

Pruebas de laboratorio en celdas de deformación de pilotes de control

Elaborado por Dra. Norma Patricia López Acosta, Dr. Fernando Peña Mondragón, Ing. Eduardo Martínez Hernández, MSc. Leidy Elvira Bejarano Urrego y Dr. Gabriel Auvinet Guichard

La Coordinación de Geotecnia, en colaboración con la Coordinación de Ingeniería Estructural (anteriormente Coordinación de Estructuras y Materiales), ha efectuado una serie de pruebas en celdas de deformación que son parte de los sistemas de pilotes de control. Las pruebas fueron realizadas en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Las celdas de deformación (constituidas por un arreglo de cubos de madera tipo caobilla) son uno de los tres elementos principales que constituyen el sistema de control de este tipo de pilotes; los otros dos componentes son el propio pilote (de punta o de fricción) y el marco de carga (ver tabla 1).

Un número importante de cimentaciones de edificios en la ciudad de México emplean este mecanismo de control sobre pilotes de punta. Algunos claros ejemplos son la Iglesia de las Capuchinas (localizada a un costado de la antigua Basílica de Guadalupe) y el Hotel Camino Real Aeropuerto (ubicado frente a la terminal 1 del Aeropuerto Internacional Benito Juárez de la Ciudad de México). Los controles también se han instalado en pilotes de fricción; algunos casos documentados 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), el conjunto de edificios del Palacio de Justicia Federal en San Lázaro, y algunos tanques de almacenamiento de hidrocarburos en las instalaciones de ASA (Aeropuertos y Servicios Auxiliares).

El objetivo fundamental de las pruebas fue estudiar el comportamiento mecánico de las celdas de deformación. Para ello, se plantearon los siguientes objetivos particulares:

- Verificar el comportamiento elastoplástico de los cubos y el efecto de la anisotropía de la madera (orientación de las fibras).
- Identificar la carga de fluencia y la carga máxima en cubos aislados de acuerdo con sus características físicas (masa y peso volumétrico).
- Identificar la carga de fluencia y la carga máxima para distintos arreglos de cubos.
- Verificar la influencia de la humedad sobre los parámetros de los cubos.

Para cumplir los objetivos anteriores, se llevaron a cabo 13 tipos de pruebas de compresión uniaxial mediante una máquina universal con capacidad máxima de 2500 kN y un *software* para la adquisición automática de datos sincronizados en todos los canales de hasta 500 Hz. Las especificaciones de las pruebas se indican en la tabla 2.

Debido a la diferencia observada en los pesos de los cubos, estos fueron evaluados estadísticamente con la ayuda de histogramas de masa y pesos volumétricos, y se obtuvo como resultado un peso medio de los cubos de 70 g. Con base en lo anterior, se optó por clasificar dos tipos de cubos: los pesados (aquellos cuyo peso es mayor o igual que 70 g) y los ligeros (aquellos cuyo peso es menor de 70 g).

Las primeras pruebas que se realizaron correspondieron a cubos aislados en condición seca colocados con fibras en posición horizontal, y posteriormente con fibras en posición vertical. El propósito fue observar su comportamiento elastoplástico de acuerdo con su peso y con la orientación de sus fibras (horizontal o vertical). Como resultado de estas pruebas se determinó que:

- a) Los cubos con fibras en posición vertical soportan una carga de fluencia aproximadamente tres veces mayor que los cubos con fibras en posición horizontal. Sin embargo, estos últimos presentan una mayor deformación, que contribuye al mejor funcionamiento de los sistemas de pilotes de control.
- b) Independientemente de la orientación de las fibras del cubo, la carga de fluencia es proporcional a su peso, esto es, los cubos de madera más pesados soportan mayor carga de fluencia.
- c) Los cubos con fibras en posición horizontal presentan fallas de tipo dúctil (figura 1a), y los cubos con fibras en posición vertical presentan fallas de tipo frágil (figura 1b).

Adicionalmente, se realizaron pruebas en cubos en estado húmedo, los cuales permanecieron en un cuarto húmedo durante 27 días, en los que el contenido de humedad promedio fue del 40 %. Como puede observarse en la figura 2, los resultados de estas pruebas señalan que la carga de fluencia es menor en condición húmeda que en condición seca (independientemente de la masa del cubo).

También se llevaron a cabo pruebas en arreglos de cubos. Inicialmente con cubos ligeros, posteriormente con cubos pesados, y por último con cubos mixtos (mezcla de cubos pesados y ligeros). El primer arreglo ensayado correspondió a tres camas de 3 x 3 cubos con lámina divisoria (figura 3), y posteriormente sin lámina divisoria (figura 4). En las figuras 3 y 4 se aprecia que los arreglos de cubos que tienen láminas divisorias se deforman de manera más uniforme respecto a los arreglos que no tienen láminas separadoras (estos últimos exhiben una deformación considerable). Además, de todo el grupo, los cubos ligeros (o de menor peso) son los que se deforman más; de igual forma, las fallas se

presentan en los planos más débiles de la madera. De acuerdo con los resultados de estas pruebas, el arreglo con láminas divisorias presenta una carga de fluencia media de 20.43 t, que corresponde a 2.27 t por cada cubo del grupo, mientras que el arreglo que no tiene láminas separadoras presenta una carga de fluencia media de 18.75 t.

Otras pruebas que se llevaron a cabo correspondieron a arreglos de tres camas de 4 x 4 cubos (figura 5) y 5 x 4 cubos (figura 6), ambas con láminas divisorias. La finalidad de estas pruebas fue conocer la carga máxima y la carga de fluencia en función del número de cubos. El arreglo de 4 x 4 cubos de madera presentó una carga de fluencia media

de 37.33 t, y el arreglo de 5 x 5 cubos, una carga de fluencia media de 47.75 t, lo cual corresponde en el arreglo de 4 x 4 a una carga de fluencia de 2.33 t por cada cubo, y en el arreglo de 5 x 5, a 2.39 t por cubo. Se concluye que al incrementar el número de cubos se incrementa la carga de fluencia.

En la figura 7 se presenta el resumen de resultados de acuerdo con el número de cubos por arreglo. En cada caso, se indica la carga máxima y la carga de fluencia obtenida para los cubos en conjunto y de manera individual en los arreglos de tres camas de 3 x 3, 4 x 4 y 5 x 4 cubos, respectivamente.

Tabla 1. Componentes del sistema de pilotes de control

a) Componentes	b) Esquema
<p>Pilote</p> <ul style="list-style-type: none"> • De punta (concepción original) • De fricción (implementación reciente) <p>Marco de carga</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cabezal • Espárragos o husillos • Estabilizadores de concreto • Anclas <p>Celdas de deformación</p>	

Tabla 2. Especificaciones de las pruebas realizadas

No.	Celda de madera	Lámina divisoria	Número de cubos por cama	Número de camas	Número de cubos por ensayo	Número de ensayos	Cubos requeridos
1	Un cubo	---	1	1	1	15	15
2	Un cubo húmedo	---	1	1	1	10	10
3	Dos cubos superpuestos	SÍ	1	2	2	5	10
4	Dos cubos superpuestos	NO	1	2	2	1	2
5	Tres cubos superpuestos	SÍ	1	3	3	5	15
6	Tres cubos superpuestos	NO	1	3	3	5	15
7	Una cama de 3 x 3 cubos	---	9	1	9	9	81
8	Tres camas de 3 x 3 cubos	SÍ	9	3	27	5	135
9	Tres camas de 3 x 3 cubos	NO	9	3	27	3	81
10	Tres cubos superpuestos húmedos	NO	1	3	3	5	15
11	Carga y descarga en tres camas de 3 x 3 cubos	SÍ	9	3	27	5	135
12	Tres camas de 4 x 4 cubos	SÍ	16	3	48	3	144
13	Tres camas de 5 x 4 cubos	SÍ	20	3	60	2	120
Total						73	778

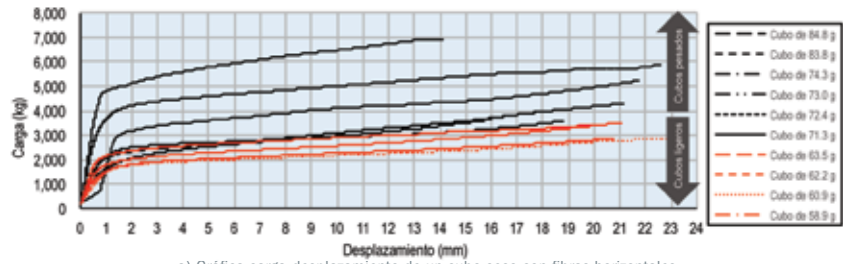


a) Cubo con fibras en posición horizontal (falla dúctil)

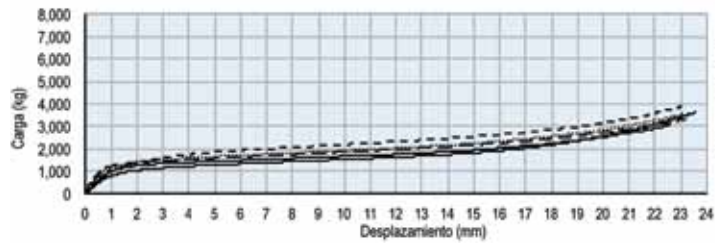


b) Cubo con fibras en posición vertical (falla frágil)

Figura 1. Tipos de fallas en pruebas de un cubo aislado



a) Gráfica carga-desplazamiento de un cubo seco con fibras horizontales



b) Gráfica carga-desplazamiento de un cubo húmedo con fibras horizontales

Figura 2. Comparación del comportamiento elasto-plástico de cubos en estado seco y cubos en estado húmedo (con fibras horizontales)



a) Antes de la prueba



b) Después de la prueba

Figura 3. Arreglo de tres camas de 3 x 3 cubos con lámina divisoria



a) Antes de la prueba



b) Después de la prueba

Figura 4. Arreglo de tres camas de 3 x 3 cubos sin lámina divisoria



a) Antes de la prueba



b) Después de la prueba

Figura 5. Arreglo de tres camas de 4 x 4 cubos con lámina divisoria



a) Antes de la prueba



b) Después de la prueba

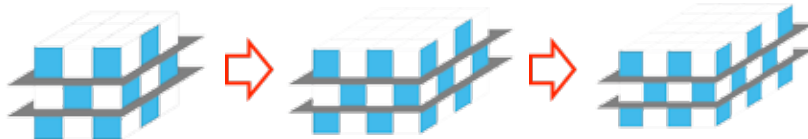
Figura 6. Arreglo de tres camas de 5 x 4 cubos con lámina divisoria

a) Análisis por arreglo de cubos

Carga máxima: 31.52 t
Carga de fluencia: 20.43 t

Carga máxima: 60.40 t
Carga de fluencia: 37.33 t

Carga máxima: 72.84 t
Carga de fluencia: 47.75 t



b) Análisis por cubo

Carga máxima: 3.50 t
Carga de fluencia: 2.27 t

Carga máxima: 3.78 t
Carga de fluencia: 2.33 t

Carga máxima: 3.64 t
Carga de fluencia: 2.39 t

Figura 7. Resultados de los arreglos de tres camas de 3 x 3, 4 x 4 y 5 x 4 cubos