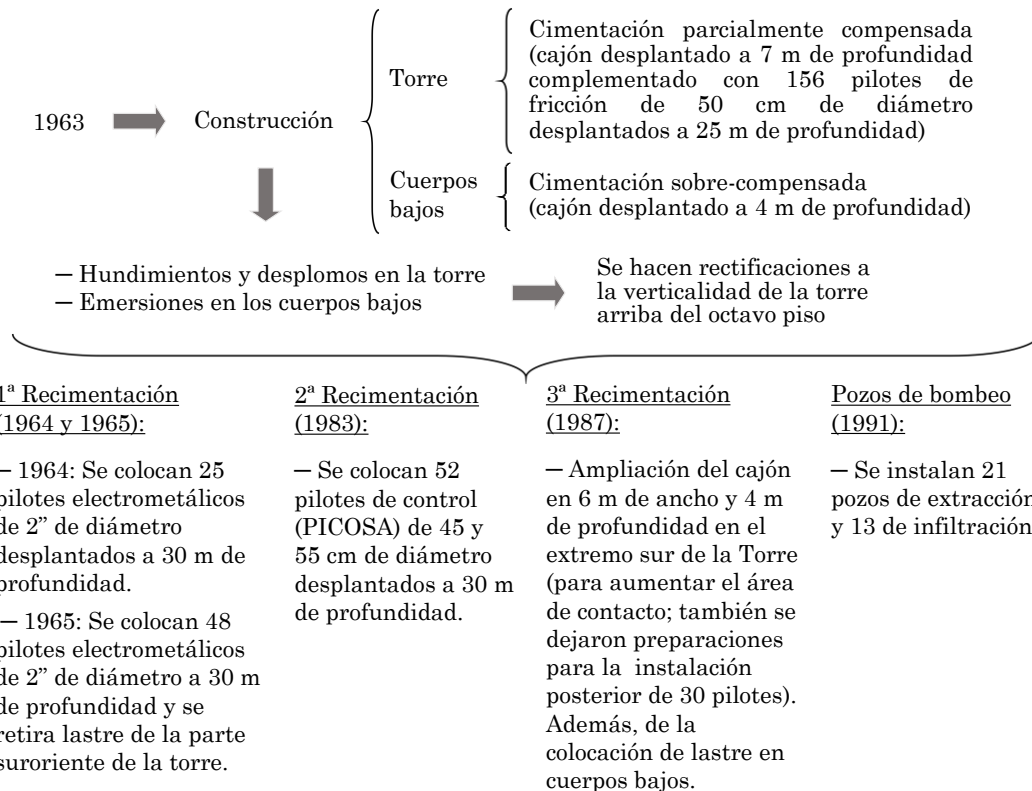


Figura 2.40 Historia de eventos en el conjunto Tlatelolco.

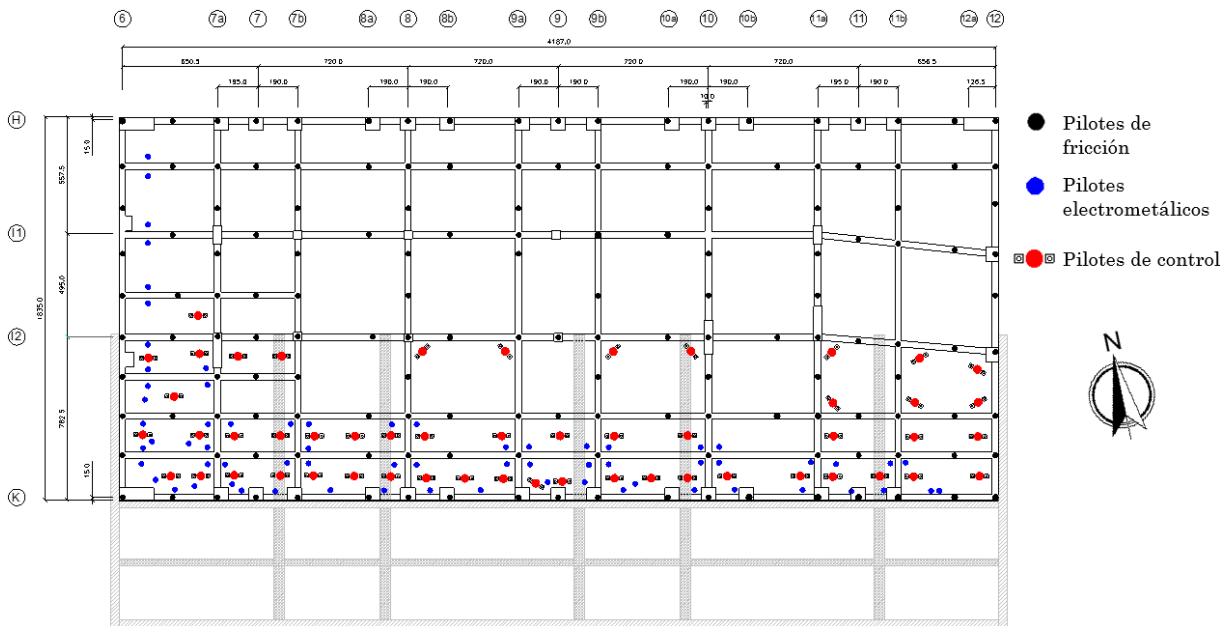
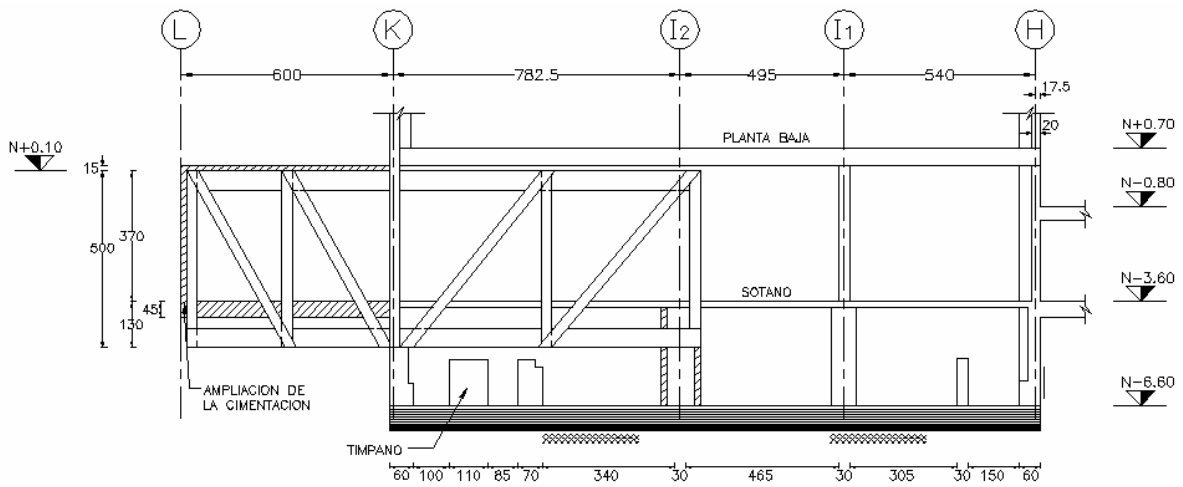
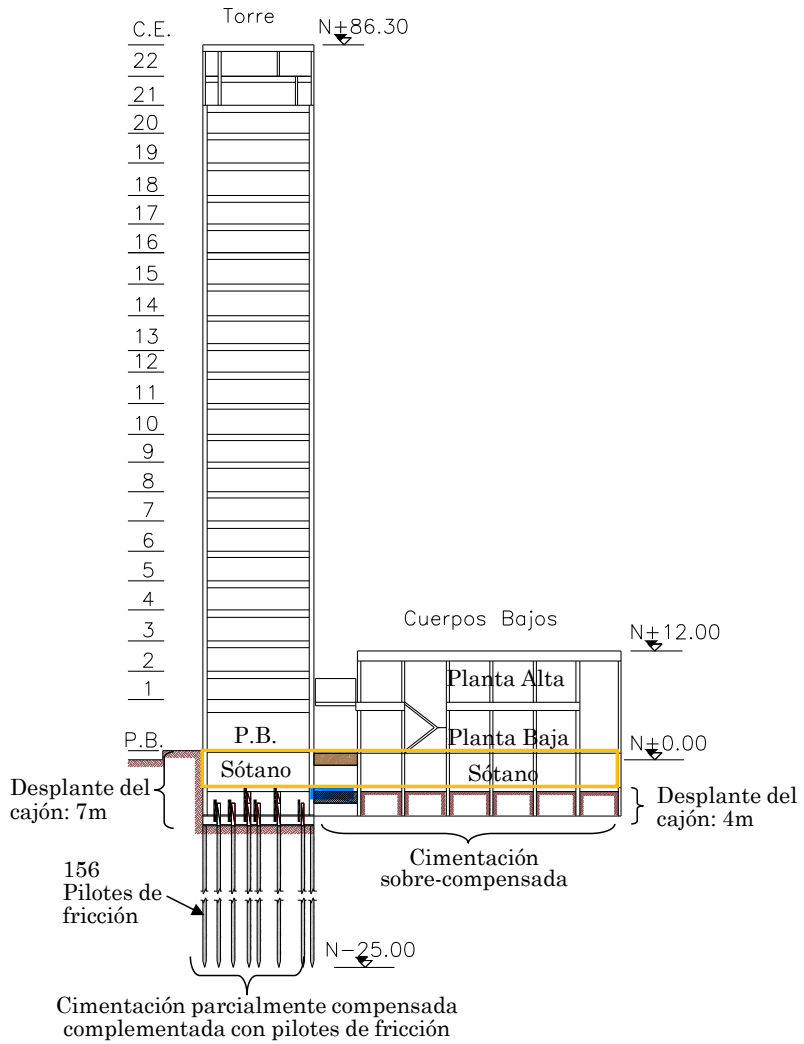


Figura 2.41 Recimentación con 52 pilotes de control de 100 y 150 t, de la torre de un conjunto de edificios.

En 2007 el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Auvinet y López-Acosta, 2008) realizó un diagnóstico y una revisión del comportamiento del conjunto de edificios. Derivado de lo anterior, la opción de rehabilitación adoptada para mitigar la problemática de la torre del conjunto consistió en reforzar la superestructura y la cimentación de la torre, proporcionando un margen adicional de seguridad estructural con respecto al estado en ese entonces de la misma, sin que se pretendiera proceder a la corrección geométrica de su configuración. La propuesta de recimentación se presenta en párrafos posteriores. A continuación se exponen algunos datos importantes sobre el inmueble en estudio.

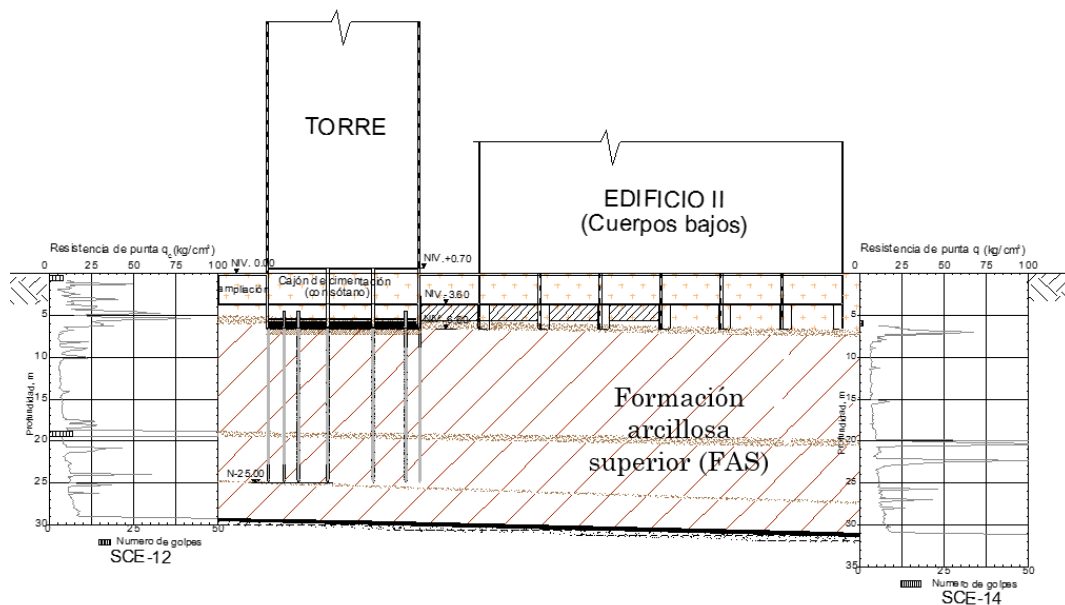
#### a) Características de las cimentaciones de los edificios

La torre tiene una cimentación parcialmente compensada constituida por un cajón de cimentación de 7 m de profundidad, complementado con 156 pilotes de fricción, 73 pilotes electrometálicos y 52 pilotes de control. El cajón de cimentación de la torre tiene una ampliación de 6 m hacia el lado sur cuya profundidad se reduce a 4 m (Figura 2.43). Dicha ampliación no tiene pilotes. Los cuerpos bajos tienen una cimentación sobre-compensada constituida por un cajón de 4 m de profundidad y sin pilotes. La cimentación de la torre está ligada a la de los cuerpos bajos. En la Figura 2.42 se presenta un corte transversal del conjunto.



## b) Características geotécnicas

De acuerdo con la zonificación geotécnica (NTCDCC, 2004), el CCUT se ubica en la denominada Zona III (Lacustre), con la siguiente estratigrafía típica: i) Costra superficial (de 0 a 5 y 7.5 m de profundidad), ii) Formación arcillosa superior (de 5 y 7.5 a 30 m de profundidad), iii) Capa dura (de 30 a 33m de profundidad), iv) Formación arcillosa inferior (de 33 a 44 m de profundidad), y v) Depósitos profundos (de 44 m en adelante). De la exploración geotécnica se determinó que la resistencia de punta presenta variaciones si se compara su magnitud en el lado norte con la del lado sur del conjunto: la resistencia es mayor en la parte cercana a la zona arqueológica (lado norte). Algo similar ocurre cuando se compara la magnitud de esta propiedad en el oriente y el poniente: la resistencia es mayor en la parte poniente (Figura 2.44).



**Figura 2.44 Corte estratigráfico transversal.**

De acuerdo con la información piezométrica, el abatimiento de la presión hidrostática a 30 m de profundidad (donde se localiza la capa dura) también presenta algunas variaciones:

- Al norte del conjunto (cerca de la zona arqueológica) se tienen abatimientos de 180.4 kPa (18.4 t/m<sup>2</sup>; febrero 1997).
- En la esquina noroeste de la torre hay abatimientos de 209.9 kPa (21.41 t/m<sup>2</sup>, octubre de 1999).
- En la parte suroeste se presentan los máximos valores de 231.4 kPa (23.6 t/m<sup>2</sup>, octubre 1999).
- En la parte sur pero más al este se presentan valores de 215.7 kPa (22 t/m<sup>2</sup>, diciembre 2006; Figura 2.45).

Es decir, se tienen mayores abatimientos en la parte sur que en la parte norte del conjunto. También existen variaciones del poniente al oriente: el abatimiento es mayor en el lado poniente.

En la Figura 2.45 se muestra la ubicación de un sondeo con piezocono realizado en diciembre de 2006 para conocer las condiciones piezométricas del sitio en estudio. Se realizaron lecturas en diferentes lentes permeables hasta la profundidad de 30 m (donde se localiza la capa dura) y

se instaló un tubo de observación a 12 m de profundidad. Los resultados de las mediciones mostraron que el nivel freático se encontraba a 4 m de profundidad cerca del sondeo de cono SC-12 (frente a la torre del conjunto). En la Figura 2.45 se presenta una gráfica de la distribución de la presión de poro a diferentes profundidades.

Adicionalmente, la velocidad del hundimiento regional en la zona de estudio es de 7 a 8 cm/año. En el caso de la formación arcillosa superior, su velocidad media de hundimiento es de 3 cm/año.

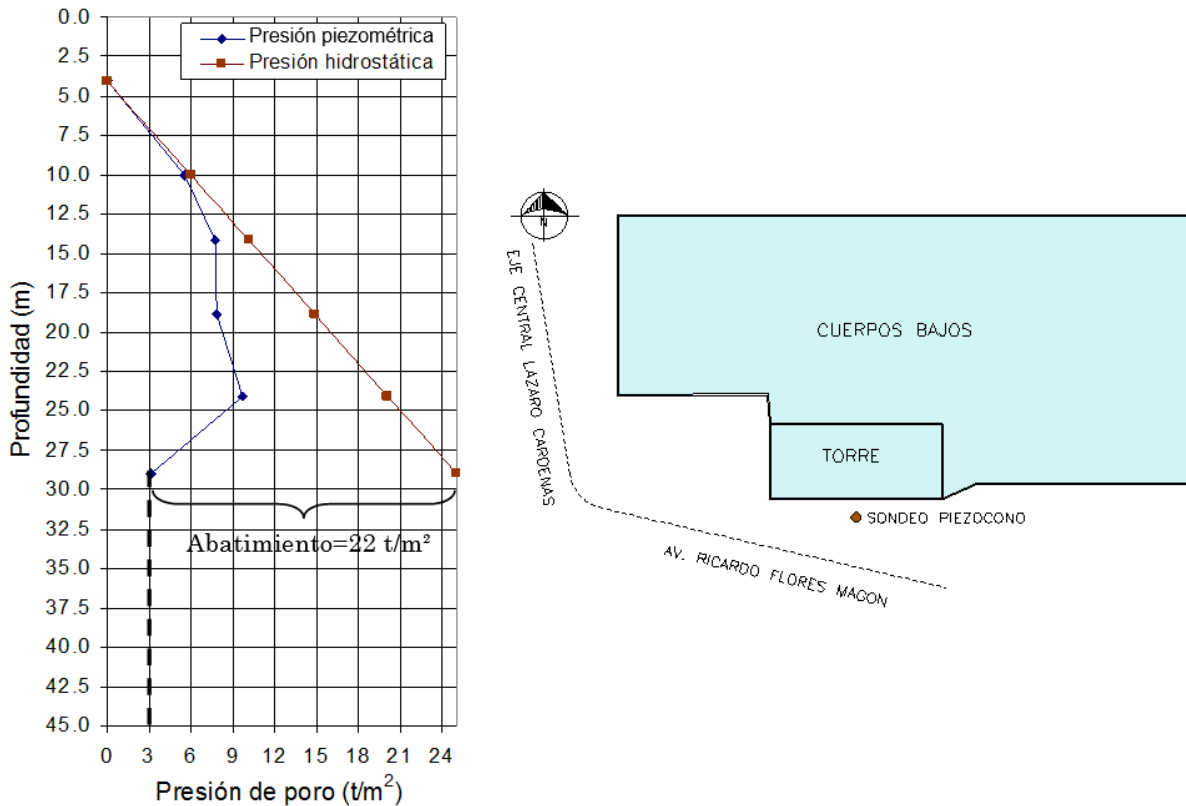


Figura 2.45 Variación de la presión piezométrica frente a la torre en diciembre de 2006.

### c) Comportamiento del conjunto de edificios

La historia de movimientos verticales señala que todo el conjunto torre-cuerpos bajos se mueve como un mismo cuerpo rígido, en donde los menores hundimientos se presentan en los edificios que se localizan del lado de la zona arqueológica (edificios II y III), y los máximos hundimientos se presentan hacia el lado sur del conjunto (donde se ubica la torre). La variación de los movimientos verticales en la esquina suroeste de la torre (donde se presenta el mayor desplomo actualmente) ha variado de 2.18 cm en agosto 1965 hasta casi 30.6 cm en marzo 2016 (Figuras 2.46 y 2.47). Un resumen de estos movimientos para diferentes fechas se presenta en la Tabla 2.3.



Tabla 2.3 Movimientos verticales en la esquina suroeste de la torre del CCUT.

Fecha	Movimiento vertical en la esquina suroeste (cm)
30-sept-1965	2.18
27-nov-1985	3.4
25-nov-1986	5.5
12-ago-1987	7.1
04-ago-1988	8.8
09-abr-1989	10.1
30-may-1991	14.6
23-ago-1994	19.6
18-dic-1997	25.3
18-ago-1999	27.4
18-ago-2000	29.4
10-jul-2001	31.8
01-ago-2006	39.7
08-sep-2010	40.8
29-nov-2014	31.2
22-mar-2016	30.6

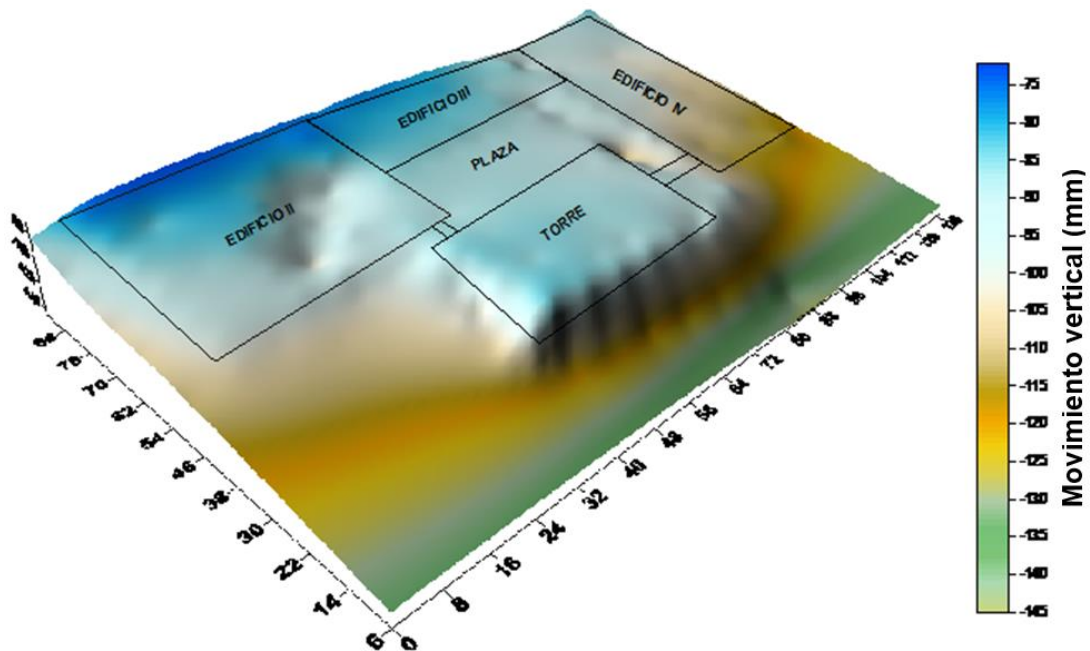


Figura 2.46 Movimientos verticales del conjunto, periodo 1994 a 1998 (Auvinet y López-Acosta, 2008).

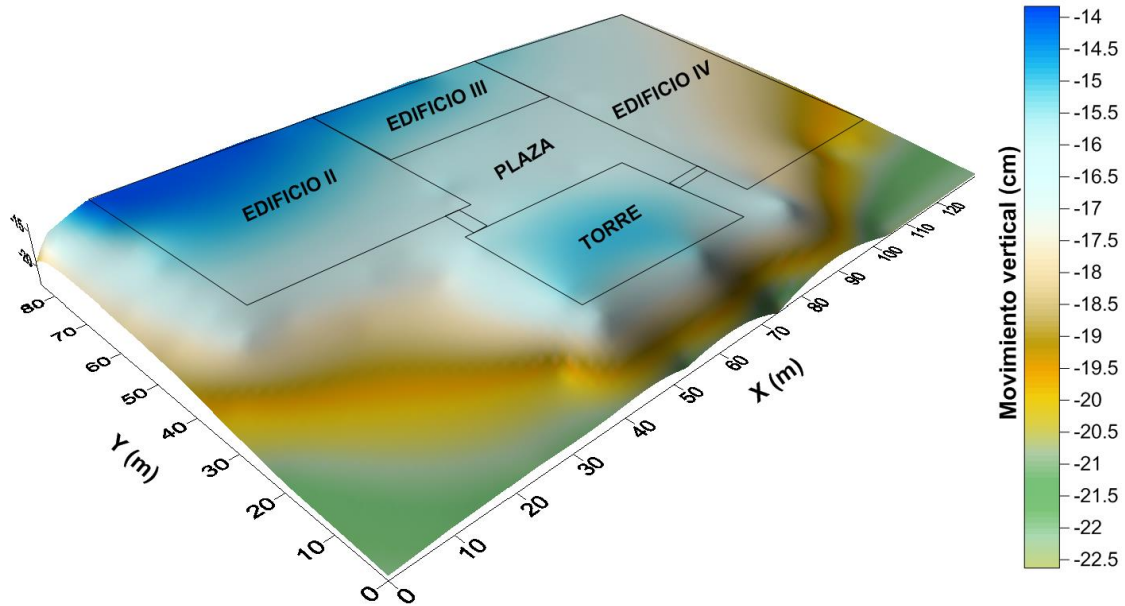


Figura 2.47 Movimientos verticales del conjunto (Período 2010 a 2016).

La historia del comportamiento de los desplomos en la torre se resume a continuación (Figura 2.48):

–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: desde la instalación de bajo alfombras en los entresijos hasta la colocación de lastre de arena en la cimentación. Con todo esto, cuando ya la torre estaba terminada y con todos 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), 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 (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 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 2.48, alcanzando los valores más altos registrados en la torre (106 cm).

–En el período 03/noviembre/2008 a 30/abril/2009 (COPICOSA, 2017) la torre se recimentó con la instalación de 36 pilotes de control nuevos en la ampliación del cajón de cimentación existente (Figura 2.48), apoyados en la capa dura.

–Con base en la información revisada (COPICOSA, 2016), 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.

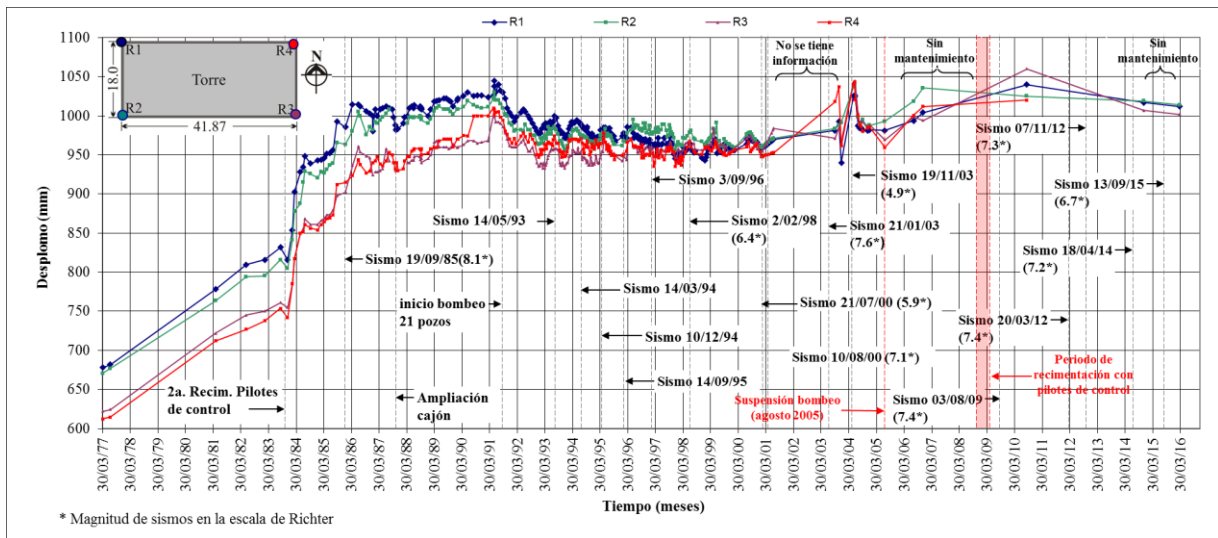


Figura 2.48 Historia de desplomos en la TVGUT en el Período: marzo 1977 a marzo 2016 (actualizado de López-Acosta et al., 2007).

#### d) Recimentación de la torre del conjunto

Después de analizar diferentes opciones de recimentación para la torre (ampliación del cajón al poniente, colocación de pilotes adicionales en la torre, etc.), se consideró como la alternativa más viable aprovechar la ampliación del cajón al sur y colocar ya sea 30 o 44 pilotes de control adicionales en la misma (Auvinet y López-Acosta, 2008). Finalmente, en la ampliación de la torre se colocaron los 36 pilotes de control nuevos que se indican en la Figura 2.49.

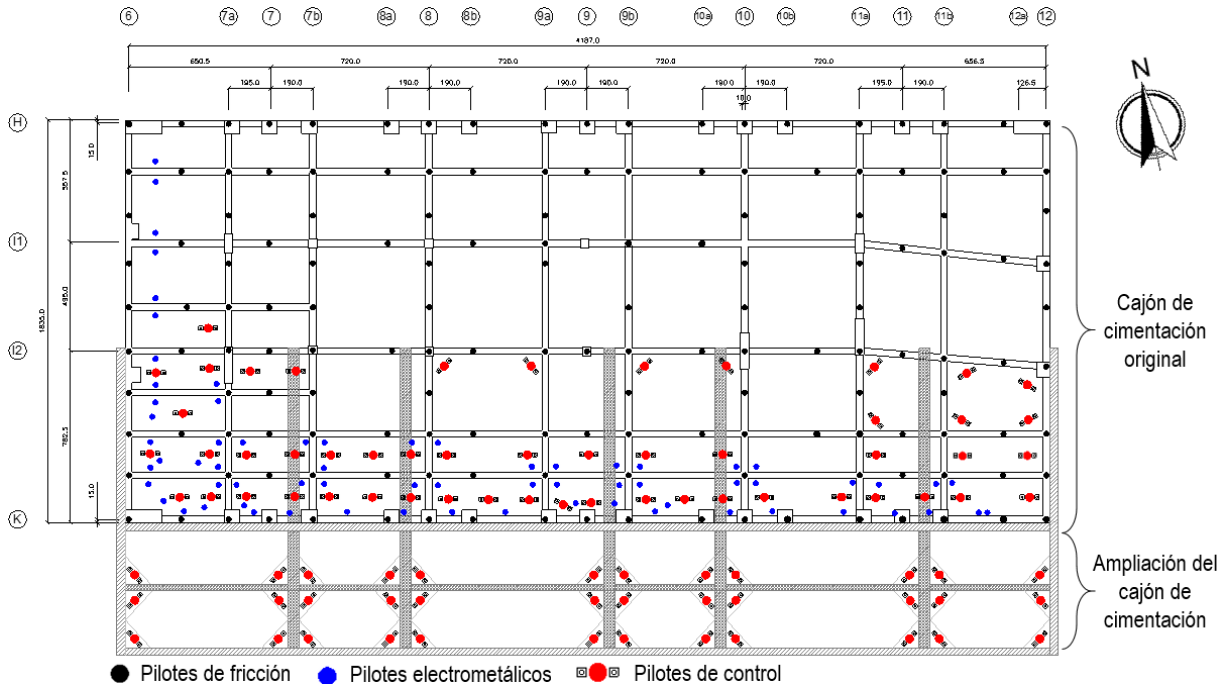


Figura 2.49 Recimentación en la ampliación sur de la torre del CCUT con 36 nuevos pilotes de control.

### 2.5.6 Caso 6: Uso de cilindros poliméricos y arreglos de cubos de madera en los sistemas de control

Los cilindros poliméricos fueron utilizados recientemente en pilotes de control para la recimentación y nivelación de un edificio ubicado en la Ciudad de México. Este caso es el primero en donde se emplean tanto arreglos de cubos de madera como cilindros poliméricos en los pilotes de control para la recimentación y nivelación de un inmueble. También se utilizó la subexcavación.

#### a) Características del edificio

El edificio intervenido fue construido en 1964 y se encuentra ubicado en la Zona III: Lacustre (NTCDCC, 2004), integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. El edificio está conformado por un sótano, planta baja y siete niveles (Figura 2.50). La cimentación está constituida por contratabes invertidas solamente en el centro, pues no cuenta con contratabes invertidas perimetrales, y está complementado con 35 pilotes de fricción. El inmueble fue monitoreado desde junio de 1990, manifestando desde entonces ligeros desplomos y asentamientos diferenciales que aumentaron con el paso del tiempo, debido al hundimiento regional de la Ciudad de México y a la colindancia con un edificio cimentado con pilotes de punta (Figura 2.50). Para corregir los asentamientos diferenciales y los desplomos, en 2015 se decidió recimentar el edificio con pilotes de control. Los trabajos de recimentación se realizaron de julio 2015 a junio 2016 y los de nivelación en un periodo de tres meses (noviembre 2016 a enero 2017).

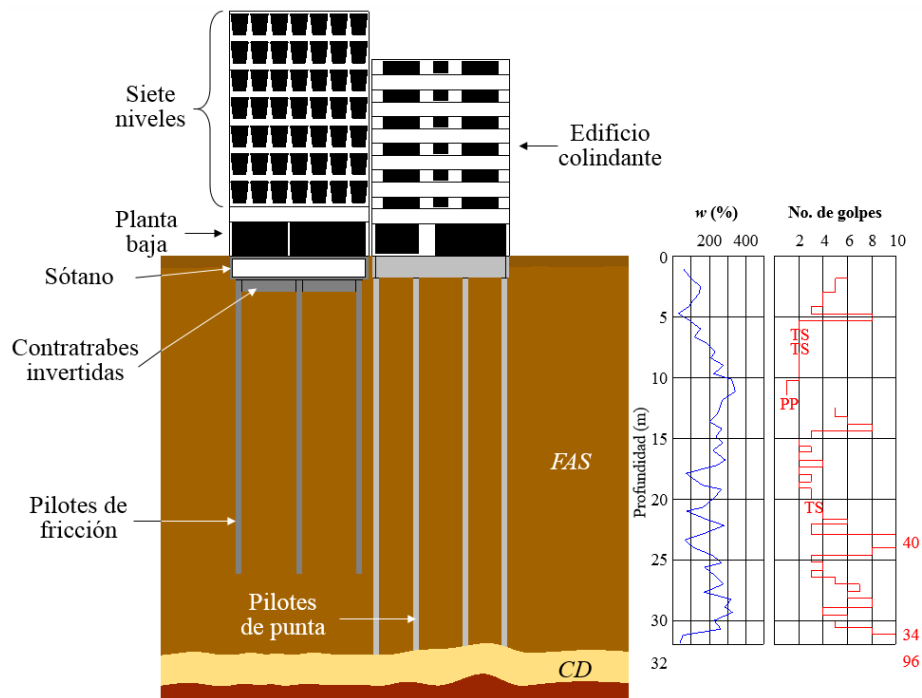


Figura 2.50 Características del edificio intervenido.

## b) Recimentación

Los trabajos de recimentación consistieron en:

- Demolición en pequeñas secciones de la losa fondo del sótano para el acceso a la zona de trabajo.
- Excavación manual en las zonas donde se alojarían los sistemas de control.
- Extracción del material producto de la excavación.
- Habilitado del acero de los muros, losa de fondo y dados estructurales del nuevo cajón de cimentación.
- Cimbrado, colado y curado de los nuevos elementos estructurales.
- Montaje y nivelación del equipo de perforación mecánica para perforar hasta llegar al estrato resistente (capa dura, aproximadamente a 32 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.
- Colocación de la celda de deformación y del cabezal en el sistema de control para posteriormente precargarlo empleando el *sistema doble puente*.

De esta manera se instalaron 26 nuevos pilotes de control (Figura 2.51), de los cuales 16 tienen como celda de deformación arreglos de tres niveles de  $6 \times 6$  cubos de madera con láminas galvanizadas como separación (Figura 2.52a), y los restantes tienen cilindros poliméricos de 100 t de capacidad nominal (Figura 2.52b). La ubicación de los cilindros fue arbitraria, ya que un arreglo de  $6 \times 6$  cubos de madera es equivalente a un cilindro con capacidad nominal de 100 t. Una vez concluidos los trabajos de recimentación, iniciaron los trabajos de nivelación.

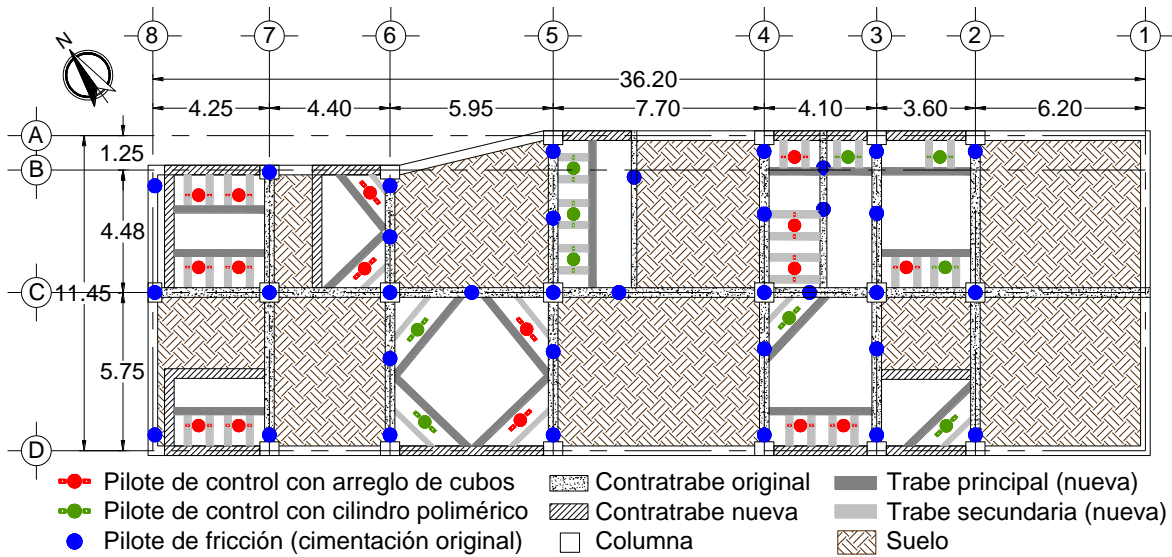


Figura 2.51 Ubicación de los pilotes de control.



a) Con cilindro polimérico.



b) Con arreglo de tres niveles de 6×6 cubos de madera

Figura 2.52 Pilotes de control hincados en el edificio.

### c) Renivelación

Los primeros trabajos para la renivelación consistieron en: *i*) realizar túneles debajo de la losa del sótano y de los nuevos cajones de cimentación para llegar al fuste de los pilotes originales (de fricción), y *ii*) la desconexión de algunos de los pilotes originales ubicados en zonas específicas, para permitir el movimiento vertical de la estructura. Al efectuar estos trabajos, se observó que el edificio intervenido estaba ligado al edificio colindante por una junta (no estructural) de concreto y desperdicio que había que demoler para poder inducir el movimiento vertical del edificio. Para ello fue necesario:

- a) Demoler secciones del muro del sótano para llegar a la junta de concreto y desperdicio,
- b) Demoler la junta y colocar paneles de unigel en esa área, y

- c) Cimbrar y colar las secciones del muro del sótano que fueron demolidas. Estos trabajos se realizaron al mismo tiempo que la desconexión de los pilotes de fricción (Figura 2.53a).

Posteriormente, se llevó a cabo la subexcavación manual en las zonas con menor asentamiento (Figuras 2.53b y 2.54), complementándola con la liberación de las tuercas de los sistemas de control (Figura 2.53c) 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 quedará a pocos milímetros de los estabilizadores de concreto. Después se precargó cada pilote. Asimismo los pilotes de fricción desconectados se volvieron a conectar soldando las varillas centrales de los mismos, pues trabajan a tensión (Figura 2.53d).



Figura 2.53 Trabajos de renivelación: a) desconexión de pilotes de fricción, b) subexcavación, c) liberación de tuercas y penetración del pilote y, d) reconexión de los pilotes de fricción.

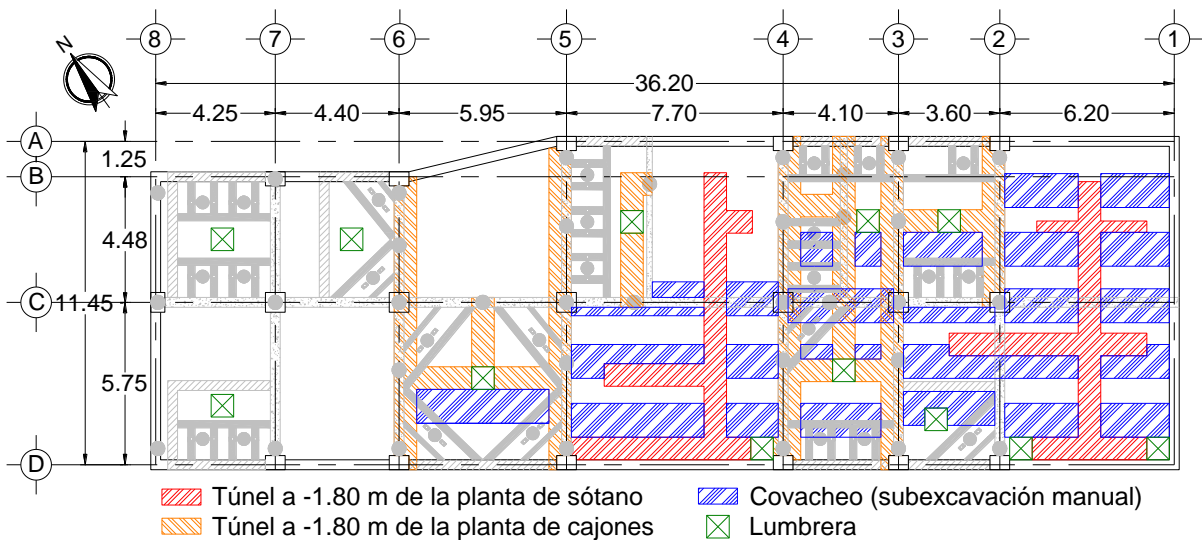


Figura 2.54 Ubicación de los túneles y zonas de subexcavación manual.

#### d) Comportamiento del edificio posterior a la intervención

En la Figura 2.53a se observa que el asentamiento diferencial máximo que presentaba originalmente el edificio era 43.6 cm (de la esquina surponiente a la esquina nororiente, Figura 2.55a). Después de la renivelación, el asentamiento diferencial máximo fue 14.9 cm (de

la dirección poniente a oriente, Figura 2.55b). En cuanto a los desplomos, las Figuras 2.56a y 2.56b muestran la corrección de verticalidad del edificio, y en la Figura 2.56c se presentan los desplomos medidos en tres esquinas del edificio antes, durante y después de la intervención. No fue posible llegar a un valor nulo en el desplomo, debido a que el edificio colindante tiene un desplomo de 21 cm en dirección del edificio intervenido.

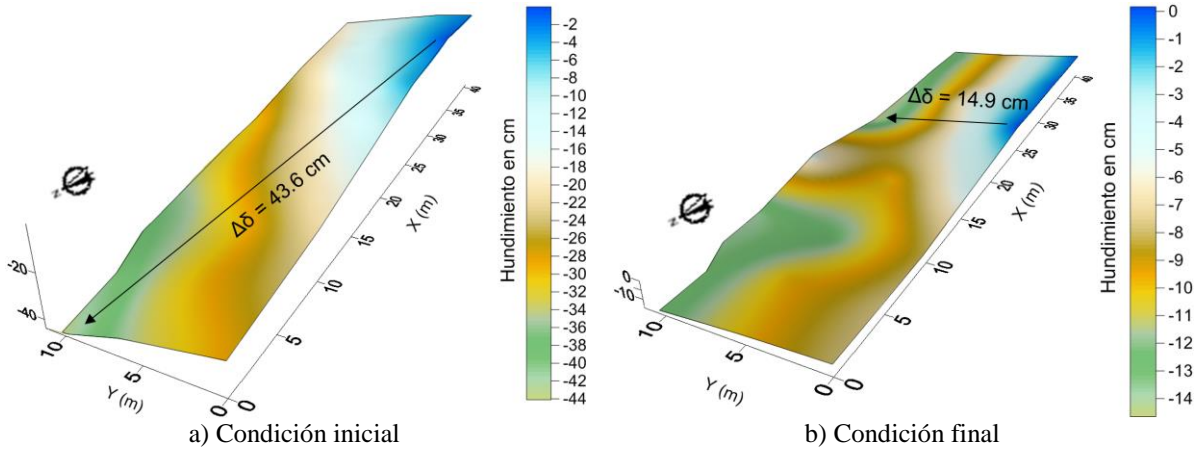


Figura 2.55 Asentamientos diferenciales del edificio.

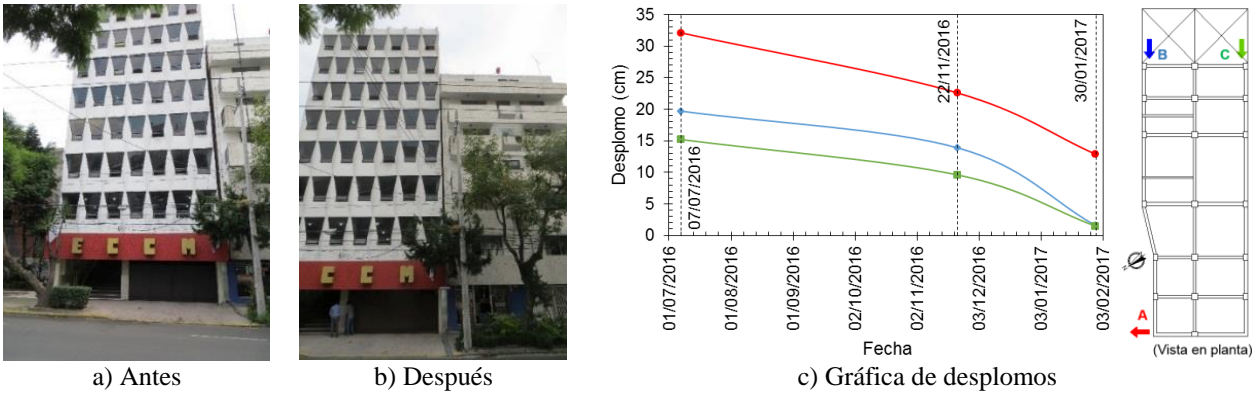


Figura 2.56 Corrección de desplomos del edificio.





### **3 COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES**

#### **3.1 Comportamiento y propiedades de los materiales**

El estudio del comportamiento y las propiedades de los materiales permite conocer la relación entre las variables de fuerza o esfuerzo y las variables de desplazamiento o deformación unitaria. Al evaluar el comportamiento de un material, se procura caracterizar cualitativa y cuantitativamente las respuestas de diferentes sólidos a las acciones mecánicas y térmicas, especificando la forma de las relaciones y las constantes físicas que intervienen en ellas, entre las variables de fuerza y las de desplazamiento para un material en específico. Al proponer un modelo para representar el comportamiento del material de un sólido, se deben incluir todos los factores que influyen en la respuesta del sólido bajo determinadas condiciones.

Los aspectos cualitativos representan el comportamiento de los materiales, mientras que los cuantitativos, se refieren a las propiedades de los materiales. Ambos aspectos se deben determinar experimentalmente mediante los diagramas esfuerzo-deformación unitaria (Bickford, 1995).

##### **3.1.1 Diagrama esfuerzo-deformación**

A partir de los datos de un ensayo de tensión o de compresión, es posible calcular los valores del esfuerzo y la correspondiente deformación unitaria en el espécimen ensayado. Al graficar dichos valores se obtiene una curva resultante conocida como diagrama esfuerzo-deformación unitaria.

Usando los datos registrados se puede determinar el esfuerzo nominal dividiendo la carga  $P$  aplicada entre el área  $A_0$  de la sección transversal original del espécimen (ecuación 3.1). Este cálculo supone que el esfuerzo es constante en la sección transversal y en toda la región entre los puntos calibrados.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (3.1)$$

Para cada incremento de esfuerzo existe una deformación unitaria asociada. Como se muestra en la ecuación (3.2), la deformación unitaria se determina dividiendo el desplazamiento  $\delta$  generado en cada incremento de esfuerzo, entre la longitud inicial del espécimen  $L_0$ .

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (3.2)$$

Al graficar los valores correspondientes de  $\sigma$  y  $\varepsilon$ , con los esfuerzos como ordenadas y las deformaciones unitarias como abscisas, se obtiene una curva resultante denominada diagrama convencional de esfuerzo-deformación unitaria (Figura 3.1). Este diagrama proporciona los medios para obtener datos sobre la resistencia a tensión (o a compresión) de un material sin considerar el tamaño o forma geométrica del material. En general, dos diagramas esfuerzo-deformación unitaria para un material en particular nunca son exactamente iguales, ya que los resultados dependen de: a) la composición del material, b) imperfecciones microscópicas, c) la manera en que esté fabricado, d) la velocidad de carga, y e) la temperatura durante la prueba.

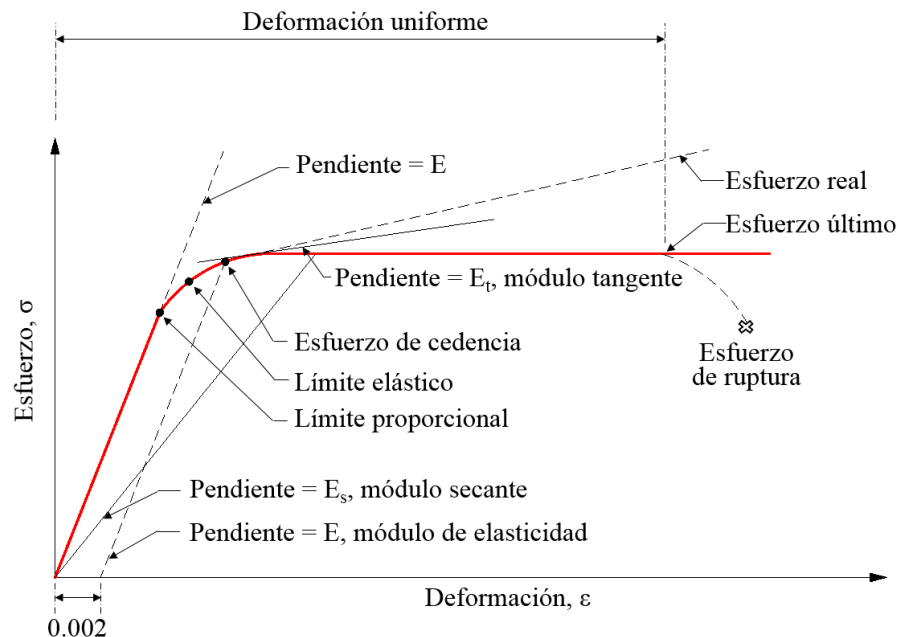


Figura 3.1 Diagrama convencional esfuerzo-deformación unitaria (modificado de Pilkey y Pilkey, 1974).

Las propiedades de los materiales que pueden obtenerse mediante los diagramas esfuerzo-deformación unitaria son:

- *Límite de proporcionalidad.* Es el máximo esfuerzo en que éste permanece directamente proporcional a la deformación. El límite de proporcionalidad se determina a partir de la curva esfuerzo-deformación, trazando una línea recta tangente al origen y observando la primera desviación de la línea que tiene el trazado. El valor obtenido para el límite

proporcional depende de la exactitud de la medición de deformación y el esfuerzo y la escala de la gráfica trazada; por lo tanto, el límite proporcional no se utiliza comúnmente en aplicaciones de ingeniería, aunque resulta de interés científico.

- *Límite elástico.* Es el máximo esfuerzo que el material puede soportar sin deformarse permanentemente. Para determinar con exactitud el límite elástico se necesitan cargas para crear esfuerzos sucesivamente mayores seguidos de descargas. Después de cada ciclo de carga y descarga, se toman medidas para ver si cambiaron las dimensiones del espécimen. El límite elástico es difícil de medir y requiere mediciones precisas. Aunque tiene cierto interés científico, este límite tiene escaso valor desde el punto de vista de la ingeniería.
- *Esfuerzo de fluencia.* También denominado esfuerzo de cedencia, es el esfuerzo que produce en un material una deformación específica, permanente y limitadora. Si se carga un espécimen ligeramente por encima del límite elástico y luego se descarga, la línea de esfuerzo-deformación de descarga es esencialmente paralela a la porción recta inicial de la curva. Más adelante se aborda uno de los métodos para obtener el esfuerzo de fluencia.
- *Esfuerzo último.* El esfuerzo correspondiente a la carga máxima que se puede alcanzar se conoce como esfuerzo último. Este nivel de esfuerzo se considera generalmente como la resistencia de un material. La diferencia del esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último actúa como una resistencia de reserva si se diseña con el esfuerzo de fluencia.
- *Módulo de elasticidad.* También conocido como el Módulo de Young  $E$ , es la constante física de proporcionalidad (ecuación 3.3). Como se muestra en la Figura 3.1, el módulo de elasticidad es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación unitaria dentro del intervalo lineal elástico del material y se expresa comúnmente en Pascales (Pa).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.3)$$

Al variar cada una de las propiedades mecánicas de los materiales, también varían los comportamientos mecánicos. Como se muestra en la Figura 3.2, existen diversos comportamientos mecánicos representativos, entre los que destacan: rígido, elástico lineal, plástico perfecto, elastoplástico y elástico no lineal, modelo Ramberg-Osgood (ecuación constitutiva 3.4).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \beta \left( \frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (3.4)$$

Los parámetros  $\beta$ ,  $E$  y  $n$  son constantes del material que pueden ajustarse para obtener una buena correspondencia entre la curva experimental esfuerzo-deformación unitaria y la curva Ramberg-Osgood.

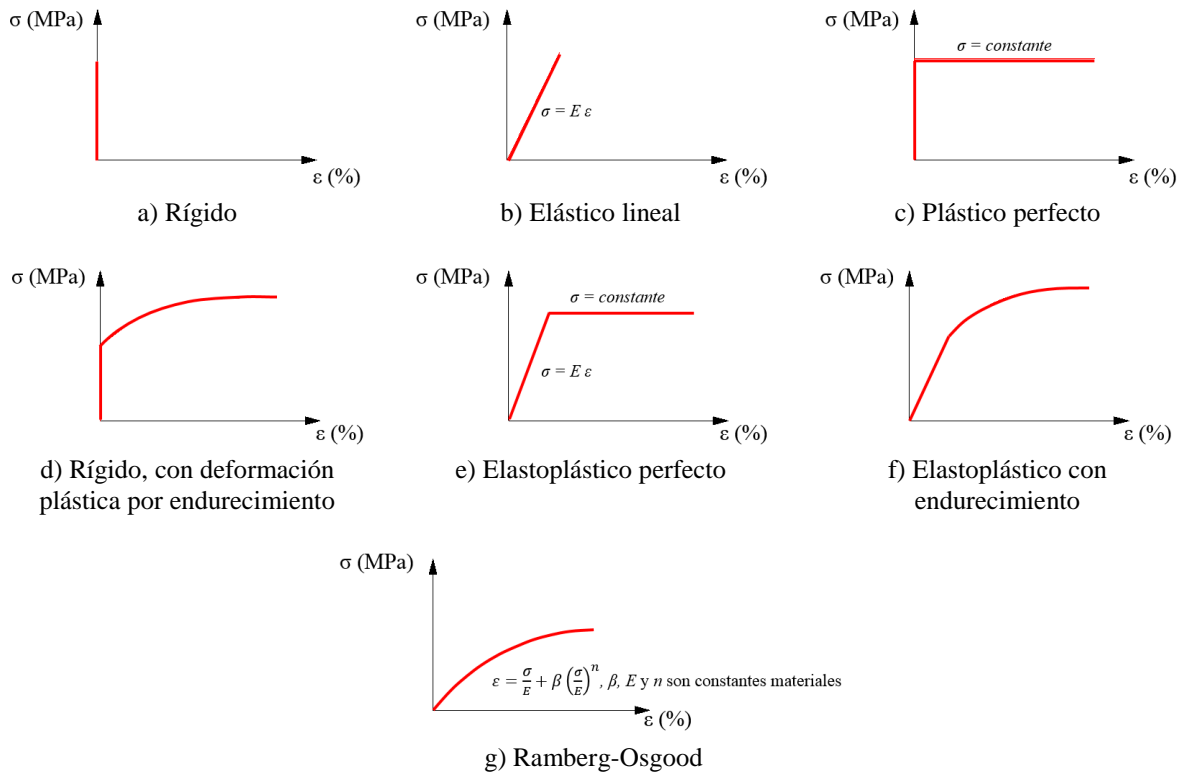


Figura 3.2 Modelos representativos del comportamiento de materiales (Pilkey y Pilkey, 1974).

### 3.1.2 Deformación

Al aplicar una carga en un material (generalmente en metal), comúnmente se produce primero una deformación elástica, después una deformación plástica y finalmente la falla (Figura 3.3). La deformación elástica es la que desaparece al quitar la carga que la produjo, mientras que la deformación plástica es la que persiste después de eliminar dicha carga. La deformación plástica se conoce también como deformación inelástica o permanente.

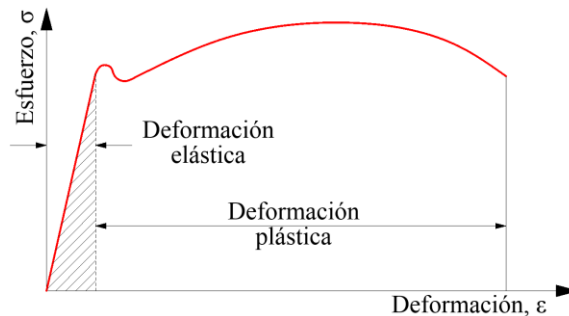


Figura 3.3 Deformación: a) elástica, y b) plástica (Bickford, 1995).

La cantidad de deformación que puede sufrir un material bajo condiciones de esfuerzo constante, como una función de tiempo y temperatura, se denomina fluencia. En contraste a la deformación bajo condiciones de velocidad de deformación constante, la magnitud y la

velocidad de la deformación durante la fluencia se determinan para el mismo material de acuerdo con las condiciones de esfuerzo y temperatura a que está sometido.

Debido a que los materiales cristalinos se endurecen en el proceso de deformación, una deformación continua bajo un esfuerzo constante implica recuperación. La velocidad de fluencia (velocidad de deformación) es el resultado de un balance entre los procesos de endurecimiento y recuperación.

En la Figura 3.4 se muestran las curvas típicas de fluencia de un material divididas en tres etapas:

- Etapa 1.* Conocida también como fluencia primaria, se caracteriza por producir una deformación plástica inicial al aplicar la carga, seguida por un periodo inicial a una velocidad que disminuye rápidamente.
- Etapa 2.* Presenta un período de extensión a velocidad de deformación constante generado por el endurecimiento del material. A esta etapa se le conoce como fluencia secundaria.
- Etapa 3.* Conocida también como fluencia terciaria, se identifica por exhibir un incremento en la deformación en un menor tiempo. En esta etapa la resistencia de fluencia adquiere su valor máximo.

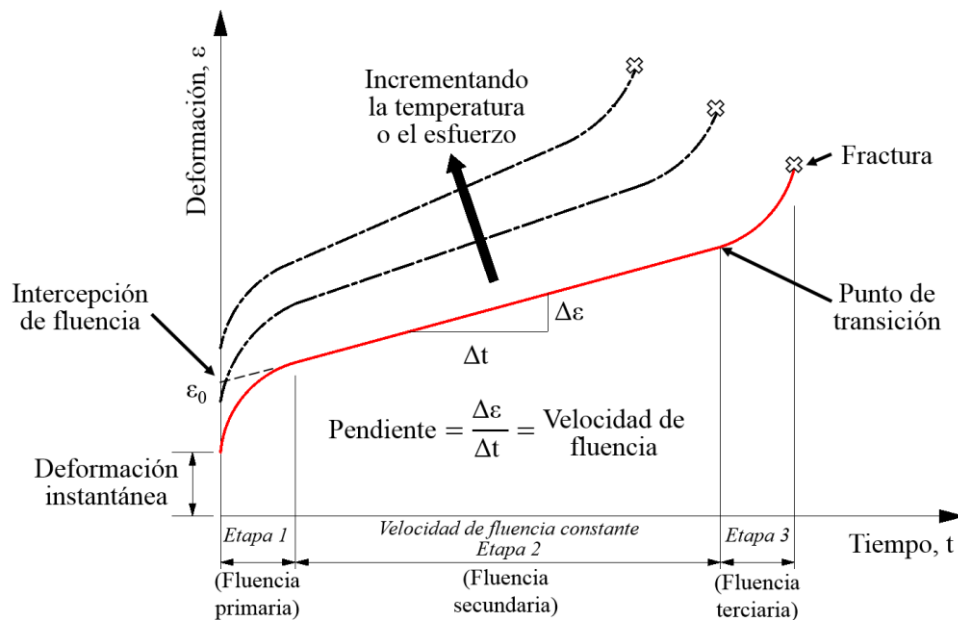


Figura 3.4 Curvas típicas de fluencia (modificado de Pilkey y Pilkey, 1974).

### 3.1.3 Fractura

La fractura es la separación de un cuerpo en dos o más partes, y puede tener características dúctiles o frágiles. La fractura dúctil se produce después de una deformación plástica extensa (Figura 3.5a), y se caracteriza por una propagación lenta de la fisura por medio de un proceso de deformación y coalescencia de huecos. La superficie de este tipo de fractura tiene apariencia característica opaca y fibrosa.

La fractura frágil ocurre por una propagación rápida de la fisura después de poca o nula deformación plástica (Figura 3.5b). En materiales cristalinos, la fisura se propaga a lo largo del límite de los granos. En este caso, se le da el nombre de fractura intergranular y puede atribuirse a la existencia de películas frágiles segregadas en los límites de grano. La fractura se produce en una dirección perpendicular a la componente máxima del esfuerzo de tensión (Hayden *et al*, 1964).

La presencia de muescas, así como el uso de bajas temperaturas o velocidades de deformación elevadas, pueden dar origen a una transición de fractura dúctil a frágil en metales de transición. En cualquiera de estos materiales, la fractura dúctil se caracteriza por una gran absorción de energía antes de la fractura, mientras que la fractura frágil requiere muy poca absorción de energía.

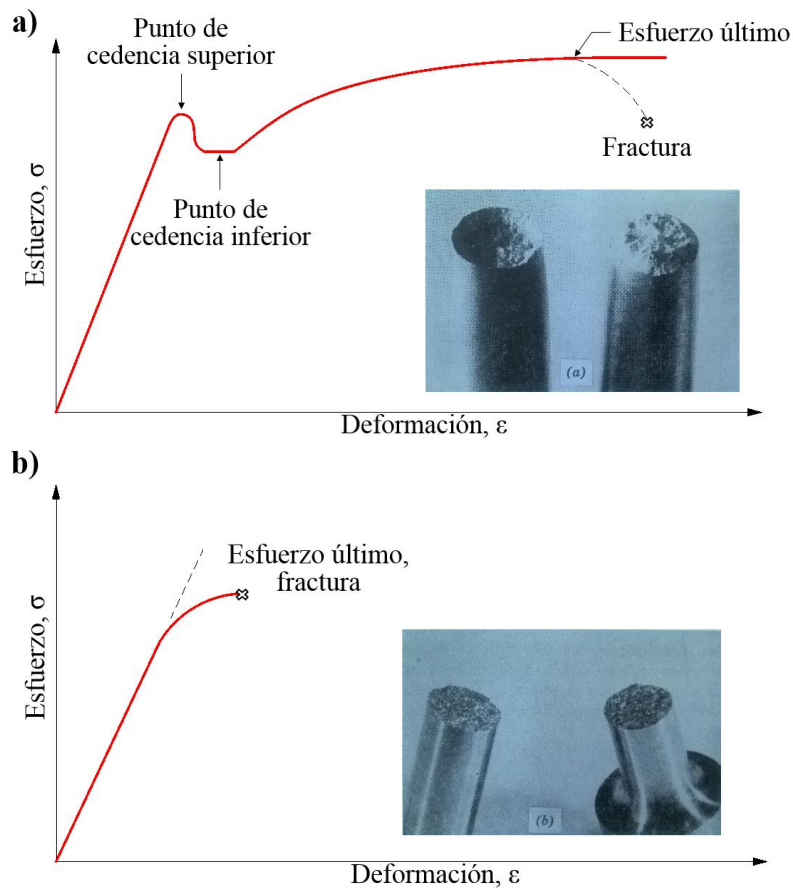


Figura 3.5 Comportamiento mecánico y falla: a) dúctil, y b) frágil (Hayden *et al*, 1964).

Un tipo de falla que se produce como fractura frágil, es la falla por fatiga. Esta falla se genera debido a esfuerzos cíclicos que usualmente están por debajo de los valores comúnmente aceptados para el límite de elasticidad. Aun cuando se ha observado deslizamientos a esfuerzos inferiores que el límite elástico en especímenes sujetos a esfuerzos cíclicos, no producen deformaciones plásticas apreciables antes de que tenga lugar la fractura completa, y por lo tanto, no existe señal de que vaya a producirse la falla (Keyser, 1972).

### 3.1.4 Método de esfuerzo de fluencia desplazado (*Método offset*)

Uno de los métodos más empleados en las normas ASTM (ASTM D638-02) para obtener el esfuerzo de fluencia (conocido también como esfuerzo de fluencia) en materiales dúctiles, es el *Método de esfuerzo de fluencia desplazado* (Método Offset). Dicho método consiste en trazar una línea que va del origen al límite de proporcionalidad (línea O-A). La línea cuya pendiente es igual a la región elástica, debe extenderse ligeramente como se muestra en la Figura 3.6a (línea A-A'). Posteriormente se dibuja una línea paralela a la línea O-A', a una equidistancia de 0.2% de la deformación original (línea B-B'). El punto de intersección de la línea paralela con la curva esfuerzo-deformación (punto C) es el esfuerzo de fluencia.

En ocasiones, la curva esfuerzo-deformación típica (Figura 3.6b) tiene una región al pie de la gráfica (sección O-E), que no representa una propiedad del material. En este caso, es necesario generar un nuevo punto cero (O') utilizando como base la línea de rama elástica (línea A-E) y extendiéndola hasta el eje de las abscisas (línea O'-E). Posteriormente se efectúa todo lo descrito en la Figura 3.2a.

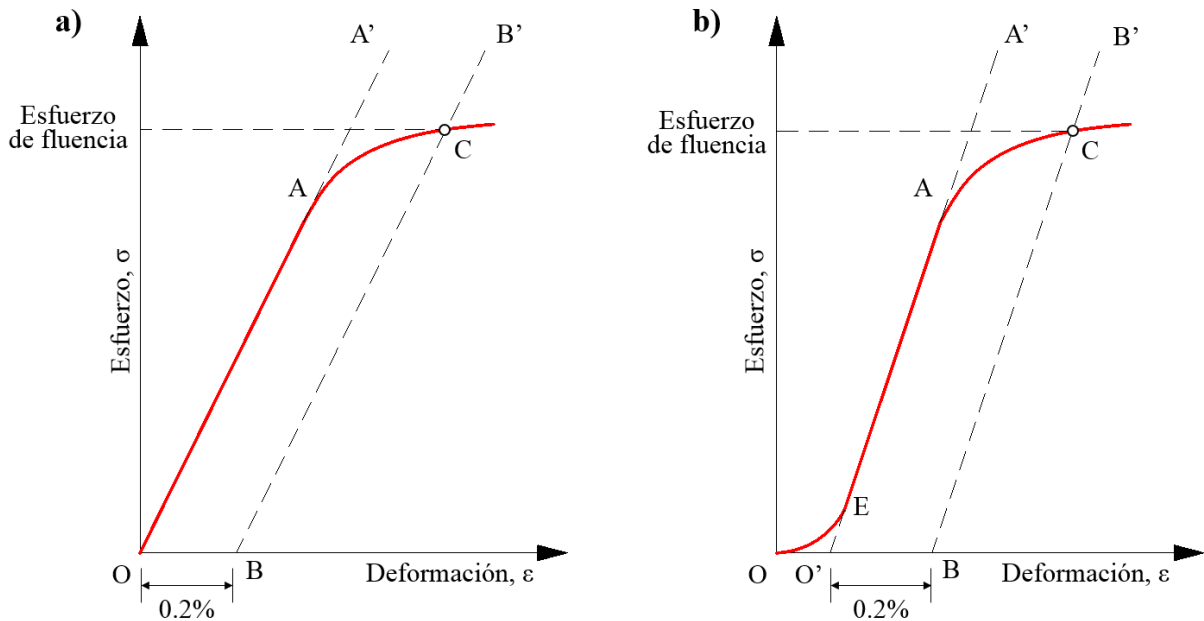
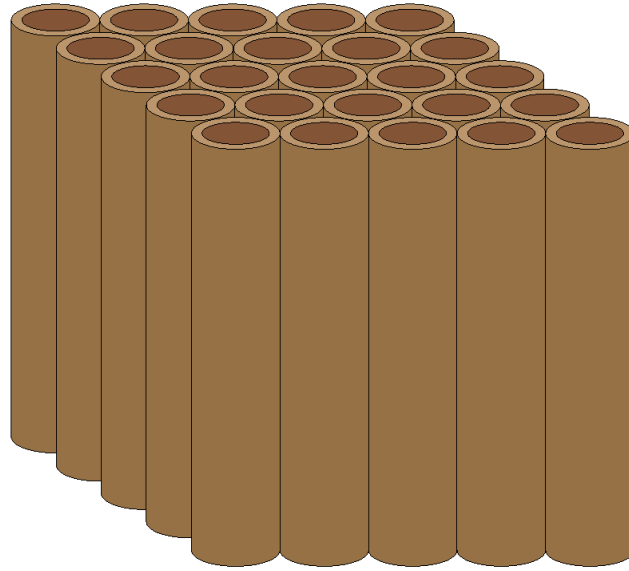


Figura 3.6 Método de esfuerzo de fluencia desplazado (modificado de ASTM D638-02).

### 3.1.5 Comportamiento mecánico de la madera

Desde el punto de vista ingenieril, la porción más útil de un árbol es la madera del tronco. Este material se compone principalmente de celdas largas y huecas, cuyos ejes corren paralelos a la longitud del árbol. Las celdas están aglomeradas por medio de una resina natural, llamada lignina (Keyser, 1972). El comportamiento de la madera es similar al comportamiento de un conjunto de tubos de paredes delgadas, adheridos unos a otros (Figura 3.7).





**Figura 3.7 Estructura celular de la madera (modificado de Hayden *et al*, 1964).**

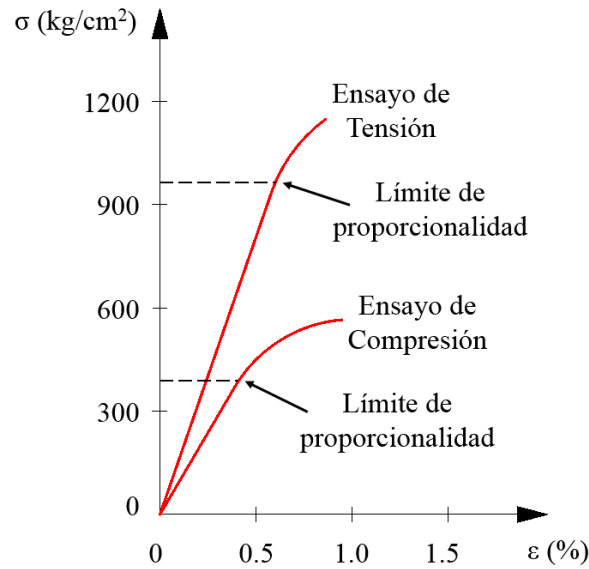
La madera es un material higroscópico que tiende a absorber o perder agua según la humedad relativa del medio ambiente que la rodea. La humedad es un factor que influye en el comportamiento mecánico de la madera, ya que las propiedades mecánicas de la madera varían significativamente con el contenido de agua. Asimismo la humedad en la madera puede afectar su durabilidad, si el contenido de agua es alto por un periodo de tiempo considerable, puede ser susceptible a la presencia de hongos que producen podredumbre.

El contenido de agua  $w$  (%) se define como la relación que existe entre el peso del agua que contiene la madera y el peso anhidro de ésta, relación que se expresa en porcentaje.

$$w (\%) = \frac{\text{peso del agua}}{\text{peso de la madera en estado seco}} \times 100 \quad (3.5)$$

Para un contenido de agua de 12%, la resistencia a la tensión paralela a las fibras varía de 30 a 300 MPa, según el peso volumétrico del tipo de madera. En los pinos mexicanos, la resistencia a la tensión es del orden de 80 MPa. En cuanto a la resistencia a la compresión paralela a las fibras, varía de 10 a 160 MPa con un contenido de agua de 10%. Las especies de pino de México tienen resistencias del orden de 45 MPa para un contenido de agua de 12%.

En la Figura 3.8 se aprecia una curva esfuerzo-deformación típica de un tipo de madera sometida a compresión longitudinal. En dicha figura se observa que el comportamiento en compresión y en tensión es fundamentalmente elástico. En cuanto al módulo de elasticidad, se observa que tiende a ser ligeramente mayor en tensión que en compresión.



**Figura 3.8** Curvas esfuerzo-deformación en ensayo de tensión y compresión en madera (Robles y Echenique-Manrique, 1986).

En la Tabla 3.1 se presentan las propiedades mecánicas de algunas de las maderas mexicanas (no incluye la caobilla). Los valores corresponden a resistencias máximas o últimas a diversas acciones y fueron obtenidas en ensayos de probetas sin defectos y con la dirección de las fibras paralelas a los cantos. Asimismo se presenta la dureza de los distintos tipos de madera obtenida mediante la prueba Janka (Robles y Echenique-Manrique, 1986). Dicha prueba consiste en determinar la fuerza (en kilogramos) necesaria para que una esfera de 1.127 cm penetre a la madera hasta una profundidad de 0.282 cm.

Tabla 3.1 Propiedades de algunas de las maderas mexicanas (Robles y Echenique-Manrique, 1986).

Nombre científico	Nombre común	Relación peso anhidrido/volumen verde (kg/cm <sup>3</sup> )	Flexión Módulo de rotura (kg/cm <sup>2</sup> )	Estática Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de rotura en compresión paralela a la fibra (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo al límite de proporcionalidad en compresión perpendicular a la fibra (kg/cm <sup>2</sup> )	Máximo esfuerzo cortante paralelo a la fibra (kg/cm <sup>2</sup> )	Dureza Janka perpendicular a la fibra (kg)
<i>En condición verde</i>								
Terminalia amazonia	Caushán, tepesuchil	0.62	741	119000	375	59	107	458
Calophyllum brasiliense	Bari, leche maria	0.57	745	106000	343	50	94	407
Cordia alliodora	Bajón, hormiguero	0.44	636	90000	284	48	80	363
Hymenaea courbaril	Cuapinol, guapinol	0.71	910	129000	408	115	124	893
Lonchocarpus castilloi	Machicho, chaperlo	0.73	1236	160000	511	109	121	787
Simarouba glauca	Pasá ak, pajulté	0.4	442	79800	207	27	55	175
Vochysia hondurensis	Macablanca, apestoso	0.33	390	73000	182	29	50	184
Pinus cooperi	Pino amarillo	0.39	349	89300	124	21	49	154
Pinus durangensis	Pino blanco	0.46	450	90200	166	30	62	223
Pinus patula	Pino colorado	0.47	407	81000	---	28	65	240
Pinus montezumae	Chamaite	0.42	330	65000	---	22	50	200
Pinus lawsoni	Pino ortiguillo	0.51	507	77000	---	---	---	241
<i>En condición seca, a un contenido de humedad del 12%</i>								
Terminalia amazonia	Caushán, tepesuchil	0.64	1275	159000	695	---	147	780
Calophyllum brasiliense	Bari, leche maria	0.57	1040	128000	484	62	146	515
Cordia alliodora	Bajón, hormiguero	0.44	856	106000	445	58	86	367
Hymenaea courbaril	Cuapinol, guapinol	0.71	1364	152000	669	132	174	1066
Lonchocarpus castilloi	Machicho, chaperlo	0.73	1682	181000	862	---	194	1190
Simarouba glauca	Pasá ak, pajulté	0.4	625	86800	379	42	81	198
Vochysia hondurensis	Macablanca, apestoso	0.33	555	81000	290	31	78	180
Pinus cooperi	Pino amarillo	0.39	872	114000	483	47	86	238
Pinus durangensis	Pino blanco	0.46	1038	121000	475	63	105	346
Pinus patula	Pino colorado	0.48	965	128000	448	59	102	389
Pinus montezumae	Chamaite	0.42	782	110000	378	45	99	302
Pinus lawsoni	Pino ortiguillo	0.51	850	92000	---	---	---	401

### 3.1.6 Comportamiento mecánico de los polímeros: elastómeros y elasticidad del hule

Los polímeros comunes están formados por compuestos de carbono, pero pueden también estar constituidos por compuestos químicos inorgánicos tales como los silicatos y las siliconas. Un aumento en cristalinidad aumenta también la resistencia y el peso volumétrico. Al calentarse, los polímeros pasan por cinco estados diferentes (Figura 3.9): vítreo, coriáceo (semejante al cuero), similar al hule, hule viscoso y líquido. Este comportamiento se explica por medio de un modelo viscoelástico de movimientos moleculares.

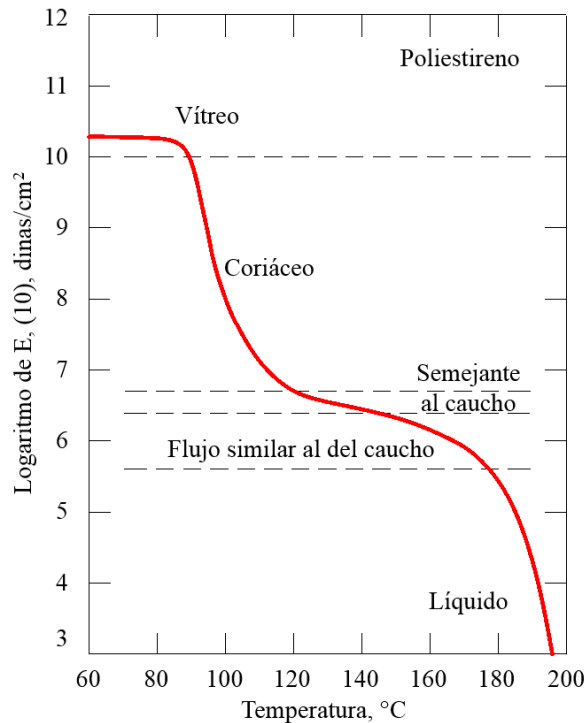


Figura 3.9 Diagrama de módulo elástico-temperatura para el poliestireno (Hayden *et al*, 1964).

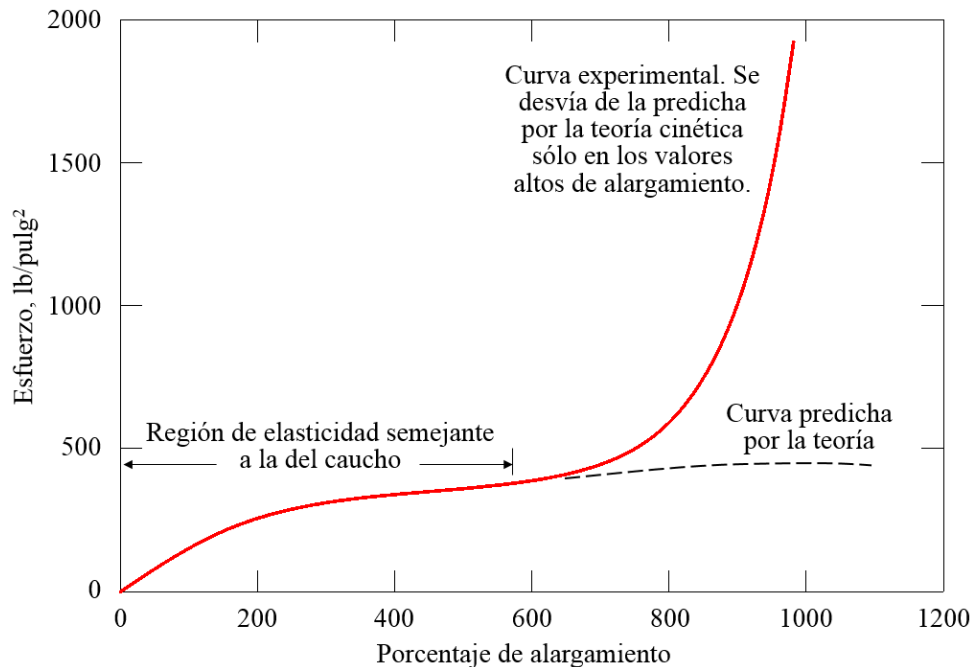
Los elastómeros son un tipo especial de polímeros, con una gran habilidad para extensión reversible y con características térmicas muy peculiares. Para entender las características del módulo elástico, la deformación bajo esfuerzo, la resistencia a la tensión, el límite de fluencia y el comportamiento bajo cargas de impacto en polímeros, es necesario considerar su composición y el método de producción (Hayden *et al*, 1964).

La mayoría de los materiales sometidos a un esfuerzo exhiben una región elástica inicial en la que la deformación es proporcional al esfuerzo aplicado; y si éste se elimina, el material recupera su longitud original. Por lo general, la magnitud de deformación elástica no excede el 1% y una deformación mayor introduce otro tipo de relación entre esfuerzo y deformación. La deformación está relacionada al movimiento elástico de los átomos fuera de sus posiciones de equilibrio.

Los materiales conocidos como elastómeros pueden soportar deformaciones reversibles hasta varios cientos de porcentaje. La Figura 3.10 muestra una curva típica de deformación de un elastómero. Se observan varias características únicas:

- El material es blando y su módulo elástico es bajo.
- Es posible producir deformaciones elevadas.
- La deformación es reversible.
- El material no es cristalino y su modificación ordinaria se presenta a una temperatura superior que la de transición vítrea.

Las primeras teorías moleculares atribuían el comportamiento de los elastómeros al hecho de que las moléculas estaban enroscadas cuando el material no estaba sometido a esfuerzo alguno y, por lo tanto, podían soportar alargamientos elevados al desenroscarse bajo la acción de un esfuerzo aplicado (Figura 3.10).



**Figura 3.10** Curva esfuerzo-deformación de un elastómero (Hayden *et al*, 1964).

La teoría cinética de elasticidad del hule, propuesta en 1935 por Meyer (Patterson, 2014), ayuda a explicar la presencia de deformaciones recuperables elevadas en elastómeros, así como los efectos térmicos para los que el modelo del resorte enrollado es inadecuado. La deformación de un elastómero en esta teoría es análoga a la compresión de un gas ideal. Una combinación de la primera y segunda ley de la termodinámica aplicada a deformaciones en tensión da origen a la ecuación 3.6.

$$dU = T dS + F dL - p dV \quad (3.6)$$

En dicha ecuación,  $F$  es la fuerza de tensión y  $L$  es la longitud del espécimen. En materiales semejantes al hule, el coeficiente de Poisson es aproximadamente 0.5; por lo tanto, el alargamiento en tensión no produce un cambio de volumen. Si un hule ideal se somete a una extensión isotérmica reversible ( $dU = 0$ ), la ecuación 3.7 predice la relación siguiente:

$$F = - T (\partial S / \partial L)_{T,V} \quad (3.7)$$

### 3.2 Estudios previos del comportamiento de cubos individuales de madera

La capacidad de carga de las celdas de deformación, constituidas por arreglos de cubos de madera, se ha estimado usualmente con base en los resultados de pruebas en cubos individuales de madera. Los diversos estudios realizados por distintos autores y los resultados obtenidos se presentan a continuación.

#### 3.2.1 González-Flores

González-Flores no publicó documentos donde mostrara los resultados obtenidos de pruebas de laboratorio en cubos de madera de caobilla. Sin embargo, en algunos proyectos de recimentación consideró una capacidad promedio de un cubo de 25 kN (2.5 t) (González-Flores, 1959). Años posteriores especificó que los cubos de madera tienen su límite elástico al aplicar 29 kN (3.0 t) (González-Flores, 1964).

#### 3.2.2 Salazar Resines

Salazar-Resines (1978) realizó pruebas de laboratorio en cubos individuales de madera de caobilla a deformación controlada (1 mm/min y 0.75 mm/min). Estas pruebas le permitieron concluir que para tener un funcionamiento eficiente, era necesario realizar un análisis estadístico de la madera y clasificar los arreglos de cubos de madera para una deformación más uniforme (Figura 3.11).

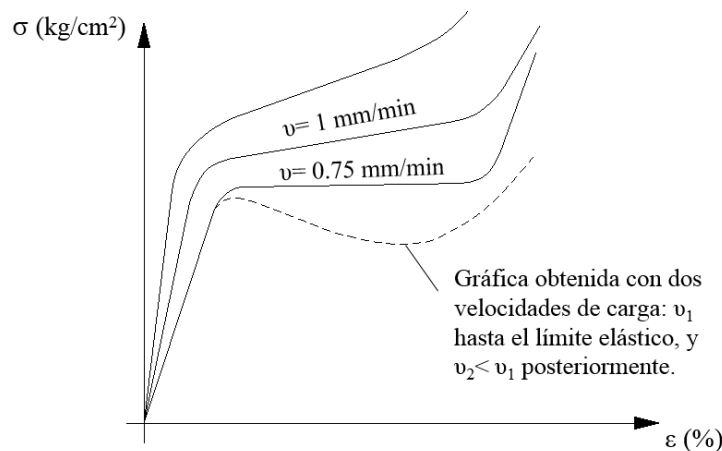


Figura 3.11 Resultados obtenidos en cubos de madera de caobilla (modificado de Salazar-Resines, 1978).

### 3.2.3 Aguilar y Rojas

Para estudiar el problema de la heterogeneidad de la madera, Aguilar y Rojas realizaron pruebas de compresión simple en 20 cubos individuales de madera de caoba elegidos al azar de un lote de 5000 cubos obtenidos de todas las zonas posibles de un tronco de madera (Aguilar y Rojas, 1990; Figura 3.12). Como resultado de dichas pruebas, se obtuvo que la madera se comporta como un sólido plástico perfecto al presentar una deformación entre el 10 y 30%. Asimismo establecieron una resistencia media en los cubos de 25 kN (2.5 t), con una desviación estándar de  $\pm 5$  kN (0.5 t).

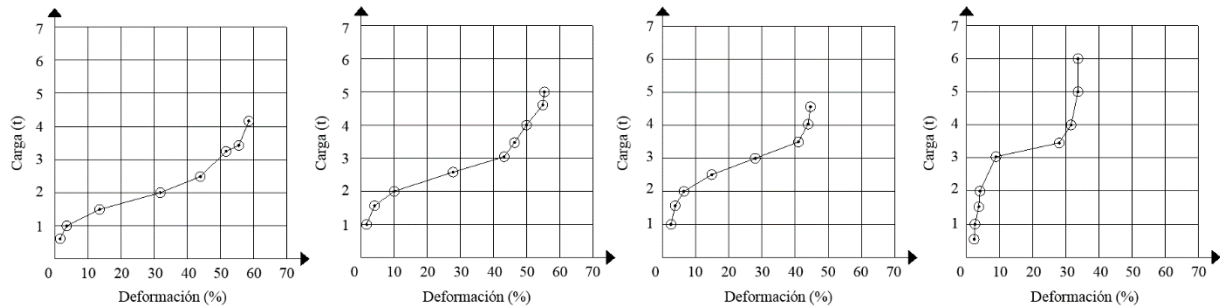


Figura 3.12 Resultados obtenidos en cubos de caoba (modificado de Aguilar y Rojas, 1990).

### 3.2.4 Santoyo y Segovia

Santoyo y Segovia (1995) presentaron resultados de ensayos en cubos individuales de madera de caobilla (empleados en Centrales Telefónicas), en los cuales se obtuvo que debido a la heterogeneidad de la madera la resistencia de los cubos varía de 25 a 34 kN (2.5 a 3.4 t). Además determinaron que un cubo en estado húmedo pierde la habilidad de plastificarse (Figura 3.13).

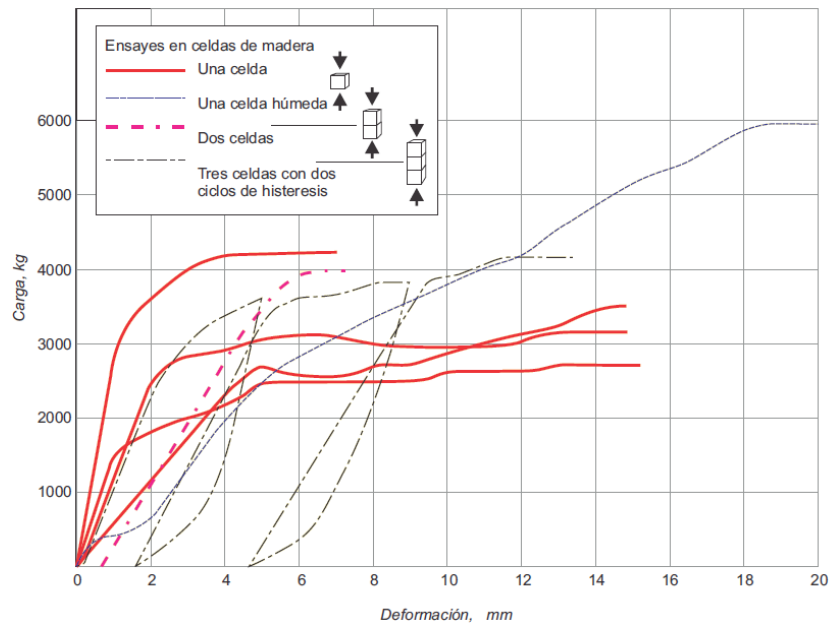


Figura 3.13 Comportamiento en cubos individuales de madera de caobilla (Santoyo y Alanís, 2013).

Además de los cubos de Centrales Telefónicas, también se ensayaron siete cubos obtenidos de la Catedral Metropolitana (Figura 3.14). Como resultado, obtuvieron que tres cubos se plastificaron al alcanzar una deformación de 0.15 cm. Los cubos húmedos presentaron una disminución en su resistencia a la compresión de aproximadamente 40% (respecto a los cubos secos).

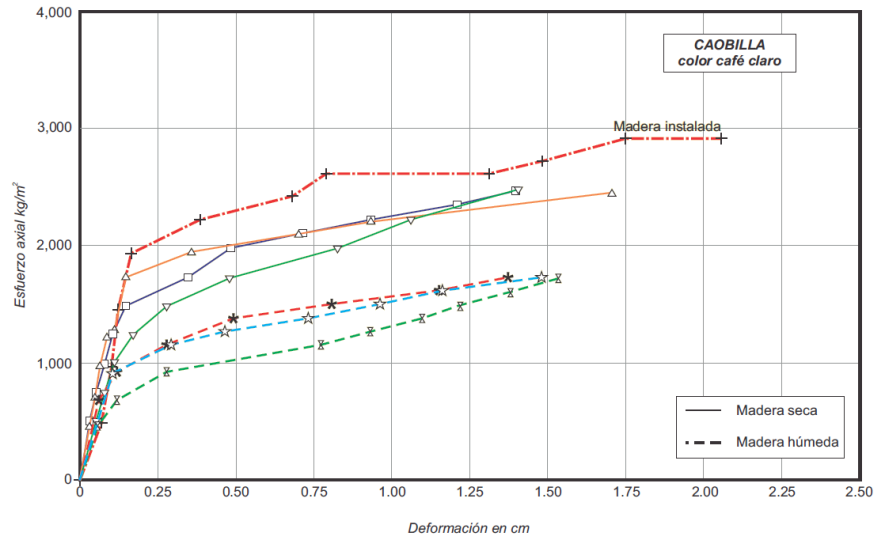


Figura 3.14 Comportamiento en cubos individuales de madera de caobilla (Santoyo y Alanís, 2013).





## 4 ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIALES EMPLEADOS COMO CELDAS DE DEFORMACIÓN

Con la finalidad de evaluar el comportamiento mecánico en los materiales empleados como celda de deformación en el sistema de pilotes de control, se efectuó una serie de ensayos de compresión simple con carga controlada (representando condiciones normales de operación) y con carga cíclica (representando condiciones sísmicas) en tres elementos: a) cubos de madera de caobilla (de forma individual y en conjunto), b) cilindros poliméricos, y c) tacones de neopreno. Dichos ensayos se realizaron en el Laboratorio de Ingeniería Estructural del Instituto de Ingeniería de la UNAM. El equipo empleado, las pruebas de laboratorio realizadas y los resultados obtenidos se describen a continuación.

### 4.1 Equipo e instrumentos de medición

Los ensayos de compresión simple se realizaron en la máquina universal hidráulica de ensayos mecánicos con capacidad máxima de 2452 kN (Figura 4.1), fabricada por Instron® - Satec™ (modelo 500 WHVL). La adquisición de datos se automatiza mediante un software que permite la captura de datos sincrónica en todos los canales (fuerza y desplazamiento) hasta 500 Hz.

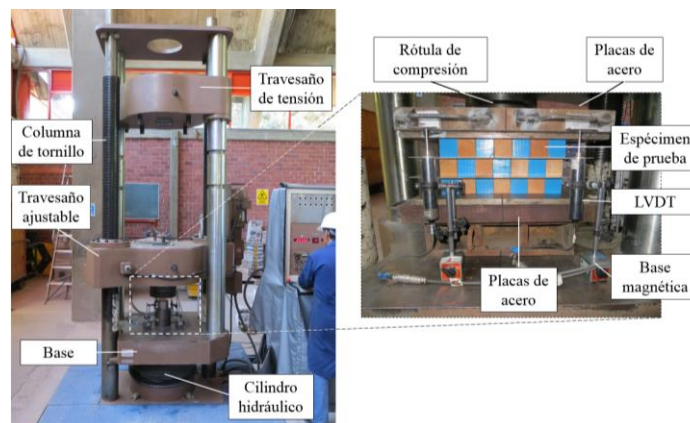


Figura 4.1 Máquina hidráulica de ensayo universal.

Para registrar la deformación de los elementos de estudio se emplearon dos modelos de sensores de desplazamiento marca Tokyo Sokki Kenkyujo Co. El modelo CDP-25 (LVDT con carrera de 25 mm) se utilizó en las pruebas de cubos individuales, mientras que el CDP-50 (LVDT con carrera de 50 mm) se empleó en las pruebas de cubos en conjunto (apilados y el arreglos), cilindros poliméricos y tacones de neopreno. Las características y dimensiones de los sensores de desplazamiento LVDT se muestran en la Figura 4.2.

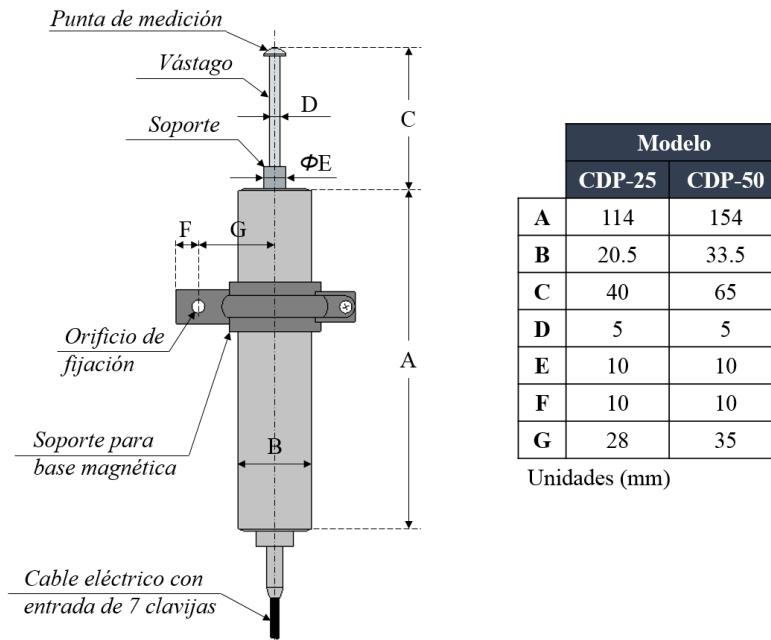


Figura 4.2 Características y dimensiones del sensor de desplazamiento (LVDT).

En cada prueba se utilizaron cuatro sensores de desplazamiento (del mismo modelo), ubicados en las esquinas de los elementos de estudio. En la Figura 4.3 se muestra la ubicación de los sensores de desplazamiento durante las pruebas de carga.

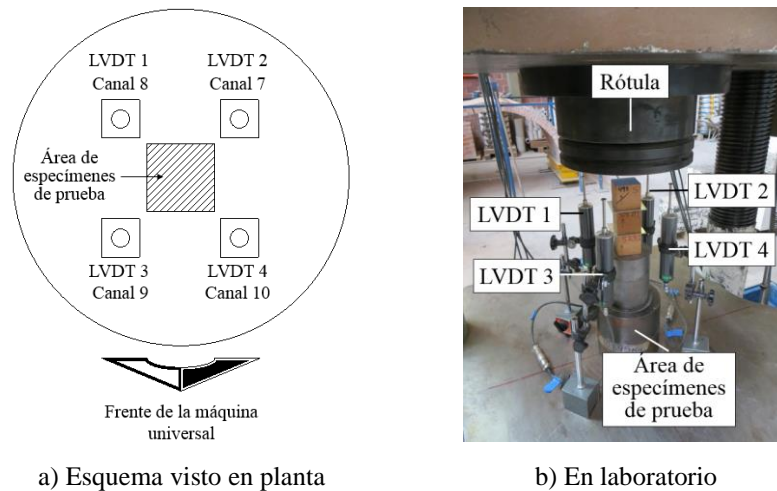


Figura 4.3 Ubicación de los sensores de desplazamiento (LVDT).

Además de los sensores de desplazamiento, se emplearon diversas placas de acero tanto en la parte superior como en la inferior de los elementos de estudio. La finalidad de las placas superiores fue distribuir uniformemente la carga en el elemento de estudio, mientras que las placas inferiores permitieron ajustar la altura en los elementos de estudio para colocar los LVDT que registraron los desplazamientos generados durante la prueba (Figura 4.4).

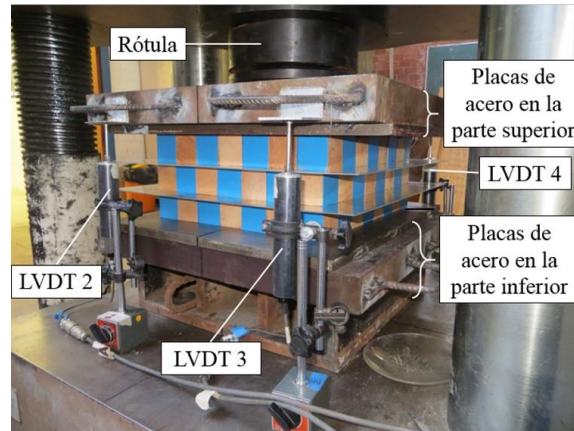


Figura 4.4 Placas de acero empleadas en los ensayos de laboratorio.

## 4.2 Elementos de estudio y pruebas realizadas

Para analizar el comportamiento mecánico de los tres materiales empleados como celdas de deformación en el sistema de pilotes de control, se realizaron 68 pruebas de compresión simple con carga controlada, de las cuales 51 correspondieron a cubos de madera de caobilla (individuales y en arreglos), 12 a cilindros poliméricos y 5 a tacones de neopreno. Asimismo se realizaron 14 pruebas con carga cíclica únicamente en: a) arreglos de tres niveles de  $3 \times 3$  cubos de madera (cinco ensayos) y b) cilindros poliméricos (nueve ensayos).

### 4.2.1 Cubos de madera

Los cubos que conforman las celdas de deformación son de madera de caobilla (*Swietenia humilis* Zucc., Meliaceae) que se obtiene de un árbol de 15 a 20 m de altura, originario de las zonas de bosque seco tropical mesoamericano del Pacífico (Gordon *et al.*, 2003). Se sabe que las propiedades de la caobilla son similares a las de la caoba (Santoyo y Alanís, 2013), sin embargo, no existe información documentada referente a sus propiedades mecánicas. Estas propiedades se determinaron experimentalmente como parte de los resultados de esta investigación (los datos se presentan en el inciso 4.2.1.7).

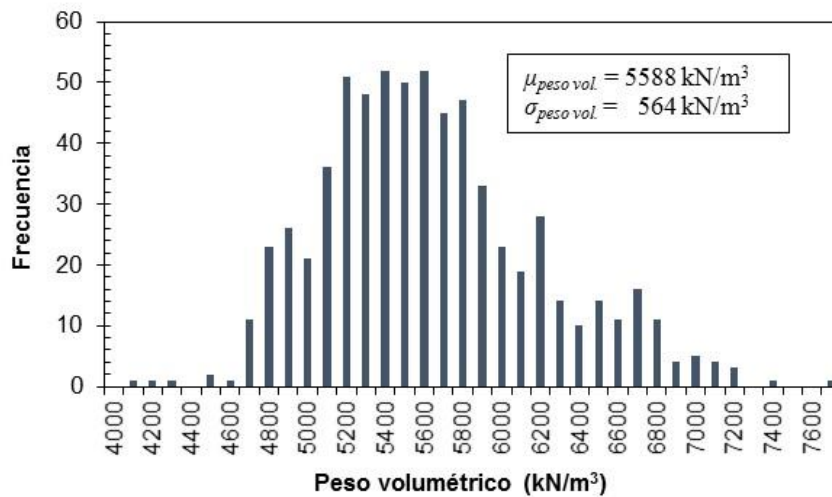
Para analizar el comportamiento mecánico de este tipo de madera, se realizaron 56 pruebas (Tabla 4.1), para las que se requirieron un total de 876 cubos de madera de caobilla. Los cubos tienen las mismas dimensiones (5 cm de lado), pero presentan una variación considerable en su peso volumétrico, resultando la mayor de  $7662 \text{ kN/m}^3$  y la menor de  $4064 \text{ kN/m}^3$ .

Por lo anterior, se efectuó un análisis estadístico del peso volumétrico de 665 cubos de madera de caobilla de 5 cm de lado, de una muestra de 1500 cubos, de los cuales se obtuvo el histograma

de pesos volumétrico de la Figura 4.5. Como resultado del análisis, se estimó el peso volumétrico medio de los cubos  $\mu_{\text{peso vol.}} = 5588 \text{ kN/m}^3$ , con base en la cual los cubos se clasificaron en dos tipos: pesados (con peso volumétrico mayor o igual que  $\mu_{\text{peso vol.}} = 5588 \text{ kN/m}^3$ ) y ligeros (con peso volumétrico menor que  $\mu_{\text{peso vol.}} = 5588 \text{ kN/m}^3$ ).

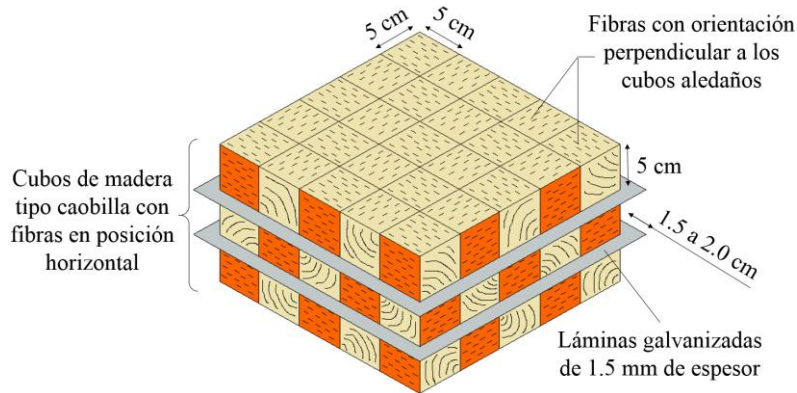
**Tabla 4.1 Especificaciones de las pruebas de laboratorio con cubos de madera.**

No.	Descripción	Láminas galvanizadas	No. de niveles	No. de cubos por nivel	No. de cubos por prueba	Velocidad de carga (kN/min)	No. de ensayos	Número total de cubos
1	Cubos individuales (fibras en posición vertical)	---	1	1	1	5	5	5
2	Cubos individuales (fibras en posición horizontal)	---	1	1	1	5	10	10
3	Cubos individuales (húmedos)	---	1	1	1	5	5	5
4	Cubos individuales (sumergidos)	---	1	1	1	5	4	4
5	Cubos apilados (condición seca)	Si	3	1	3	5	5	15
6	Cubos apilados (húmedos)	Si	3	1	3	5	3	9
7	Arreglo de 3×3 cubos	-	1	9	9	20	5	45
8	Arreglo de 3×3 cubos	Si	3	9	27	20	5	135
9	Arreglo de 3×3 cubos	No	3	9	27	20	3	81
10	Arreglo de 3×3 cubos (cíclica)	Si	3	9	27	20	5	135
11	Arreglo de 4×4 cubos	Si	3	16	48	20	3	144
12	Arreglo de 5×4 cubos	Si	3	20	60	20	2	120
13	Arreglo de 8×7 cubos	Si	3	56	168	20	1	168
<b>Total =</b>							56	876



**Figura 4.5 Histograma de peso volumétrico de cubos de caobilla.**

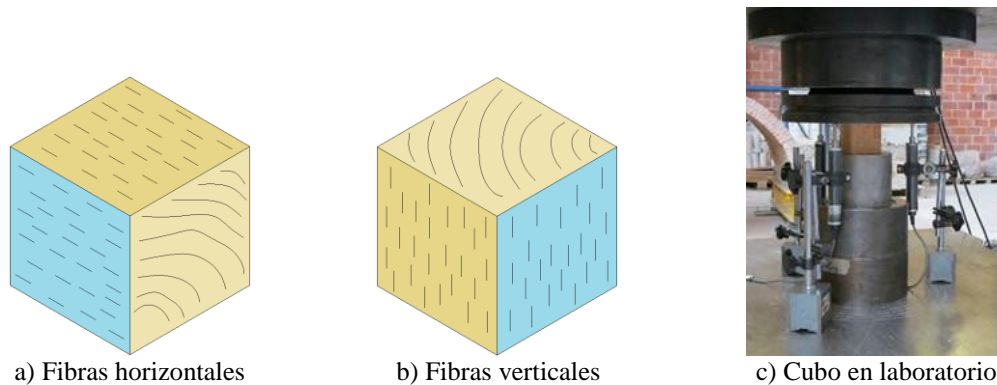
Con base en la clasificación de los cubos, se conformaron distintos arreglos: con cubos pesados, ligeros y una combinación de ellos (Figura 4.4). Fue necesario también emplear láminas galvanizadas de 1.5 mm de espesor en arreglos de tres niveles con las siguientes dimensiones: a) 20×20 cm (para arreglos de 3×3 cubos), b) 25×25 cm (para arreglos de 4×4 cubos), c) 30×35 cm (para arreglos de 5×4 cubos), y d) 45×40 cm (para arreglos de 8×7 cubos).



**Figura 4.6** Acomodo de los cubos de madera de caobilla en los arreglos de tres niveles.

#### 4.2.1.1 Cubos individuales

Se efectuaron quince pruebas en cubos individuales en condición seca para conocer la relación que tiene el esfuerzo de fluencia con el peso volumétrico de los cubos y obtener sus propiedades mecánicas. Inicialmente se ejecutaron diez pruebas con fibras en posición horizontal, y posteriormente, cinco en posición vertical (Figuras 4.7a y 4.7b). El cambio de posición se realizó para conocer el comportamiento mecánico y el tipo de falla que presentan los cubos debido a la anisotropía de la madera. La velocidad de carga en las quince pruebas fue de 5 kN/min, con la finalidad de aplicar carga estática. Asimismo se emplearon cuatro sensores de desplazamiento con carrera de 25 mm colocados alrededor del cubo a ensayar (Figuras 4.7c).



**Figura 4.7** Posición de las fibras en los ensayos de laboratorio.

En la Figura 4.8 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de cubos individuales en estado seco, tanto para fibras en posición horizontal como vertical. En dicha figura se aprecia que los cubos con fibras en posición vertical presentan un esfuerzo de fluencia mayor respecto a los cubos con fibras en sentido horizontal. Sin embargo, todos los cubos con fibras verticales presentan un esfuerzo máximo (pico) y después un esfuerzo residual, resultado de una falla frágil en los cubos. En los cubos con fibras en posición horizontal, se observa un comportamiento mecánico elastoplástico, el cual ocasiona en los cubos una falla de tipo dúctil. En ambos casos se distingue que el peso volumétrico  $\gamma$  de los cubos está relacionado directamente con el esfuerzo de fluencia  $\sigma_f$ , esto es, a mayor peso volumétrico, mayor esfuerzo de fluencia.

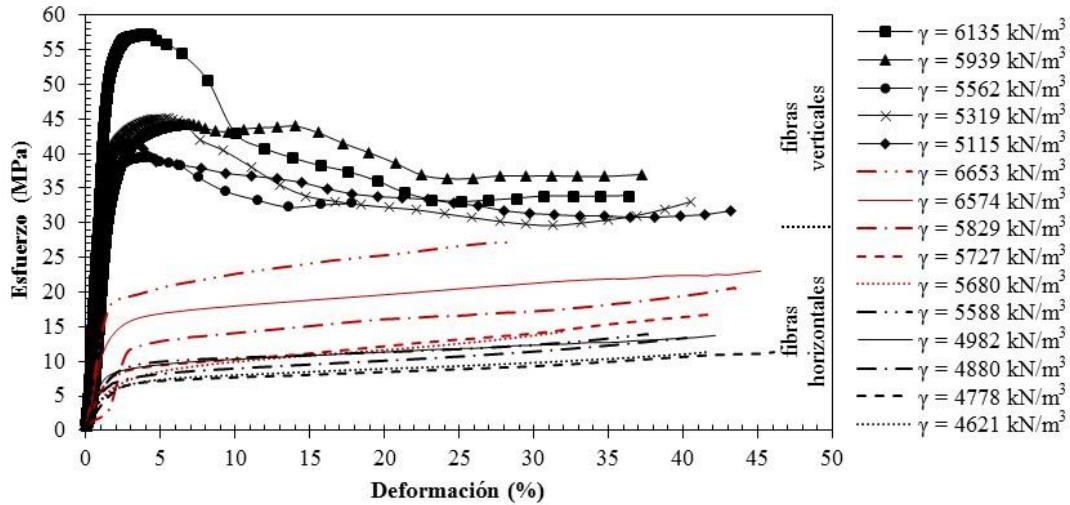


Figura 4.8 Comportamiento mecánico en cubos individuales de madera en estado seco.

Los resultados obtenidos en cubos con fibras en posición horizontal (Tabla 4.2) indican que un cubo con peso volumétrico de  $\gamma = 4621 \text{ kN/m}^3$  alcanza su punto de fluencia a  $\sigma_f = 5.3 \text{ MPa}$ , mientras que un cubo con mayor peso volumétrico ( $\gamma = 6653 \text{ kN/m}^3$ ) presenta su punto de fluencia a  $\sigma_f = 18.5 \text{ MPa}$ . Un cubo con peso volumétrico medio  $\gamma = 5588 \text{ kN/m}^3$  (resultado obtenido del análisis estadístico), presenta un esfuerzo de fluencia  $\sigma_f = 8.5 \text{ MPa}$ . Esto indica que el peso volumétrico de los cubos y el esfuerzo de fluencia tienen una relación directa o de proporcionalidad.

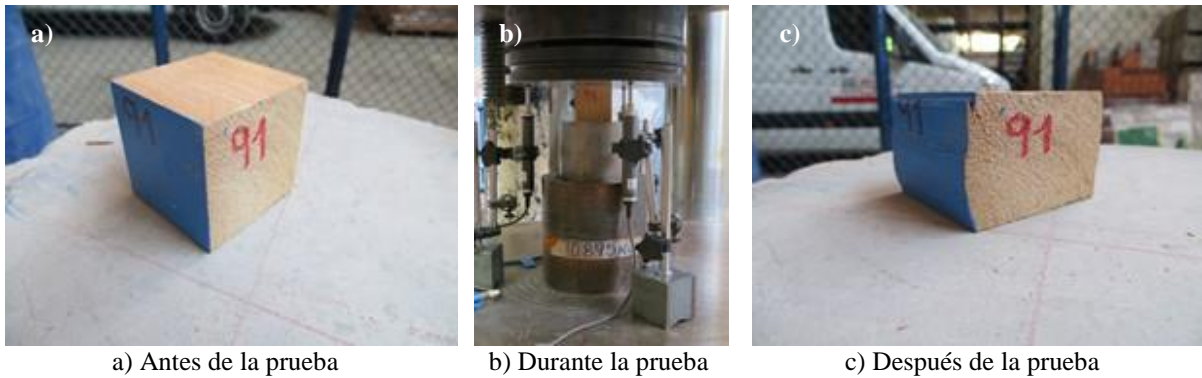
Los cubos con fibras en posición vertical presentan el mismo patrón (Tabla 4.2). Un cubo cuyo peso volumétrico es  $\gamma = 5115 \text{ kN/m}^3$  presenta un esfuerzo de fluencia  $\sigma_f = 39 \text{ MPa}$ , mientras que un cubo con un peso volumétrico  $\gamma = 6135 \text{ kN/m}^3$  (mayor que el cubo anterior), alcanza su esfuerzo de fluencia a  $\sigma_f = 53.2 \text{ MPa}$ . Esto indica que en posición vertical, el esfuerzo de fluencia y el peso volumétrico de los cubos son proporcionales.

Tabla 4.2 Resultados obtenidos en cubos individuales en estado seco.

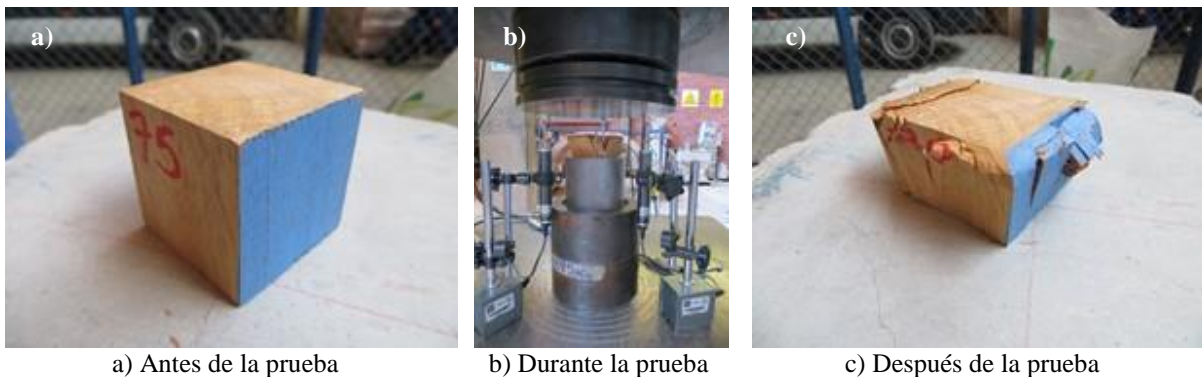
Cubos con fibras en posición horizontal							Cubos con fibras en posición vertical							
Peso volumétrico (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_f$ (MPa)	$\epsilon_f$ (%)	$\sigma_m$ (MPa)	$\epsilon_m$ (%)	$E_e$ (MPa)	$E_p$ (MPa)	Peso volumétrico (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_f$ (MPa)	$\epsilon_f$ (%)	$\sigma_m$ (MPa)	$\epsilon_m$ (%)	$\sigma_r$ (MPa)	$\epsilon_r$ (%)	$E_e$ (MPa)
4621	5.3	1.5	11.3	41.5	477.3	9.1	5115	39.0	1.6	41.5	3.4	31.7	43.2	3473.2
4778	6.3	2.4	11.4	46.1	298.9	9.8	5319	40.3	1.8	45.1	5.6	33.1	40.5	3470.0
4880	6.8	1.8	13.3	40.2	529.6	11.7	5562	36.6	1.7	39.5	4.2	32.8	17.8	3411.0
4982	8.1	1.7	13.8	42.2	623.4	10.9	5939	37.9	2.3	44.3	6.5	37.0	36.4	2793.2
5588	8.5	2.1	14.0	37.5	503.6	8.2	6135	53.2	1.8	57.3	3.8	34.0	36.3	4988.6
5680	6.2	1.8	14.3	32.0	449.0	17.6								
5727	7.9	1.9	16.9	42.3	536.1	20.0								
5829	12.0	3.2	20.6	43.5	802.9	18.9								
6574	14.0	1.8	23.0	45.2	1035.8	16.9								
6653	18.5	1.8	27.3	28.0	1386.9	33.7								

Nota:  $\sigma_f$  = esfuerzo de fluencia,  $\epsilon_f$  = deformación asociada al esfuerzo de fluencia,  $\sigma_m$  = esfuerzo máximo,  $\epsilon_m$  = deformación asociada al esfuerzo máximo,  $\sigma_r$  = esfuerzo residual,  $\epsilon_r$  = deformación asociada al esfuerzo residual,  $E_e$  = módulo tangente en la rama elástica,  $E_p$  = módulo tangente en la rama plástica.

Los cubos con fibras en posición horizontal presentan una falla dúctil y los cubos en posición vertical presentan una falla frágil (Figura 4.8). Lo anterior puede observarse físicamente en las Figuras 4.9 y 4.10, respectivamente. En los sistemas de control, lo apropiado es que los cubos se compriman para permitir el descenso de la estructura, de forma que la losa permanezca en contacto con el suelo. La falla dúctil permite absorber mejor los desplazamientos verticales generados por el descenso de la estructura, lo que resulta más apropiado para este tipo de sistema de control, en lugar de las fallas frágiles que ocurren para cubos colocados con fibras en posición vertical. Por lo anterior, los cubos deben colocarse con fibras en posición horizontal.



**Figura 4.9 Proceso de deformación en un cubo con fibras en posición horizontal.**



**Figura 4.10 Proceso de deformación en un cubo con fibras en posición vertical.**

Los resultados obtenidos en cubos individuales, indican que hay una gran variación en el esfuerzo de fluencia de los cubos, y considerar estos resultados para diseñar la capacidad nominal de un arreglo de cubos genera una sobrestimación o subestimación en la carga nominal del arreglo. Por ello, lo recomendable es obtener los parámetros para estimar la carga nominal de las celdas de deformación a partir de arreglos de cubos de madera.

En las pruebas posteriores a las descritas previamente (en cubos húmedos, apilados y en arreglos de tres niveles), la posición de las fibras se mantuvo horizontal. Lo anterior, debido a que en la práctica profesional es recomendable que las celdas de deformación se conformen por cubos con fibras en posición horizontal.



Además de las pruebas en cubos en estado seco, se realizaron diez pruebas en cubos húmedos para analizar la influencia que tiene el agua en el comportamiento mecánico de la madera. Lo anterior debido a que en la práctica las celdas de deformación pueden estar en un ambiente húmedo o incluso inundado (por falta de mantenimiento). Para analizar el efecto de la presencia de agua, se introdujeron cinco cubos al cuarto húmedo y cinco más fueron sumergidos en un recipiente con agua, durante 26 días en ambos casos, para posteriormente ensayarlos.

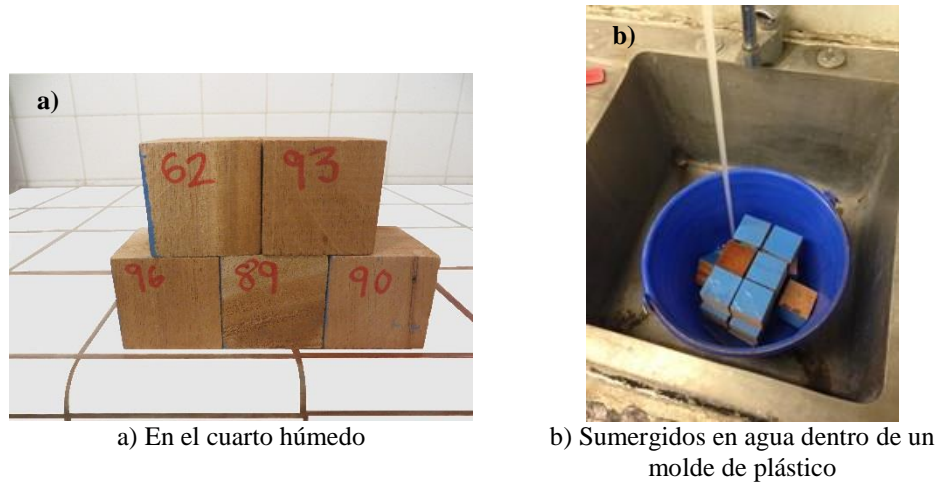


Figura 4.11 Cubos individuales húmedos y sumergidos.

Los resultados de las pruebas en cubos individuales húmedos y sumergidos indican una reducción en el esfuerzo de fluencia  $\sigma_f$  respecto a los resultados obtenidos en cubos en estado seco. En la Figura 4.12a se aprecia que un cubo con un peso volumétrico inicial de  $5578 \text{ kN/m}^3$  que permaneció en el cuarto húmedo durante 26 días, presenta un esfuerzo de fluencia 51% menor al obtenido en un cubo seco con peso volumétrico similar ( $\gamma = 5588 \text{ kN/m}^3$ ).

En cuanto a los cubos que estuvieron sumergidos en agua, también presentan una reducción en su esfuerzo de fluencia. En la Figura 4.12b se aprecia que un cubo seco cuyo peso volumétrico es  $\gamma = 6653 \text{ kN/m}^3$ , presenta un esfuerzo de fluencia  $\sigma_f = 18.5 \text{ MPa}$ , mientras que un cubo con peso volumétrico similar ( $\gamma = 6636 \text{ kN/m}^3$ ), cuyo contenido de agua es  $w = 36.2\%$ , presenta una reducción de aproximadamente un 52% en su esfuerzo de fluencia, siendo éste de  $\sigma_f = 8.9 \text{ MPa}$ .

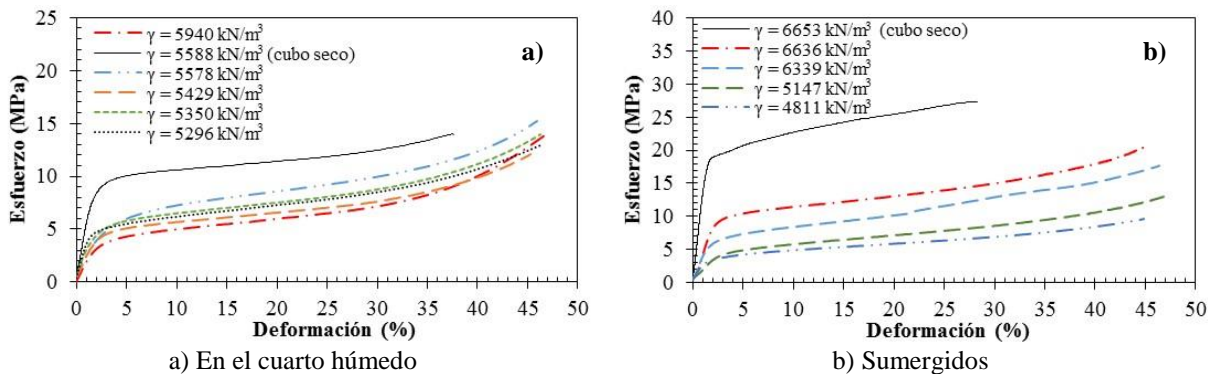


Figura 4.12 Comportamiento mecánico en cubos que estuvieron: a) en el cuarto húmedo, y b) sumergidos.

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas en cubos individuales húmedos y sumergidos a partir de las curvas esfuerzo-deformación de la Figura 4.12. En dicha tabla se observa que el contenido de agua  $w$  en cubos húmedos no depende del peso volumétrico de los cubos, ya que el agua la adquirieron mediante la condensación. En el caso de los cubos sumergidos, el cubo que tiene mayor contenido de agua es el de menor peso volumétrico y conforme aumenta el peso volumétrico de los cubos, menor es el contenido de agua.

**Tabla 4.3 Resultados obtenidos en cubos individuales húmedos.**

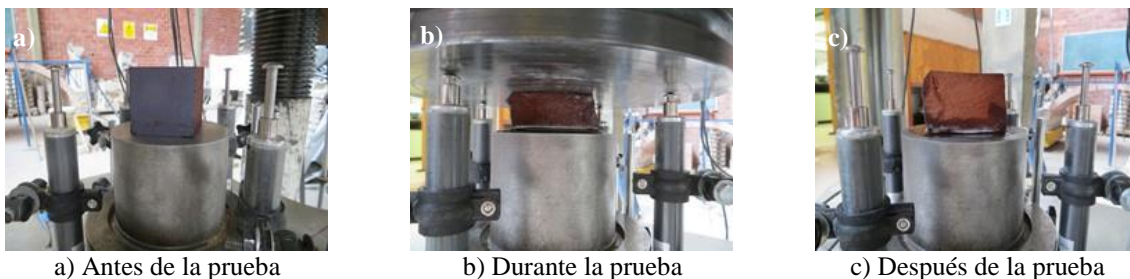
Cubos	Peso Volumétrico (kN/m <sup>3</sup> )	$w$ (%)	$\sigma_f$ (MPa)	$\epsilon_f$ (%)	$\sigma_m$ (MPa)	$\epsilon_m$ (%)	$E_e$ (MPa)	$E_p$ (MPa)
Húmedos	5296	44.0	4.6	1.8	13.0	46.3	326.9	11.1
	5350	36.7	4.3	1.9	14.0	46.3	293.5	10.0
	5429	43.6	4.1	2.2	12.1	45.2	225.6	9.3
	5578	35.4	4.2	2.2	15.2	46.0	218.2	12.9
	5940	49.9	3.4	2.3	14.2	47.1	187.2	10.7
Sumergidos	4811	58.7	3.3	1.7	9.7	44.8	240.6	10.3
	5147	47.6	4.1	2.8	13.2	47.1	170.7	13.8
	6339	42.4	6.1	2.2	17.6	46.4	340.8	17.7
	6636	36.2	8.9	2.5	20.5	44.8	497.5	16.3

Nota:  $w$  = contenido de agua,  $\sigma_f$  = esfuerzo de fluencia,  $\epsilon_f$  = deformación asociada al esfuerzo de fluencia,  $\sigma_m$  = esfuerzo máximo,  $\epsilon_m$  = deformación asociada al esfuerzo máximo,  $E_e$  = módulo tangente en la rama elástica,  $E_p$  = módulo tangente en la rama plástica.

En las Figuras 4.13 y 4.14 se muestra el proceso de deformación de los cubos, tanto en cubos individuales que estuvieron durante 26 días en el cuarto húmedo, y otros más sumergidos en un recipiente de plástico. Se distingue que a diferencia de los cubos en estado seco, al quitar la carga los cubos húmedos tienen una recuperación respecto a su altura inicial de aproximadamente 30%. Esto indica que el agua modifica su tamaño y también reduce la resistencia a la compresión de los cubos.



**Figura 4.13 Proceso de deformación en un cubo que estuvo en el cuarto húmedo.**



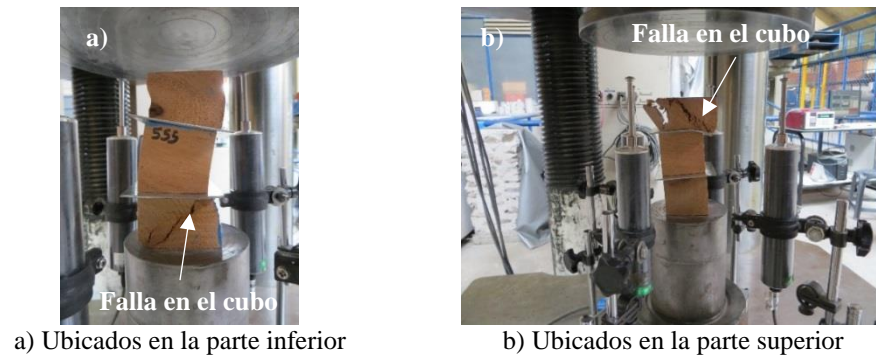
**Figura 4.14 Proceso de deformación en un cubo que estuvo sumergido en agua.**

#### 4.2.1.2 Cubos apilados

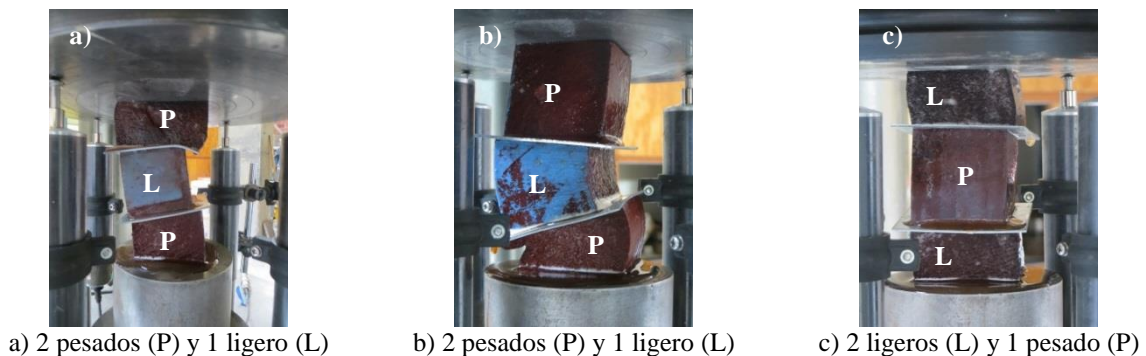
Se ejecutaron cinco ensayos en tres cubos apilados en estado seco y tres ensayos en cubos en estado húmedo, ambos con láminas galvanizadas. Estas pruebas se realizaron inicialmente con cubos pesados, posteriormente con cubos ligeros, y finalmente con una combinación de ellos (en el caso de los húmedos, todos fueron combinados). La finalidad fue observar los patrones de deformación de los cubos con respecto a su peso volumétrico, asimismo analizar si los tres niveles de cubos alcanzan una disminución de 8 a 9 cm en su altura inicial de acuerdo con lo señalado por González-Flores (1960) y Aguirre (1991).

Los resultados en los ensayos con cubos secos indican que los cubos con mayor deformación vertical son aquellos con menor peso volumétrico del conjunto. También se aprecia que colocar de esta forma los cubos (no contiguos en un arreglo de cubos) propicia una deformación no uniforme en ellos y puede provocar más rápido la falla de los cubos con menor peso volumétrico en el arreglo (sean pesados o ligeros). Por ejemplo, en la Figura 4.15a el arreglo está constituido por tres cubos pesados, de los cuales el cubo que alcanza la falla es el de menor peso volumétrico. Asimismo en la Figura 4.15b el arreglo está formado por dos cubos pesados y uno ligero, de los cuales este último es el alcanza la falla.

En los cubos húmedos apilados no se cumple el mismo patrón que en los cubos apilados secos. Como se observa en la Figura 4.16, un cubo pesado presenta mayor deformación que un cubo ligero, independientemente del lugar donde se ubique (sea en la parte superior o inferior).



**Figura 4.15** Falla en cubos con menor peso volumétrico.



**Figura 4.16** Deformación en los cubos apilados húmedos.

En cuanto al comportamiento mecánico que presentan los cubos apilados en estado seco (Figura 4.17a), se observa que en dos de ellos hay una reducción brusca en el esfuerzo, la cual se atribuye a la falla en uno de sus cubos. Los esfuerzos de fluencia resultantes oscilan entre  $\sigma_f = 5.6$  y  $9.9$  MPa (1.4 y 2.5 t), y varían de acuerdo con el peso volumétrico de los cubos. En los resultados también se observa que el esfuerzo de fluencia en los cubos apilados es menor que el obtenido en un cubo individual. Esto se debe a que la falla generada en algunos de los cubos apilados reduce de manera importante el esfuerzo de fluencia del conjunto. Por lo anterior, no es recomendable que los cubos en los arreglos de los sistemas de control se coloquen separados.

El comportamiento mecánico obtenido en cubos apilados en estado húmedo (Figura 4.17b), indica una disminución en el esfuerzo de fluencia respecto al obtenido en cubos secos (Figura 4.17a). Por ejemplo, los arreglos en estado húmedo de dos cubos ligeros y uno pesado, muestran un esfuerzo de fluencia con una reducción de hasta 52% con respecto a los arreglos en estado seco (Tabla 4.4).

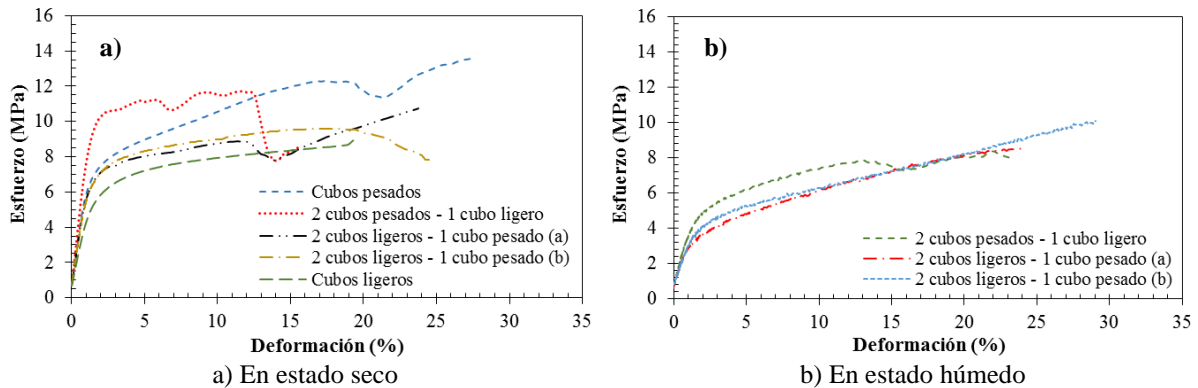


Figura 4.17 Comportamiento mecánico en cubos apilados.

La deformación vertical máxima  $\varepsilon_u$  del conjunto de cubos apilados en estado seco y húmedo (Tabla 4.4) es de 27 y 29% (equivalente a 4.1 y 4.4 cm) respectivamente. Ninguno de los ensayos realizados en los cubos apilados alcanza una deformación de 30%. Con ello se demuestra que es errónea la idea de que tres niveles de cubos permiten una deformación de 8 o 9 cm.

Tabla 4.4 Resultados obtenidos en cubos apilados.

Condicio n	Cubos	$\sigma_f$ (MPa)	$\varepsilon_f$ (%)	$\sigma_m$ (MPa)	$\varepsilon_m$ (%)	$\sigma_u$ (MPa)	$\varepsilon_u$ (%)	$E_e$ (MPa)	$E_p$ (MPa)
Seca	Pesados	7.1	1.6	13.6	27.3	13.6	27.3	565.2	33.1
	2 Pesados y 1 ligero	9.9	1.7	11.7	11.5	8.6	15.8	744.4	13.4
	2 Ligeros y 1 pesado (a)	6.9	1.7	10.7	23.8	10.7	23.8	516.6	14.5
	2 Ligeros y 1 pesado (b)	6.8	1.7	9.6	16.7	7.8	24.5	525.1	11.5
	Ligeros	5.6	1.8	9.0	19.6	9.0	19.6	383.4	8.6
Húmeda*	2 Pesados y 1 ligero	4.6	1.8	8.3	22.0	8.0	23.2	319.0	22.4
	2 Ligeros y 1 pesado	3.3	1.5	8.5	23.9	8.5	23.9	272.6	24.6
	2 Ligeros y 1 pesado	4.1	2.0	10.1	29.0	10.1	29.0	220.1	20.1

\* Nota: los cubos pesados y ligeros tienen un contenido de agua medio de 63 y 83% respectivamente.  $\sigma_f$  = esfuerzo de fluencia,  $\varepsilon_f$  = deformación asociada al esfuerzo de fluencia,  $\sigma_m$  = esfuerzo máximo,  $\varepsilon_m$  = deformación asociada al esfuerzo máximo,  $\sigma_u$  = esfuerzo asociado a la deformación última,  $\varepsilon_u$  = deformación última,  $E_e$  = módulo tangente en la rama elástica,  $E_p$  = módulo tangente en la rama plástica.

#### 4.2.1.3 Arreglos de un nivel

Para analizar el comportamiento mecánico de los cubos en conjunto, se realizaron cinco ensayos en arreglos de un solo nivel de  $3 \times 3$  cubos. Inicialmente se ensayó un arreglo con cubos pesados, posteriormente dos arreglos con cubos ligeros y finalmente dos arreglos con cubos combinados. Todos los ensayos fueron a carga controlada de 20 kN/min (2 t/min).

En la práctica profesional, lo usual es obtener la capacidad nominal de un arreglo multiplicando el número de cubos de un nivel por la carga de fluencia de un cubo (25 y 29 kN por cubo, ver inciso 3.2). Considerando ambos valores y un arreglo de  $3 \times 3$  cubos, se obtiene como resultado un esfuerzo de fluencia de  $\sigma_f = 9.8$  y 11.8 MPa, respectivamente (transformando el valor de carga a esfuerzo). Como resultado de los ensayos efectuados en esta investigación, se obtiene un esfuerzo de fluencia inferior al considerado en la práctica ( $\sigma_f = 9.8$  y 11.8 MPa). En la Figura 4.18, se aprecia que los esfuerzos de fluencia obtenidos en los arreglos son:  $\sigma_f = 9.4$  MPa en el arreglo con cubos pesados,  $\sigma_f = 7.6$  y 7.3 MPa en cubos combinados y  $\sigma_f = 6.4$  MPa en cubos ligeros.

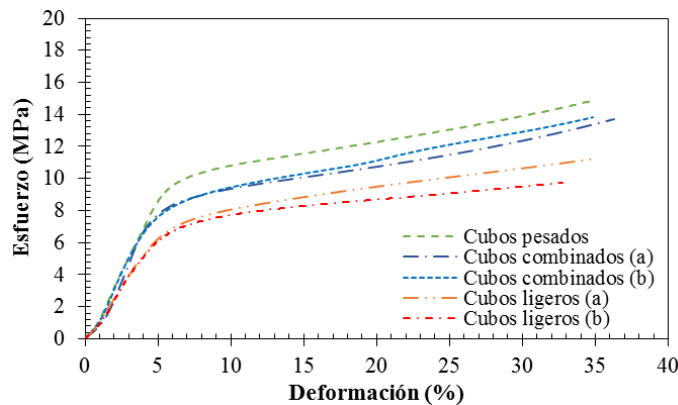


Figura 4.18 Comportamiento mecánico en arreglos de un solo nivel de  $3 \times 3$  cubos de madera.

En la Tabla 4.5 se observa que la deformación vertical máxima media en los arreglos es de  $\epsilon_m = 35\%$  (aproximadamente 1.75 cm) de la altura total del conjunto. Asimismo se observa que el arreglo conformado por cubos pesados es el que presenta mayor esfuerzo de fluencia, mientras que el arreglo de cubos ligeros presenta el menor esfuerzo de fluencia. Esto ratifica el hecho de que el esfuerzo de fluencia tiene una relación directa con el peso volumétrico de los cubos.

Tabla 4.5 Resultados obtenidos en un arreglo de  $3 \times 3$  cubos de un solo nivel.

Cubos	$\sigma_f$ (MPa)	$\epsilon_f$ (%)	$\sigma_m$ (MPa)	$\epsilon_m$ (%)	$E_e$ (MPa)	$E_p$ (MPa)
Pesados	9.4	5.8	14.9	35.0	191.3	15.7
Combinados (a)	7.6	4.7	13.7	36.3	224.5	14.9
Combinados (b)	7.3	4.6	13.8	34.8	200.8	17.9
Ligeros (a)	6.4	5.3	11.2	35.0	146.1	12.9
Ligeros (b)	6.3	5.3	9.7	32.7	145.1	9.0

Nota:  $\sigma_f$  = esfuerzo de fluencia,  $\epsilon_f$  = deformación asociada al esfuerzo de fluencia,  $\sigma_m$  = esfuerzo máximo,  $\epsilon_m$  = deformación asociada al esfuerzo máximo,  $E_e$  = módulo tangente en la rama elástica,  $E_p$  = módulo tangente en la rama plástica.

En la Figura 4.19, se observa que los primeros cubos en deformarse son los de menor peso volumétrico. Esto indica que el peso volumétrico no sólo está asociado al esfuerzo de fluencia, sino también a la deformación.



Figura 4.19 Proceso de deformación en un arreglo de 3×3 cubos de un nivel.

#### 4.2.1.4 Arreglos de tres niveles

Se realizaron ocho ensayos en arreglos de tres niveles de 3×3 cubos de madera, cinco con láminas galvanizadas entre los niveles de los cubos y tres sin ellas, con la finalidad de estudiar: a) el comportamiento mecánico de los cubos en conjunto con respecto a su peso volumétrico, y b) la influencia que tienen las láminas galvanizadas en la carga de fluencia. Los arreglos se clasificaron en tres tipos: a) los conformados por cubos pesados, b) aquellos constituidos por cubos ligeros, y c) los formados por una combinación de ellos. Todos los arreglos se ensayaron a una velocidad de carga de 20 kN/min (2 t/min).

Los resultados en los arreglos de tres niveles con lámina indican que el arreglo que presenta mayor esfuerzo de fluencia  $\sigma_f$  es el conformado por cubos pesados. En la Figura 4.20a, se muestra que los arreglos que solamente tienen cubos pesados alcanzan un esfuerzo de fluencia de  $\sigma_f = 9.5$  MPa, los combinados (con cubos pesados y ligeros) alcanzan  $\sigma_f = 7.6$  y 7.8 MPa y los que sólo tienen cubos ligeros  $\sigma_f = 6.9$  MPa. Comparando estos resultados con los arreglos de un solo nivel de 3×3 cubos (Figura 4.20b), se observa que los esfuerzos de fluencia son muy similares, lo único que incrementa son los módulos tangentes en la rama elástica  $E_e$  y plástica  $E_p$  como se aprecia en la Tabla 4.6.

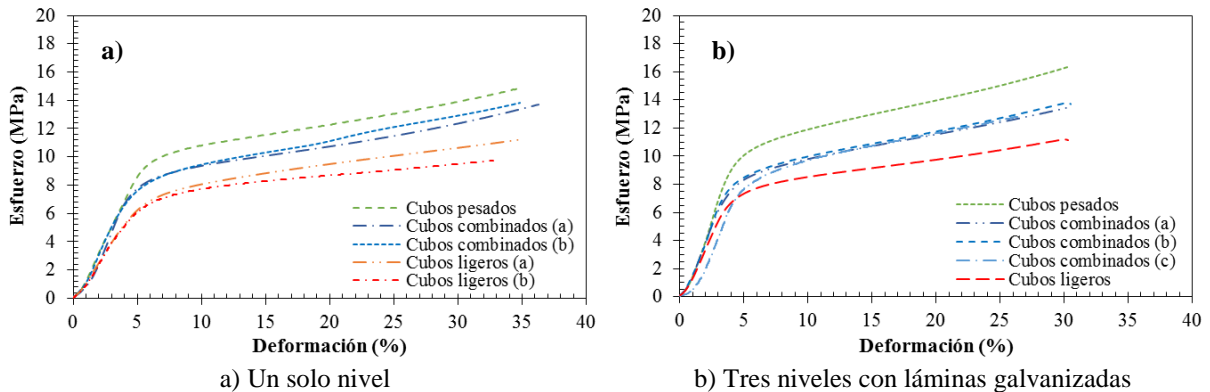


Figura 4.20 Comportamiento mecánico en arreglos de 3×3 cubos.

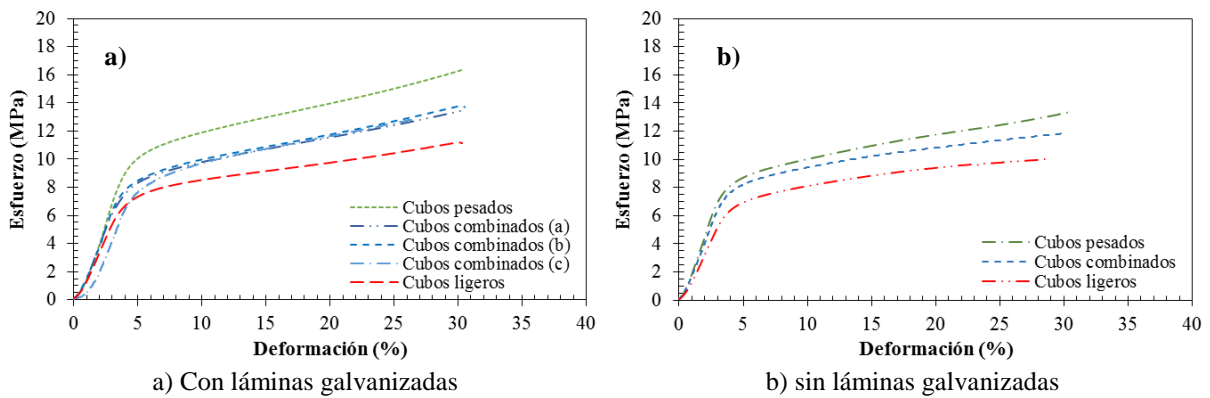
Lo anterior comprueba que un solo nivel proporciona el esfuerzo de fluencia en un arreglo de cubos, y que la finalidad de colocar tres niveles es proporcionar mayor holgura a la deformación. Un arreglo de un solo nivel presenta una deformación vertical máxima de  $\epsilon_m = 35\%$  (equivalente a 1.75 cm), mientras que en un arreglo de tres niveles es de  $\epsilon_m = 30\%$  (equivalente a 4.5 cm) de la altura total del conjunto. En la práctica se recomienda colocar arreglos de tres niveles para tener mayor holgura en la deformación y por consiguiente, un mantenimiento en los sistemas de control con menor frecuencia.

**Tabla 4.6 Resultados obtenidos en arreglos de 3x3 cubos de un solo nivel y de tres niveles con láminas galvanizadas.**

Arreglos de 3x3 cubos de un solo nivel							Arreglos de 3x3 cubos de tres niveles con láminas galvanizadas						
Cubos	$\sigma_f$ (MPa)	$\epsilon_f$ (%)	$\sigma_m$ (MPa)	$\epsilon_m$ (%)	$E_e$ (MPa)	$E_p$ (MPa)	Cubos	$\sigma_f$ (MPa)	$\epsilon_f$ (%)	$\sigma_m$ (MPa)	$\epsilon_m$ (%)	$E_e$ (MPa)	$E_p$ (MPa)
Pesados	9.4	5.8	14.9	35.0	191.3	15.7	Pesados	9.5	4.4	16.3	30.2	281.3	21.1
Combinados (a)	7.6	4.7	13.7	36.3	224.5	14.9	Combinados (a)	7.6	4.1	13.6	30.6	236.6	17.5
Combinados (b)	7.3	4.6	13.8	34.8	200.8	17.9	Combinados (b)	7.8	4.1	13.8	30.5	248.6	18.9
Ligeros (a)	6.4	5.3	11.2	35.0	146.1	12.9	Combinados (c)	7.6	5.0	12.9	26.8	232.3	18.5
Ligeros (b)	6.3	5.3	9.7	32.7	145.1	9.0	Ligeros	6.9	4.3	11.2	30.3	198.7	12.7

Nota:  $\sigma_f$  = esfuerzo de fluencia,  $\epsilon_f$  = deformación asociada al esfuerzo de fluencia,  $\sigma_m$  = esfuerzo máximo,  $\epsilon_m$  = deformación asociada al esfuerzo máximo,  $E_e$  = módulo tangente en la rama elástica,  $E_p$  = módulo tangente en la rama plástica.

Comparando los resultados obtenidos en los arreglos de 3x3 cubos de tres niveles con y sin láminas galvanizadas (Figura 4.21), se observa que los arreglos que no tienen láminas galvanizadas presentan una reducción en su esfuerzo de fluencia. Como se aprecia en los resultados de la Tabla 4.7, el arreglo que tiene cubos pesados (sin láminas) experimenta un esfuerzo de fluencia de  $\sigma_f = 8$  MPa, 19% menor respecto al esfuerzo obtenido con láminas galvanizadas. El arreglo con cubos combinados sin láminas, no muestra una reducción en el esfuerzo de fluencia. Para los cubos ligeros, se observa una pequeña reducción de 6% en el esfuerzo de fluencia en el arreglo sin láminas, respecto al arreglo que sí tiene láminas galvanizadas.



**Figura 4.21 Comportamiento mecánico en arreglos de tres niveles de 3x3 cubos.**

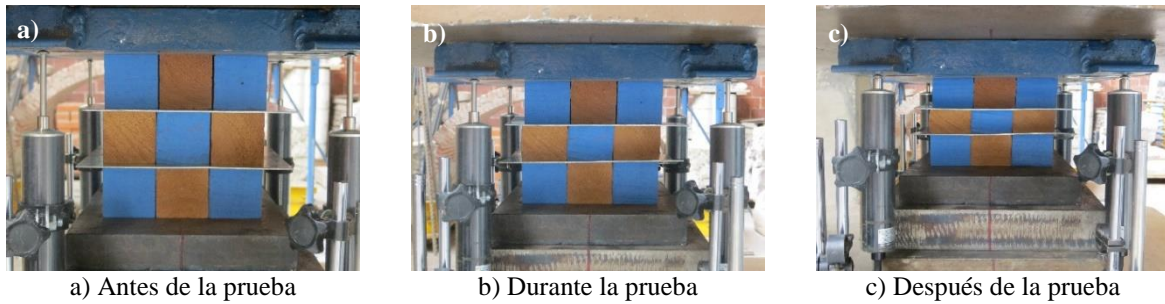
Los módulos tangentes de la rama elástica  $E_e$  y plástica  $E_p$  son mayores en los arreglos con láminas galvanizadas, respecto a los obtenidos en los arreglos sin láminas, como se muestra en la Tabla 4.7. Esto es, a mayor módulo tangente en la rama plástica  $E_p$  mayor endurecimiento exhiben los cubos.

**Tabla 4.7 Resultados obtenidos en arreglos de tres niveles de 3×3 cubos.**

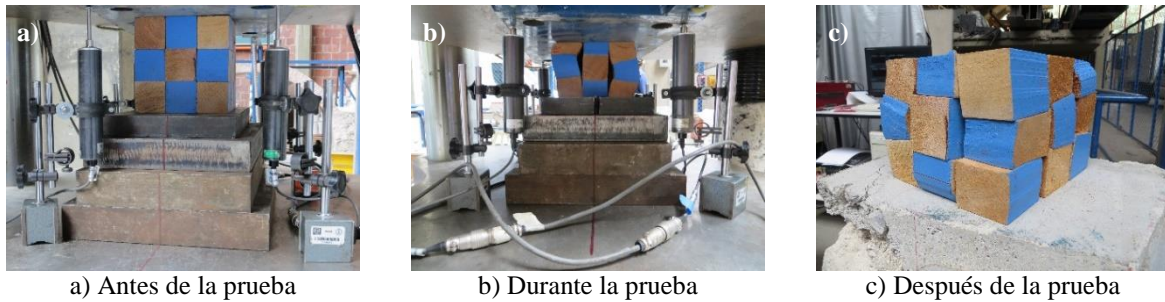
Cubos	Arreglos con lámina						Cubos	Arreglos sin lámina					
	$\sigma_f$ (MPa)	$\epsilon_f$ (%)	$\sigma_m$ (MPa)	$\epsilon_m$ (%)	$E_e$ (MPa)	$E_p$ (MPa)		$\sigma_f$ (MPa)	$\epsilon_f$ (%)	$\sigma_m$ (MPa)	$\epsilon_m$ (%)	$E_e$ (MPa)	$E_p$ (MPa)
Pesados	9.5	4.4	16.3	30.2	281.3	21.1	Pesados	8.0	3.8	13.4	30.7	243.8	16.3
Combinados (a)	7.6	4.1	13.6	30.6	236.6	17.5	Combinados	7.6	4.0	11.8	29.9	220.7	12.2
Combinados (b)	7.8	4.1	13.8	30.5	248.6	18.9							
Combinados (c)	7.6	5.0	12.9	26.8	232.3	18.5							
Ligeros	6.9	4.3	11.2	30.3	198.7	12.7	Ligeros	6.5	4.1	10.1	28.7	183.0	10.8

Nota:  $\sigma_f$  = esfuerzo de fluencia,  $\epsilon_f$  = deformación asociada al esfuerzo de fluencia,  $\sigma_m$  = esfuerzo máximo,  $\epsilon_m$  = deformación asociada al esfuerzo máximo,  $E_e$  = módulo tangente en la rama elástica,  $E_p$  = módulo tangente en la rama plástica.

La deformación generada en los arreglos que poseen láminas galvanizadas (Figura 4.22), muestra mayor uniformidad respecto a los arreglos que no tienen láminas (Figura 4.23). Incluso, se observa que en los arreglos que no cuentan con láminas galvanizadas, algunos de los cubos alcanzan la falla (Figura 4.24). Esto genera una disminución en el esfuerzo de fluencia  $\sigma_f$ .



**Figura 4.22 Proceso de deformación en arreglo de 3×3 cubos de tres niveles con lámina.**



**Figura 4.23 Proceso de deformación en arreglo de 3×3 cubos de tres niveles sin lámina.**



**Figura 4.24 Comparación de deformación de arreglos de 3×3 cubos con y sin lámina.**



Además de los arreglos de tres niveles de 3×3 cubos, se realizaron ensayos en arreglos de tres niveles de 4×4, 5×4 y 8×7 cubos con láminas galvanizadas, clasificándolos con base en su peso volumétrico en: a) cubos pesados, b) ligeros, y c) una combinación de ellos. La finalidad de los ensayos es obtener parámetros que permitan: a) calcular la capacidad nominal de los arreglos, b) estimar la carga de los pilotes con base en la deformación de los arreglos, y c) tener un mejor control de carga y asentamiento en las cimentaciones con estos sistemas de control.

Los resultados del comportamiento mecánico en arreglos 4×4, 5×4 y 8×7 cubos indican que si se realiza una clasificación de acuerdo con el peso volumétrico de los cubos que se colocan en los edificios, es posible tener un mejor control de la carga que se transmite al pilote. Como se muestra en la Figura 4.25, los arreglos conformados por cubos pesados presentan un mayor esfuerzo de fluencia  $\sigma_f$ , seguidos por los arreglos conformados por una combinación de cubos pesados y ligeros, y finalmente los arreglos de cubos ligeros. Asimismo se observa que los arreglos alcanzan una deformación vertical máxima de aproximadamente 30% (equivalente a 4.5 cm) de la altura total del conjunto de tres niveles.

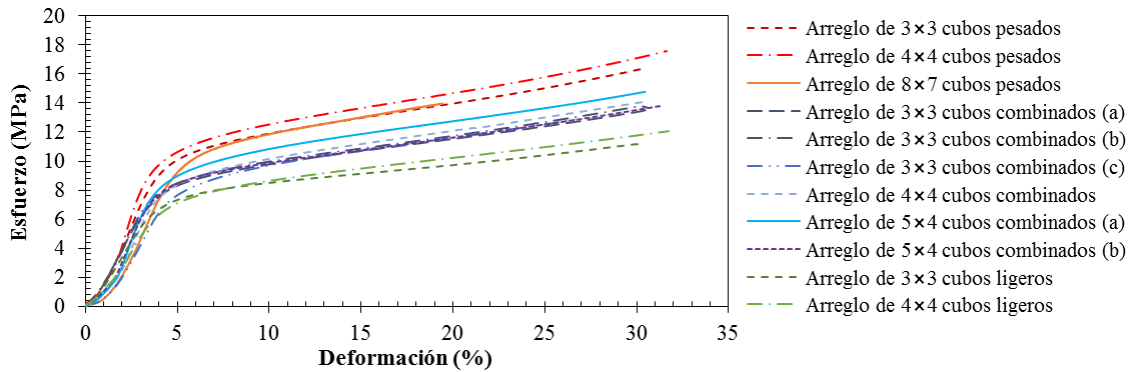


Figura 4.25 Comportamiento mecánico de diversos arreglos de tres niveles de 3×3, 4×4, 5×4 y 8×7 cubos.

En la Tabla 4.8 se aprecia que los arreglos con cubos pesados presentan un esfuerzo de fluencia medio de  $\sigma_f = 9.5$  MPa, mientras que los ligeros y combinados de  $\sigma_f = 6.8$  y 7.7 MPa, respectivamente. El Factor de comportamiento plástico (cociente de la carga al inicio de la respuesta plástica entre la carga máxima) medio es  $F_{cp} = 0.58$ .

Tabla 4.8 Resultados obtenidos en diversos arreglos de tres niveles de 3×3, 4×4, 5×4 y 8×7 cubos.

Cubos	Arreglos	$\sigma_f$ (MPa)	$\epsilon_f$ (%)	$\sigma_m$ (MPa)	$\epsilon_m$ (%)	$E_e$ (MPa)	$E_p$ (MPa)	$F_{cp}$ (-)
Pesados	3×3	9.5	4.4	16.3	30.2	281.3	21.1	0.58
	4×4	9.4	3.8	17.6	31.6	414.9	24.2	0.53
	8×7	9.7	5.4	14.0	19.5	269.7	22.6	0.69
Combinados	3×3 (a)	7.6	4.1	13.6	30.6	236.6	17.5	0.56
	3×3 (b)	7.8	4.1	13.8	30.5	248.6	18.9	0.57
	3×3 (c)	7.6	5.0	12.9	26.8	232.3	18.5	0.59
	4×4	7.8	4.3	14.1	30.7	304.0	18.1	0.55
	5×4 (a)	8.3	4.2	14.8	30.5	330.2	18.1	0.56
	5×4 (b)	7.8	4.1	13.8	31.2	304.3	17.6	0.57
Ligeros	3×3	6.9	4.3	11.2	30.3	198.7	12.7	0.62
	4×4	6.6	4.3	12.1	31.7	217.9	15.5	0.55

Nota:  $\sigma_f$  = esfuerzo de fluencia,  $\epsilon_f$  = deformación asociada al esfuerzo de fluencia,  $\sigma_m$  = esfuerzo máximo,  $\epsilon_m$  = deformación asociada al esfuerzo máximo,  $E_e$  = módulo tangente en la rama elástica,  $E_p$  = módulo tangente en la rama plástica,  $F_{cp}$  = factor de comportamiento plástico.

La deformación de los cubos en los arreglos exhibe el mismo patrón: los cubos con menor peso volumétrico son los que experimentan mayor deformación. En la Figura 4.26 se muestra la deformación ocurrida en los arreglos de 4×4, 5×4 y 8×7 cubos.



Figura 4.26 Deformación en arreglos de tres niveles de cubos de madera de caobilla.

#### 4.2.1.5 Arreglos de tres niveles en prueba cíclica

Para analizar el comportamiento mecánico de arreglos de cubos en condición sísmica, se realizaron pruebas cíclicas con carga controlada de 20 kN/min (2 t/min). Las descargas se realizaron a 147 kN, 196 kN y 245 kN (15, 20 y 25 t).

El comportamiento mecánico obtenido en las pruebas cíclicas de arreglos de tres niveles de 3×3 cubos se presenta en la Figura 4.27. En dicha figura se observa que en los ensayos de carga cíclica, el material presenta el mismo comportamiento elastoplástico con endurecimiento que se obtiene en las pruebas de compresión simple. Asimismo se aprecia que el arreglo de cubos pesados experimenta el mayor esfuerzo de fluencia, mientras que en los cubos ligeros ocurre el menor esfuerzo de fluencia.

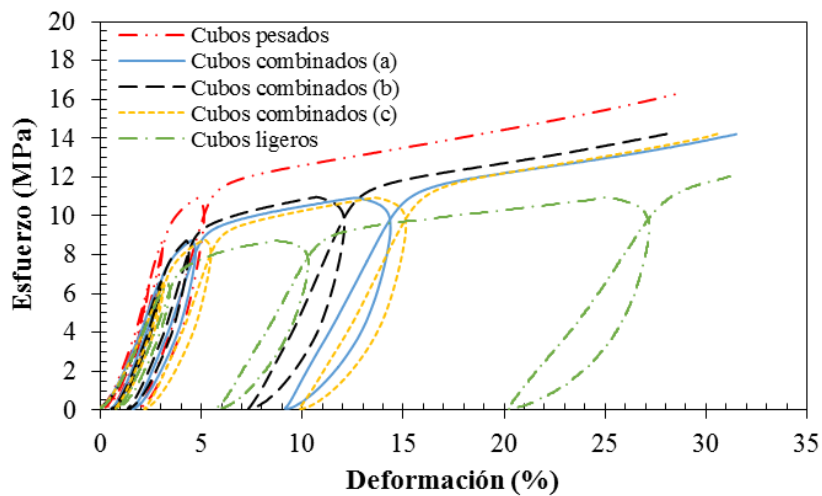


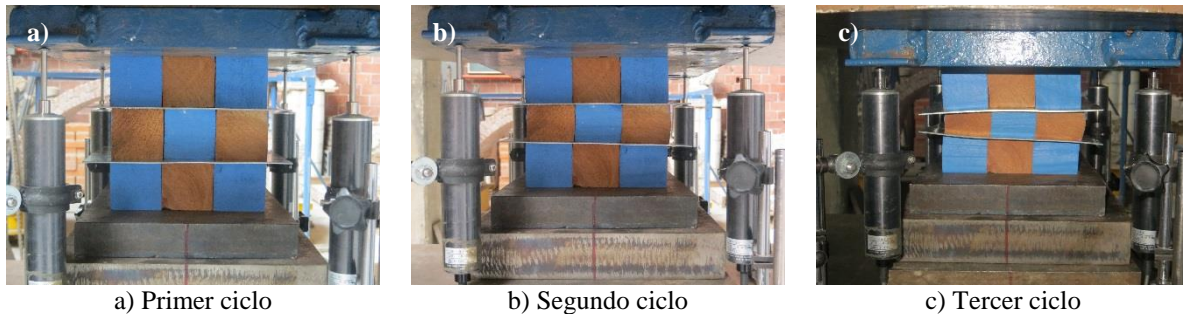
Figura 4.27 Comportamiento mecánico en arreglos de tres niveles de 3×3 cubos en prueba cíclica.

De las gráficas de la Figura 4.27 se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 4.9, referentes a la deformación plástica  $\varepsilon_p$  y elástica  $\varepsilon_e$ , así como el módulo de elasticidad  $E$  para cada ciclo de las pruebas. Se aprecia que la deformación plástica en el primer ciclo  $\varepsilon_{p1}$  es casi nula, predominando la deformación elástica  $\varepsilon_{e1}$ . En el segundo ciclo se observa que la deformación elástica  $\varepsilon_{e2}$  es mayor que la plástica  $\varepsilon_{p2}$  a excepción del arreglo de cubos ligeros. Contrariamente, en el tercer ciclo la deformación plástica  $\varepsilon_{p3}$  es mayor que la elástica  $\varepsilon_{e3}$ .

**Tabla 4.9 Resultados obtenidos en pruebas cíclicas en arreglos de tres niveles de 3×3 cubos.**

Cubos	Primer ciclo (6.5 MPa)			Segundo ciclo (8.7 MPa)			Tercer ciclo (10.9 MPa)		
	$\varepsilon_{p1}$ (%)	$\varepsilon_{e1}$ (%)	$E_{e1}$ (MPa)	$\varepsilon_{p2}$ (%)	$\varepsilon_{e2}$ (%)	$E_{e2}$ (MPa)	$\varepsilon_{p3}$ (%)	$\varepsilon_{e3}$ (%)	$E_{e3}$ (MPa)
Cubos pesados	0.1	2.3	282.8	0.5	2.6	335.6	1.9	2.9	376.4
Cubos combinados (a)	0.5	2.4	273.1	1.6	2.9	297.3	9.2	3.4	318.2
Cubos combinados (b)	0.6	2.4	267.6	1.4	2.9	300.1	7.4	3.3	332.4
Cubos combinados (c)	0.7	2.5	264.1	2.2	3.0	292.0	9.9	3.7	294.0
Cubos ligeros	0.8	2.6	251.6	5.8	2.9	296.3	20.2	4.9	220.8

Nota:  $\varepsilon_{p1}$  = deformación plástica en el primer ciclo,  $\varepsilon_{e1}$  = deformación elástica en el primer ciclo,  $E_{e1}$  = módulo de elasticidad en el primer ciclo,  $\varepsilon_{p2}$  = deformación plástica en el segundo ciclo,  $\varepsilon_{e2}$  = deformación elástica en el segundo ciclo,  $E_{e2}$  = módulo de elasticidad en el segundo ciclo,  $\varepsilon_{p3}$  = deformación plástica en el tercer ciclo,  $\varepsilon_{e3}$  = deformación elástica en el tercer ciclo,  $E_{e3}$  = módulo de elasticidad en el tercer ciclo.



**Figura 4.28 Deformación en arreglo de tres niveles de 3×3 cubos durante una prueba cíclica.**

#### 4.2.1.6 Parámetros para obtener la capacidad de carga de los arreglos de cubos in situ

Con base en los resultados obtenidos en los ensayos en arreglos de tres niveles de 3×3, 4×4, 5×4 y 8×7 cubos de madera de caobilla, se proponen tres curvas promedio para arreglos de tres niveles conformados con: a) cubos pesados, b) cubos ligeros, y c) cubos combinados (Figura 4.29). Con dichas gráficas es posible estimar la carga de trabajo de los pilotes en un edificio, con base en la deformación que el arreglo de cubos exhiba in situ.

En la Tabla 4.10 se presentan las propiedades mecánicas de las curvas de la Figura 4.29. En dicha tabla se observa que la deformación vertical máxima en los arreglos es  $\varepsilon_m = 30\%$  de la altura total del conjunto. El factor de comportamiento plástico  $f_{cp}$  es: a) 0.56 en arreglos de cubos pesados, b) 0.61 en cubos ligeros, y c) 0.57 en arreglos con cubos pesados y ligeros.

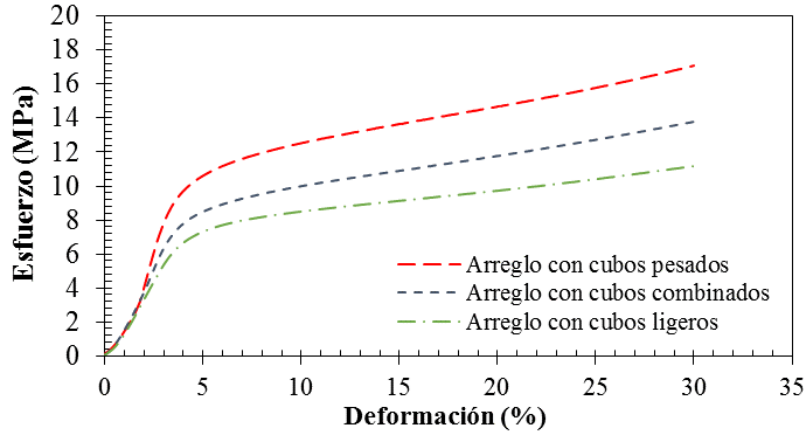


Figura 4.29 Curvas medias de los arreglos de tres niveles de cubos de madera.

Tabla 4.10 Propiedades mecánicas de las curvas medias de los arreglos de tres niveles de cubos de madera.

Cubos del arreglo	$\sigma_f$ (MPa)	$\epsilon_f$ (%)	$\sigma_m$ (MPa)	$\epsilon_m$ (%)	$E_e$ (MPa)	$E_p$ (MPa)	Fcp (-)
Pesados	9.55	3.9	17.11	30.0	414.8	21.3	0.56
Combinados	7.84	4.1	13.75	30.0	296.7	17.5	0.57
Ligeros	6.77	4.1	11.18	30.0	226.1	12.3	0.61

Nota:  $\sigma_f$  = esfuerzo de fluencia,  $\epsilon_f$  = deformación asociada al esfuerzo de fluencia,  $\sigma_m$  = esfuerzo máximo,  $\epsilon_m$  = deformación asociada al esfuerzo máximo,  $E_e$  = módulo tangente en la rama elástica,  $E_p$  = módulo tangente en la rama plástica, Fcp = factor de comportamiento plástico.

A partir de los datos de la Tabla 4.10, se proponen los parámetros para estimar la carga nominal y la carga última en los arreglos conformados por: a) cubos pesados, b) cubos ligeros, y c) una combinación de cubos pesados y ligeros. Los parámetros se obtuvieron multiplicando el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo máximo (Tabla 4.10) por el área transversal de un cubo, dando como resultado el factor de carga de fluencia  $F_f$  y el de carga máxima  $F_m$  (Tabla 4.11). La ecuación (4.1) permite estimar la carga nominal de los arreglos de tres niveles. El comportamiento de los arreglos al ser elastoplástico con endurecimiento, genera un incremento en la deformación conforme aumenta la carga. Por ello, además de estimar la carga nominal, se debe calcular la carga máxima del arreglo usando la ecuación (4.2). La carga máxima no debe exceder la capacidad de los marcos de carga del dispositivo de control, para evitar que los cabezales o los espárragos alcancen la falla.

Tabla 4.11 Parámetros para estimar la carga nominal y carga última en los arreglos de cubos de madera.

Factor	Cubos que conforman el arreglo		
	Pesados	Combinados	Ligeros
$F_f$ (kN)	23.88	19.60	16.93
$F_m$ (kN)	42.77	34.38	27.95

Nota:  $F_f$  = factor de carga de fluencia,  $F_m$  = factor de carga máxima.

$$\text{Carga nominal} = (F_f)(N_c) \quad (4.1)$$

$$\text{Carga máxima} = (F_m)(N_c) \quad (4.2)$$

donde:

$F_f$  = factor de carga de fluencia.

$F_m$  = factor de carga máxima.

$N_c$  = número de cubos de un nivel del conjunto.

#### 4.2.1.7 Propiedades mecánicas de la caobilla obtenidas experimentalmente

Con base en los resultados de las pruebas experimentales efectuadas, se obtienen las propiedades mecánicas de la madera de caobilla que se resumen en la Tabla 4.12. Se distingue que las propiedades cambian de acuerdo con la posición de las fibras. Comparando las propiedades mecánicas de la caobilla obtenidas experimentalmente en esta tesis con respecto a las propiedades de diversos tipos de madera (Santoyo y Alanís, 2013), se distingue que la caobilla tiene una resistencia a la compresión similar a la caoba para cubos con un peso volumétrico mayor o igual que  $\gamma = 5588 \text{ kN/m}^3$  (cubos pesados), siendo la resistencia de la caoba de 45800 kPa con fibras en posición vertical y 12400 kPa con fibras en posición horizontal. Asimismo la caobilla tiene una resistencia a la compresión similar a la madera de pino (36700 kPa con fibras en posición vertical y 4000 kPa en posición horizontal) para cubos con un peso volumétrico menor que  $\gamma = 5588 \text{ kN/m}^3$  (cubos ligeros).

**Tabla 4.12 Propiedades mecánicas en cubos de madera de caobilla de 5cm de lado.**

Cubo	Posición de las fibras	Peso volumétrico $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Límite elástico $L_e$ (kPa)	Punto de fluencia $\sigma_f$ (kPa)	Módulo tangente en la rama elástica $E_e$ (MPa)
Pesado	Vertical	6135	41678	53152	4988.6
	Horizontal	6653	14612	18534	1386.9
Ligero	Vertical	5115	33539	39030	3473.2
	Horizontal	4621	3874	5296	477.3

#### 4.2.2 Cilindros poliméricos

Los cilindros poliméricos son elementos elaborados con resinas elastoméricas copolimerizadas (patente MX/E/2010/015050; PICOSA, 2015). Actualmente son empleados como celdas de deformación y buscan sustituir los arreglos de cubos de madera. Existen tres capacidades nominales: 490, 735 y 980 kN (50, 75 y 100 t). Los cilindros son homogéneos, macizos (sin huecos) y cualquiera que sea su capacidad nominal tienen las mismas dimensiones (un diámetro medio de 26 cm, altura media de 15 cm, y una funda de caucho sintético de 2 mm de espesor). 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)  $6526.5 \text{ kN/m}^3$  en los cilindros de 490 kN, b)  $7232.0 \text{ kN/m}^3$  en los cilindros de 735 kN, y c)  $8823.2 \text{ kN/m}^3$  en los cilindros de 980 kN.

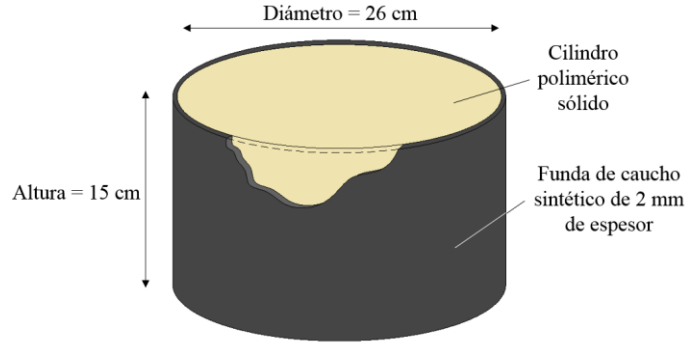


Figura 4.30 Dimensiones de los cilindros poliméricos.

Para estudiar el comportamiento mecánico de los cilindros poliméricos 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 (Figura 4.31b), con la finalidad de evaluar la influencia que tiene el agua en el comportamiento mecánico de los cilindros. Las especificaciones de las pruebas de compresión simple y pruebas cíclicas se resumen en las Tablas 4.13 y 4.14 respectivamente.

Tabla 4.13 Especificaciones de las pruebas de compresión simple en cilindros poliméricos.

Prueba	Espécimen	Capacidad (kN)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso volumétrico (kN/m <sup>3</sup> )	Estado	
						Seco	Húmedo
1	Cilindro polimérico 1	490	26.25	14.73	6352.8	X	
2	Cilindro polimérico 2		25.95	15.13	6228.6	X	
3	Cilindro polimérico 3		25.80	14.63	7700.9	X	
4	Cilindro polimérico húmedo		26.05	15.08	6338.3		X
5	Cilindro polimérico 1	735	26.05	14.98	7596.6	X	
6	Cilindro polimérico 2		26.35	15.00	7216.6	X	
7	Cilindro polimérico 3		26.35	15.08	7369.3	X	
8	Cilindro polimérico húmedo		26.50	15.15	7315.9		X
9	Cilindro polimérico 1	980	26.30	15.15	8509.5	X	
10	Cilindro polimérico 2		26.10	15.08	8224.4	X	
11	Cilindro polimérico 3		24.55	15.48	9868.1	X	
12	Cilindro polimérico húmedo		25.75	15.13	9387.0		X

Tabla 4.14 Especificaciones de las pruebas cíclicas en cilindros poliméricos.

Prueba	Espécimen	Capacidad (kN)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso volumétrico (kN/m <sup>3</sup> )	Velocidad (kN/min)		Descargas (kN)		
						Carga	Descarga	1	2	3
1	CP-C1	490	26.65	13.70	7384.0	2	5	245	490	736
2	CP-C2		26.40	14.95	7102.7					
3	CP-C3		26.37	14.18	7644.4					
4	CP-C1	735	26.01	14.08	8172.4	2	5	392	735	883
5	CP-C2		24.69	13.34	9482.9					
6	CP-C3		26.06	15.00	8477.7					
7	CP-C1	980	25.94	15.30	9217.5	2	5	588	980	1324
8	CP-C2		26.18	15.04	9126.6					
9	CP-C3		25.41	15.17	9617.6					



a) En condición seca



b) En el cuarto húmedo

Figura 4.31 Cilindros poliméricos.

#### 4.2.2.1 Cilindros con capacidad de 490 kN (50 t)

Los resultados de los cilindros poliméricos con capacidad nominal de 490 kN, indican que el material presenta un comportamiento elastoplástico no muy bien definido. Se distingue que los cilindros presentan un comportamiento mecánico variable (esfuerzo de fluencia y esfuerzo máximo distintos para cada cilindro ensayado, Figura 4.32). En el caso del cilindro húmedo, se observa el esfuerzo de fluencia es menor que el de los cilindros en estado seco y además su comportamiento no es elastoplástico.

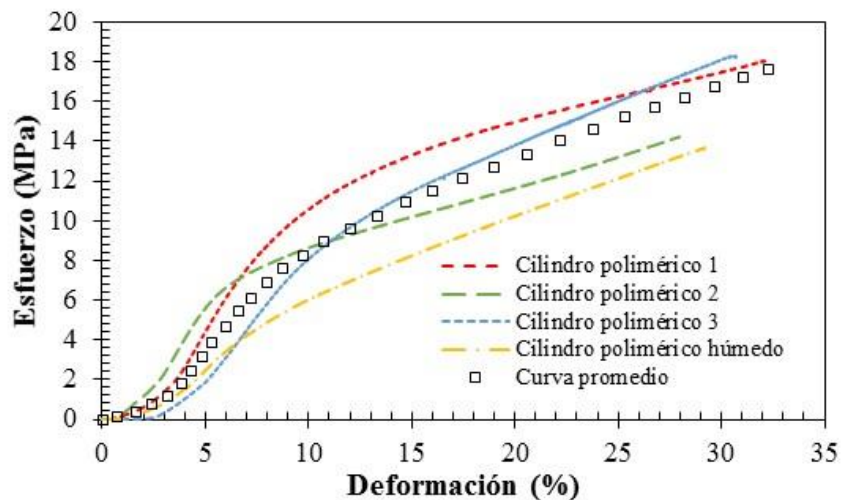


Figura 4.32 Comportamiento mecánico en cilindros con capacidad de 490 kN (50 t).

A diferencia de los cubos de madera, los cilindros poliméricos no presentan una relación directa entre el peso volumétrico y el esfuerzo de fluencia. En la Tabla 4.15 se observa que los cilindros 1 y 3 presentan un esfuerzo de fluencia similar ( $\sigma_f = 8.6$  y  $8.5$  MPa respectivamente), siendo el peso volumétrico del cilindro 1 menor respecto al cilindro 3. El esfuerzo de fluencia  $\sigma_f$  en el cilindro húmedo es menor respecto al obtenido en cilindros en estado seco. Lo anterior indica que el agua afecta el comportamiento mecánico de los cilindros con capacidad nominal de 490 kN.

**Tabla 4.15 Resultados obtenidos en cilindros con capacidad de 490 kN (50 t).**

Cilindro	Peso volumétrico (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_f$ (MPa)	$\epsilon_f$ (%)	$\sigma_m$ (MPa)	$\epsilon_m$ (%)	$E_e$ (MPa)	$E_p$ (MPa)
Cilindro 1	6353	8.6	8.0	19.5	32.1	175.1	25.9
Cilindro 2	6229	6.5	6.9	15.1	28.0	171.1	31.3
Cilindro 3	7701	8.5	10.6	19.1	30.7	132.1	45.1
Cilindro húmedo	6338	5.1	8.2	14.6	29.2	93.3	38.4

Nota:  $\sigma_f$  = esfuerzo de fluencia,  $\epsilon_f$  = deformación asociada al esfuerzo de fluencia,  $\sigma_m$  = esfuerzo máximo,  $\epsilon_m$  = deformación asociada al esfuerzo máximo,  $E_e$  = módulo tangente en la rama elástica,  $E_p$  = módulo tangente en la rama plástica,  $F_{cp}$  = factor de comportamiento plástico.

En la Figura 4.33 se observa que los cilindros poliméricos con capacidad nominal de 490 kN exhiben una deformación más uniforme en comparación con la de los arreglos de cubos de madera. La funda de caucho sintético de los cilindros confina el material, lo que restringe un poco la deformación horizontal en el cilindro. Dicha deformación sólo se presenta en la parte superior del cilindro (Figura 4.33d).



**Figura 4.33 Proceso de deformación de los cilindros poliméricos con capacidad de 490 kN (50 t).**

En la Figura 4.34 se presentan las curvas carga-desplazamiento obtenidas en los cilindros poliméricos con capacidad nominal de 490 kN (50 t) y su comparación con uno de los resultados obtenidos del ensayo de un arreglo de tres niveles de 5×5 cubos combinados de madera de caobilla (la carga nominal del arreglo es equivalente a la de los cilindros poliméricos). En dicha figura se observa que los cubos de madera tienen un comportamiento mecánico elastoplástico mejor definido que los cilindros poliméricos. Asimismo los cilindros poliméricos presentan un rango de deformación muy similar a la de los arreglos de cubos de madera (de 0 a 4.5 cm), siendo físicamente más uniforme en los cilindros poliméricos.



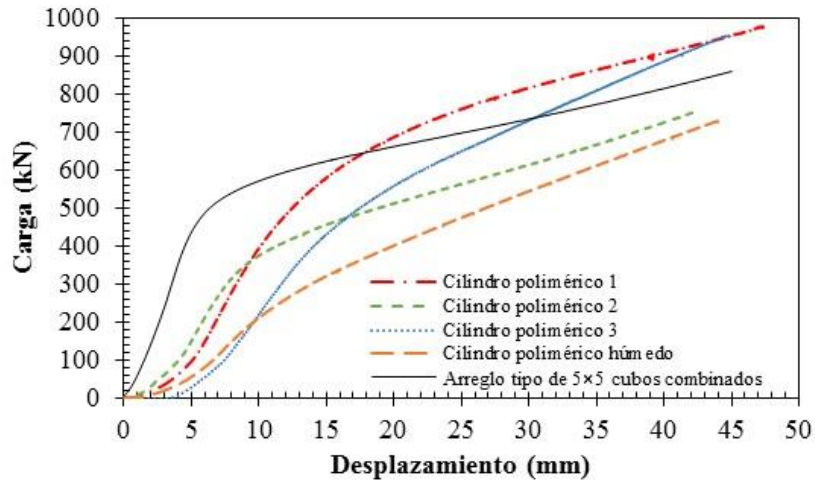


Figura 4.34 Comparación entre cilindros poliméricos de 490 kN y un arreglo tipo de 5×5 cubos.

En la Tabla 4.16 se presentan los resultados de las curvas de la Figura 4.34. En dicha figura se observa que el punto de fluencia en el arreglo tipo de 5×5 cubos de madera combinados se encuentra más próximo a los 490 kN (capacidad nominal de los cilindros poliméricos), respecto a los puntos de fluencia de los propios cilindros. Asimismo el arreglo tipo de cubos presenta un factor de comportamiento plástico  $F_{cp}$  mayor que los cilindros poliméricos.

Tabla 4.16 Comparación entre cilindros poliméricos de 490 kN y un arreglo tipo de 5×5 cubos.

Cilindro	Peso volumétrico (kN/m <sup>3</sup> )	P <sub>f</sub> (kN)	δ <sub>f</sub> (mm)	P <sub>m</sub> (kN)	δ <sub>m</sub> (mm)	E <sub>e</sub> (MPa)	E <sub>p</sub> (MPa)	F <sub>cp</sub> (-)
Cilindro 1	6353	467.0	11.7	977.1	47.3	175.1	25.9	0.48
Cilindro 2	6229	342.3	10.4	754.5	42.3	171.1	31.3	0.45
Cilindro 3	7701	446.0	15.4	954.6	45.0	132.1	45.1	0.47
Cilindro húmedo	6338	271.8	12.4	730.6	44.0	93.3	38.4	0.37
Arreglo tipo de 5×5 cubos combinados		490.0	6.1	859.5	45.0	296.7	17.5	0.57

Nota: P<sub>f</sub> = carga de fluencia, δ<sub>f</sub> = disminución en la altura del espécimen asociada a la carga de fluencia, P<sub>m</sub> = carga máxima, δ<sub>m</sub> = disminución en la altura del espécimen asociada a la carga máxima, E<sub>e</sub> = módulo tangente en la rama elástica, E<sub>p</sub> = módulo tangente en la rama plástica, F<sub>cp</sub> = factor de comportamiento plástico.

#### 4.2.2.2 Cilindros con capacidad de 735 kN (75 t)

Los cilindros de 735 kN (75 t) presentan un comportamiento mejor definido o menos variable respecto a los cilindros de 490 kN (50 t), siendo muy similar al elastoplástico con endurecimiento que presenta la madera. La deformación vertical máxima de los cilindros de 735 kN es aproximadamente de  $\epsilon_m = 30\%$  respecto a su altura inicial. En la Figura 4.35 se observa que el cilindro polimérico húmedo tiene un esfuerzo de fluencia menor, incluso a 7.4 MPa se aprecia un ligero cambio de pendiente. Sin embargo, el esfuerzo máximo  $\sigma_m$  es muy similar al de los cilindros en estado seco.

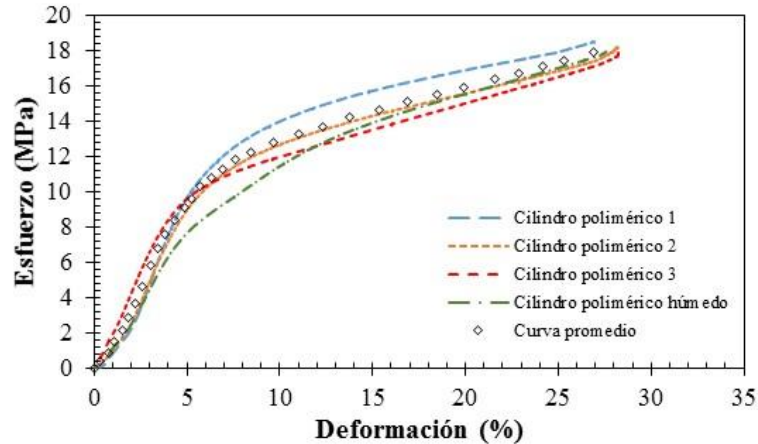


Figura 4.35 Comportamiento mecánico en cilindros con capacidad de 735 kN (75 t).

Los resultados de la figura 4.35 se presentan en la Tabla 4.17. En dicha tabla se aprecia que los cilindros no tienen una relación directa entre el peso volumétrico y el esfuerzo de fluencia, ya que el cilindro 2 presenta un esfuerzo de fluencia ligeramente mayor respecto al cilindro 3 (cuyo peso volumétrico es mayor respecto al cilindro 2). Asimismo la deformación vertical máxima en los cilindros es aproximadamente  $\epsilon_m = 28\%$ .

Tabla 4.17 Resultados obtenidos en cilindros con capacidad de 735 kN (75 t).

Cilindro	Peso volumétrico (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_f$ (MPa)	$\epsilon_f$ (%)	$\sigma_m$ (MPa)	$\epsilon_m$ (%)	$E_e$ (MPa)	$E_p$ (MPa)
Cilindro 1	7597	10.3	5.5	19.7	26.9	280.2	22.6
Cilindro 2	7217	9.7	5.5	19.8	28.3	232.7	26.4
Cilindro 3	7369	9.2	4.6	19.5	28.4	231.8	31.5
Cilindro húmedo	7316	8.1	5.4	19.9	27.9	189.7	30.2

Nota:  $\sigma_f$  = esfuerzo de fluencia,  $\epsilon_f$  = deformación asociada al esfuerzo de fluencia,  $\sigma_m$  = esfuerzo máximo,  $\epsilon_m$  = deformación asociada al esfuerzo máximo,  $E_e$  = módulo tangente en la rama elástica,  $E_p$  = módulo tangente en la rama plástica,  $F_{cp}$  = factor de comportamiento plástico.

En la Figura 4.36 se muestra el proceso de deformación de los cilindros poliméricos con capacidad nominal de 735 kN. En dicha figura se observa una deformación uniforme y aunque se distinguen grietas en el cilindro, el elemento presenta una falla dúctil. Los cilindros de 735 kN (75 t) se deforman en la parte superior y en la central (Figura 4.36d).

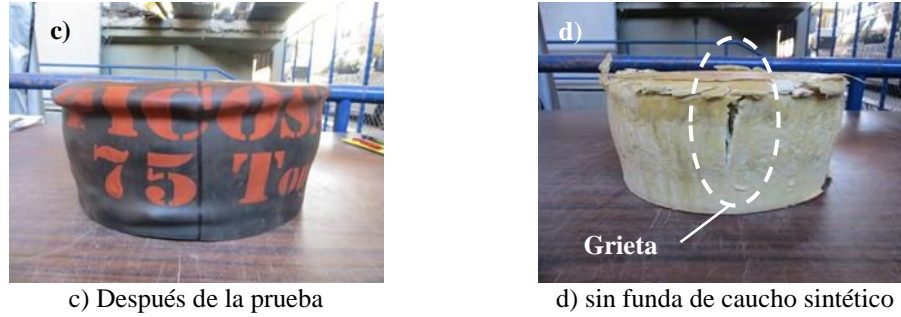


a) Antes de la prueba



b) Durante la prueba

Figura 4.36 Proceso de deformación en los cilindros poliméricos con capacidad de 735 kN (75 t).



Continuación Figura 4.36 Proceso de deformación en los cilindros poliméricos con capacidad de 735 kN (75 t).

En la Figura 4.37 se presentan las curvas carga-desplazamiento obtenidas en los cilindros poliméricos con capacidad nominal de 735 kN (75 t) y un arreglo tipo de tres niveles de  $6 \times 5$  cubos de madera pesados (la carga nominal del arreglo es equivalente a los cilindros poliméricos). En dicha figura se observa que ambos elementos presentan un comportamiento elastoplástico con endurecimiento. Los cilindros poliméricos exhiben una menor disminución en su altura inicial que la del arreglo de cubos. Sin embargo, la carga de fluencia  $P_f$  que alcanzan los cilindros poliméricos es menor de 735 kN (75 t).

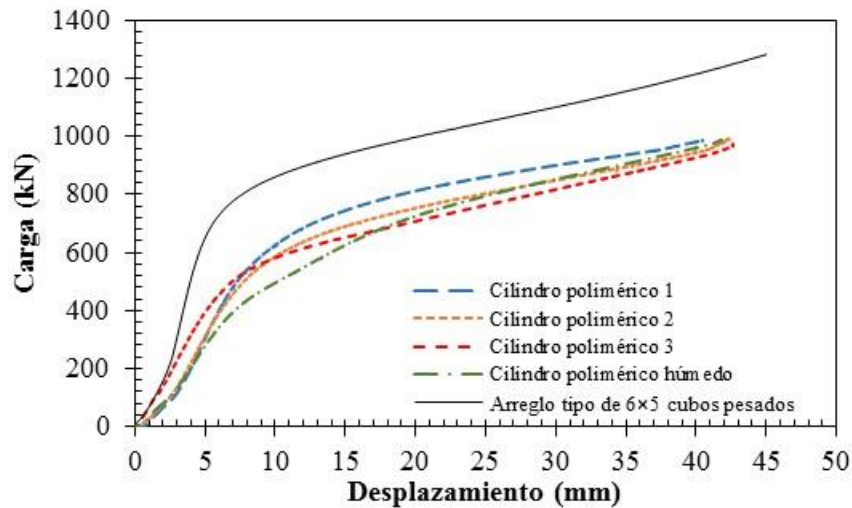


Figura 4.37 Comparación entre cilindros poliméricos de 735 kN y un arreglo tipo de  $6 \times 5$  cubos.

De la Figura 4.37 se obtienen los resultados de la Tabla 4.18. En dicha tabla, se observa que el arreglo de  $6 \times 5$  cubos pesados alcanza una carga de fluencia  $P_f$  más cercana a 735 kN (75 t) que los propios cilindros poliméricos. Además, en la carga de fluencia  $P_f$  los cilindros presentan una disminución en su altura inicial de  $\delta_f = 8.2$  mm, y en el arreglo tipo es de  $\delta_f = 5.8$  mm. Lo anterior se debe a que el arreglo de cubos de madera tiene un mayor módulo tangente de la rama elástica  $E_e$  respecto al obtenido en los cilindros poliméricos. El  $F_{cp}$  en los cilindros es ligeramente menor que el del arreglo de cubos tipo (excepto el cilindro 1).

Tabla 4.18 Comparación entre cilindros poliméricos de 735 kN y un arreglo tipo de 6x5 cubos.

Cilindro	Peso volumétrico (kN/m <sup>3</sup> )	P <sub>f</sub> (kN)	δ <sub>f</sub> (mm)	P <sub>m</sub> (kN)	δ <sub>m</sub> (mm)	E <sub>e</sub> (MPa)	E <sub>p</sub> (MPa)	F <sub>cp</sub> (-)
Cilindro 1	7597	551.4	8.2	987.1	40.4	280.2	22.6	0.56
Cilindro 2	7217	526.8	8.3	990.6	42.4	232.7	26.4	0.53
Cilindro 3	7369	502.7	6.9	975.2	42.6	231.8	31.5	0.52
Cilindro húmedo	7316	447.3	8.1	995.3	41.8	189.7	30.2	0.45
Arreglo tipo de 6x5 cubos pesados		716.4	5.8	1283.1	45.0	414.8	21.3	0.56

Nota: P<sub>f</sub> = carga de fluencia, δ<sub>f</sub> = disminución en la altura del espécimen asociada a la carga de fluencia, P<sub>m</sub> = carga máxima, δ<sub>m</sub> = disminución en la altura del espécimen asociada a la carga máxima, E<sub>e</sub> = módulo tangente en la rama elástica, E<sub>p</sub> = módulo tangente en la rama plástica, F<sub>cp</sub> = factor de comportamiento plástico.

#### 4.2.2.3 Cilindros con capacidad de 980 kN (100 t)

Los resultados en las pruebas en cilindros con capacidad nominal de 980 kN indican que comportamiento mecánico que presentan es elastoplástico con endurecimiento. Sin embargo, los cilindros presentan una variación importante en su esfuerzo de fluencia  $\sigma_f$ . En el cilindro húmedo se aprecia que la presencia de agua no genera una disminución en su carga nominal. Asimismo la deformación vertical máxima en los cilindros poliméricos es  $\varepsilon_m = 27\%$ .

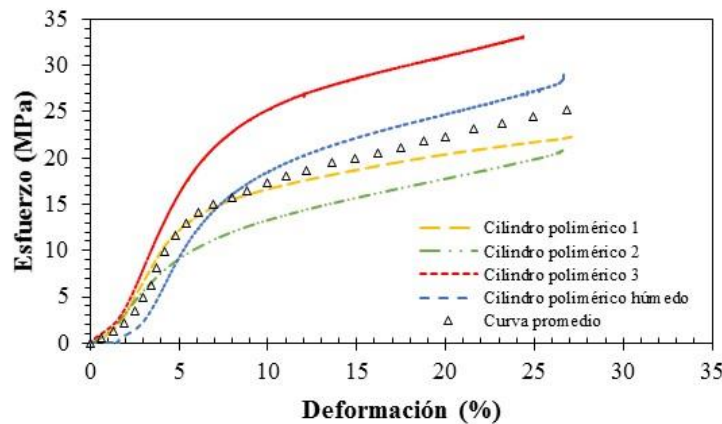


Figura 4.38 Comportamiento mecánico en cilindros con capacidad de 980 kN (100 t).

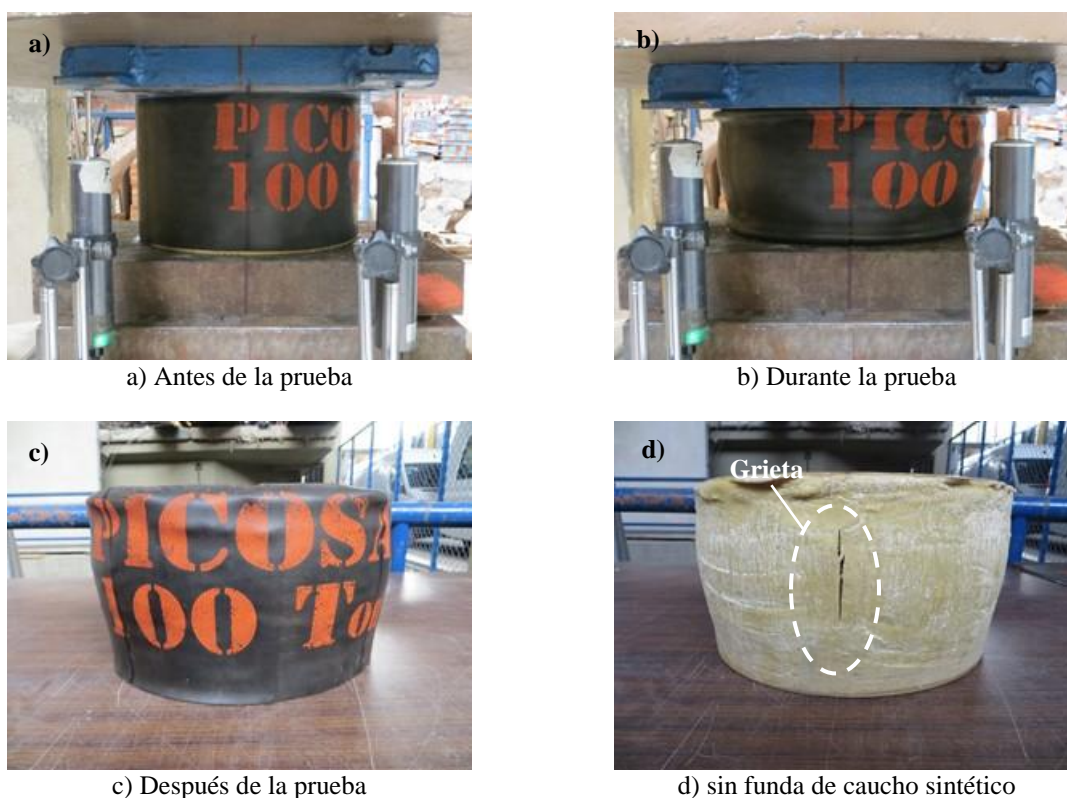
Los resultados de la Figura 4.38 se presentan en la Tabla 4.19. En dicha tabla se muestra que el cilindro con mayor peso volumétrico ( $\gamma = 9868 \text{ kN/m}^3$ ) es el que presenta mayor esfuerzo de fluencia ( $\sigma_f = 18.8 \text{ MPa}$ ) y el menor esfuerzo de fluencia ( $\sigma_f = 8.5 \text{ MPa}$ ) lo obtiene el cilindro de menor peso volumétrico ( $\gamma = 8224 \text{ kN/m}^3$ ). Lo anterior indica que en los cilindros con capacidad nominal de 980 kN (100 t) existe una relación directa entre el peso volumétrico y el esfuerzo de fluencia.

En la Figura 4.39 se observa que la deformación de los cilindros se genera en todo el contorno de forma uniforme. Asimismo se distinguen grietas en el cilindro, las cuales no afectan su comportamiento mecánico, puesto que exhibe una falla dúctil apropiada para el sistema de pilotes de control.

**Tabla 4.19 Resultados obtenidos en cilindros con capacidad de 980 kN (100 t).**

Cilindro	Peso volumétrico (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_f$ (MPa)	$\epsilon_f$ (%)	$\sigma_m$ (MPa)	$\epsilon_m$ (%)	$E_e$ (MPa)	$E_p$ (MPa)
Cilindro 1	8510	12.7	5.4	24.3	27.6	341.0	38.8
Cilindro 2	8224	8.5	4.7	22.2	26.9	245.2	40.7
Cilindro 3	9868	18.8	6.0	31.4	25.2	443.1	47.3
Cilindro húmedo	9387	13.5	6.6	30.2	26.9	372.7	48.7

Nota:  $\sigma_f$  = esfuerzo de fluencia,  $\epsilon_f$  = deformación asociada al esfuerzo de fluencia,  $\sigma_m$  = esfuerzo máximo,  $\epsilon_m$  = deformación asociada al esfuerzo máximo,  $E_e$  = módulo tangente en la rama elástica,  $E_p$  = módulo tangente en la rama plástica,  $F_{cp}$  = factor de comportamiento plástico.



**Figura 4.39 Proceso de deformación de los cilindros poliméricos con capacidad de 980 kN (100 t).**

En la Figura 4.40 se presentan las curvas carga-desplazamiento obtenidas en los cilindros poliméricos con capacidad nominal de 980 kN (100 t) y un arreglo tipo de tres niveles de 7×6 cubos pesados de madera de caobilla (la carga nominal del arreglo de madera es equivalente a la de los cilindros poliméricos). En dicha figura se observa que los cilindros poliméricos están por debajo de la capacidad nominal (980 kN), mientras que el arreglo de cubos presenta una carga de fluencia muy similar a 980 kN (100 t). La deformación vertical máxima de los cilindros es ligeramente menor que en el arreglo tipo de 7×6 cubos pesados.

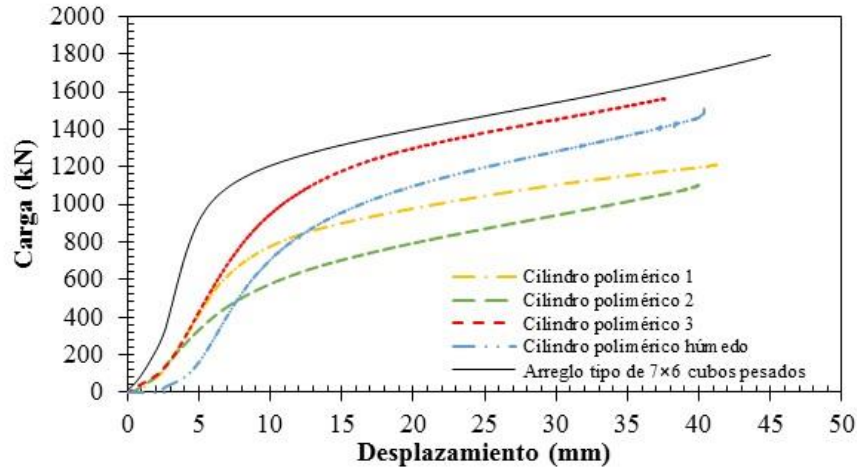


Figura 4.40 Comparación entre cilindros poliméricos de 980 kN y un arreglo tipo de 7×6 cubos.

A partir de las curvas de la Figura 4.40 se obtienen los datos de la Tabla 4.20. En ella se aprecia que los cilindros poliméricos experimentan una carga de fluencia que va de  $P_f = 456.5$  a  $887.6$  kN, mientras que en el arreglo tipo de 7×6 cubos es de  $P_f = 1003$  kN (muy similar a la carga nominal de los cilindros). Los módulos tangentes en la rama elástica  $E_e$  de los cilindros poliméricos son menores que el obtenido en el arreglo tipo de madera (a excepción del cilindro 3). Contrariamente los módulos tangentes de la rama plástica  $E_p$  en los cilindros poliméricos son mayores respecto al obtenido en el arreglo de 7×6 cubos.

Tabla 4.20 Comparación entre cilindros poliméricos de 980 kN y un arreglo tipo de 7×6 cubos.

Cilindro	Peso volumétrico (kN/m <sup>3</sup> )	$P_f$ (kN)	$\delta_f$ (mm)	$P_m$ (kN)	$\delta_m$ (mm)	$E_e$ (MPa)	$E_p$ (MPa)	$F_{cp}$ (-)
Cilindro 1	8510	692.6	8.0	1214.9	41.4	341.0	38.8	0.57
Cilindro 2	8224	456.5	7.0	1111.3	40.3	245.2	40.7	0.41
Cilindro 3	9868	887.6	8.9	1568.9	37.8	443.1	47.3	0.57
Cilindro húmedo	9387	702.0	9.9	1510.5	40.3	372.7	48.7	0.46
Arreglo tipo de 7×6 cubos pesados		1003.0	5.8	1796.3	45.0	414.8	21.3	0.56

Nota:  $P_f$  = carga de fluencia,  $\delta_f$  = disminución en la altura del espécimen asociada a la carga de fluencia,  $P_m$  = carga máxima,  $\delta_m$  = disminución en la altura del espécimen asociada a la carga máxima,  $E_e$  = módulo tangente en la rama elástica,  $E_p$  = módulo tangente en la rama plástica,  $F_{cp}$  = factor de comportamiento plástico.

#### 4.2.2.4 Cilindros en pruebas cíclicas

Para analizar el comportamiento de los cilindros poliméricos en condición sísmica, se realizaron nueve pruebas cíclicas en cilindros poliméricos (tres pruebas por cada capacidad nominal). En cada prueba se realizaron tres descargas, siendo la primera en la rama elástica, la segunda en su capacidad nominal y la tercera en la rama plástica. Para los cilindros con capacidad nominal de 490 kN (50 t), las descargas fueron a 245, 490 y 736 kN (que en términos de esfuerzos resulta 4.6, 9.2 y 13.8 MPa, respectivamente).

En la Figura 4.41 se muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas en las pruebas cíclicas de los cilindros con capacidad nominal de 490 kN. En dicha figura se observa que los cilindros poliméricos conservan su comportamiento elastoplástico con endurecimiento. Sin embargo, a diferencia de los ensayos de compresión simple en donde se alcanza una deformación vertical máxima de 32%, en las pruebas cíclicas no se alcanza una deformación vertical máxima superior a 24%.

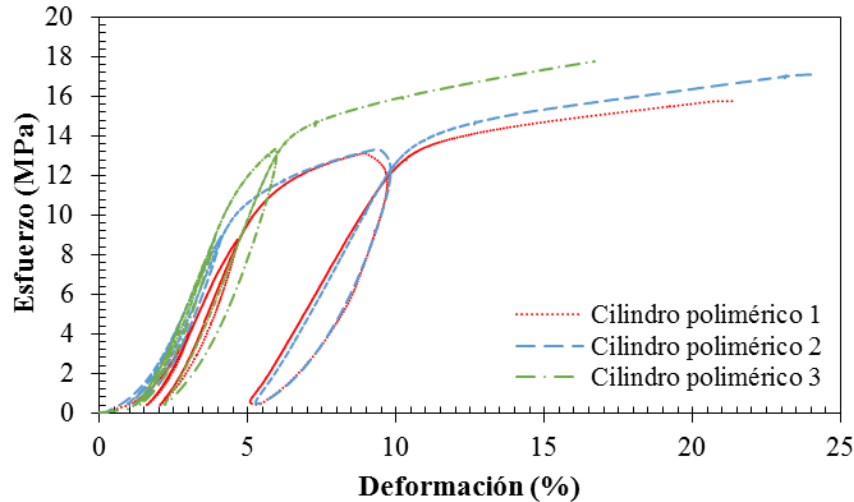


Figura 4.41 Comportamiento mecánico en cilindros con capacidad nominal de 490 kN en pruebas cíclicas.

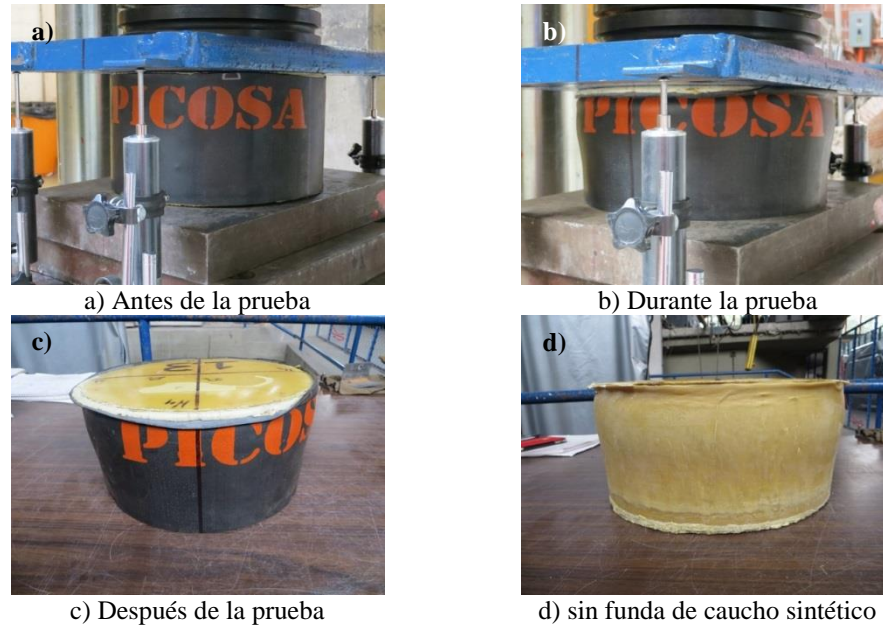
En la Tabla 4.21 se presenta la deformación plástica  $\varepsilon_p$  y elástica  $\varepsilon_e$  obtenidas en cada ciclo, así como su respectivo módulo de elasticidad  $E$ . En dicha tabla se observa que la deformación elástica en el primer y segundo ciclo, es mayor que la deformación plástica. Contrariamente en el tercer ciclo se observa que la deformación plástica es superior a la elástica.

Tabla 4.21 Resultados obtenidos en pruebas cíclicas en cilindros poliméricos con capacidad de 490 kN.

Capacidad (kN)	Cilindro	Primer Ciclo (4.6 MPa)			Segundo Ciclo (9.2 MPa)			Tercer Ciclo (13.8 MPa)		
		$\varepsilon_{p1}$ (%)	$\varepsilon_{e1}$ (%)	$E_{e1}$ (MPa)	$\varepsilon_{p2}$ (%)	$\varepsilon_{e2}$ (%)	$E_{e2}$ (MPa)	$\varepsilon_{p3}$ (%)	$\varepsilon_{e3}$ (%)	$E_{e3}$ (MPa)
490	Cilindro 1	1.58	1.42	247.0	2.03	2.60	312.79	5.31	4.39	261.03
	Cilindro 2	0.94	1.69	231.17	1.24	2.82	292.80	5.35	4.45	265.25
	Cilindro 3	1.19	1.50	271.34	1.36	2.53	337.52	2.19	3.76	336.13

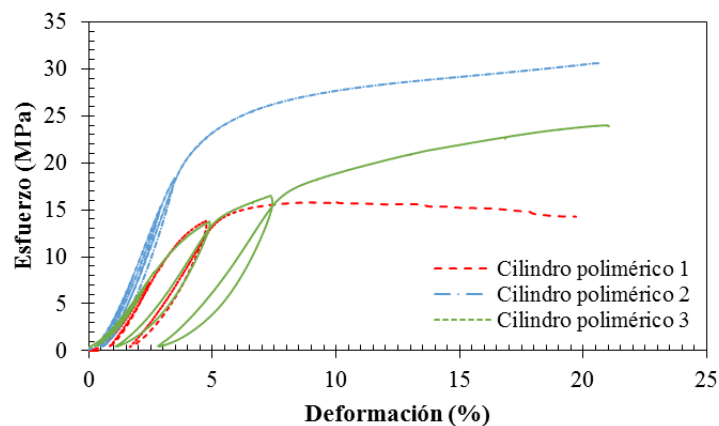
Nota:  $\varepsilon_{p1}$  = deformación plástica en el primer ciclo,  $\varepsilon_{e1}$  = deformación elástica en el primer ciclo,  $E_{e1}$  = módulo de elasticidad en el primer ciclo,  $\varepsilon_{p2}$  = deformación plástica en el segundo ciclo,  $\varepsilon_{e2}$  = deformación elástica en el segundo ciclo,  $E_{e2}$  = módulo de elasticidad en el segundo ciclo,  $\varepsilon_{p3}$  = deformación plástica en el tercer ciclo,  $\varepsilon_{e3}$  = deformación elástica en el tercer ciclo,  $E_{e3}$  = módulo de elasticidad en el tercer ciclo.

En la Figura 4.42 se presenta el proceso de deformación de los cilindros de 490 kN durante la prueba cíclica. En dicha figura se observa que la deformación en los cilindros es uniforme y que presentan una falla dúctil. No se distingue la presencia de grietas en estos cilindros.



**Figura 4.42** Proceso de deformación de los cilindros poliméricos de 490 kN (50 t) en prueba cíclica.

En los cilindros con capacidad nominal de 735 kN (75 t) se realizaron pruebas cíclicas con descargas a 392, 735 y 883 kN (correspondientes a esfuerzos de 9.3, 13.8 y 16.6 MPa, respectivamente). Los resultados de estas pruebas (Figura 4.43) indican que conservan su comportamiento elastoplástico con endurecimiento. Asimismo se observa que el cilindro 2 presenta un esfuerzo de fluencia mayor respecto a su capacidad nominal, y por tanto que los tres ciclos se presentan en la rama elástica. Los cilindros 1 y 3 exhiben un comportamiento elastoplástico muy similar entre sí, pero el cilindro 1 presenta falla frágil antes del tercer ciclo.



**Figura 4.43** Comportamiento mecánico en cilindros con capacidad nominal de 735 kN en pruebas cíclicas.

En la Tabla 4.22 se presenta la deformación plástica  $\epsilon_p$  y elástica  $\epsilon_e$  en cada ciclo, así como el módulo de elasticidad  $E$  a partir de las curvas de la Figura 4.43. En dicha tabla se observa que la deformación plástica  $\epsilon_p$  en el cilindro 2 es casi nula en los tres ciclos, ya que se localizan en la rama elástica. Los cilindros 1 y 3 repiten el mismo patrón (la deformación elástica  $\epsilon_e$  es mayor que la plástica  $\epsilon_p$ ) excepto que todos se ubican en la rama elástica.



**Tabla 4.22 Resultados obtenidos en pruebas cíclicas en cilindros poliméricos con capacidad de 735 kN.**

Capacidad (kN)	Cilindro	Primer Ciclo (9.3 MPa)			Segundo Ciclo (13.8 MPa)			Tercer Ciclo (16.6 MPa)		
		$\epsilon_{p1}$ (%)	$\epsilon_{e1}$ (%)	$E_{e1}$ (MPa)	$\epsilon_{p2}$ (%)	$\epsilon_{e2}$ (%)	$E_{e2}$ (MPa)	$\epsilon_{p3}$ (%)	$\epsilon_{e3}$ (%)	$E_{e3}$ (MPa)
735	Cilindro 1	0.82	1.47	392.69	1.68	2.98	385.00	-----	-----	-----
	Cilindro 2	0.40	1.42	531.31	0.50	2.37	605.35	0.59	2.82	607.08
	Cilindro 3	0.26	2.10	322.67	1.11	3.76	332.48	2.84	4.58	324.71

Nota:  $\epsilon_{p1}$  = deformación plástica en el primer ciclo,  $\epsilon_{e1}$  = deformación elástica en el primer ciclo,  $E_{e1}$  = módulo de elasticidad en el primer ciclo,  $\epsilon_{p2}$  = deformación plástica en el segundo ciclo,  $\epsilon_{e2}$  = deformación elástica en el segundo ciclo,  $E_{e2}$  = módulo de elasticidad en el segundo ciclo,  $\epsilon_{p3}$  = deformación plástica en el tercer ciclo,  $\epsilon_{e3}$  = deformación elástica en el tercer ciclo,  $E_{e3}$  = módulo de elasticidad en el tercer ciclo.

En la Figura 4.44 se presenta la deformación generada en los cilindros 2 y 3. En ambos casos se observa que la deformación es uniforme, sin aparición de grietas y con falla dúctil. Excepto el cilindro 1 que muestra una falla frágil (Figura 4.45).



a) Cilindro 2



b) Cilindro 3

**Figura 4.44 Deformación generada en cilindros poliméricos 2 y 3 con capacidad nominal de 735 kN (75 t) en prueba cíclica.**



a) Antes de la prueba



b) Durante la prueba



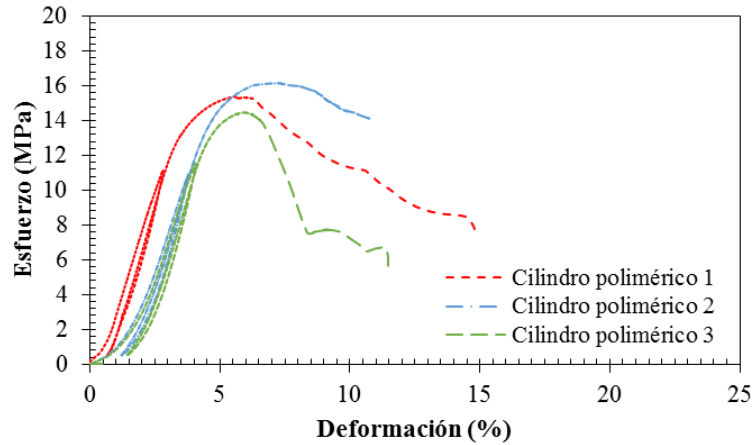
c) Después de la prueba



d) sin funda de caucho sintético

**Figura 4.45 Proceso de deformación del cilindro polimérico 1 con capacidad de 735 kN (75 t) en prueba cíclica.**

Los resultados obtenidos de las pruebas cíclicas en los cilindros con capacidad nominal de 980 kN (100 t) con descargas a 588, 980 y 1324 kN (que en términos de esfuerzos resulta 11.1, 18.5 y 24.9 MPa, respectivamente), indican falla frágil en los cilindros. En la Figura 4.46 se observa que los tres cilindros solamente admiten el primer ciclo y antes de alcanzar 17 MPa presentan la falla.



**Figura 4.46 Comportamiento mecánico en cilindros con capacidad nominal de 980 kN en pruebas cíclicas.**

Los resultados obtenidos en el primer ciclo se resumen en la Tabla 4.23. En ella se muestra que en el primer ciclo, al estar dentro de la rama elástica, la deformación plástica es menor que la elástica. Sin embargo, no es posible realizar los demás ciclos debido a que los cilindros alcanzan la falla frágil.

**Tabla 4.23 Resultados obtenidos en pruebas cíclicas en cilindros poliméricos con capacidad de 980 kN.**

Capacidad (kN)	Cilindro	Primer Ciclo (11.1 MPa)			Segundo Ciclo (18.5 MPa)			Tercer Ciclo (24.9 MPa)		
		$\epsilon_{p1}$ (%)	$\epsilon_{e1}$ (%)	$E_{e1}$ (MPa)	$\epsilon_{p2}$ (%)	$\epsilon_{e2}$ (%)	$E_{e2}$ (MPa)	$\epsilon_{p3}$ (%)	$\epsilon_{e3}$ (%)	$E_{e3}$ (MPa)
980	Cilindro 1	0.65	2.04	469.45	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	Cilindro 2	1.20	2.49	388.50	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	Cilindro 3	1.43	2.59	400.08	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Nota:  $\epsilon_{p1}$  = deformación plástica en el primer ciclo,  $\epsilon_{e1}$  = deformación elástica en el primer ciclo,  $E_{e1}$  = módulo de elasticidad en el primer ciclo,  $\epsilon_{p2}$  = deformación plástica en el segundo ciclo,  $\epsilon_{e2}$  = deformación elástica en el segundo ciclo,  $E_{e2}$  = módulo de elasticidad en el segundo ciclo,  $\epsilon_{p3}$  = deformación plástica en el tercer ciclo,  $\epsilon_{e3}$  = deformación elástica en el tercer ciclo,  $E_{e3}$  = módulo de elasticidad en el tercer ciclo.

En la Figura 4.47 se muestra el proceso de deformación de uno de los cilindros poliméricos con capacidad nominal de 980 kN (100 t). En la imagen superior izquierda, se observa la condición del cilindro polimérico al iniciar la prueba (Figura 4.47a), que debido a la falla frágil que experimentó, terminó en la condición que se muestra en la Figura 4.47b. La funda de caucho sintético al confinar el material (Figura 4.47c), impidió que las partes del cilindro se desmoronaran. De no tener dicha funda, el cilindro se habría visto como se muestra en la Figura 4.47d.

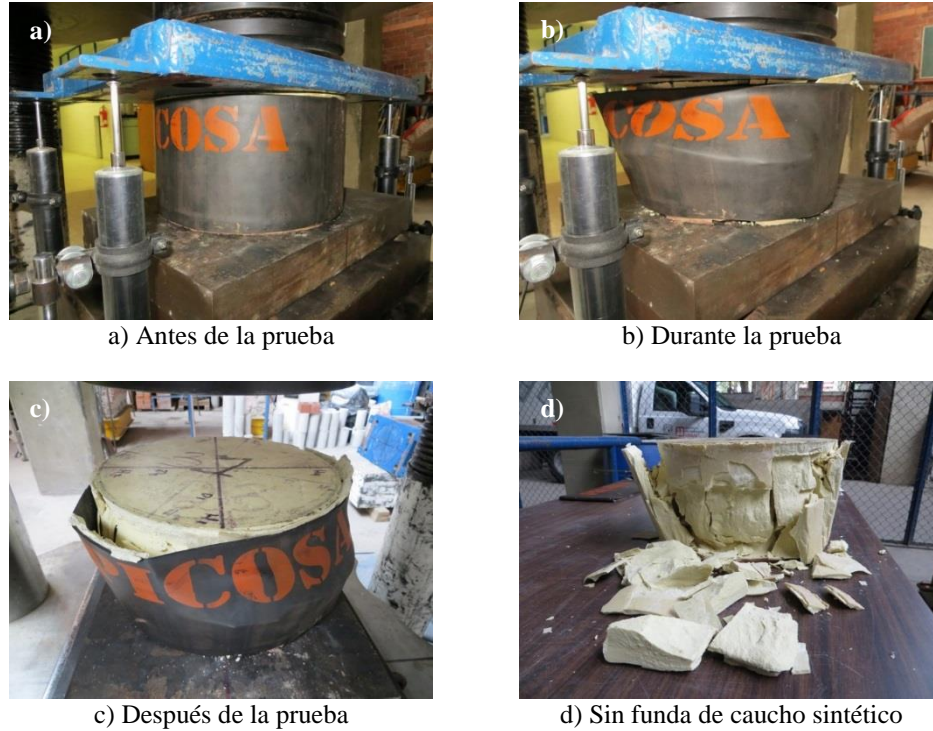


Figura 4.47 Proceso de deformación de un cilindro polimérico de 980 kN (100 t) en prueba cíclica.

#### 4.2.2.5 Parámetros para obtener la carga de cilindros poliméricos en sitio

Con base en los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio de compresión simple con carga controlada, se proponen tres curvas esfuerzo-deformación promedio para los cilindros de 490, 735 y 980 kN (Figura 4.48). Con dichas gráficas es posible estimar la carga de trabajo de los pilotes en un edificio, con base en la deformación que los cilindros poliméricos exhiban en sitio. Para convertir el esfuerzo en carga, se debe considerar un diámetro medio del cilindro de 26 cm.

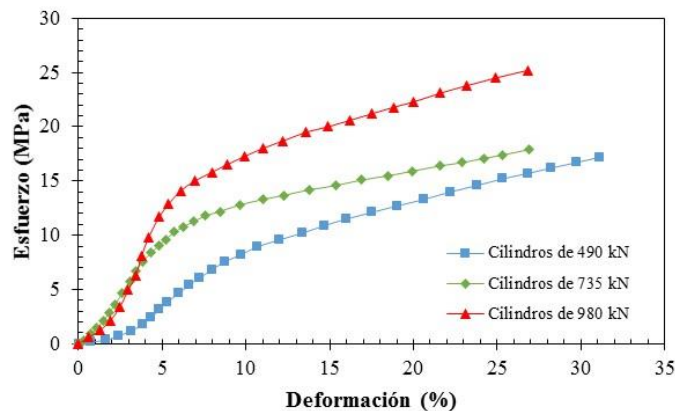


Figura 4.48 Curvas medias obtenidas en cilindros poliméricos.

En la Tabla 4.24 se presentan las propiedades mecánicas obtenidas en las curvas de la Figura 4.48. En dicha tabla se observa que la deformación vertical máxima en los cilindros es

de aproximadamente 32%. El factor de comportamiento plástico  $F_{cp}$  es mayor en los cilindros de 735 kN (75 t).

**Tabla 4.24 Propiedades mecánicas de las curvas medias en los cilindros poliméricos de 490, 735 y 980 kN.**

Espécimen	$\sigma_f$ (MPa)	$\varepsilon_f$ (%)	$\sigma_m$ (MPa)	$\varepsilon_m$ (%)	$E_e$ (MPa)	$E_p$ (MPa)	$F_{cp}$ (-)
Cilindro de 490 kN	7.0	8.1	18.7	32.3	135.8	37.3	0.50
Cilindro de 735 kN	9.5	5.2	19.0	26.9	258.0	28.1	0.66
Cilindro de 980 kN	13.2	5.5	26.8	26.8	409.9	44.3	0.63

Nota:  $\sigma_f$  = esfuerzo de fluencia,  $\varepsilon_f$  = deformación asociada al esfuerzo de fluencia,  $\sigma_m$  = esfuerzo máximo,  $\varepsilon_m$  = deformación asociada al esfuerzo máximo,  $E_e$  = módulo tangente en la rama elástica,  $E_p$  = módulo tangente en la rama plástica,  $F_{cp}$  = factor de comportamiento plástico.

La capacidad nominal de los cilindros poliméricos en términos de esfuerzo son: a) 9.2 MPa en cilindros de 490 kN (50 t), b) 13.8 MPa en cilindros de 735 kN (75 t), y c) 18.5 MPa en cilindros de 980 kN (100 t). En la Tabla 4.24 se observa que los esfuerzos medios de fluencia obtenidos en laboratorio son menores respecto a su capacidad nominal.

### 4.2.3 Tacones de neopreno

Para estudiar el comportamiento del neopreno empleado en pilotes tipo funda con el marco de carga diseño de Tamez (Figura 2.14d, inciso 2.1.2), se realizaron cinco ensayos de compresión simple con carga controlada de 20 kN/min: a) tres en tacones 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 los tacones empleados en los sistemas de control de un inmueble tienen más de 15 años sin reemplazarse (TGC, 2016).

Aunque existe una diversa cantidad de neoprenos (cuyas propiedades mecánicas son distintas), el neopreno que se estudia en este trabajo tiene características similares a los existentes en los sistemas de control empleados en la CDMX (TGC, 2016). Las características son: acabado liso en ambas caras, resistencia a la tensión de 600 PSI (4137 kPa), peso volumétrico de 14500 kN/m<sup>3</sup> y dureza 65° Shore<sup>2</sup> “A” +/-5° (ASTM D-2240). Debido a que la adquisición sólo es por placa de 1 m por lado, fue necesario realizar cortes con agua a presión (Figura 4.49) para obtener cuatro secciones de 40×40 cm (Figura 4.50).



**Figura 4.49 Corte de los cuatro tacones de neopreno.**

<sup>2</sup> Escala de medida de la dureza elástica de los materiales, determinada a partir de la reacción elástica del material cuando se deja caer un objeto sobre él (ASTM D-2240).

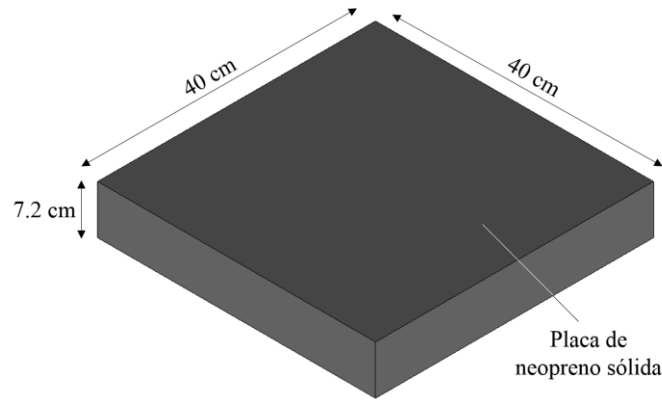


Figura 4.50 Dimensiones de los tacones de neopreno.

Los resultados de las pruebas en los tacones de neopreno indican que su comportamiento es elástico no lineal (Figura 4.51). El esfuerzo máximo en el neopreno 1 es  $\sigma_{\text{máx}} = 13.16$  MPa (correspondiente a una carga de 2106 kN, similar a la capacidad de la máquina universal con la que se realizan los ensayos de esta tesis). Las demás pruebas se limitaron a un esfuerzo máximo de  $\sigma_m = 7.95$  MPa (correspondiente a una carga de 1275 kN), por razones de seguridad.

En este estudio se propone dividir 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 carga significativo con un menor incremento en la deformación. En la Figura 4.51 se observa que los tacones de neopreno muestran un comportamiento muy parecido entre sí, incluso en los neoprenos usados, los cuales presentan un mayor módulo secante  $E_{s2}$  en la sección 2, respecto a los tacones nuevos.

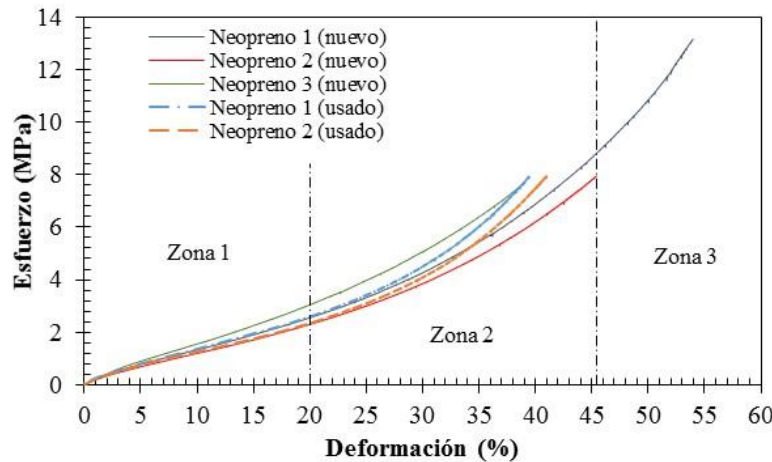


Figura 4.51 Comportamiento mecánico en tacones de neopreno.

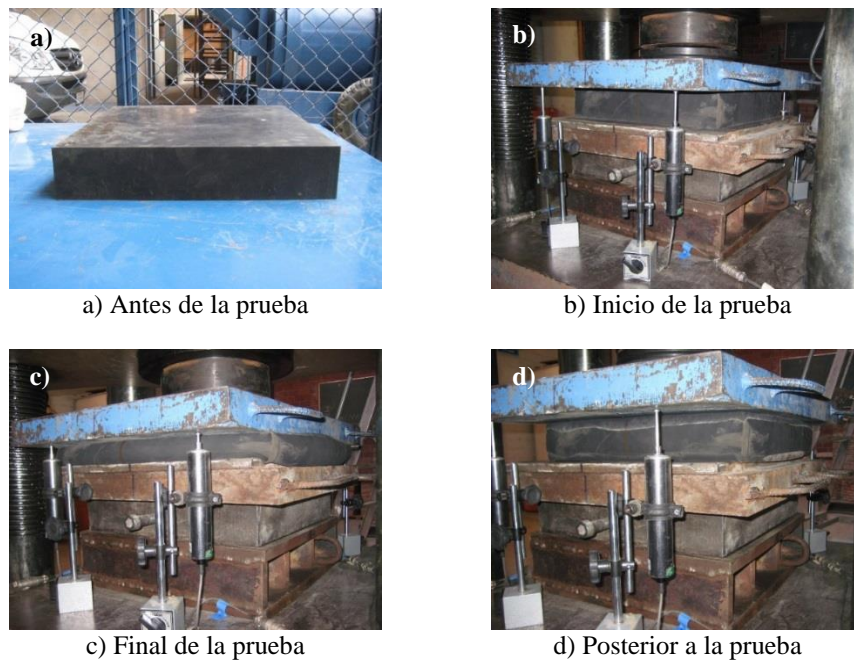
En la Tabla 4.25 se observa que el neopreno 1 presenta un módulo en la zona 1 de  $E_{t1} = 12.35$  MPa, en la zona 2 de  $E_{s2} = 23.17$  MPa y en la zona 3 de  $E_{s3} = 47.20$  MPa. La deformación vertical máxima que el neopreno alcanza es aproximadamente 54% (equivalente a 3.9 cm) de su altura inicial (7.2 cm).

**Tabla 4.25 Resultados obtenidos en pruebas de compresión simple en tacones de neopreno.**

Especímen	Zona 1			Zona 2			Zona 3		
	$\sigma_{m1}$ (MPa)	$\epsilon_{m1}$ (%)	$E_{s1}$ (MPa)	$\sigma_{m2}$ (MPa)	$\epsilon_{m2}$ (%)	$E_{t1}$ (MPa)	$\sigma_{m3}$ (MPa)	$\epsilon_{m3}$ (%)	$E_{t1}$ (MPa)
Neopreno 1 (nuevo)	2.55	19.70	12.35	7.95	43.00	23.17	13.16	53.96	47.20
Neopreno 2 (nuevo)	2.30	20.50	10.28	7.95	45.41	22.67	---	---	---
Neopreno 3 (nuevo)	2.70	18.00	14.00	7.70	39.09	23.71	---	---	---
Neopreno 1 (usado)	2.60	20.50	11.96	7.95	39.41	28.30	---	---	---
Neopreno 2 (usado)	2.37	20.50	10.86	7.95	40.99	27.22	---	---	---

Nota:  $\sigma_{m1}$  = esfuerzo máximo en la Zona 1,  $\epsilon_{m1}$  = deformación asociada al esfuerzo máximo en la Zona 1,  $E_{s1}$  = módulo secante de la Zona 1,  $\sigma_{m2}$  = esfuerzo máximo en la Zona 2,  $\epsilon_{m2}$  = deformación asociada al esfuerzo máximo en la Zona 2,  $E_{s1}$  = módulo secante de la Zona 2,  $\sigma_{m3}$  = esfuerzo máximo en la Zona 3,  $\epsilon_{m3}$  = deformación asociada al esfuerzo máximo en la Zona 3,  $E_{s1}$  = módulo secante de la Zona 3.

El proceso de deformación generado en el tacón 1 se muestra en la Figura 4.53. En dicha figura se observa que la deformación vertical máxima fue de 53.96% (correspondiente a 3.9 cm; Figura 4.53c), misma que se recupera en su totalidad después de retirar la carga (Figura 4.53d). Tanto en los tacones de neopreno nuevos como usados, se observa una recuperación total de la deformación generada durante la prueba.



**Figura 4.52 Proceso de deformación en tacón de neopreno de 7.2 cm de espesor.**

En la Figura 4.52 se comparan los resultados obtenidos en el tacón de neopreno 1 y un arreglo tipo de tres niveles de  $8 \times 7$  cubos de madera. El tacón de neopreno presenta una carga máxima de 2106 kN (215 t) con una disminución en su altura inicial de 3.92 cm, mientras que en el arreglo de cubos es de 1961 kN (200 t) y una disminución de 2.92 cm en la altura inicial del conjunto. Ambos materiales se utilizan en los marcos de carga tipo Tamez (Figura 2.14d, inciso 2.1.2).

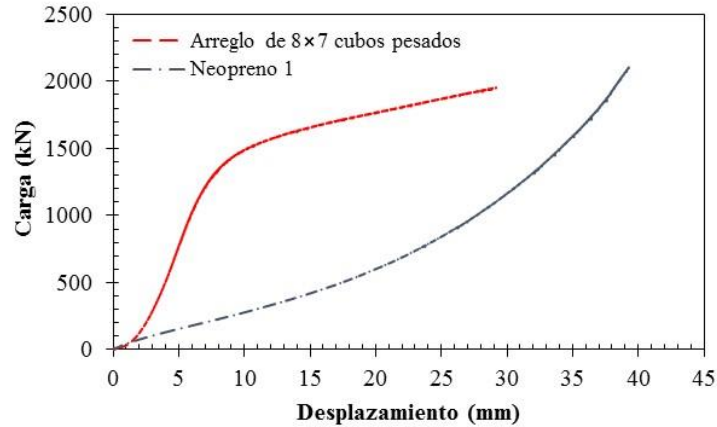


Figura 4.53 Comparación entre un arreglo tipo de 8×7 cubos y un tacón de neopreno.

### 4.3 Resumen de resultados experimentales

#### 4.3.1 Cubos de madera tipo caobilla

Los resultados obtenidos en las pruebas de compresión simple con carga controlada y pruebas cíclicas en cubos de madera de caobilla (individuales y en conjunto), indican lo siguiente:

- Los cubos presentan una variación importante en su peso volumétrico. Con base en un análisis estadístico del peso volumétrico de 665 cubos de madera de caobilla, se obtuvo un peso volumétrico medio de  $\gamma = 5588 \text{ kN/m}^3$ , con la cual se clasificaron los cubos en: a) pesados (con peso volumétrico  $\gamma \geq 5588 \text{ kN/m}^3$ ), y b) ligeros (con peso volumétrico  $\gamma < 5588 \text{ kN/m}^3$ ).
- Los cubos de madera presentan una relación directa entre el peso volumétrico y el esfuerzo de fluencia. A mayor peso volumétrico, mayor resistencia a la compresión.
- Los cubos con fibras en posición horizontal presentan falla dúctil, apropiada para el sistema de pilotes de control. Los cubos con fibras en posición vertical producen falla frágil que puede ser perjudicial para la estabilidad del sistema de control.
- Los cubos de madera con fibras en posición horizontal (individuales y en conjunto) presentan un comportamiento elastoplástico con endurecimiento.
- La humedad en los cubos ocasiona una disminución en el esfuerzo de fluencia de aproximadamente 50% respecto a la que se obtiene en cubos en estado seco.
- La deformación vertical máxima obtenida en los cubos apilados es de 27.3% (4.1cm), respecto a la altura inicial del conjunto. Los resultados experimentales de esta tesis permitieron demostrar que los cubos no alcanzan una deformación de 8 o 9 cm como lo señalan algunos autores (González-Flores, 1960; Aguirre, 1991). Además, los que tienen menor peso volumétrico son los primeros en deformarse, independientemente del lugar donde se ubiquen. Inclusive algunos cubos alcanzan la falla cuando el conjunto exhibe una deformación vertical de aproximadamente 14% (2.1 cm).
- Tomando en cuenta el peso volumétrico de los cubos, los arreglos para las pruebas experimentales se conformaron en: a) pesados, b) ligeros, y c) una combinación de cubos

pesados y ligeros. Los resultados indican que el arreglo de cubos pesados presenta el mayor esfuerzo de fluencia. Contrariamente el arreglo de cubos ligeros presenta el menor esfuerzo de fluencia. Esto ratifica el hecho de que el esfuerzo de fluencia tiene una relación directa con el peso volumétrico de los cubos.

- Los arreglos de tres niveles sin láminas galvanizadas muestran una reducción en el esfuerzo de fluencia, respecto al obtenido en arreglos con láminas. Asimismo la deformación que exhiben los cubos en los arreglos que no poseen láminas, no es uniforme y propicia fallas más aparatosas en algunos de los cubos.
- Ante cargas cíclicas, los arreglos de cubos de madera conservan su comportamiento elastoplástico con endurecimiento.
- Los cubos de caobilla tienen una resistencia a la compresión similar a la caoba cuando tienen un peso volumétrico mayor o igual a  $\gamma = 5588 \text{ kN/m}^3$  (cubos pesados), y los cubos ligeros (con peso volumétrico menor a  $\gamma = 5588 \text{ kN/m}^3$ ) presentan una resistencia similar a la madera de pino.
- Para estimar la capacidad nominal en los arreglos de cubos de madera, se propone utilizar los siguientes parámetros por cubo: a) 23.88 kN (2.45 t) para arreglos con cubos pesados, b) 16.93 kN (1.73 t) para arreglos con cubos ligeros, y c) 19.60 kN (2.0 t) para una combinación de cubos pesados y ligeros. Esto es, se debe multiplicar este valor por el número total de cubos de un nivel del conjunto para estimar la capacidad del dispositivo de control.
- Con las curvas medias de los arreglos de cubos propuestas en este estudio, es posible estimar en sitio la carga de trabajo en los pilotes de control de un edificio, considerando la deformación vertical que los arreglos de tres niveles de cubos exhiban en el sitio.

#### 4.3.2 Cilindros poliméricos

A partir de los resultados en los ensayos en cilindros poliméricos (de compresión simple con carga controlada y carga cíclica), es posible establecer los siguientes comentarios:

- Los cilindros poliméricos muestran un comportamiento mecánico elastoplástico con endurecimiento. Pero que no es tan definido como en la madera.
- 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 todas en general resultan menores que su capacidad nominal.
- Los cilindros de 735 kN (75 t) presentan un comportamiento mecánico elastoplástico con endurecimiento más uniforme.
- La humedad en el cilindro de 490 kN (50 t) provoca una reducción en su carga de fluencia de aproximadamente 42%, respecto a la obtenida en los cilindros secos.
- La deformación vertical máxima de los cilindros poliméricos es similar a la de los arreglos con cubos de madera (aproximadamente 5 cm). La deformación en los cilindros es más uniforme que en los arreglos de cubos de madera.
- En las pruebas cíclicas, los cilindros de 490 y 735 kN conservan su comportamiento elastoplástico con endurecimiento y presentan falla dúctil. Contrariamente, los cilindros de 980 kN muestran vulnerabilidad ante cargas cíclicas y presentan falla frágil.



- Con las curvas medias de los cilindros poliméricos propuestas en este estudio, es posible estimar en sitio la carga de trabajo en los pilotes de control de un edificio, considerando la deformación vertical que los cilindros poliméricos exhiban en el sitio.

### **4.3.3 Tacones de neopreno**

Los resultados obtenidos en pruebas de compresión simple con carga controlada en tacones de neopreno nuevos y usados, indican lo siguiente:

- Los tacones de neopreno presentan un comportamiento mecánico elástico no lineal.
- La carga máxima que soporta un tacón de neopreno es 2106 kN (215 t), cercana a la carga máxima que puede transmitir el equipo de ensaye utilizado. Sin embargo, el neopreno no alcanza la falla.
- La deformación vertical máxima en el neopreno es de 54% (equivalente a 3.9 cm) de la altura inicial. No obstante, al retirar la carga regresa a su altura original.
- Los tacones de neopreno muestran un comportamiento elástico lineal hasta una carga de aproximadamente 416 kN (42 t), cuya deformación vertical asociada es de 20% (1.4 cm) respecto a su altura inicial. Si la deformación vertical del neopreno es superior al 20%, ya no se tendrá un control en la carga que se transmite a los pilotes, ni los desplazamientos verticales de la estructura.

## 5 CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones generales

El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento mecánico de tres elementos empleados como celdas de deformación en el sistema de pilotes de control. Para ello, se realizaron pruebas de laboratorio de compresión simple con carga controlada (representando condiciones normales de operación) y pruebas cíclicas (representando condiciones sísmicas) en: a) cubos de madera (individuales y en conjunto), b) cilindros poliméricos, y c) tacones de neopreno.

Con base en los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, se concluye lo siguiente:

- El comportamiento mecánico en los cubos de madera con fibras en posición horizontal (individual y en conjunto) y en los cilindros poliméricos resultó elastoplástico con endurecimiento. Este comportamiento genera en los elementos 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 los pilotes de control.
- En este estudio se consideró que los principales factores que intervienen en el comportamiento mecánico de los arreglos de tres niveles de madera de caobilla fueron: a) el peso volumétrico de los cubos, b) la colocación de cubos en el arreglo, c) la colocación de láminas galvanizadas, y d) la humedad en los cubos. Los resultados de este estudio indicaron que los arreglos con cubos contiguos y con láminas galvanizadas entre niveles, presentan un funcionamiento eficiente como celdas de deformación de los pilotes de control.
- Con base en un análisis estadístico del peso volumétrico de los cubos, se obtuvo un peso volumétrico medio de  $\gamma = 5588 \text{ kN/m}^3$ , con la que se clasificaron los cubos en: a) pesados (con peso volumétrico  $\gamma \geq 5588 \text{ kN/m}^3$ ), y b) ligeros (con un peso volumétrico  $\gamma < 5588 \text{ kN/m}^3$ ). Con base en el peso volumétrico de los cubos se conformaron los arreglos de las pruebas realizadas: a) pesados, b) ligeros, y c) una combinación de cubos

pesados y ligeros. Los arreglos de cubos pesados alcanzaron el mayor esfuerzo de fluencia y los arreglos de cubos ligeros presentaron el menor esfuerzo de fluencia. Esto ratifica el hecho de que el esfuerzo de fluencia tiene una relación directa con el peso volumétrico de los cubos.

- Se realizó la estimación de los parámetros para obtener la capacidad de carga a partir de resultados de ensayos en arreglos de cubos y no de los resultados obtenidos en un solo cubo (como se hace en la práctica profesional). De esta forma se evita la sobrestimación o subestimación de la carga nominal que se transmite a los pilotes. Los parámetros obtenidos por cubo fueron: a) 23.88 kN (2.45 t) para arreglos conformados por cubos pesados, b) 16.93 kN (1.73 t) para los ligeros, y c) 19.60 kN (2.0 t) para una combinación de cubos pesados y ligeros. Esto es, se debe multiplicar este valor por el número total de cubos de un nivel del conjunto para estimar la capacidad de la celda de deformación del dispositivo de control.
- La deformación vertical máxima en los arreglos de cubos y los cilindros poliméricos fue aproximadamente 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 dicha deformación fue de 2106 kN (215 t), suficiente para generar la falla en los cabezales de los dispositivos de control tradicionales.
- En este estudio se propusieron curvas medias para: a) arreglos de cubos de madera de caobilla, b) cilindros poliméricos, y c) tacones de neopreno, a partir de las cuales se puede estimar la carga en los pilotes de control de cualquier edificio, considerando la deformación vertical que exhiba la celda de deformación en sitio.
- Los tacones de neopreno mostraron un comportamiento elástico lineal hasta una carga de aproximadamente 416 kN (42 t), cuya deformación vertical asociada fue de 20% (1.4 cm) respecto a su altura inicial. Si la deformación vertical del neopreno es superior al 20%, ya no se tendrá un control en la carga y por ende, es posible que se genere una sobrecarga en el cabezal que puede generar la falla del mismo.

## 5.2 Recomendaciones

Con base en los resultados experimentales obtenidos en esta investigación, se recomienda lo siguiente:

- Emplear arreglos conformados por cubos pesados en las zonas con mayor asentamiento diferencial. Lo anterior debido a que: a) los cubos de mayor peso volumétrico presentan mayor resistencia a la compresión, contribuyendo a restringir el desplazamiento vertical de un edificio y b) las celdas de deformación con cubos pesados permiten emplear un menor número de cubos. Por ejemplo: un arreglo de 6×5 cubos pesados y uno de 7×6 cubos ligeros tienen una capacidad nominal (carga de fluencia) muy similar (716 y 711 kN, respectivamente). La diferencia es que el arreglo con cubos pesados utiliza 36 cubos menos que el arreglo con cubos ligeros.
- Sustituir los arreglos de cubos de madera y los cilindros poliméricos cuando éstos hayan alcanzado una disminución en su altura inicial de aproximadamente 5 cm. Asimismo se recomienda precargar el pilote una vez sustituido el elemento deformable por uno nuevo,

empleando el *sistema doble puente* con gato hidráulico. La precarga genera que el pilote contribuya de inmediato al soporte del edificio.

- Los sistemas de control que emplean cilindros poliméricos deben verificarse después de un evento sísmico, pues en las pruebas realizadas algunos de ellos presentaron vulnerabilidad ante cargas cíclicas. Resulta conveniente mejorar la calidad de las resinas elastoméricas con la finalidad de uniformizar el comportamiento mecánico de los cilindros poliméricos.
- 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 un diseño específico geotécnico y estructural. Si el mantenimiento no se realiza adecuadamente, el sistema puede tener un funcionamiento deficiente.



## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, J. M. y 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*, editado por la SMMS, México, pp. 255-268.
- Aguilar, J. M. y Rojas, E. (1990). "Importantes mejoras en los dispositivos de control de pilotes", Memoria de la XV Reunión Nacional de mecánica de suelos, San Luis Potosí, México.
- Aguirre, M. (1981). "Dispositivo para controlar hundimientos de estructuras piloteadas", Publicación No 439, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D.F.
- Aguirre, M. (1991). "Device for control of building settlement and for seismic protection." *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No 12, pp. 1848-1859.
- ASTM D2240. "Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness", *American Society for Testing and Materials*, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM D638-02. "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics", *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.
- Auvinet, G. y Gutiérrez, E. (1989). "Instrumentación de un edificio en proceso de recimentación", Memoria, Simposio sobre recimentaciones, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, pp. 137-148.
- Auvinet, G. y Rodríguez, J. F. (1998). "Cimentaciones especiales", *Revista Ingeniería Civil* N° 349, Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM), mayo, México, D.F., pp. 7-18.

- Auvinet, G. y López-Acosta, N. P. (2008). “Propuesta de recimentación de la torre del Centro Cultural Universitario Tlatelolco (CCUT)”. Memoria de cálculo, octubre de 2008. Informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Bickford, W. B. (1995) “Mecánica de sólidos: conceptos y aplicaciones”, Richard D. Irwin Inc., ISBN 0-256-12344-6.
- COPICOSA (2016) “Reporte técnico” elaborado para la Unidad Administrativa de la Torre de Vinculación y Gestión Universitaria Tlatelolco.
- 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.
- Correa, J.J. (1980). “Estado actual del conocimiento sobre pilotes de control.” *Memoria de la Reunión Conjunta Consultores-Constructores Cimentaciones Profundas*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F. pp. 42-48.
- González-Flores, M. (1948). “Level control in buildings by means of adjustable piling”, Proc. Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, Vol. IV, pp. 152-156.
- 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*, México, D.F., Vol. III, pp. 1215-1248.
- 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, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Vol. 1, pp. 343-360.
- 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, Stockholm, Sweden, pp. 101-105.
- Gordon, J. E., Hawthorne, W. D., Sandoval, G., and Barrance, A. J. (2003). “Trees and farming in the dry zone of southern Honduras II: the potential for tree diversity conservation.” *Agroforestry Systems*, No. 59, 107-117.
- Hayden, W., Moffatt, W. G. y Wulff, J. (1964) “Mechanical behavior”, John Wiley and Sons Inc., Nueva York, E. U. A.
- II-UNAM (2016). Visitas técnicas, cortesía de PICOSA.
- Keyser, C. A. (1972) “Materials science in engineering”, Charles E. Merrill Publishing Company, Columbus, Ohio, ISBN 968-18-0605-0.

- López-Acosta, N. P. y Ávila, J. A. (elaboración); Auvinet, G., Loera, S. y Meli, R. (validación); Alcocer-Martínez De Castro, S. M. (autorización). (2007). “Anexo 6.13 del Libro Blanco del Centro Cultural Universitario Tlatelolco (CCUT): Proyecto de rehabilitación de la estructura y cimentación de la Torre del CCUT.” Informe del Instituto de Ingeniería elaborado para el Rector de la UNAM (Dr. Juan Ramón de la Fuente). Octubre de 2007. D. F., México. 39 p.
- López-Acosta, N. P., Peña, F., Martínez, E., Bejarano, L. y Auvinet, G. (2015). “Pruebas de laboratorio en celdas de deformación de pilotes de control”, *Gaceta del Instituto de Ingeniería de la UNAM*, No. 112, Agosto 2015, ISSN 1870-347X, pp. 14-17.
- López-Acosta, N. P., Martínez, E., Peña, F., y Auvinet, G. (2016). “Material polimérico como celdas de deformación de pilotes de control”, *Gaceta del Instituto de Ingeniería de la UNAM*, No. 118, Mayo 2016, ISSN 1870-347X, pp. 12-15.
- López-Acosta, N. P. y Martínez, E. (2016). “Evaluación experimental de celdas de deformación de pilotes de control”, *Memorias de la XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, SMIG (23-26 Noviembre 2016)*, Mérida, Yucatán, México.
- López-Acosta, N. P. y Martínez, E. (2017a). “Caracterización mecánica de materiales empleados como celdas de deformación en pilotes de control.” *Revista Geotecnia de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG)*. No. 243 Mar-May 2017, pp. 15-26.
- López-Acosta, N. P. y Martínez, E. (2017b). “Recimentación y renivelación de un edificio mediante pilotes de control y subexcavación”. *Gaceta del Instituto de Ingeniería, UNAM*, Número 125, mayo-junio 2017. C.U., México. pp. 7-8, ISSN 1870-347X.
- NTCDCC, Gobierno del Distrito Federal (GDF) (2004). “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones”.
- Paterson, G. (2014) “Polymer Science from 1935-1953: consolidating the Paradigm”, Springer, New York, USA, ISBN 978-3-662-43536-6.
- Peña, F., Cruz C.E. y Badajoz C.A. (2016). “Revisión de la capacidad de marcos de carga de pilotes de control”, Reporte Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- PICOSA (2010). “Cimentando a México desde 1951”, PICOSA S.A. de C.V., Reporte Técnico Promocional/Publicitario/De Divulgación, México D.F., 44 p.
- PICOSA (2014). “Comunicación personal”.
- PICOSA (2015). “Comunicación personal”.
- PICOSA (2017). “Comunicación personal”.



- Pilkey, W. D., y Pilkey, O. H. (1974) "Mechanics of solids", Quantum publishers Inc., Nueva York, E. U. A.
- RCDF, Gobierno del Distrito Federal (GDF) (2004). "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal".
- Reséndiz, D. (1976). "Load-control devices for piles." *Third Nabor Carrillo Conference*, Mexican Society for Soil Mechanics, pp. 147-151.
- Rico-Álvarez, A. (1991). "Sistemas mecanizados para pilotes", Tesis profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.
- Robles, F. y Echenique-Manrique, R. (1986) "Estructuras de madera", Edit. Limusa, México, D. F., ISBN 968-18-1510-6.
- Rodríguez, J. F. (2010). "Modelado del comportamiento de pilotes e inclusiones sometidos a consolidación regional, en la Zona Lacustre de la Ciudad de México". Tesis de Doctorado en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería de la UNAM.
- Salazar-Resines, J. (1978). "Control de las cargas en la cimentación y de los asentamientos de edificios mediante mecanismos en los pilotes", *UNAM-UAM*, México, D.F., pp. 1-13.
- Santoyo, E. y Alanís, R. (2013). "Monografías sobre los pilotes de control: utilidad, mantenimiento y desatinos", TGC, pp. 1-5.
- Santoyo, E. y Segovia, J. A. (1995). "Recimentación y renivelación de estructuras y monumentos", TGC, 26 p.
- Segovia, J. A. (2001). "Capítulo 6: Recimentación de estructuras." *Manual de cimentaciones profundas*, SMMS, A.C., pp. 247-261.
- Tamez, E. (1986). "Seismic design for foundations on control piles", *The Mexico earthquakes, 1985*, ASCE, pp. 204-216.
- Tamez, E. (1988). "Pilotes de control en centrales telefónicas", *Reto sísmico: incrementar la seguridad y mantener el servicio de las centrales telefónicas*, México, D.F., pp. 103-115.
- TGC (2016). "Comunicación personal".
- Zarazúa, E. (2008). "Anexo: Características del funcionamiento de los pilotes de control", Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, E.S.I.A. Unidad Zacatenco, IPN, México.
- Zeevaert, L. (1983). "Foundation engineering for difficult subsoil conditions", *Van Nostrand Reinhold Company*, U.S.A, pp. 386-452.

### **Referencias de internet**

Santoyo-Villa, E. y Santoyo Reyes, E. “Retos geotécnicos en edificios ligeros”.  
<http://tgc.com.mx/tgc/wp-content/uploads/2013/11/art002.pdf> (Fecha de consulta: 27 octubre 2014). 26 p.

<http://www.kansai-airports.co.jp/en/efforts/our-tech/kix/sink/hudou.html> (Fecha de consulta: 23 enero 2017).

[http://tgc.com.mx/tgc/wp-content/uploads/2013/11/01-PC-Sagrario\\_04.jpg](http://tgc.com.mx/tgc/wp-content/uploads/2013/11/01-PC-Sagrario_04.jpg) (Fecha de consulta: 5 diciembre 2016).