



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias
(Mecánica de Suelos)

ESTUDIO EN MODELO Y ENSAYES DE CARGA DE PILOTES PARA SUELOS EXPANSIVOS

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
(MECÁNICA DE SUELOS)**

Presenta

Daniel Vázquez Borges

Dirigido por:

Dr. Alfredo Pérez García

SINODALES

Dr. Alfredo Pérez García
Presidente

Dr. Eduardo Rojas González
Secretario

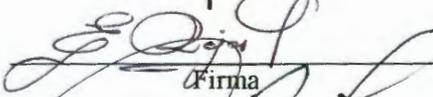
M.I. Alfredo Zepeda Garrido
Vocal

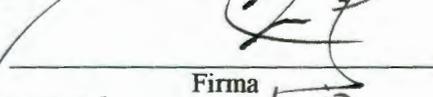
M en C. Darío Hurtado Maldonado
Suplente

M en C. Alfonso Álvarez Manilla Aceves
Suplente

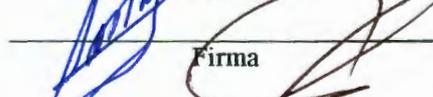
Ing. Jorge Martínez Carrillo
Director de la Facultad de Ingeniería


Firma


Firma


Firma


Firma


Firma

Dr. Sergio Quesada Aldana
Director de Investigación y Posgrado

CENTRO UNIVERSITARIO
QUERÉTARO, QRO. DICIEMBRE DE 2002
MÉXICO

No. Adq. TS 67730

No. Título _____

Clas. 624.154

V393e

Ei.1

AGRADECIMIENTOS:

- A mi madre: Quien estará en mi corazón a cada momento, y le dedico este trabajo por todo el cariño que me dio mientras estuvo a mi lado.
- A mis hermanos: Luis, Audomaro, Elizabeth, Geny, Leydi, Mary, Danilú, Guillermina y Carolina; porque con ellos aprendí a ser humano, y entre todos forjaron el carácter que me ha llevado a obtener logros tan importantes como éste. Y mis cuñados Manolo, Óscar y Joaquín por todo el apoyo que me brindaron..
- Al Sr. Juventino García: Quien me apoyó desde el principio de la maestría, y a quien le debo en muchas cosas haber concluido mis estudios, por su apoyo en el trabajo y los valiosos consejos que de él recibí.
- A Gisela Morales: Porque me estuvo apoyando durante la realización de este trabajo desde el inicio, y cuyos consejos y asesoría contribuyeron a terminarlo.
- A mis sobrinos: Yamili, Wendy, Jessica, Irving, Oscar, Edwin, Itzel, Joaquín, Shirley; porque son simplemente maravillosos.
- A mis compañeros de trabajo: Don Ezequiel, Miguel, Lorena, Xochil, Araceli, Gabriel, Gilberto, El Flaco, Esteban, René, D. Isabel; pues con ellos aprendí a trabajar los suelos. Una mención especial merece José A. de Santiago, quien estuvo asesorándome durante la realización de los ensayos de laboratorio de este trabajo. Enrique y todos los Cardós y Navarrete, Roberto, Arcadio, Trino, Nacho; y todas sus familias, a quienes dejé para venir a lograr este objetivo.
- A mis compañeros y amigos: Consuelo, Darío, Cuco, Gil, Sergio, Gregorio, Gonzalo, Ignacio, Tere López, Eleazar; por el apoyo que recibí de ellos estos años de estudio.
- A mi esposa: Verónica, porque me has hecho ser una mejor persona, te dedico este trabajo como pago por todos los esfuerzos y sacrificios que has hecho a mi lado, por seguir conmigo y apoyarme en todo lo que hemos hecho. Porque estás en mi corazón y eres mi razón de vivir y de hacer las cosas.
- A Dios: Por haberme concedido el privilegio de conocer a todas las personas que he mencionado y que me han ayudado a llegar hasta este momento.
- Agradezco de manera especial al Dr. Alfredo Pérez García, por brindarme su asesoría, amistad y apoyo incondicional, por haberme asesorado todo este tiempo siempre con los mejores consejos, para poder terminar este trabajo.

Resumen

Se presenta en este trabajo una serie de ensayos de carga realizados en pilotes a escala, con la finalidad de obtener la capacidad de carga última de éstos. Es calculada la capacidad de carga con las teorías de Terzaghi y Tomlinson, para obtener resultados comparables con los obtenidos de los ensayos. Para la realización de los ensayos se explica cada paso del procedimiento realizado para su reproducción. Es explicado en el marco teórico que se presenta, el proceso de la realización de las pruebas; así como las ventajas y los cuidados que deben tenerse para la realización de estos. Se explica la teoría y el procedimiento para la realización del análisis dimensional para poder extrapolar los resultados obtenidos de los ensayos en el modelo a pilotes de tamaño real. Los resultados obtenidos con dicho análisis son comparados con los obtenidos de las teorías utilizadas en el cálculo teórico de la capacidad de carga de los pilotes a escala. También se presenta un ejemplo de cálculo de la cimentación de una casa habitación de una planta utilizando el método propuesto, utilizando los parámetros obtenidos de las pruebas de carga de pilotes a escala; se indica en dicho capítulo todo el procedimiento que debe seguirse para realizar dicho diseño. El presente trabajo se ha realizado con la finalidad de proporcionar herramientas para diseñar cimentaciones de casas habitación que deban construirse en zonas en las que se encuentren suelos expansivos; puede servir este método como una opción viable para utilizar en el estado de Querétaro.

(Palabras clave: suelo, expansivo, pruebas, pilote, modelo)

Summary

A series of load tests carried out in scaled piles is presented in this work, with the purpose of obtaining the bearing capacity of these. The bearing capacity is calculated with the theories of Terzaghi and Tomlinson, to obtain results comparable to those obtained from load tests. For the realization of load tests, each step of the procedure is explained to carry out their reproduction. The process of the realization of the tests, as well as the advantages and the precautions that should be taken is explained in the theoretical homework.. The theory and the procedure for the realization of the dimensional analysis to be able to extrapolate the obtained results load tests in the pattern to piles of real size is also explained. The results obtained with this analysis are compared with those obtained with the theories used in the theoretical calculation of the load capacity from the piles to scale. An example of calculation of the foundation of a house is also presented using the proposed method, using the obtained parameters from the tests of load of piles to scale. In this chapter the whole procedure that should be continued to carry out this design is indicated. The present work has been carried out with the purpose of providing tools to design foundations of houses that should be built in areas where expansive soils exist; this method can be good as viable option to use in the state of Queretaro.

(Key words: soil, expansive, tests, pile, model)

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	vi
SIMBOLOGÍA	x
1. BASES TEÓRICAS Y ESTUDIOS PREVIOS	1
2. CAPACIDAD DE CARGA DE PILOTES	10
2.1 Pruebas de carga	10
2.2 Capacidad de carga de pilotes en arcilla	24
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	33
3.1 Trabajo de laboratorio	35
4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
4.1 Gráficas y tablas	46
4.2 Cálculo de la capacidad de carga de los pilotes de prueba	85
4.3 Presión y porcentaje de expansión	89
5. ANÁLISIS DIMENSIONAL	93
5.1 Determinación de la relación dimensional modelo – prototipo	99
5.2 Cálculo de las capacidades de carga de los pilotes reales	101
6. APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO: DISEÑO DE CIMENTACIÓN DE CASA HABITACIÓN	104
7. CONCLUSIONES	111
8. RECOMENDACIONES	113
9. BIBLIOGRAFÍA	114

Introducción

Antecedentes

Los cimientos más utilizados cuando se encuentran suelos en donde se tienen problemas de capacidad de carga, de asentamientos o de expansiones de la estructura, son a base de un sistema apoyado en cimentaciones profundas, con pilotes o pilas enterradas en el subsuelo hasta una cierta profundidad.

Los pilotes tienen un funcionamiento tal que con ellos se transmite la carga de la estructura a estratos firmes cuando trabajan en conjunto como grupo, distribuyendo la carga por su base o la transmiten al suelo movilizándolo la fricción lateral.

Una de las inquietudes para los ingenieros, arquitectos y constructores en el estado de Querétaro es la de encontrar un tipo de cimentación apropiada y adecuada para casas habitación, con el fin de evitar los daños que causan los suelos expansivos. Estos daños van desde simple grietas en paredes hasta el colapso total de la estructura. Por ello, los métodos tradicionales de cimentación para este tipo de construcciones resultan inadecuados, por lo que es necesario investigar el uso de cimentaciones diferentes, a fin de dar solución al problema de la construcción de estructuras ligeras sobre suelos expansivos de la región.

En la actualidad, en varias regiones del mundo donde existen suelos expansivos, se ha propuesto el uso de pilotes cortos para construir una cimentación tipo palafito. Este sistema de cimentación prácticamente no ha sido utilizado en nuestra región, a pesar de las múltiples ventajas que presenta en cuanto a su probable buen funcionamiento, al estar levantada la estructura uno o dos decímetros, y con lo cual es probable que esta no presentará daños aun cuando los suelos sean fuertemente expansivos.

Chen (1975) elaboró un modelo para medir la fuerza de levantamiento de un pilote; usó arcilla de Denver compactada con una humedad de 14% en un contenedor de acero de 23 cm de profundidad; los pilotes fueron de 5 cm de diámetro. Con estas pruebas intentó medir

la fuerza de levantamiento y la capacidad de punta de los pilotes. El Dr. Alfredo Pérez García (2002) realizó ensayos en modelo de pilotes de pequeño diámetro en arcillas expansivas. O. J. Luna et al (2002) realizó el estudio de un modelo instrumentado de pilote de fricción; el material utilizado fue suelo marino reconstituido.

Prácticamente todos los estudios en modelo de pilotes han servido para obtener resultados cualitativos y en ningún caso se realizaron los estudios para obtener la capacidad de carga del pilote modelo y poder extrapolar los resultados obtenidos para obtener la capacidad de carga de pilotes de tamaño real.

Justificación

El problema radica en que los suelos típicos de la región queretana son superficialmente de tipo arcilloso muy fino, con alto porcentaje de montmorilonita y clasificados como arcillas o limos de alta plasticidad, CH o MH.

Su grado de saturación es bajo, debido a las condiciones climáticas del semi-desierto queretano, es decir, presentan bajos valores de contenido de agua, sobre todo superficialmente; donde están expuestos a fuerte insolación y evaporación la mayor parte del año. Por ello, su comportamiento al estar en contacto con el agua, es de forma tal que responden con un hinchamiento o expansión, tan fuerte que es capaz de romper cualquier superficie extendida que esté en contacto con estos suelos, aun cuando se trate de estructuras hechas de concreto.

Al expandirse el suelo es capaz de fracturar cimentaciones tan frágiles como los cimientos de mampostería. De igual manera, si las cimentaciones tipo zapatas aisladas y corridas o losas de cimentación no fueron adecuadamente analizadas y diseñadas tomando en cuenta el comportamiento de los suelos al expandirse, dichas cimentaciones no serán capaces de soportar los esfuerzos aplicados por los suelos, y se fracturarán.

Una alternativa a este problema es soportar toda la estructura de una vivienda con un sistema basado en trabes y losa de piso, las que a su vez se apoyan en cimientos semiprofundos o tipo pilote, los cuales tendrán probablemente mejor comportamiento que las cimentaciones tradicionales.

Es importante decir también que muy pocos ingenieros de la práctica conocen los métodos de cálculo de este tipo de cimentaciones a base de pilotes cortos. Por otro lado, la mayor parte de los ingenieros civiles de la región desconocen parcialmente el problema del comportamiento de suelos expansivos, y también muchos de ellos son poco capaces de calcular estructuralmente una cimentación apoyada sobre un suelo potencialmente expansivo.

Se justifica un proyecto como el presentado en este trabajo, ya que es necesario verificar la capacidad de carga y el comportamiento general de pilotes cortos (en modelo reducido), y que dicho comportamiento pueda ser extrapolado a pilotes de tamaño real.

Extrapolar los resultados de pruebas de carga sobre modelos de pilotes para conocer la capacidad de carga de pilotes de tamaño real, es una aplicación que interesa tanto a investigadores de nuestra Facultad, como a ingenieros dedicados a proyectar y construir cimentaciones sobre suelos potencialmente expansivos.

Los resultados del proyecto servirán para los profesionales de la construcción en Querétaro, ya que con dichos resultados se podría tener la aproximadamente la capacidad de carga de pilotes instalados en el suelo típico del valle queretano, en cualquier situación de humedad (asociada a la succión del suelo).

Otro grupo de utilizadores de la información obtenida son los profesores y alumnos de la DEPFI, ya que con los resultados obtenidos se incrementaría el conocimiento del comportamiento del suelo de Querétaro.

Hipótesis y objetivos

El cálculo de la capacidad de carga de un pilote reside básicamente en su capacidad de carga por fricción a lo largo del cuerpo del pilote y de su capacidad de carga al nivel de la base o punta del pilote.

Haciendo pruebas de carga de pilotes por separado se podría conocer la carga que toma cada una de las partes.

Mediante un estudio de análisis dimensional es posible estimar la fuerza que tomará un pilote en modelo reducido y extrapolarla a pilotes de tamaño real (prototipo). Esto será posible al analizar las fuerzas, presiones, desplazamientos, áreas, longitudes, etc., tanto del prototipo como del modelo.

El objetivo primordial de este estudio es el de presentar resultados de los ensayos de carga que se efectuarán sobre pilotes colados en arcilla, realizados a una escala tal que pueda extrapolarse su capacidad de carga a pilotes de tamaño real.

Las hipótesis que se plantearán en el estudio son:

- La capacidad de carga de los pilotes en suelos expansivos bajo condiciones críticas es adecuada para soportar sin mayor problema las cargas transmitidas por construcciones hasta de dos niveles.
- Haciendo una ampliación de la base de los pilotes, la capacidad de carga se incrementa considerablemente, haciendo posible la colocación de pilotes en cada esquina.
- Por medio de análisis dimensional, es posible estimar la capacidad de carga de pilotes reales usando los resultados de pruebas de carga de pilotes a escala.

Simbología

U	Fuerza de tensión desarrollada por la expansión en la zona activa.
P	Carga muerta de la estructura.
Fa	Fuerza de anclaje desarrollada en la zona estable.
F.S.	Factor de seguridad.
f	Coefficiente de fricción entre el concreto y el suelo.
L	Longitud del pilote.
u	Presión de expansión total.
l	Longitud del pilote en la zona estable del suelo.
r	Radio del pilote.
δ	Levantamiento de un pilote aislado o grupo de pilotes.
δ_{lim}	Deformaciones verticales máximas permisibles en el edificio.
δ_g	Levantamiento de la superficie del suelo.
p	Perímetro del pilote.
k, m, n	Coefficientes que dependen de las propiedades del suelo y del pilote.
a	Coefficiente que toma en cuenta la desigual distribución de fuerzas en un grupo de pilotes.
Qd	Carga total de diseño de un pilote en una prueba de carga.
Q _{max}	Carga máxima que soporta un pilote en una prueba de carga.
K	Factor de ajuste por diámetro de un pilote.
D	Diámetro equivalente del pilote.
fsd	Resistencia al corte drenado de un suelo.
cu	Cohesión no drenada del suelo
As	Área lateral del fuste del pilote.
Ap	Área de la punta del pilote.
Qf	Resistencia por fricción última de un pilote.
Qp	Resistencia por punta última de un pilote.
ϕ	Ángulo de fricción interna del suelo.
Nc, Nq, N γ	Factores que dependen del ángulo de fricción del suelo.
Qa	Capacidad de carga admisible de un pilote.
Gw	Grado de saturación del suelo.
σ'	Esfuerzo efectivo en el suelo.
σ_3	Esfuerzo de confinamiento.
σ_3	Esfuerzo vertical aplicado.
e	Relación de vacíos.
ω	Humedad del suelo.
γ	Peso volumétrico del suelo.
Df	Profundidad de la punta del pilote.
α	Factor que depende del ángulo de fricción del suelo.
δ	Factor de adherencia entre el pilote y el suelo.
λ	Factor de escalamiento del análisis dimensional.

1. Bases teóricas y estudios previos

Cuando se utiliza una cimentación con pilotes, la carga que ejerce el edificio es soportada por la reacción en la punta de los pilotes (esfuerzo de corte) y por la fricción lateral que se desarrolla a lo largo de la superficie del pilote.

Cuando en la zona se encuentran suelos expansivos, los pilotes son utilizados para transmitir la carga de la estructura a un estrato de suelo estable, debajo de la capa activa; en donde los pilotes estarán apoyados para tener un anclaje eficaz contra el posible levantamiento provocado por la expansión de la capa sobreyacente. Cuando se usan pilotes para cimentar una construcción en suelos expansivos, dicha construcción deberá estar separada de la superficie del suelo, para que no se presenten daños en pisos e instalaciones. La distancia de separación estará regida por el máximo levantamiento que se estime pudiera presentarse en la superficie del suelo (Fig. 1.1).

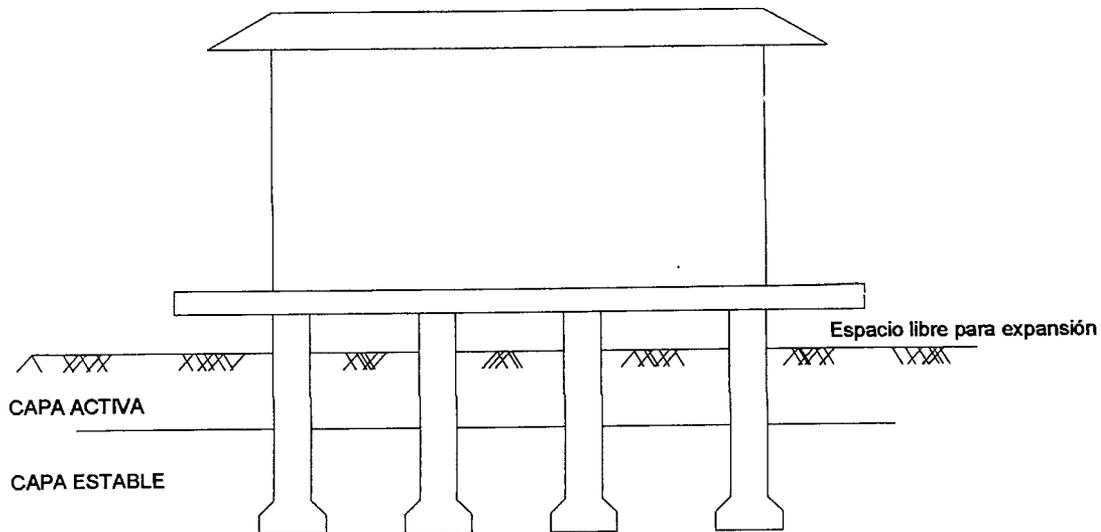


Fig. 1.1. Cimentación a base de pilotes cortos.

(Jiménez, 1980)

El comportamiento de los pilotes en suelos expansivos está regido por las variaciones de la humedad a lo largo del año. En épocas de estiaje, la humedad del suelo tiende a disminuir o a permanecer estable, el parámetro de diseño que se toma es la capacidad de carga última del suelo; en cambio, cuando es la época de lluvias, las fuerzas de levantamiento que se presentan en el suelo tienden a sacar el pilote del terreno, a lo cual debe oponerse el anclaje del pilote en la zona estable. Un pilote correctamente diseñado deberá satisfacer ambos requerimientos, de manera que queden controlados los desplazamientos verticales que pudieran dañar la estructura.

Una opción para cimentar una vivienda sobre suelo expansivo, es la de utilizar pilotes cortos; esta pudiera ser una solución económica, a pesar de que será necesario utilizar trabes que estén conectadas a los pilotes para transferir las cargas de la construcción a los pilotes, y de éstos al suelo.

Los factores que pueden influir en la utilización de pilotes cortos en una cimentación son:

- La estratigrafía del suelo hasta la profundidad de apoyo.
- La capacidad de carga admisible del suelo.
- La magnitud de los asentamientos esperados.
- La magnitud de la expansión del suelo.

Será más factible utilizar pilotes cortos en una cimentación si la capa activa tiene poco espesor, y la zona estable es de adecuada resistencia al esfuerzo cortante y de baja compresibilidad, en estado seco como saturado.

Los dos tipos de pilotes cortos más utilizados son:

- Pilotes colados en el lugar.
- Pilotes precolados.

Pilotes colados en el lugar.

Estos pilotes deberán cumplir con la siguiente condición de equilibrio:

$$U \leq P + \frac{Fa}{F.S.} \quad 1.1$$

Donde: U = Fuerza de tensión desarrollada por la expansión en la zona activa (Ton).
P = Carga muerta de la estructura (Ton).
Fa = Fuerza de anclaje desarrollada en la zona estable (Ton).
F.S. = Factor de seguridad.

La fuerza de tensión (U) se calcula con la siguiente expresión:

$$U = 2\pi r f u (L - l) \quad 1.2$$

Donde: U = Fuerza de elevación total (Ton).
r = Radio del pilote (m).
l = Zona estable del suelo (m).
L = Longitud del pilote (m).
u = Presión de expansión total (Ton/m²).
f = Coeficiente de fricción entre el concreto y el suelo.

La fuerza de anclaje (Fa) está dada por:

$$Fa = 2\pi r f_s l \quad 1.3$$

Donde: Fa = Fuerza de anclaje (Ton).
r = Radio del pilote (m).
f_s = Fricción lateral del pilote en la zona estable (Ton/m²).
l = Profundidad de la zona estable que penetra el pilote (m).

El factor de seguridad F.S. puede tomar el valor de 1.5.

Cuando se utiliza este tipo de pilote, es importante verificar que el fondo de la excavación esté limpio y libre de material suelto y evitar la segregación en el concreto durante el colado del elemento. Es también importante que el volumen de concreto por pilote colado

sea el que haya sido calculado, esto con el fin de que los elementos sean similares y se pueda dar continuidad a la cimentación. Debe evitarse que en la parte superior del pilote, es decir, la parte que se encuentra en la zona activa, se formen protuberancias, ya que esto aumentaría el valor de la fuerza de elevación total (U). El acero de refuerzo del pilote deberá tener el recubrimiento mínimo especificado en el proyecto o el reglamento de construcción vigente.

Pilotes precolados:

Para utilizar este tipo de pilotes, se requiere que la carga muerta de la estructura (P) sea mayor o igual que la fuerza de tensión que se produce por la expansión del suelo en la zona activa; de manera que la longitud de penetración del pilote en la zona estable dependerá de la capacidad de carga del pilote y de los asentamientos posibles.

Capacidad de carga última en pilotes

Cuando hablamos de la estabilidad de un pilote, nos referimos a la penetración de este en el suelo, cuando es rebasada la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, por efecto de las cargas aplicadas por la construcción. Dicha estabilidad dependerá de la capacidad de carga última del suelo, la cual es función de dos componentes:

- La capacidad de carga última de punta.

Esta capacidad está en función de las dimensiones, forma y aspereza de la punta del pilote; así como también de la presión de confinamiento del suelo al nivel de la punta, la resistencia al corte del suelo que rodea la punta del pilote y de la compresibilidad del suelo.

- La capacidad de carga última por fricción.

Esta depende de la resistencia al cortante del suelo que se encuentra alrededor de todo el cuerpo del pilote. Otros factores que influyen son: los esfuerzos efectivos horizontales que están presentes después de haber hincado el pilote y la compactación del suelo que rodea al pilote.

Fricción lateral negativa

Los pilotes que trabajan por punta, suelen estar apoyados sobre un estrato firme profundo, arriba del cual se encuentran depósitos de suelo de mayor compresibilidad que están sujetos a consolidación. Cuando se presenta esta situación, se presenta un movimiento relativo entre el pilote y el suelo, de manera que es afectada la resistencia última al corte del suelo que está cercano al fuste del pilote; de manera que parte del movimiento del suelo cercano será transmitido a los pilotes por efecto de la fricción lateral desarrollada en el fuste.

Al fenómeno anterior se le llama fricción lateral negativa, ya que tiene una dirección de movimiento de dirección opuesta a la que ofrece la fricción lateral que da resistencia de penetración al pilote. Este efecto se reconoce porque los esfuerzos verticales disminuyen en la masa del suelo, de manera que se presentan dos acciones:

- Se presenta un incremento en la carga sobre el pilote.
- Aparece una reducción de los esfuerzos efectivos confinantes al nivel de la punta, de manera que existe una reducción en la capacidad de carga última de punta del pilote.

El fenómeno de la expansión del suelo provocará una fricción lateral, la cual a su vez producirá esfuerzos de tensión de gran magnitud en los pilotes, sobre todo si no existe separación entre la parte inferior de la construcción y la superficie del suelo, o si la separación es insuficiente (Bowles, 1977).

En la época de estiaje, la capa activa de los suelos expansivos tiende a contraerse por pérdida de humedad; al ocurrir este fenómeno, los estratos superiores provocan la aparición de la fricción lateral negativa, la cual provocará asentamientos por el acortamiento axial en los pilotes de punta, o bien, un asentamiento producido por la penetración de la punta del pilote en el suelo en el que esta apoyada. Para contrarrestar estos movimientos, sería necesario que el pilote tenga una longitud suficiente dentro de la capa activa para desarrollar capacidad de carga por fricción lateral y así evitar el movimiento vertical (Figura 1.2 a).

Cuando es época de lluvias, el contenido de agua del suelo aumenta, de modo que aparece el fenómeno de expansión. La parte superior del pilote, que está embebido en la capa activa, es empujada hacia arriba por los esfuerzos que aparecen por la expansión; pero en la zona estable se generan fuerzas de anclaje que se oponen al levantamiento del pilote. De modo que el pilote estará sujeto a esfuerzos de tensión (Fig. 1.2 b).

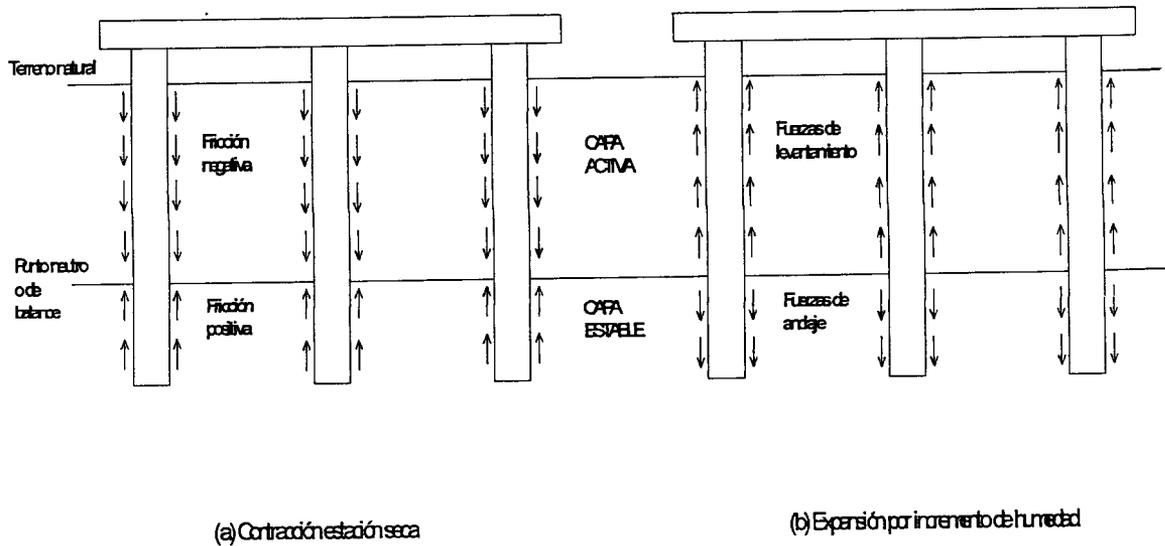


Fig. 1.2. a) Pilote sometido a fricción lateral negativa. b) Pilote sometido a fuerzas de levantamiento por expansión. (Jiménez, 1977)

La expansión del suelo provoca un cambio en su estructura y origina disminución de solidez de la masa de suelo, de modo que la capacidad de carga de pilotes en suelos saturados es mucho más baja que suelos en estado no saturado (aproximadamente del 50%).

Mecánica de elevación del pilote

Se ha dicho antes que el incremento de la humedad de un suelo produce el fenómeno de expansión, de modo que aparecen fuerzas verticales que inducen al levantamiento del pilote. La representación gráfica del pilote que proponen Komornik y Zeitlen (1973) se basa en las presiones efectivas, y determinan que la arcilla que está en contacto con la superficie del pilote, no puede expandirse si no se presenta el deslizamiento suelo – pilote.

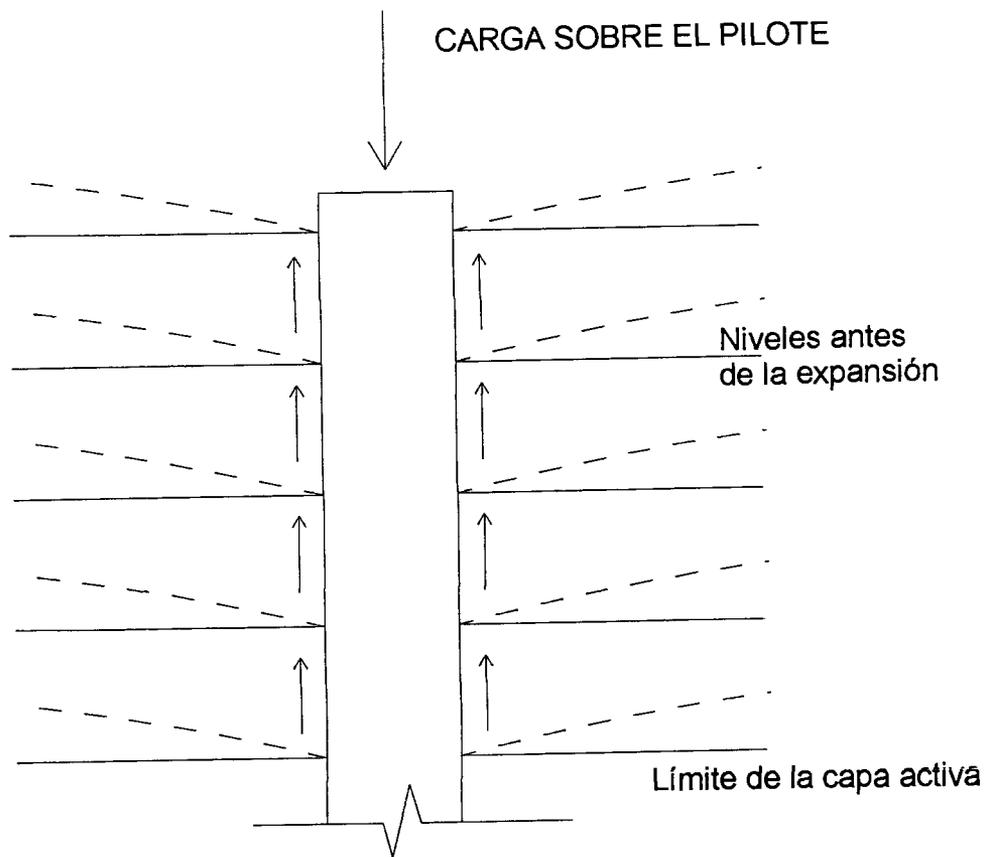


Fig. 1.3. Pilote anclado, hincado en una capa activa de arcilla expansiva. (Jiménez, 1980)

Pilotes con base de campana

Una manera para aumentar la capacidad de carga de pilotes apoyados en estratos poco resistentes es ampliar el área de la base, ya que con esto crece el área de contacto y proporciona mayor resistencia a la penetración del pilote en el suelo. Otro efecto positivo

de esta ampliación es que proporciona un mejor anclaje contra las fuerzas de levantamiento que produce la expansión de los suelos. El ángulo de inclinación de la campana de la base debe ser del orden de 60° con respecto a la horizontal; y el diámetro de la campana puede ser de hasta tres veces el diámetro del fuste.

La principal ventaja de los pilotes con base de campana es que la resistencia contra las fuerzas de levantamiento no está afectada por el cambio de la estructura y la pérdida de fricción en la zona estable del suelo; además, el peso del suelo que está sobre la campana no es afectado por el cambio de humedad, lo cual provee de un factor de seguridad adicional del pilote contra el levantamiento.

Este tipo de pilotes resulta muy adecuado cuando se trata de cimentar en zonas en las que los suelos superficiales son muy expansivos, la capa rocosa es muy delgada o inexistente y existe la posibilidad de que se presente la condición del nivel freático colgado.

La mayor desventaja en la utilización de pilotes con base de campana está dada por el costo y la dificultad de construcción e inspección. Las campanas deberán formarse con un aparato especial, pero en estratos de roca será necesario usar equipos pesados o cualquier otro factor que podría incrementar el costo de la construcción.

Una alternativa para evitar el efecto negativo de las desventajas es la de utilizar pilotes de fuste recto con mayor penetración en la zona estable, para proveer al pilote de mayor resistencia a los desplazamientos verticales.

Comportamiento de pilotes en suelos expansivos

Se ha demostrado en investigaciones (Jiménez, 1977) que la capacidad de carga de pilotes en suelos con humedad natural mostraron que la fricción de las superficies laterales corresponde a la máxima fuerza de levantamiento, en tanto que en pilotes que sufrieron expansión, la fricción corresponde a la mínima fuerza de levantamiento. Se encontró que se crean dos diferentes zonas de interacción con direcciones opuestas de las fuerzas

tangenciales actuantes: una zona “activa” en la parte superior del pilote y una zona de “freno” debajo. En la primera zona, los esfuerzos tangenciales actuantes fuerzan al pilote a elevarse; y en la segunda, los esfuerzos impiden el levantamiento.

Durante la expansión, la longitud de la zona activa disminuye a un valor constante. Después de esto, los desplazamientos del pilote serán iguales al levantamiento del estrato de suelo localizado a la profundidad igual a la mitad de la longitud del pilote.

El cálculo de los desplazamientos verticales se basa en la siguiente condición:

$$\delta \leq \delta_{lim} \quad 1.4$$

Donde: δ = Levantamiento de un pilote aislado o grupo de pilotes.
 δ_{lim} = Deformaciones verticales máximas permisibles en el edificio.

Sorochan propone la siguiente fórmula para calcular el levantamiento de un pilote aislado, en suelos expansivos:

$$\delta u = n \delta g - \frac{m}{pk} P \quad 1.5$$

Donde: δg = Levantamiento de la superficie del suelo.
 p = Perímetro del pilote.
 P = Carga sobre el pilote.
 k, m, n = Coeficientes que dependen de las propiedades del suelo y de las dimensiones del pilote.

El levantamiento de un grupo de pilotes se calcula con la siguiente fórmula:

$$\delta g p = a n \delta g - \frac{m \cdot c}{p \cdot k} P \quad 1.6$$

Donde: a = Coeficiente que toma en cuenta la desigual distribución de fuerzas en el grupo de pilotes.
 c = Coeficiente que depende del número de pilotes en el grupo.

Desafortunadamente, Sorochan no proporciona más información acerca de los coeficientes k, m, a y c .

2. Capacidad de carga de pilotes

2.1 Pruebas de carga

Cuando se realizan análisis de capacidad de carga de un suelo, es un hecho que existen muchas incertidumbres en las teorías del comportamiento pilote – suelo, y es difícil definir con pruebas experimentales el comportamiento mecánico de un suelo. De modo que con estos antecedentes, queda justificada la necesidad de realizar pruebas de carga de pilotes.

Los objetivos de la realización de pruebas de carga de pilotes son:

- Determinar la capacidad de carga vertical de pilotes apoyados en estratos firmes.
- Definir confiablemente la longitud necesaria de los pilotes de fricción.
- Definir la capacidad de carga lateral.
- Ensayar el tipo de pilote, técnicas y equipo de hincado y verificar si es necesario realizar perforaciones previas.
- Ensayar el procedimiento constructivo con el que se proyecta fabricar los pilotes.

(SMMS, 1989)

Pruebas de carga estática

Estas pruebas pretenden definir el comportamiento del sistema pilote – suelo cuando es sometido a una secuencia de cargas verticales, que simulan las que transmitirá la construcción. Los principales procedimientos de prueba están indicados en la figura 2.1. Algunas instituciones admiten pruebas que combinan dos de los procedimientos indicados.

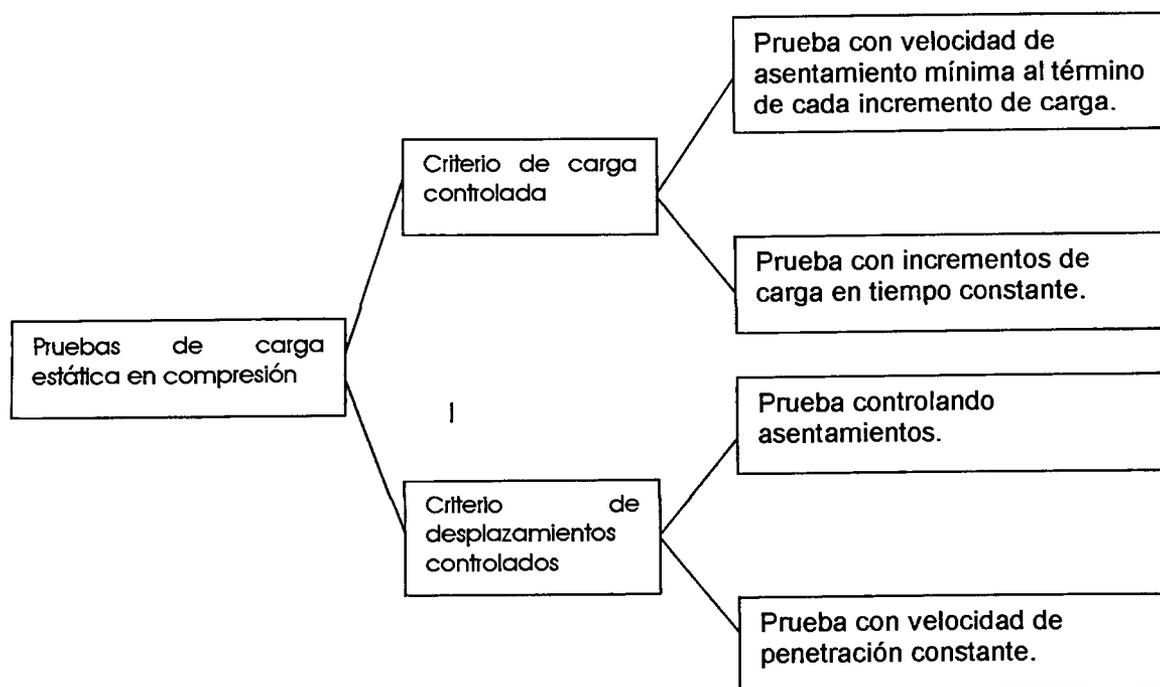


Fig. 2.1. Tipos de pruebas de carga.

(SMMS, 1989)

Criterio de carga controlada

Este es el tipo de prueba más utilizado. Con el resultado es posible determinar la magnitud de la carga última del pilote; la carga se aplica en incrementos siguiendo alguno de los siguientes criterios:

- a) Aplicar incrementos de carga iguales cada vez que la rapidez de asentamiento del pilote se reduzca a un valor mínimo preestablecido.
- b) Aplicar incrementos de carga iguales en intervalos de tiempo también constantes.

Rapidez de asentamiento mínimo

Con este criterio, se aplican los incrementos de carga después de que la rapidez de asentamiento del pilote, generada por el incremento de carga anterior, se haya reducido a un valor mínimo preestablecido; usualmente, este valor es del orden de 0.25 mm/hr. Los

incrementos de carga se sugieren de 25% de la capacidad de carga de diseño Q_d , con un factor de seguridad de 3.

En el proceso de prueba, será necesario comprobar en cada incremento de carga que la rapidez de asentamiento se ha reducido al valor establecido con anterioridad. En la Figura 2.2 se muestra la gráfica que debe construirse y se indica la manera en que se determina que se haya cumplido la condición mencionada.

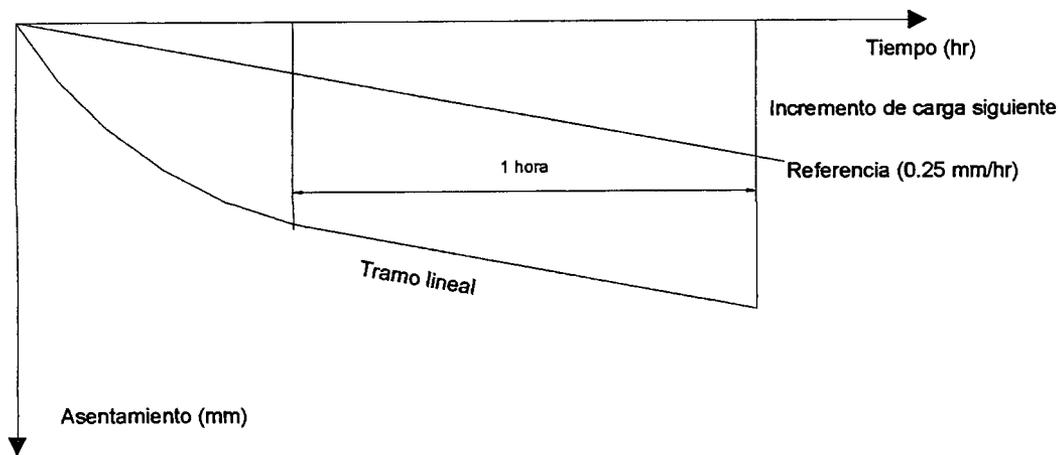


Fig. 2.2 Control de la prueba

(SMMS, 1989)

En esta prueba, la carga máxima a la que se debe llegar es de dos veces la carga de diseño Q_d ; esta carga se debe mantener durante dos horas para después pasar a la etapa de descarga, en decrementos de carga que pueden ser de $0.25 Q_{max}$ a cada veinte minutos (Fig. 2.3). La recuperación del asentamiento se debe medir a los 5, 15, y 30 minutos después de que la carga ha sido retirada por completo o, de ser posible, por más tiempo.

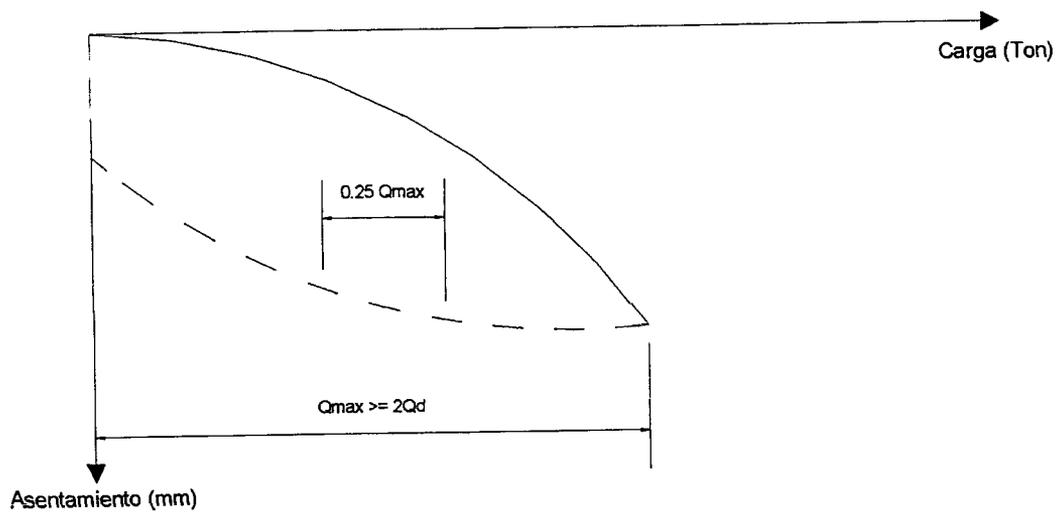


Fig. 2.3 Etapa de descarga

(SMMS, 1989)

La información obtenida con esta prueba, en la etapa de carga, se muestra en forma esquemática en la figura 2.4.

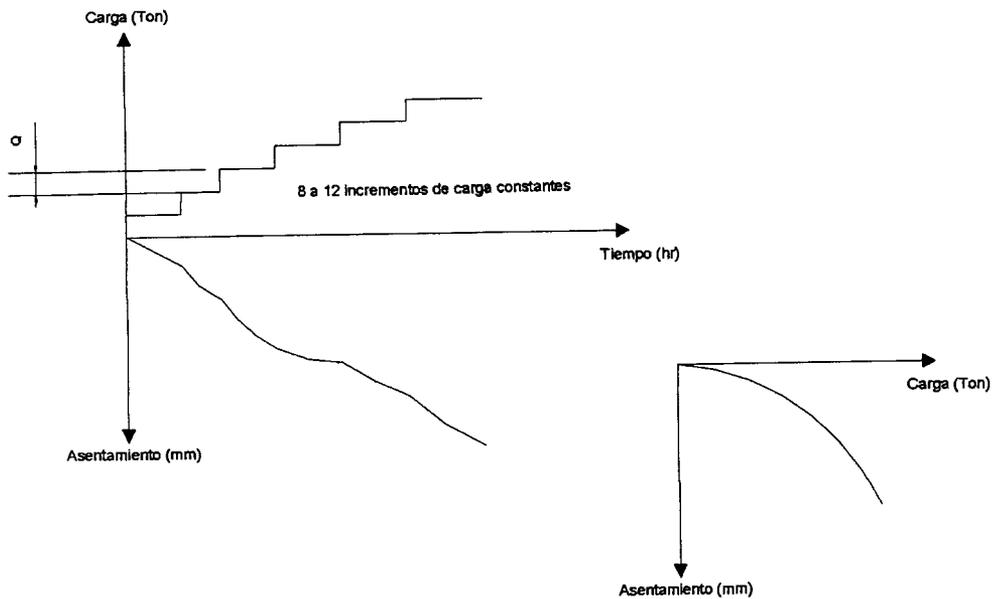


Fig. 2.4 Resultados de la prueba

(SMMS, 1989)

Incrementos de tiempo constantes

En esta prueba se aplican incrementos de carga iguales en intervalos de tiempo iguales, de preferencia de 15 minutos; la magnitud del incremento de carga se sugiere del 5% de la capacidad de carga última del pilote calculada. Los resultados de esta prueba se han de presentar como se sugiere para la prueba anterior, en la figura 2.4, pero los incrementos de tiempo serán constantes. La descarga también se hace de manera similar a la prueba anterior.

Con dos ciclos de carga y descarga

Otro procedimiento para realizar la prueba de carga en pilotes es aplicar dos ciclos de carga y descarga, como se muestra en la Fig. 2.5. En el primer ciclo la aplicación de la carga se debe hacer siguiendo el criterio de rapidez de asentamiento mínimo; cuando se alcanza la carga total, en este caso de una a dos veces el valor de Q_d , se procede a descargar. En el segundo ciclo de carga se debe seguir el criterio de los intervalos de tiempo constantes, al alcanzar el valor de la carga a la que se llegó en el primer ciclo, se sigue cargando con incrementos de $0.1 Q_d$, pero vigilando una rapidez de asentamiento mínima, hasta llegar a la carga máxima que hace fallar al pilote. La carga máxima a la que se ha llegado en este segundo ciclo (Q_{max}) se debe mantener durante dos horas como mínimo para después proceder a la descarga en decrementos de $0.25 Q_{max}$, con intervalos de 20 minutos. La recuperación del asentamiento del pilote se medirá a los 5, 15 y 3 minutos de haber retirado totalmente la carga, o si es posible durante más tiempo.

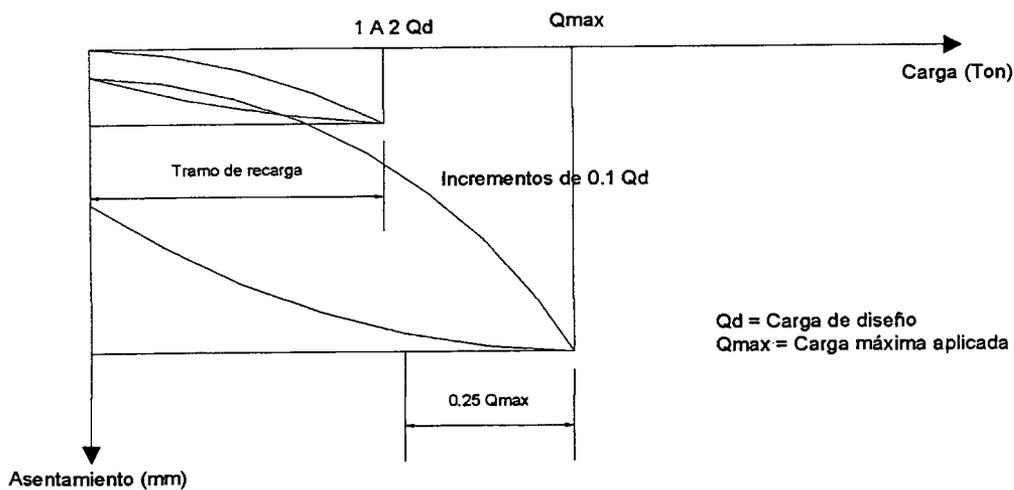


Fig. 2.5 Prueba con dos ciclos de carga y descarga.

(SMMS, 1989)

Con carga cíclica

Esta prueba sirve para determinar cuál es la carga de fluencia de un pilote sometido a ciclos repetidos de carga y descarga, que pueden variar entre un valor mínimo y uno máximo, siendo éste último usualmente el doble del primero. Los niveles de carga se deben mantener el tiempo necesario para que el pilote deje de presentar asentamiento o recuperación. En el reporte, deben registrarse los valores de carga y asentamiento cada dos minutos.

Los incrementos de carga aplicados deben ser mayores cada vez, siendo usualmente de 2/16 a 1/16, 4/16 a 2/16, 6/16 a 3/16, 8/16 a 4/16, etc.; del valor de la carga última. Para cada rango inicial de carga deben hacerse dos ciclos, después se aumentan a quince, y en la carga última se hacen veinte ciclos.

Para efectuar esta prueba es necesario contar con un sistema hidráulico que pueda permitir aplicar los niveles de carga de manera rápida y precisa, además de poder mantener constante la carga aplicada a pesar de los desplazamientos del pilote.

Este tipo de pruebas son empleadas para poder disminuir el tiempo necesario para definir la capacidad de carga de pilotes, y debe seguir alguno de los dos criterios siguientes:

- Haciendo variar la carga de manera que los asentamientos que presente el pilote sean constantes.
- Variando la carga aplicada, para que el pilote tenga rapidez de penetración constante.

Este criterio tiene las siguientes limitaciones:

- No es posible distinguir el asentamiento inmediato para una carga aplicada.
- Es necesario contar con un sistema hidráulico que permita variar los niveles de carga.

Con control de asentamientos.

Este método consiste en aplicar la carga necesaria al pilote, que le provoque incrementos de asentamientos de $0.01 D$, donde D es el diámetro del área equivalente (ver Tabla 2.1), hasta alcanzar un asentamiento de $0.1 D$. Dado que la magnitud de la carga que produce incrementos de asentamientos constantes es variable en el tiempo, el criterio de esta prueba consiste en inducirlos cuando la variación de la carga necesaria para mantener el asentamiento previo sea menor que el 0.1% de la carga total Q_i aplicada por hora ($0.001 Q_i/hr$) hasta ese momento.

Sección	Dimensión significativa	K
Circular	Diámetro	1.00
Cuadrada	Lado	1.13
Triangular equilátera		0.55
Octagonal		2.48

$D =$ Diámetro equivalente $= k \times$ dimensión significativa.

$K =$ Factor de ajuste.

Tabla 2.1 Factores para definir el diámetro equivalente.

(SMMS, 1989)

Con rapidez de penetración constante

En este caso, la carga aplicada se debe ir aumentando, de manera que el pilote tenga una rapidez de penetración constante de 0.25 a 1.25 mm/min en suelos cohesivos y de 0.75 a 2.5 mm/min en suelos granulares. Cuando la penetración total alcanza el valor del 15% de diámetro del pilote o se llega a la capacidad de resistencia del sistema de carga, entonces se procede a descargar. Para el control de la prueba, se deben tomar lecturas de carga y asentamiento por lo menos cada dos minutos, pero si se presentan variaciones importantes en la carga, deben reducirse los tiempos de toma de lecturas.

Instalación para una prueba de carga estática

El diseño de la instalación de una prueba de carga estática dependerá del tipo de prueba que se vaya a realizar, para que pueda ser posible llegar a los niveles de carga y deformación de manera sencilla y segura, previendo que el grado de precisión esté en un rango admisible; además debe permitir llevar un control confiable del desarrollo de la prueba y el registro de información suficiente para la interpretación de los resultados de la misma.

Los equipos y dispositivos que se necesitan para realizar una prueba de este tipo están indicados en la Fig. 2.6.

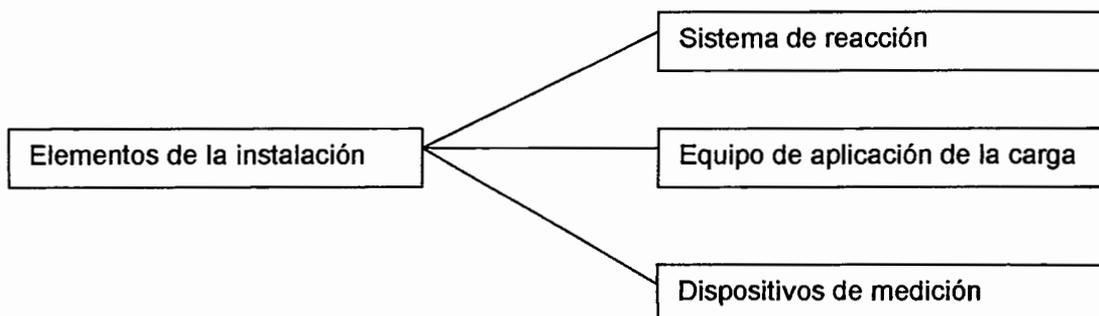


Fig. 2.6 Elementos de la instalación para una prueba de carga estática.(SMMS, 1989)

Sistema de reacción

Para construir el sistema de reacción para estas pruebas se necesita formar un puente con dos o más vigas, las cuales podrán tener algún lastre o tener sus extremos anclados, para dar el apoyo necesario al equipo de carga. El sistema deberá ser estable y seguro de modo que las cargas aplicadas al suelo no influyan en el comportamiento del pilote. Entre los sistemas de reacción más usados se encuentran los siguientes:

- Plataforma con lastre.
- Pilotes de anclaje.
- Viguetas de anclaje.

A continuación se presentan algunas consideraciones importantes en la utilización de los sistemas de reacción más comunes:

- a) Plataformas con lastre. Al utilizar este sistema de reacción deberá tenerse precaución, pues existe peligro de volteo cuando falla el pilote o cuando el lastre es insuficiente y tiende a levantarse. Para tomar las medidas de deformación deberán hacerse a distancia, para evitar que los operadores tengan que estar debajo de la plataforma.

Cuando comienza la prueba, los apoyos estarán transmitiendo al suelo el peso total del lastre, de modo que los esfuerzos inducidos disminuirán al incrementar la carga soportada por el pilote. De modo que será necesario que el lastre tenga un peso mayor a la carga máxima que puede soportar el pilote, para evitar que la influencia de los apoyos sea significativa y pueda influir en los resultados obtenidos.

- b) Pilotes de anclaje. Otras opciones para poder tener un sistema de reacción son utilizar pilotes inclinados o verticales. En el primer caso se reduce más notablemente la interacción entre los pilotes de reacción y el de prueba.

Pero la utilización de pilotes verticales tiene la gran ventaja de ser más económico, pues es posible aprovechar los pilotes que serán parte de la cimentación como pilotes de anclaje. Al utilizar esta opción habrá que cuidar que los pilotes estén alineados para evitar excentricidades en la carga; además, deben rehincarse para evitar que disminuya la capacidad de carga por punta de los pilotes usados para anclaje.

Es importante mencionar que al usar pilotes de anclaje, la interacción entre los pilotes será más significativa al alcanzar mayores niveles de carga.

- c) Viguetas de anclaje. Este sistema es relativamente nuevo; tiene las ventajas de que es de bajo costo y el sistema de instalación requiere poco tiempo para ser elaborado. Pero al haber sido utilizado poco, aún existen incertidumbres sobre la interacción entre las viguetas de anclaje y el pilote de prueba.

Equipo de aplicación de la carga

Para aplicar la carga al pilote se puede seguir alguno de los sistemas siguientes:

- Utilizar un lastre, cuyo peso es incrementado gradualmente durante la ejecución de la prueba. En este caso, las vigas de reacción sirven sólo para recibir el lastre y transmitir la carga al pilote. Se usan los apoyos laterales para prevenir la caída del lastre al fallar el pilote, de modo que deben diseñarse para que no rebasen la capacidad de carga del suelo en el que están apoyados al recibir la carga total de la prueba.
- Usar un sistema hidráulico de presión, el cual debe ser colocado entre las vigas de reacción y el pilote; de modo que la reacción proviene del lastre o de piezas ancladas.

El método de ir incrementando el peso del lastre es muy lento y poco recomendable, pues por el mismo proceso de carga y las maniobras necesarias, existe el riesgo de desajustar los dispositivos de medición o dañarlos por completo. En cambio, el sistema hidráulico (Fig. 2.7), permite controlar de mejor manera y con más precisión los niveles de carga; pero será necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) El sistema hidráulico debe contar con mecanismos para controlar el movimiento del pistón, de modo que e mantenga una carga constante al ir asentándose el pilote o permitir una rapidez de deformación uniforme, según el tipo de prueba que se esté realizando.
- b) Si el sistema de carga consta de dos o más gatos, estos deberán estar interconectados.
- c) La longitud del pistón deberá ser mayor que los asentamientos que pudiera tener el pilote.
- d) Debe colocarse un apoyo esférico sobre el pistón para eliminar la transmisión de momentos al pilote.
- e) Para transmitir la carga al pilote, deberá usarse una placa horizontal de acero adherida con mortero a la cabeza del elemento.

EQUIPO	DIAGRAMA DE INSTALACIÓN	COMENTARIOS
SISTEMA HIDRÁULICO	<p>El diagrama ilustra la configuración de un sistema hidráulico para la aplicación de carga. Desde la base, un gato hidráulico sostiene un pistón. El pistón está apoyado en un apoyo esférico, el cual a su vez descansa sobre una placa de apoyo. El pistón está conectado a un elemento de prueba mediante atesadores. Una célula de carga y un manómetro están integrados en el sistema para medir la fuerza aplicada.</p>	<p>El sistema hidráulico debe tener la capacidad de carga y la longitud del pistón requeridos durante la prueba. es necesario un mecanismo que regule el movimiento del pistón para mantener una carga constante conforme se deforme el pilote o para permitir una rapidez de deformación uniforme, dependiendo del tipo de prueba que se realice.</p>

Fig. 2.7 Equipo de aplicación de la carga.

(SMMS, 1989)

Dispositivos de medición

Al efectuar una prueba de carga, deben medirse los siguientes parámetros:

- En caso de que se trate de pilotes convencionales, deberán medirse los asentamientos que ocurran en la parte superior, las cargas aplicadas y los tiempos en que se presentan.
- Si son pilotes que están instrumentados internamente, será necesario determinar además la carga que estos transmiten a diferentes profundidades.

Sólo será necesario llevar a cabo la segunda medición, en caso de sea importante conocer la relación entre las resistencias de punta y fricción o, en su caso, la evolución en el tiempo de la transferencia de carga al suelo.

Para poder medir los parámetros indicados en la primera opción se utilizan los siguientes dispositivos:

Medición de la carga. Para medir la magnitud de la carga aplicada se puede utilizar alguno de los aparatos siguientes: con el manómetro, previamente calibrado, del sistema hidráulico o con una celda electrónica de carga. En la Fig. 2.8 se muestra la instalación de estos dos aparatos.

La utilización del manómetro que mide la presión del sistema hidráulico no es muy recomendable, pues se ha visto que el margen de error que puede tener es de aproximadamente 20%; el origen de este error es debido a la fricción que se presenta entre el pistón y las paredes del cilindro del gato, o pro fallas en la verticalidad o bien, si durante la prueba el pistón tiende a salir o entrar del depósito.

Si se va a utilizar en la prueba de carga el manómetro como único aparato de medición, éste debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Que el sistema hidráulico esté en perfectas condiciones.
- Que la calibración del aparato se haya hecho correctamente.
- Que la posición del gato sea perfectamente vertical durante toda la prueba.

La celda electrónica de carga es un cilindro de acero instrumentado con deformímetros electrónicos (strain-gages); con este aparato es posible obtener mayor precisión en la lectura de datos. También es importante que estos aparatos se protejan debidamente de los cambios de humedad y temperatura.

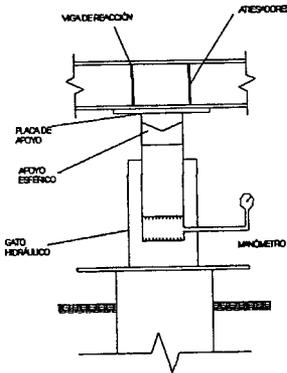
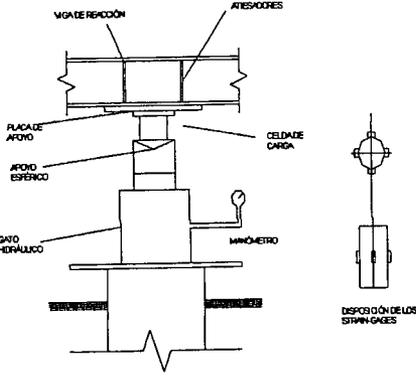
DISPOSITIVO	DESCRIPCIÓN	DIAGRAMA DE INSTALACIÓN	PRECISIÓN	COMENTARIOS
Manómetro del sistema hidráulico	La celda es el manómetro previamente calibrado que mide la presión del aceite en el sistema hidráulico de carga.			En la calibración debe usarse el gato para cargar a la máquina universal y no al revés. Además, la calibración debe hacerse para distintas posiciones del pistón.
Celda de carga	Celda formada por un cilindro de acero instrumentado con deformímetros eléctricos (strain - gages).		De 0.1% a 0.3% de su capacidad	El apoyo de la celda con el gato debe ser esférico para evitar la transmisión de momentos. Estos aparatos usualmente se conectan a una fuente de 10 v.

Fig. 2.8. Dispositivos de medición de la carga.

(SMMS, 1989)

Medición de los asentamientos. Para medir los asentamientos que se presentan en el pilote durante la prueba es necesario contar con un sistema preciso y confiable. Generalmente se usan micrómetros entre el pilote y un marco de referencia fijo. Es importante tener en cuenta la importancia de poder ajustar los ceros de los aparatos, sin que se afecte la continuidad de las lecturas.

Los micrómetros de carátula son medidores mecánicos de deformación; se colocan fijos en viguetas que sirven de referencia y su vástago de medición debe estar apoyado en una placa fija a la cabeza del pilote, para que las lecturas no sean afectadas por los movimientos superficiales del suelo durante la carga. Se recomienda colocar por lo menos cuatro micrómetros diametralmente opuestos y equidistantes al eje del pilote, para detectar una eventual inclinación del pilote. Los micrómetros que se utilicen deben tener una precisión de ± 0.1 mm y un vástago de 5 cm como mínimo; asimismo se recomienda que estos aparatos se mantengan en la sombra para que estén protegidos de los cambios de temperatura.

De los asentamientos de la punta. La medición de los asentamientos de la punta del pilote sirve para separar, en forma aproximada, las resistencias de punta y de fricción para los distintos niveles de carga aplicada. Para poder efectuar estas mediciones, se requiere usar un tubo de acero alojado en un conducto longitudinal, que está en el eje del pilote y que está apoyado en el fondo del conducto, lo más cercano posible a la punta del pilote. El micrómetro para medir las deformaciones debe estar apoyado sobre el tubo de acero y sostenido con un marco de referencia, que puede ser el mismo que sirve para sujetar los micrómetros que miden los asentamientos de la parte superior. La precisión de los micrómetros utilizados para medir los asentamientos en la punta debe ser por lo menos de ± 0.01 mm.

2.2 Capacidad de carga de pilotes en suelos cohesivos

El diseño de pilotes abarca dos usos principales:

- Cuando se trate de la construcción de obras de gran magnitud y sea necesaria la utilización de alguna cimentación profunda, en este caso, pilotes. Para esta situación de grandes obras que tengan un costo muy elevado de construcción, siempre es recomendable realizar pruebas de carga como ayuda de diseño o bien, para verificación durante la construcción.
- Si se trata de obras que necesiten cimentación de pequeña escala o convencional en tamaño, el diseño de los pilotes como opción podrá ser el definitivo, siempre y cuando se usen factores de seguridad adecuados.

Un parámetro importante y que debe conocerse en ambos casos es la resistencia del suelo al corte del suelo a corto plazo (usando la prueba triaxial no drenada); que es cuando suele presentarse la condición más crítica de capacidad. También debe tenerse en cuenta que si los pilotes utilizados son hincados, se producirá una alteración de la masa de suelo, la cual provocará una reducción temporal de resistencia.

La capacidad de carga de pilotes en arcillas se calcula usando el criterio de los esfuerzos totales; es decir, tomando como base la resistencia al corte no drenado de la arcilla, C_u . Existen en la actualidad correlaciones empíricas entre C_u , la resistencia por punta y la fricción lateral de un pilote; las cuales no han demostrado ser del todo confiables, por lo que algunos autores proponen realizar el análisis de capacidad en función de los esfuerzos efectivos como un método alternativo de cálculo.

Pilotes colados en suelos cohesivos

La fabricación de este tipo de pilotes produce remoldeo y reblandecimiento considerable del suelo que le rodea en un espesor aproximado de 25 mm. Las pruebas de carga en este tipo de pilotes han permitido verificar que no existe aumento apreciable de capacidad de

carga con el paso del tiempo, ya que la consolidación de la arcilla blanda adyacente al cuerpo del pilote se desarrolla de manera muy lenta.

Resistencia por fricción

La resistencia de punta de pilotes de fricción embebidos en arcilla blanda es despreciable comparada con la resistencia de fricción. La fricción lateral por unidad de área de contacto es más o menos independiente de la profundidad de penetración y del método utilizado para instalar el pilote, pues depende casi exclusivamente de las propiedades de la arcilla. La fricción lateral aumenta generalmente durante el primer mes después de hincado el pilote, pero el porcentaje de aumento varía mucho con la naturaleza del suelo.

La fricción lateral entre los suelos cohesivos y el fuste del pilote no puede ser mayor que la cohesión del suelo. Se puede asignar a la cohesión un valor igual a la resistencia a la compresión simple del suelo.

La resistencia última del fuste del pilote puede calcularse como la suma de la resistencia última al cortante impuesta por los varios estratos que están en contacto con el pilote. La resistencia última del fuste de un pilote hincado en estratos de arcilla uniforme puede expresarse en términos de la resistencia al corte "drenado" y un factor de reducción a , como sigue (Chen, 1975):

2.1

$$F_s = 2\pi r a f_{sd}$$

Donde: r = Radio del pilote (m).

f_{sd} = resistencia al corte "drenado" (Ton/m²).

Fricción lateral en función de esfuerzos totales. Con este criterio, la capacidad de carga última por fricción lateral entre el fuste del pilote colado en el lugar y el suelo se calcula con la siguiente expresión:

$$Q_f = C_{u_a} A_s \quad 2.2$$

Donde: Q_f = Fricción lateral última.

A_s = Área lateral del fuste del pilote.

C_{u_a} = Adherencia última (en la práctica $C_{u_a} = 0.3$ a $0.4 C_u$).

Los factores que afectan el valor de Cu_a pueden ser: el remoldeo provocado por el procedimiento de excavación empleado, la estructura de la arcilla y el grado de fisuración de la misma. En la práctica se recomienda determinar Cu_a de la mínima resistencia al corte no drenada y con un valor máximo de 10 Ton/m^2 .

Fricción lateral en función de los esfuerzos efectivos. En este caso se puede usar el mismo criterio que para pilotes hincados en arcilla, siempre y cuando el valor de k_0 pueda ser determinado con métodos apropiados de pruebas de carga. La expresión para calcular el valor de la fricción lateral con esfuerzos efectivos es la siguiente:

$$Q_u = A_s (\tau_s) p \quad 2.3$$

Donde: Q_s = Fricción lateral última.

A_s = Área lateral del fuste del pilote (m^2).

$(\tau_s)_p$ = Fricción lateral efectiva promedio a lo largo del fuste (Ton/m^2).

Para calcular el valor promedio de τ_s se usan los valores de la fricción lateral determinados a distintas profundidades a lo largo del fuste del pilote, suponiendo que:

$$\tau_s = p'_0 k_0 \tan \phi' \quad 2.4$$

Donde p'_0 es la presión efectiva por sobre carga a la profundidad considerada y k_0 es el coeficiente de tierra en reposo.

Uno de los inconvenientes de este método es que es necesario conocer los valores de k_0 y ϕ' , pues estos dos parámetros son difíciles de determinar. Sin embargo, resultados que se tienen de pruebas hechas a arcillas con Cu menor de 10 Ton/m^2 , poco preconsolidadas, el factor $k_0 \tan \phi'$ suele tener un valor entre 0.25 y 0.40. para fines prácticos de diseño es posible usar un valor promedio de 0.3, por lo que:

$$\tau_s = 0.3 p'_0 \quad 2.5$$

Si se va a determinar la capacidad de carga permisible del pilote, se recomienda usar un factor de seguridad mínimo de 2.5, si se realizarán pruebas de carga durante la construcción; en caso contrario, el factor de seguridad mínimo es de 3. Puesto que el método propuesto en este trabajo incluye pruebas de carga de pilotes, en modelo, se propone usar un factor de seguridad de 1.5; ya que pueden determinarse con menos incertidumbres las propiedades y el comportamiento del pilote y del suelo.

Fuerzas de arrastre

Las fuerzas de arrastre más importantes que se deben tomar en cuenta para diseñar y construir pilotes que deban soportar grandes cargas son: la fricción negativa y las fuerzas laterales (sobre todo las provocadas por sismos).

Fuerzas laterales sísmicas

Esta fuerza de arrastre ocurre en zonas sísmicas; durante el movimiento del terreno, el vástago del pilote es forzado a moverse con la masa de suelo, y los desplazamientos diferenciales laterales que se producen en él pueden producir fuerzas de corte y momentos flexionantes en sus extremos y en el vástago del pilote. En estos casos es necesario que el pilote tenga la resistencia y rigidez necesarias para poder soportar tanto las fuerzas laterales como las cargas verticales de servicio.

Resistencia por punta

A los pilotes de punta rodeados de suelo, algunas veces se les considera erróneamente como columnas libremente apoyadas, sin que el suelo que las rodea les dé apoyo lateral. Sin embargo, tanto la experiencia como la teoría han demostrado ampliamente que no existe peligro de flexión transversal en un pilote de punta, de las dimensiones convencionales, cargado axialmente, con soporte lateral inadecuado, aunque esté rodeado por los suelos más blandos. Por lo tanto, los esfuerzos en esos pilotes, bajo las cargas de trabajo, pueden tomarse como los de los materiales de que están hechos cuando se sujetan a

compresión directa. En los pilotes cuya sección disminuye con la profundidad, la sección crítica está en la punta. Los esfuerzos de trabajo en el concreto colado en el lugar no deben exceder de 0.25 a 0.33 $f'c$; siendo $f'c$ la resistencia a la compresión simple del concreto a los 28 días, medida en cilindros. Para tener la seguridad de obtener la resistencia necesaria en el concreto de los pilotes colados en el lugar, debe controlarse el revenimiento entre los límites de 7.5 y 15 cm o más (Elsevier, 1979).

La magnitud de la carga última que pueden soportar los pilotes colados en el lugar (Q_p) está dada por:

$$Q_p = N'cCuA_p \quad 2.6$$

- Donde:
- A_p = Área de la sección transversal de la punta del pilote.
 - C_u = Valor mínimo de la resistencia al corte no drenada de la arcilla al nivel de la punta del pilote.
 - $N'c$ = Coeficiente de capacidad de carga que es función del diámetro de la punta del pilote (Tabla 2.2)

Diámetro de la punta	$N'c$
Menor de 0.50 m	9
De 0.50 a 1.0 m	7
Mayor de 1.0 m	6

Tabla 2.2 Coeficiente de capacidad de carga $N'c$ para pilotes colados en el lugar. (SMMS, 1989)

Capacidad de carga admisible

La capacidad de carga permisible para los pilotes colados en el lugar (Q_a) se calcula a base de la combinación de la fricción lateral (Q_f) y la resistencia por punta (Q_p), y aplicando factores de seguridad adecuados. La contribución relativa de estas dos resistencias depende la de rigidez del pilote y de la compresibilidad de la arcilla alrededor del fuste y debajo de la base del pilote.

Si la compresibilidad del suelo al nivel de la base es igual o mayor que la del suelo que rodea al fuste, la carga permisible del pilote se calcula con la siguiente expresión:

$$Q_a = \frac{1}{2.5} [Q_f + Q_p] \quad 2.7$$

En cambio, si el suelo bajo la base del pilote es de menos compresibilidad que el suelo que rodea al pilote, los movimientos relativos entre el fuste y el suelo serán demasiado pequeños como para movilizar la adherencia total. Si es este el caso, la carga permisible del pilote estará dada por:

$$Q_a = \frac{1}{2} Q_p \quad 2.8$$

Las ecuaciones anteriores pueden ser consideradas como casos límite; por lo que la decisión de considerar la fricción lateral además de la resistencia de la base deberá ser tomada con la debida precaución, siempre que se hayan hecho pruebas de carga. La selección de la carga permisible deberá ser regida por el asentamiento permisible del pilote, determinado a partir de las pruebas de carga realizadas.

Diseño estructural de pilotes colados en el lugar

Los pilotes colados en el lugar pueden ser de formas y dimensiones variadas. La fabricación de este tipo de pilotes se realiza haciendo una perforación en el suelo y llenándola con concreto, con o sin ademe. Ambos tipos pueden tener refuerzo de acero en caso de ser necesario. El uso de este tipo de cimentación ha aumentado debido a su alta capacidad de carga.

Las ventajas de los pilotes colados en el lugar son:

- Tienen alta capacidad de carga por punta apoyados en roca y se han usado con éxito en arcillas duras.

- Pueden tener longitudes variables, con diámetros de hasta 2.5 m y cargas de hasta 2,000 Ton.
- Requieren poco espacio de almacenamiento y no se necesita equipo especial de manejo; además, se eliminan los daños por traslado.
- No es necesario recortar ni prolongar el pilote para que tenga la longitud necesaria.
- No se presentan daños en el concreto debidos al proceso de hincado.

Sin embargo, en el caso de que sea necesario atravesar depósitos de materiales no cohesivos y sueltos o cuando se tenga la presencia de nivel freático, no se recomienda usar este tipo de pilotes; pues en tales casos, puede ser imposible excavar y colar el elemento aun cuando se utilice lodo bentonítico.

El proporcionamiento de la mezcla para la elaboración de los pilotes deberá ser realizado por personal debidamente capacitado; se recomienda que la resistencia del concreto esté limitada a 350 Kg/cm^2 . El porcentaje de acero de refuerzo y la longitud del tramo reforzado se determinará con base en las condiciones de carga. En algunos casos, el acero de refuerzo podrá no ser necesario, mientras que en otros, será menester colocarlo en toda la longitud del elemento.

El refuerzo se diseñará de acuerdo con alguno de los siguientes criterios:

- Por requisitos estructurales en cuanto a la flexión y acción columnar al estar sometido a la carga del edificio que soporta.
- Por requisitos impuestos por la necesidad de mantener la estabilidad del armado durante su habilitado y al colar el concreto.

El acero de refuerzo deberá satisfacer las especificaciones de calidad y limpieza de la obra. Deberá tenerse cuidado al diseñar el acero de esfuerzo para garantizar su estabilidad durante el manejo y la colocación.

Es necesario tener en cuenta que deberá dejarse una separación suficiente entre el armado de acero y las paredes de la excavación, así como entre las varillas mismas, para permitir el fácil paso y adecuado acomodo del concreto colado. El recubrimiento mínimo podrá ser de 4 cm, excepto en pilotes expuestos al agua de mar u otros ambientes muy agresivos, en los cuales deberá ser de 7.5 cm como mínimo.

Cuando se usen pilotes con ampliación de base de campana, la inclinación de los costados no deberá ser mayor a 30° con respecto a la vertical. El espesor del borde del extremo inferior será por lo menos de 15 cm y el diámetro del fondo no debe exceder tres veces el diámetro del fuste del pilote. El diámetro de la cabeza debe ser por lo menos 15 cm mayor que el diámetro del fuste. La altura de la cabeza debe ser suficiente para alojar el desarrollo del refuerzo vertical procedente del fuste, y las barbas o pernos de anclaje de la columna (SMMS, 1989).

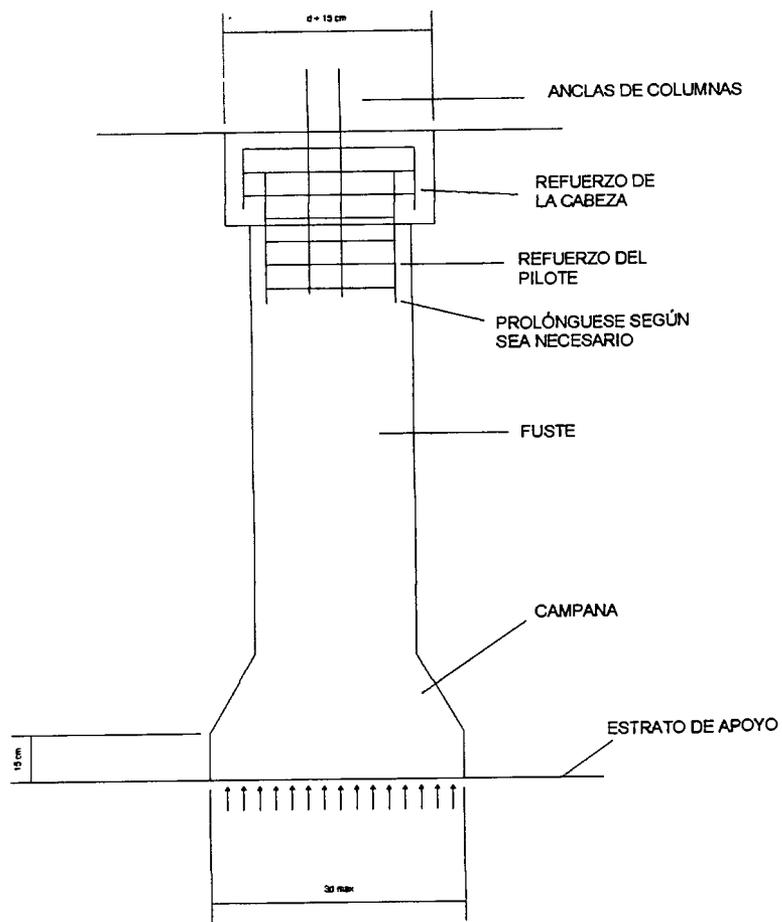


Fig. 2.9. Configuración de un pilote con base de campana.

(CFE, 1981)

3 Procedimiento experimental

Para la medición de la magnitud de la carga aplicada al pilote con el gato se utilizó una celda electrónica de carga, proporcionada por el Laboratorio de Análisis Experimental de Esfuerzos de la Facultad de Ingeniería de la UAQ. Dicha celda debió ser calibrada, y el procedimiento se realizó con ayuda de un anillo de carga calibrado previamente. Los resultados obtenidos, y la gráfica de la curva de calibración se presentan a continuación.

Constante de carga del anillo: **9.5 (Kg)**

Lectura celda	Lectura anillo	Carga anillo (Kg)
0	0	0
3	5	47.5
8	10	95.0
14	15	142.5
19	20	190
25	25	237.5
29	30	285.0
39	40	380.0
49	50	475.0
60	60	570.0
70	70	665.0
80	80	760.0
92	90	855.0
102	100	950.0
113	110	1045.0
123	120	1140.0
135	130	1235.0
144	140	1330
154	150	1425
165	160	1520
175	170	1615
186	180	1710
197	190	1805
207	200	1900
218	210	1995

Tabla 3.1 Datos de la calibración de la celda de carga

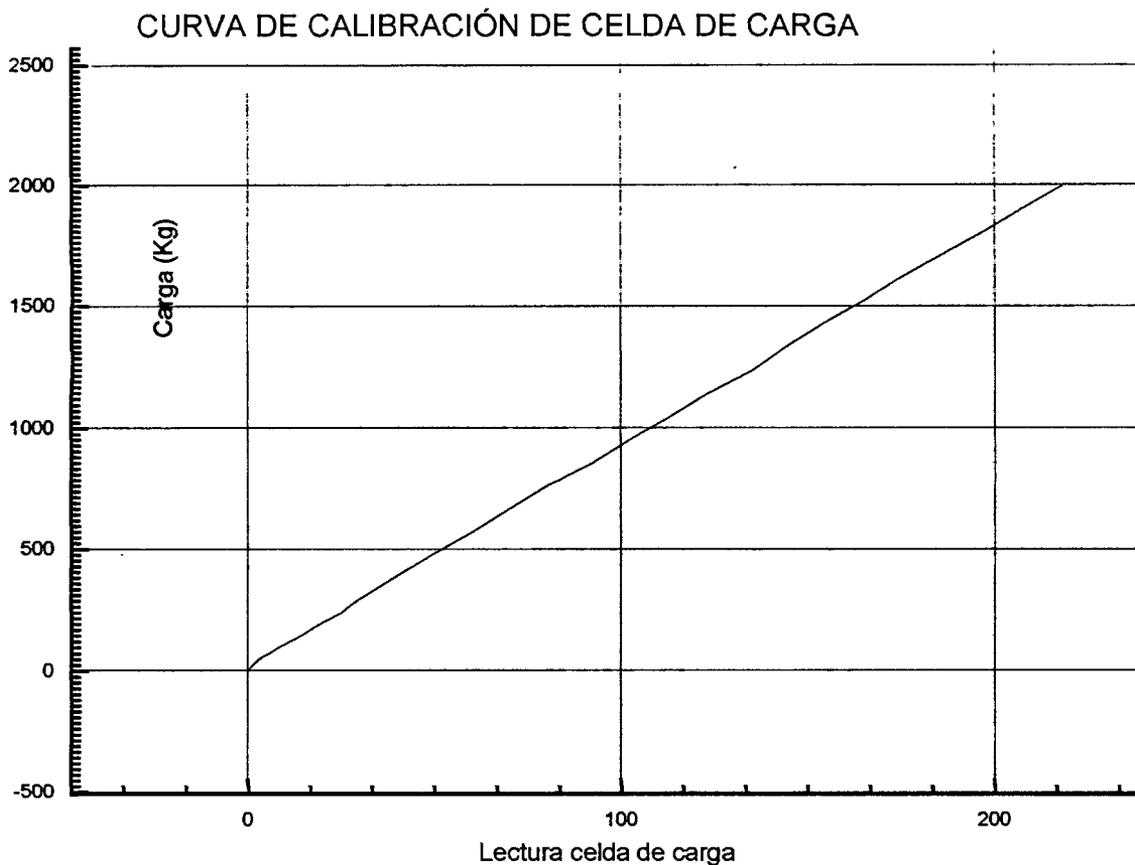


Figura 3.1 Curva de calibración de la celda de carga

Con los datos de la tabla y la gráfica anteriores, se calculó la ecuación de la línea recta para la determinación de los valores de carga, según las lecturas de la celda. La ecuación es la siguiente:

$$y = a + bx \tag{3.1}$$

Donde:

y = Carga en kilogramos.

a = 19.58551

b = 9.09134

x = Lectura de la celda de carga.

La ecuación anterior es válida para los valores positivos de x diferentes de cero.

3.1 Trabajo de laboratorio

Material para las pruebas

El material que se utilizó para el trabajo se tomó de la zona de Jurica, en la cual se conoce ampliamente que el suelo existente es de tipo arcilloso y tiene comportamiento expansivo. La cantidad de material recogida fue de aproximadamente 900 Kg y se llevó al laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería, empacado en costales de plástico. Una vez que se tuvo el material en el laboratorio se procedió a disgregarlo y cribarlo por la malla de 4.75 mm (No. 4), para tenerlo listo para las pruebas necesarias para su clasificación y conocimiento de sus propiedades. Los ensayos que se le practicaron al material se relacionan a continuación, junto con los resultados obtenidos.

Granulometría

	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)
Grava	0.00	0.00
Arena	10.40	3.47
Finos	289.60	96.53
Total	300.00	100.00

Tabla 3.2 Datos de la granulometría de la arcilla

Límites de plasticidad

Límite líquido

Peso húmedo + tara	41.83 g
Peso seco + tara	28.27 g
Peso tara	11.58 g
Límite líquido	81.25 %

Límite plástico

Peso húmedo + tara	20.83 g
Peso seco + tara	18.78 g
Peso tara	12.35 g
Límite líquido	31.88 %

Índice plástico **49.36**

Contracción lineal

Longitud del molde	9.95 cm
Longitud del material	8.02 cm
Contracción lineal	19.40 %

Clasificación S.U.C.S.

Con los datos obtenidos de la granulometría y de los límites de plasticidad se tiene que la clasificación S.U.C.S. del material es CH, es decir, arcilla de alta plasticidad.

Obtención del peso específico seco suelto y seco compacto

P.E.S.S.

Peso bruto	3,590.00 g
Peso tara	1,660.00 g
Volumen	2,762.00 cm ³
P.E.S.S.	698.80 kg/m ³

P.E.S.C.

Peso bruto	4,260.00 g
Peso tara	1,660.00 g
Volumen	2,762.00 cm ³
P.E.S.S.	941.30 kg/m ³

Obtención del peso seco máximo y humedad óptima

Para la obtención de estos parámetros del suelo se realizó la prueba Proctor estándar ASTM D – 698. A continuación se presentan los datos obtenidos en el procedimiento de prueba.

Obtención del número de golpes

	Proctor	Prueba
Peso del pisón	2,500.00 g	4,500.00 g
Altura de caída	30.10 cm	45.00 cm
Número de capas	3.00	20.00
Diámetro del molde	10.11 cm	30.00 cm
Altura del molde	11.68 cm	120.00 cm
Volumen del molde	937.64 cm ³	118,800.00cm ³
Peso del molde	1,970 g	-----
Energía de compactación	25.13 kg-m / m ³	6.05 kg-m/m ³
Número de golpes	25.13	177.47

Datos de la prueba:

Peso molde + material (g)	3415.00	3490.00	3515.00	3555.00
Peso deL material (g)	1445.00	1520.00	1545.00	1585.00
Peso específico húmedo (g)	1541.10	1621.09	1647.75	1690.41
Peso específico seco (g)	1183.47	1185.91	1183.74	1182.92
Peso húmedo (g)	241.97	254.44	228.79	230.86
Peso seco (g)	212.93	218.36	198.14	197.59
Peso tara (g)	116.83	120.04	119.95	120.04
Humedad (%)	30.22	36.70	39.20	42.90

Tabla 3.3 Datos de la prueba Proctor

De los datos de la tabla anterior se obtiene que:

Peso volumétrico seco máximo: 1186.00 Kg/m³
Humedad óptima: 36.70 %

Proporcionamiento para los pilotes de prueba

Para la elaboración de los pilotes de prueba, se utilizaron los siguientes materiales:

- Cemento tipo Portland.
- Arena de trituración.
- Agua potable.
- Cloruro de calcio (CaCl).

El objetivo de la utilización del Cloruro de Calcio fue el de acelerar el fraguado rápido de la mezcla. Este aditivo químico se usó en una proporción del 2% del peso del cemento utilizado. En la siguiente tabla se presenta la dosificación utilizada para la elaboración de la mezcla de cilindros de prueba:

Material	Volumen	Peso (g)
Cemento Portland	0.33	1,400.00
Arena	0.99	3,475.00
Agua	0.22	924.00
Cloruro de calcio		28.00
Relación agua - cemento		0.66

Tabla 3.4 Proporcionamiento para microconcreto de los pilotes

Con el proporcionamiento anterior se hicieron cilindros de concreto de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura, que se ensayaron en una prensa y se registraron sus resistencias. También se elaboraron cilindros sin el Cloruro de Calcio, con el fin de comparar las resistencias de

los cilindros. En la tabla que se muestra a continuación se presentan los resultados de haber ensayado dichos cilindros:

Cilindro	Fecha	Edad (Días)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Altura (cm)	Volumen (cm ³)	Peso (g)	P. vol. (g/cm ³)	Carga (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)
1 (S/A)	230202	10	5.05	20.03	9.93	198.89	410.38	2.06	1651.0	82.43
2 (S/A)	230202	10	5.02	19.79	9.99	197.73	409.52	2.07	1524.0	77.00
3(S/A)	230202	10	4.98	19.44	9.95	193.42	399.52	2.07	1524.0	78.40
1(C/A)	030302	2	5.02	19.79	10.05	198.91	433.78	2.18	3175.0	160.42
2(C/A)	030302	2	5.04	19.91	9.99	198.91	435.91	2.19	3048.0	153.08
3(C/A)	040302	3	5.03	19.87	9.82	195.14	425.97	2.18	3683.0	185.34
4(C/A)	040302	3	5.04	19.91	9.93	197.71	434.75	2.20	3683.0	184.97
5(C/A)	040302	3	4.99	19.56	10.12	197.91	430.37	2.17	3365.5	172.09

Tabla 3.5 Resultados de los ensayos de compresión a los cilindros de prueba.

En la tabla anterior, las tres primeras filas (S/A) se refieren a los cilindros hechos con la mezcla sin Cloruro de Calcio, mientras que las siguientes (C/A) son los cilindros elaborados con el Cloruro. Por lo tanto es claro que la dosificación utilizada y la adición del cloruro proporcionan a la mezcla la facultad de alcanzar la resistencia suficiente a los dos días para realizar las pruebas de carga; y será este tiempo el que habría de esperarse durante la realización de las pruebas para dar la carga a los pilotes.

Equipo para la realización de las pruebas

Las pruebas se realizaron en un equipo especialmente construido para este trabajo de investigación, en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería. En la Figura 3.1 se muestra el esquema del recipiente de concreto, así como sus medidas.

Este equipo fue fabricado con concreto reforzado con acero, para poder resistir las presiones que habrían de generarse por efecto del peso de la arcilla, las cargas aplicadas y las presiones de expansión.

Al frente se le colocó una tapa removible de placa de acero de 3/16" de espesor, fijada a través de tornillos y tuercas; esto con el fin de poder obtener las muestras necesarias después de cada una de las pruebas.

El sistema de carga y reacción se construyó con una viga PTR de 4" x 4", para la cual se calcularon las deformaciones y se obtuvo que, bajo el efecto de las cargas máximas esperadas, la deformación de la viga es despreciable.

La altura a la que se colocó la viga de reacción se determinó con base en el espacio necesario para colocar sobre el pilote: una rótula metálica para evitar que se produzcan momentos por excentricidad en las cargas, una celda de carga digital cuya curva de calibración se anexa en este trabajo, y un gato hidráulico para aplicar la carga al pilote. El esquema del sistema de carga se muestra en la Figura 3.2.

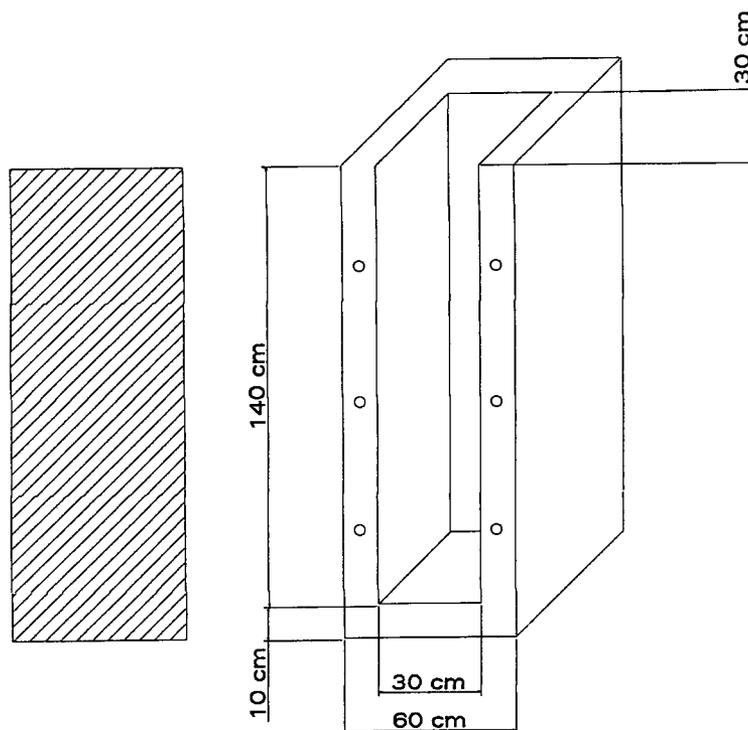


Fig. 3.1 Esquema del recipiente de concreto para la realización de las pruebas a los pilotes.

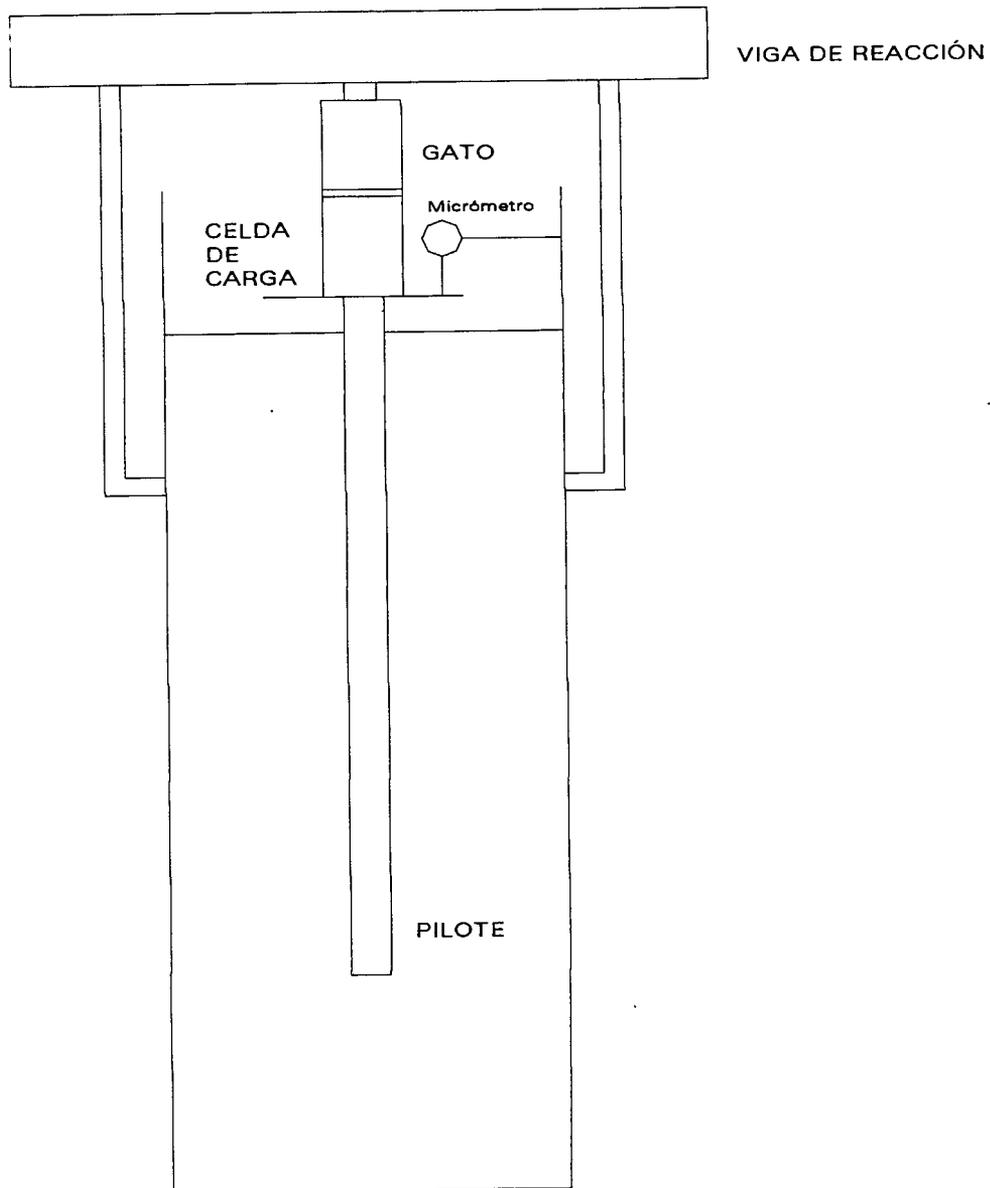


Fig. 3.2 Esquema del sistema de carga y reacción para las pruebas.

En las figuras siguientes se muestran fotografías tomadas al equipo, el sistema de reacción y la manera como estuvo colocado el micrómetro en el pilote para la lectura del asentamiento producido por las cargas aplicadas.



Fig. 3.3 Recipiente de concreto utilizado para contener la arcilla compactada.

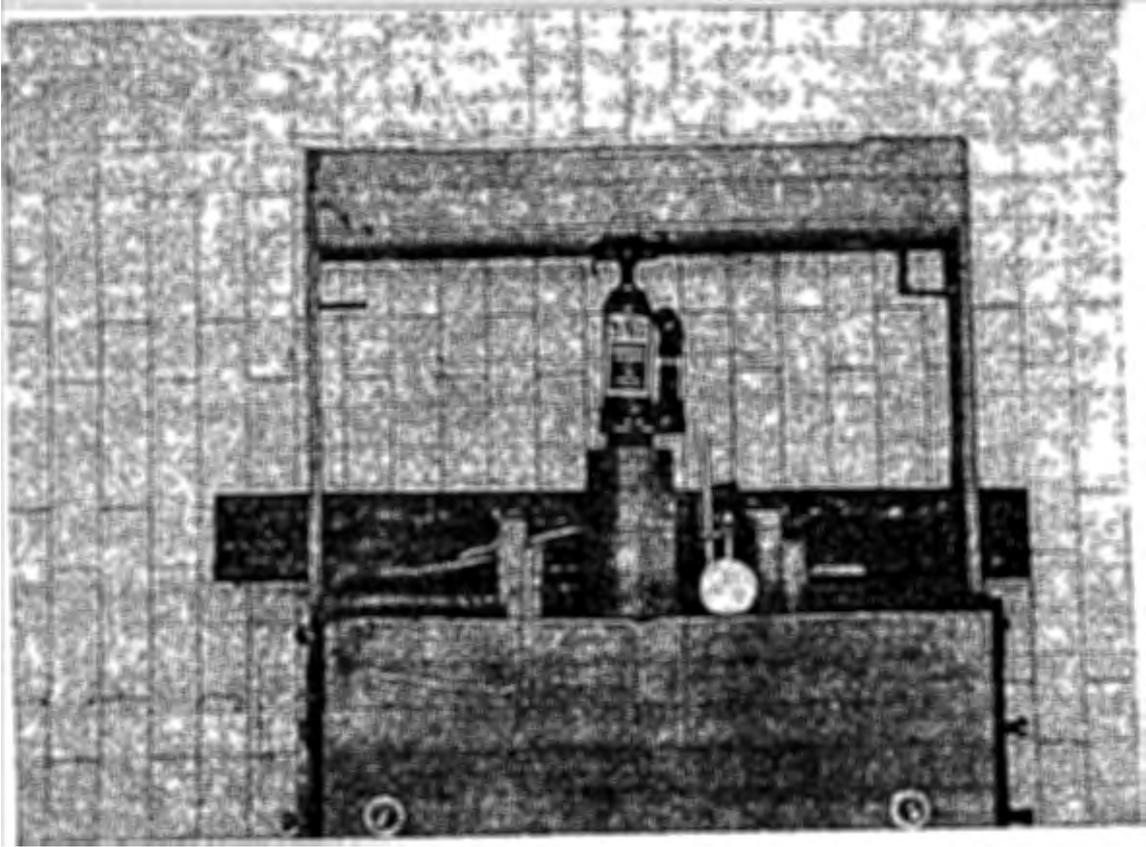


Fig. 3.4 Sistema de carga y reacción.

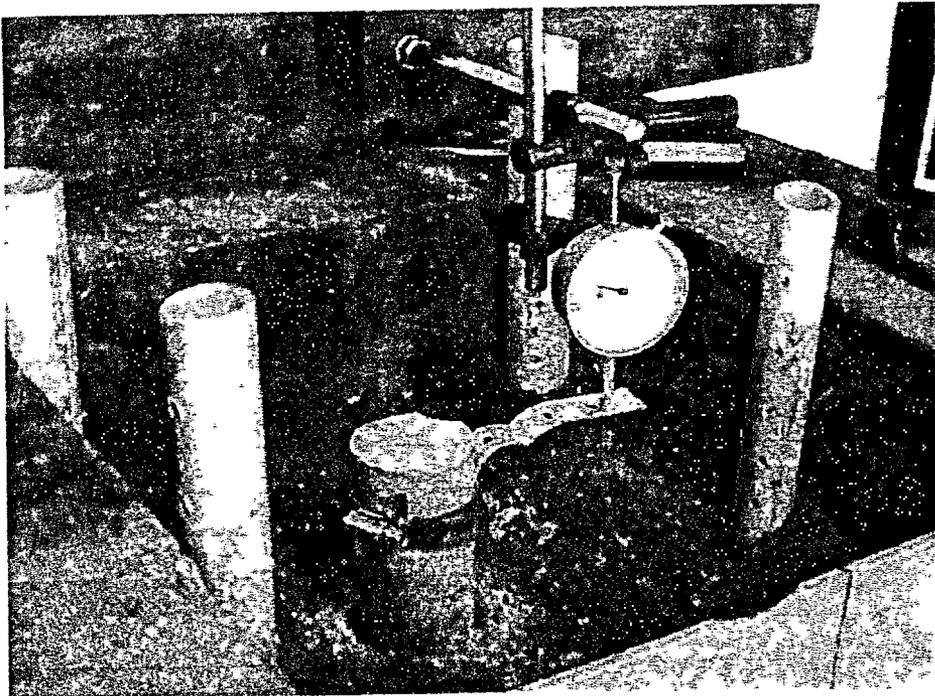


Fig. 3.5 Micrómetro colocado para la lectura de los asentamientos.

Procedimiento de realización de las pruebas

Los trabajos previos realizados para cada una de las pruebas fueron los siguientes:

1. De la arcilla disgregada y cribada por la malla No. 4, se obtiene la cantidad necesaria para llenar el mueble de prueba hasta una altura de 1.15 m.
2. Se determina la humedad que tiene el material.
3. Se calcula la cantidad de agua que habrá de agregarse al material, para llevarlo a la humedad deseada.
4. Se le da al material un tiempo de curado de 24 horas, para propiciar la homogeneización de la humedad.
5. Se procede a compactar el material dentro del equipo en capas, utilizando un pisón de 4.5 Kg de peso y 45 cm de altura de caída, semejante al utilizado en la prueba ASTM D 1557, con la energía de compactación calculada anteriormente.
6. Con la ayuda de una herramienta de perforación (posteadora) se realiza la excavación del agujero para colar el pilote. El diámetro del agujero es aproximadamente 6.5 cm y su longitud 95 cm, procurando que la excavación quede completamente vertical.
7. Se limpia perfectamente el agujero.
8. Se prepara la mezcla de micro concreto y se procede a colar el pilote, utilizando un molde especial para que el elemento sobresalga de la superficie aproximadamente 10 cm, con el objeto de poder colocar un micrómetro para medir el asentamiento provocado por la carga aplicada.

9. Después de 48 horas ya es posible aplicar la carga al pilote, según el criterio de incrementos de carga iguales en intervalos de tiempo iguales, explicado en el Capítulo 3 de este trabajo.
10. Una vez concluida la prueba, se procede a retirar todos los dispositivos de medición y carga, para posteriormente tomar testigos de humedad a diferentes profundidades, así como muestras inalteradas para realizar pruebas triaxiales rápidas y así obtener los parámetros de cálculo ϕ (ángulo de fricción) y C_u (cohesión) del suelo.
11. Después de haber sacado todas las muestras necesarias, se procede a retirar el material sobrante del equipo y limpiarlo, para dejarlo listo para la siguiente prueba.

4 Presentación y análisis de resultados

Prueba 1

Esta prueba se realizó el día 29 de abril de 2002. Los trabajos previos se realizaron conforme a lo descrito en el capítulo anterior. A continuación se muestran los valores registrados en la prueba de carga realizada al pilote:

Carga (Kg)	Asentamiento (mm)
0.00	0.0000
110.5	0.0762
201.4	0.1245
292.3	0.1727
383.2	0.2261
474.2	0.2819
565.1	0.3386
656.0	0.4140
746.9	0.5334
837.8	0.6858
928.7	0.8255
1019.6	1.0414
1110.5	1.3335
1201.5	1.5494
1292.4	1.7526
1383.3	1.9431
1474.2	2.0447
1565.1	2.2936
1656.0	2.4028
1746.9	2.5578
1837.9	2.7127

Tabla 4.1 Resultados de la prueba de carga No. 1

Con la tabla anterior se construyen las gráficas correspondientes.

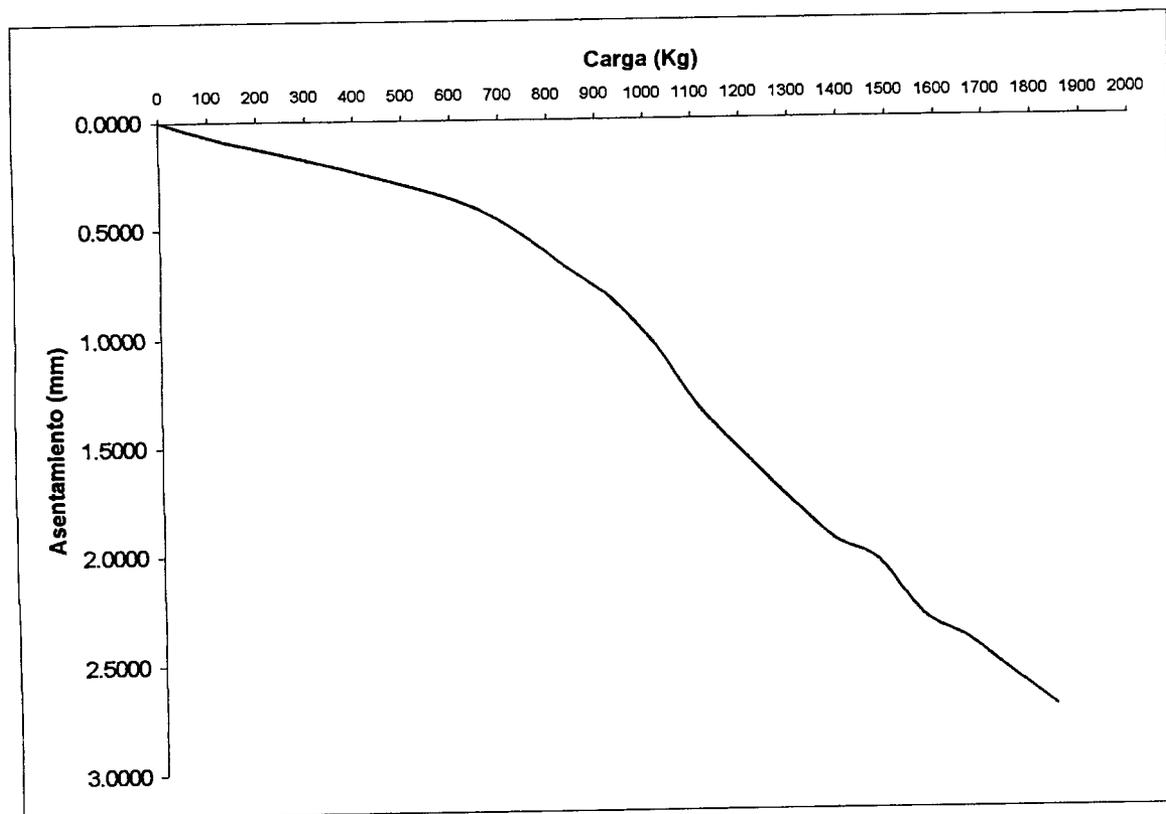


Fig. 4.1 Gráfica de carga de la prueba No. 1, Carga - Asentamiento.

La humedad del suelo cuando se realizó la prueba fue de 22%. Las medidas del pilote fueron:

Diámetro: 6.60 cm.

Longitud: 95.0 cm.

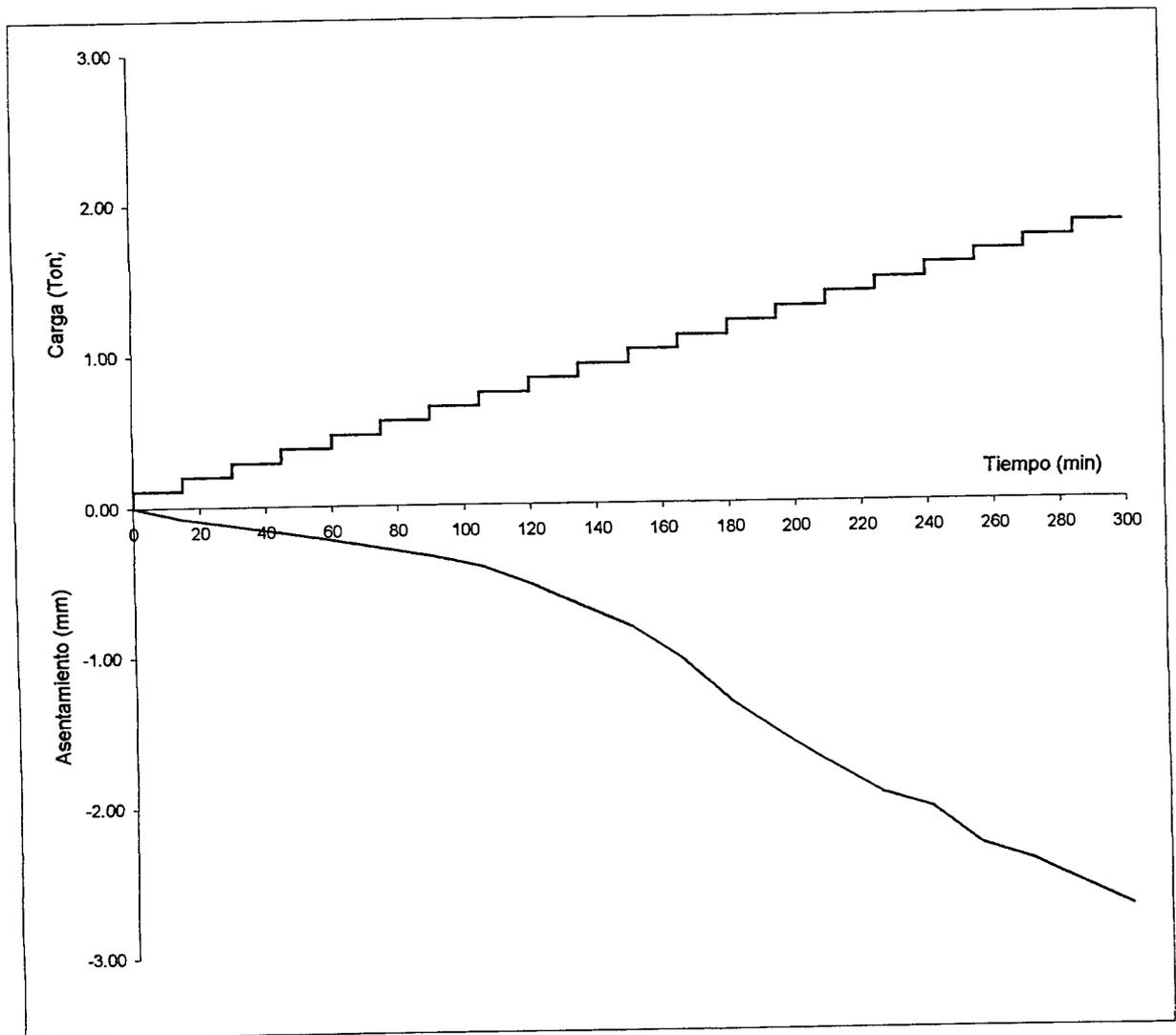


Fig. 4.2 Gráfica del comportamiento en el tiempo de la prueba de carga No. 1.

Resultados de la prueba triaxial realizada al material utilizado en la prueba No. 1

Ensaye Triaxial						
Tipo de prueba:		Triaxial Rápida.				
Ensaye:		1	Prof:	0.95	m	
Probeta	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Propiedades		Resultados del ensaye	
			w%	22.646	c(kg/cm ²)	0.132
1	0.300	1.297	Ss	2.650	ϕ grados	36.217
2	0.600	2.502	e	1.325	r	0.998
3	1.200	3.936	Gw%	45.35	Nc	51.699
			γ_m (kg/m ³)	1398.34	Nq	38.887
			γ_d (kg/m ³)	1140.09	N γ	57.484

Tabla 4.2 Resultados obtenidos del ensaye triaxial del material para la prueba 1.

Prueba 2

Esta prueba fue realizada el día 13 de mayo de 2002. los datos de la prueba de carga son:

Carga (Kg)	Asentamiento (mm)
0.00	0.0000
110.5	0.0102
201.4	0.0305
292.3	0.0457
383.2	0.1245
474.2	0.2311
565.1	0.3607
656.0	0.5867
746.9	1.0973
837.8	5.1943
928.7	32.7660

Tabla 4.3 Resultados de la prueba de carga No. 1

Las gráficas correspondientes a esta prueba se muestran a continuación:

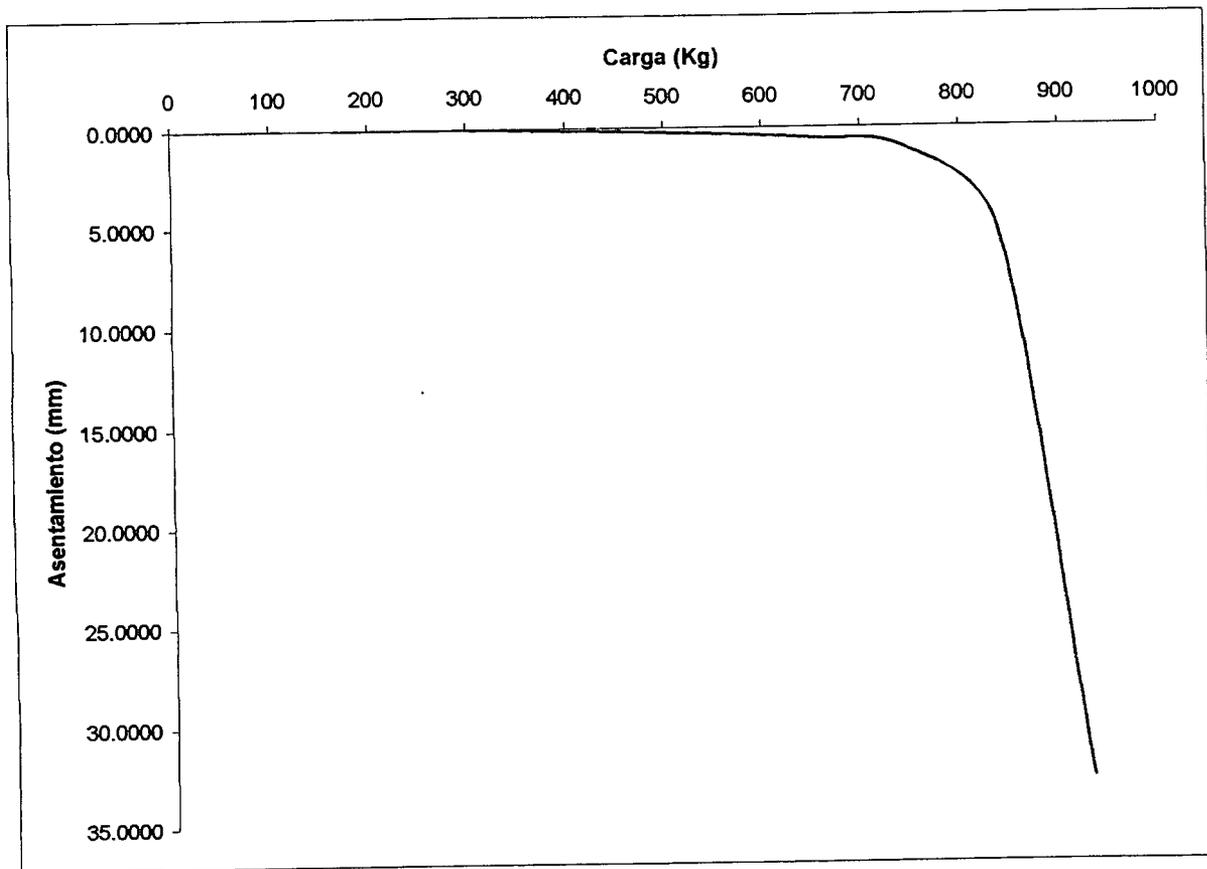


Fig. 4.3 Gráfica de la prueba de carga No. 2, Carga - Asentamiento.

La humedad del suelo al momento de la prueba fue de 44.0%. Las medidas del pilote fueron:

Diámetro: 6.53 cm.

Longitud: 93.0 cm.

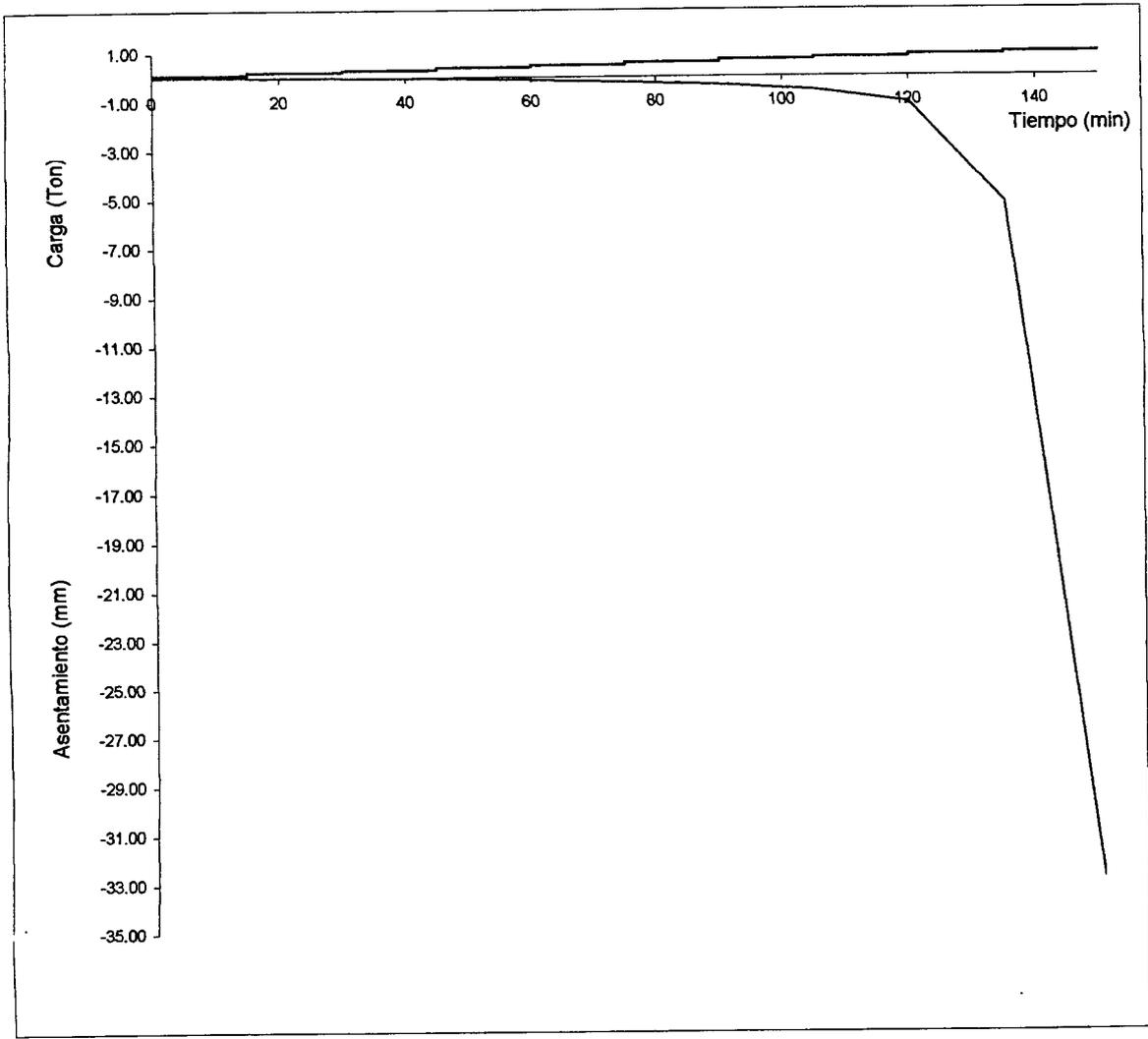


Fig. 4.4 Gráfica de comportamiento en el tiempo de la prueba de carga No. 2.

Ensaye Triaxial						
Tipo de prueba:		Triaxial Rápida.				
Ensaye:		2	Prof:	0.93	m	
Probeta	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Propiedades		Resultados del ensaye	
			w%	44.067	c(kg/cm ²)	0.337
1	0.300	0.910	Ss	2.650	ϕ grados	8.025
2	0.600	0.920	e	1.428	r	0.967
3	1.200	1.181	Gw%	81.850	Nc	7.542
			γ_m (kg/m ³)	1573.135	Nq	2.066
			γ_d (kg/m ³)	1092.101	Ny	0.855

Tabla 4.4 Resultados de la prueba triaxial realizada al material utilizado en la prueba No. 2

Prueba 3

En esta prueba, una vez que se preparó el material y se hizo el colado del pilote. La humedad del suelo compactado al inicio fue de 22.0%. Además, antes de compactar al material, se le colocaron tubos de PVC de 1 y 1 ½" con perforaciones circulares a todo lo largo y rellenos con arena, con el fin de agregarle agua por la parte superior y esta pueda llegar hasta la parte inferior de la arcilla, tratando de lograr la saturación del material de manera uniforme. En la superficie del material se colocó una placa circular de acero, sobre la cual se instaló el micrómetro; esto, con el objeto de medir la expansión vertical del suelo durante el proceso de saturación. Al pilote se le aplicó una carga inicial de 1.175 toneladas con ayuda del gato hidráulico, el día 3 de junio de 2002, dando inicio a esta prueba.

El pilote soportó sin problemas la carga aplicada, sin embargo, conforme se fue saturando el material, inició la expansión y el suelo perdió solidez. De manera que al día siguiente la celda de carga indicaba que había desaparecido por completo la carga vertical aplicada. Sin embargo, el día 10 de junio de 2002 se registró en la celda de carga una lectura de 70 kg; el día 11 de junio de 2002 la lectura de la celda de carga indicaba 100 kg; pero al día siguiente comenzó a disminuir nuevamente. El sistema se dejó sin seguir aplicándole carga al pilote,

pero se le siguió agregando agua hasta el día 12 de junio de 2002, que fue cuando se realizó la prueba de carga.

El movimiento vertical registrado en la superficie fue de 14.1986 mm. De modo que el volumen que aumentó el material fue de:

$$\Delta V = 31.0 \times 31.0 \times 1.41986 = 1364.485 \text{ cm}^3$$

$$V_i = 31.0 \times 31.0 \times 120.0 = 115,320.0 \text{ cm}^3$$

$$V_f = 116,684.485 \text{ cm}^3$$

$$\Delta V = \frac{V_f - V_i}{V_i} * 100 = \frac{116684.485 - 115320.0}{115320.0} * 100 = 1.183\%$$

En la siguiente gráfica se presenta el comportamiento de elevación del suelo con respecto al tiempo:

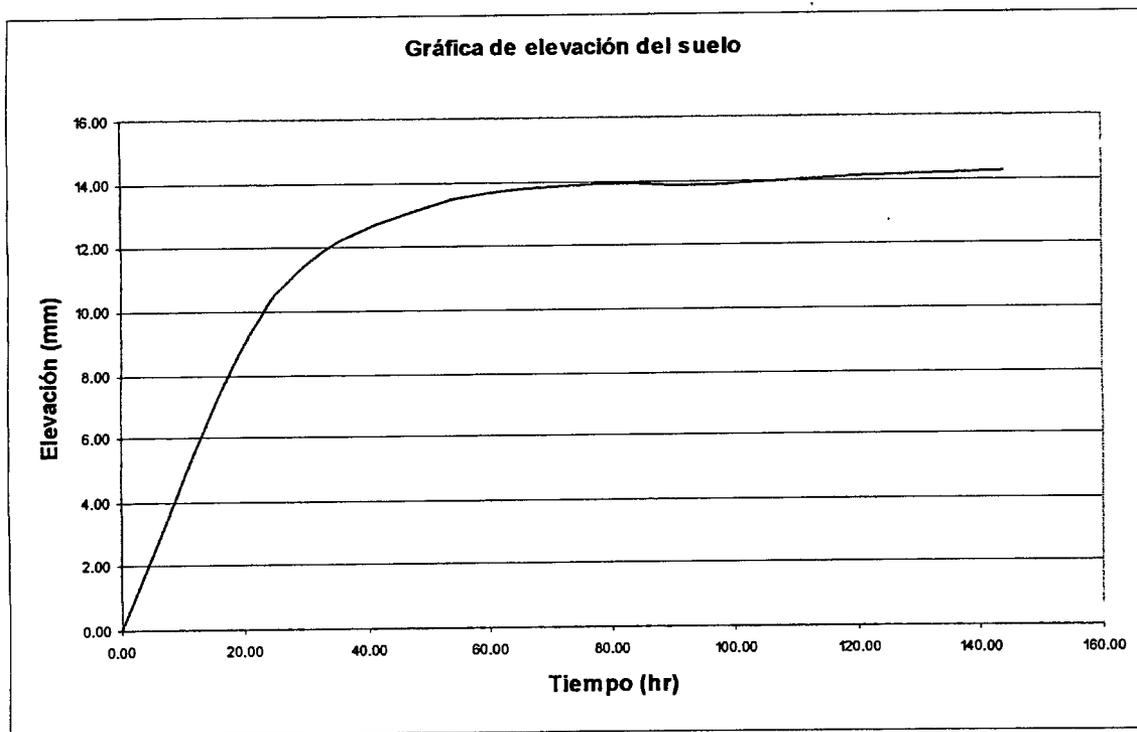


Fig. 4.5 Gráfica de expansión del material con respecto al tiempo.

El siguiente paso fue realizar la prueba de carga el día 12 de junio de 2002, dando los siguientes valores:

Carga (Kg)	Asentamiento (mm)
0.00	0.0000
110.5	0.0635
201.4	0.1524
292.3	0.1981
383.2	0.2794
474.2	0.3277
565.1	0.4089
656.0	0.5055
746.9	0.6020
837.8	0.7569
928.7	0.9169
1019.6	1.2395
1110.5	2.5273

Tabla 4.5 Resultados de la prueba de carga No. 3

Con base en estos resultados, se realizaron las gráficas que se presentan a continuación.

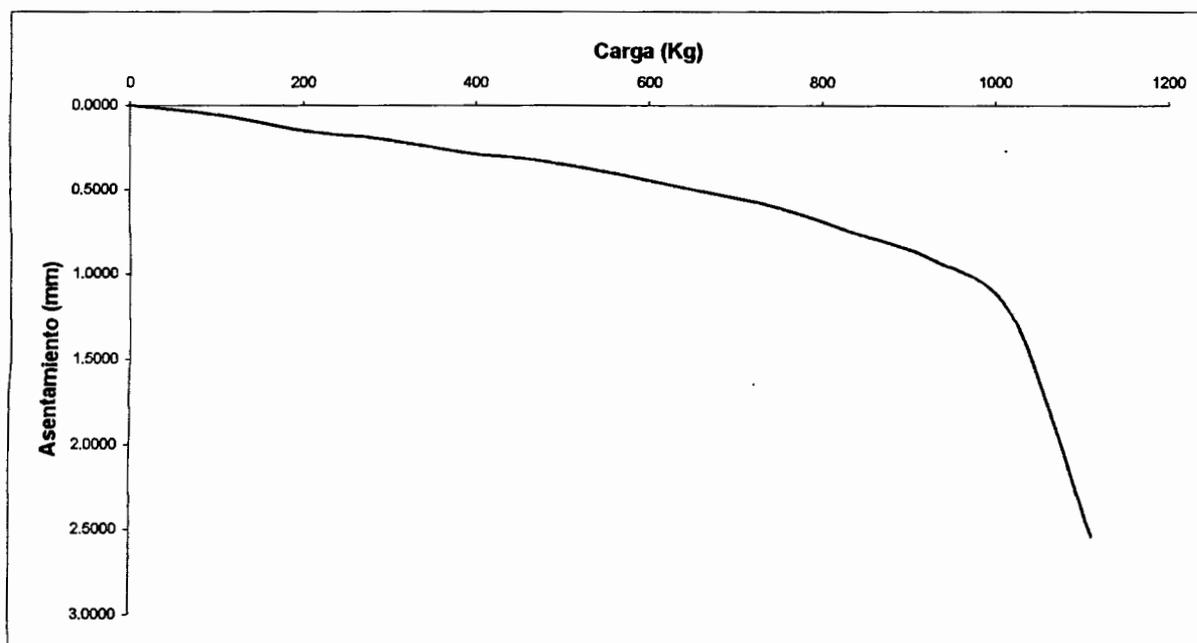


Fig. 4.6 Gráfica de la prueba de carga No. 3 Carga – Asentamiento.

Para la determinación de la humedad del suelo se tomaron muestras a diferentes profundidades y los resultados se muestran a continuación:

Profundidad (cm)	Humedad (%)
0.0	75.34
20.0	51.23
40.0	44.18
65.0	48.42
95.0	44.91
120.0	45.80
140.0	45.61

Tabla 4.6 Perfil de humedades del material dentro del recipiente.

Las medidas del pilote fueron:

Diámetro: 6.52 cm.

Longitud: 86.0 cm.

Puesto que las condiciones de humedad y de compactación son similares a las del material de la prueba No. 2, en este caso no se realizaron pruebas triaxiales y se consideraron los mismos valores que se obtuvieron con el material de la prueba No. 2.

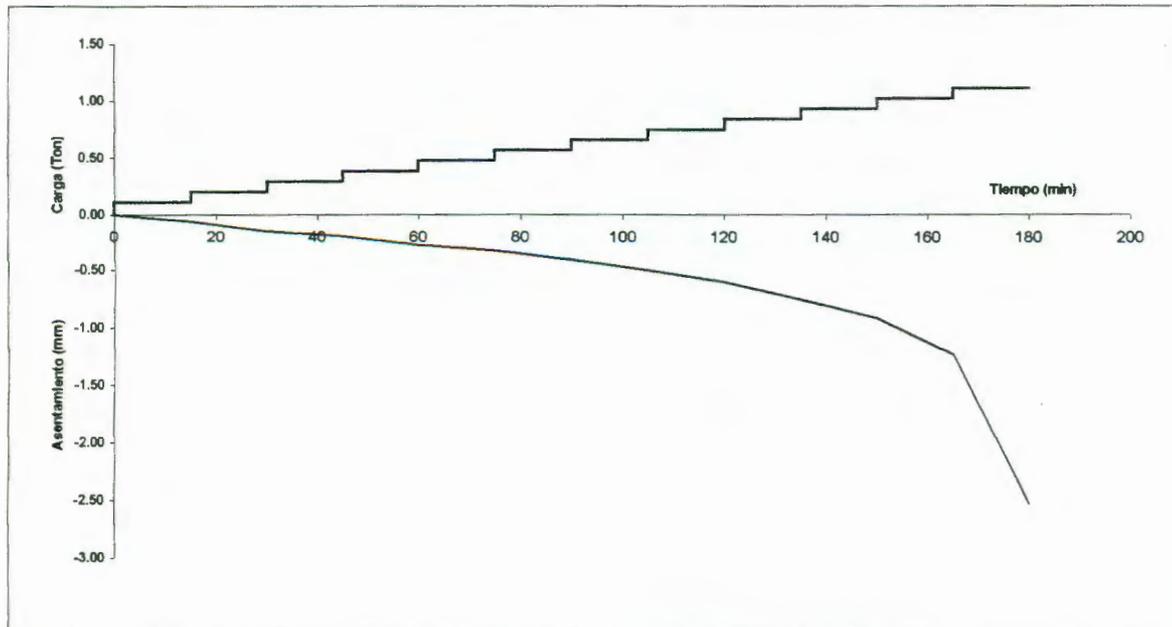


Fig. 4.7 Gráfica de comportamiento en el tiempo de la prueba No. 3.

Prueba No. 4

El objetivo de esta prueba es determinar la resistencia por fricción del pilote en condiciones similares a la prueba 1. Para lograr determinar dicho valor se colocó en la parte inferior del mueble, separado 25 cm de la base, un fondo de madera sostenido con tabicones de concreto y con una perforación en el centro, de 8 cm. Esto, con el fin de que sirva de base para colocar y compactar la arcilla y hacer el agujero en el material, de modo que coincida con el agujero de la tabla, y así, al momento de cargar el pilote, no exista suelo en la base que impida el movimiento; de modo que la única resistencia desarrollada sea por causa de la fricción en el fuste del pilote. Puesto que la humedad del suelo durante la prueba fue similar a la de la prueba No. 1, se utilizarán los parámetros obtenidos de la prueba triaxial efectuada al material de dicha prueba.

Esta prueba se realizó el día 24 de junio de 2002. los datos de la prueba de carga son:

Carga (Kg)	Asentamiento (mm)
0.00	0.0000
110.5	0.0270
201.4	0.0530
292.3	0.0830
383.2	0.1290
474.2	0.1800
565.1	0.2380
656.0	0.2960
746.9	0.3470
837.8	0.4180
928.7	0.5000
1019.6	0.5710
1110.5	0.6650
1201.5	0.7650
1292.4	0.8680
1383.3	1.0230
1474.2	1.2290
1565.1	1.5210
1656.0	1.9160
1746.9	2.8200
1837.9	9.6000

Tabla 4.7 Resultados de la prueba No. 4.

Puesto que el pilote mostró una resistencia demasiado alta dadas las condiciones de la prueba, se considera que existieron factores que provocaron un resultado incorrecto. Por lo anterior, se ha decidido no tomar en cuenta esta prueba para fines de cálculo y se presenta únicamente con la finalidad de mostrar un método que, bien realizado, puede proporcionar la capacidad por fricción de un pilote.

Prueba 5

Para la realización de esta prueba se utilizó el dispositivo preparado para la prueba No. 4. Una vez terminada la prueba, se retiraron los dispositivos de carga y medición, dejando solamente el micrómetro en la parte superior del pilote, y luego se procedió a agregar agua en la superficie y por los drenes de tubo de PVC colocados al momento de la compactación. Se observó que durante el proceso de expansión del suelo, el pilote sufrió un movimiento vertical hacia arriba, registrado con el micrómetro. Durante la primera hora, dicho movimiento fue de 0.025 mm. Esta prueba se llevó a cabo el día 27 de junio de 2002.

Los datos obtenidos con la prueba son:

Carga (Kg)	Asentamiento (mm)
0.00	0.0000
110.5	0.0290
201.4	0.0770
292.3	0.1420
383.2	0.2280
474.2	0.2890
565.1	0.3930
656.0	0.5320
746.9	0.6980
837.8	1.0380
928.7	1.5960
1019.6	3.3500
1110.5	11.0000

Tabla 4.8 Resultados de la prueba No. 5.

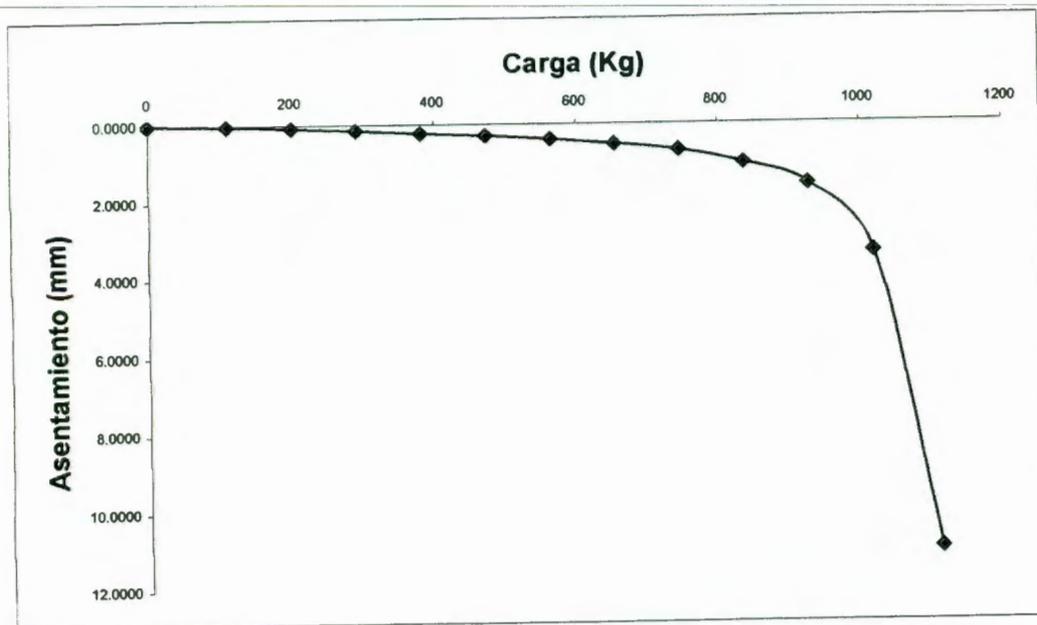


Fig. 4.8 Gráfica de la prueba de carga No. 5, Carga - Asentamiento.

Las medidas del pilote fueron:

Diámetro: 6.87 cm.

Longitud: 90.0 cm.

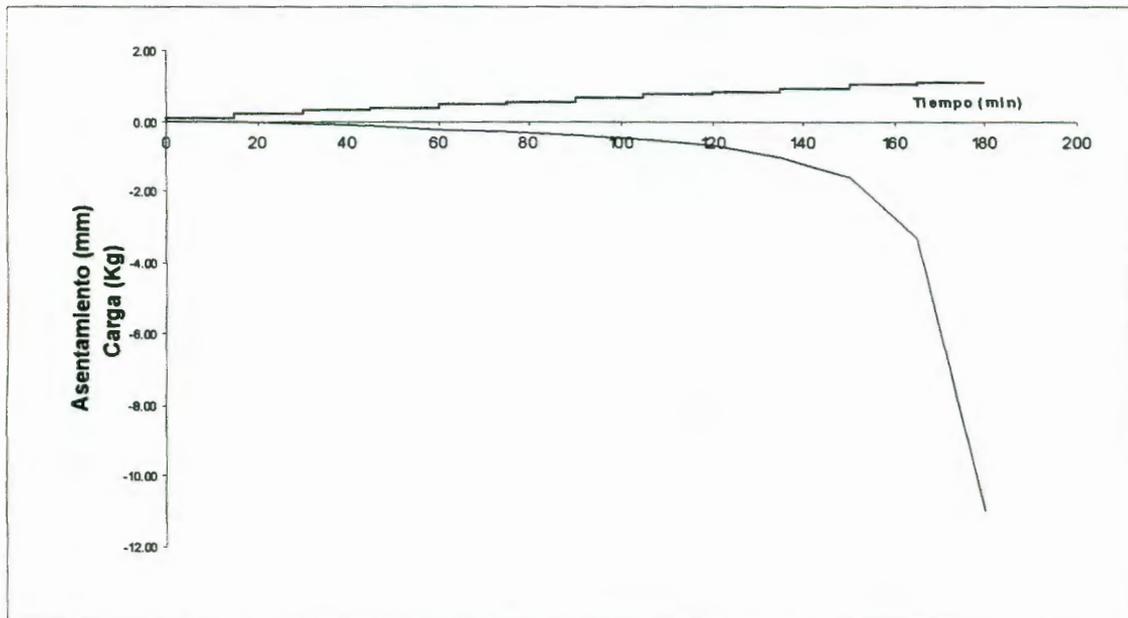


Fig. 4.9 Gráfica de comportamiento en el tiempo de la prueba de carga No. 5.

Ensayo Triaxial						
Tipo de prueba:		Triaxial Rápida.				
Ensayo:		5	Prof:	0.90	m	
Probeta	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Propiedades		Resultados del ensayo	
			w%	30.071	c(kg/cm ²)	0.226
1	0.300	1.076	Ss	2.650	ϕ grados	26.278
2	0.600	1.961	e	1.414	r	0.985
3	1.200	2.529	Gw%	56.086	Nc	22.301
			γ_m (kg/m ³)	1427.697	Nq	11.891
			γ_d (kg/m ³)	1098.729	N γ	12.598

Tabla 4.9 Resultados de la prueba triaxial realizada al material utilizado en la prueba No. 5.

Prueba 6

Esta prueba se realizó llevando el material a una humedad de 44% y compactándolo como se describió anteriormente. Adicionalmente se le construyó una ampliación al pilote en la base, quedando ésta de 9 cm de diámetro y 14 cm de longitud. Esto con la finalidad de observar un aumento en la capacidad de carga del pilote en comparación con el anterior. Los datos de la prueba de carga son:

Carga (Kg)	Asentamiento (mm)
0.00	0.0000
110.5	0.0762
201.4	0.1651
292.3	0.3353
383.2	0.6350
474.2	1.2700
565.1	3.1750
656.0	7.6200

Tabla 4.10 Resultados de la prueba No. 6.

Las medidas del pilote fueron:

Diámetro: 6.62 cm

Longitud: 92.0 cm

Las gráficas obtenidas de la prueba se muestran a continuación.

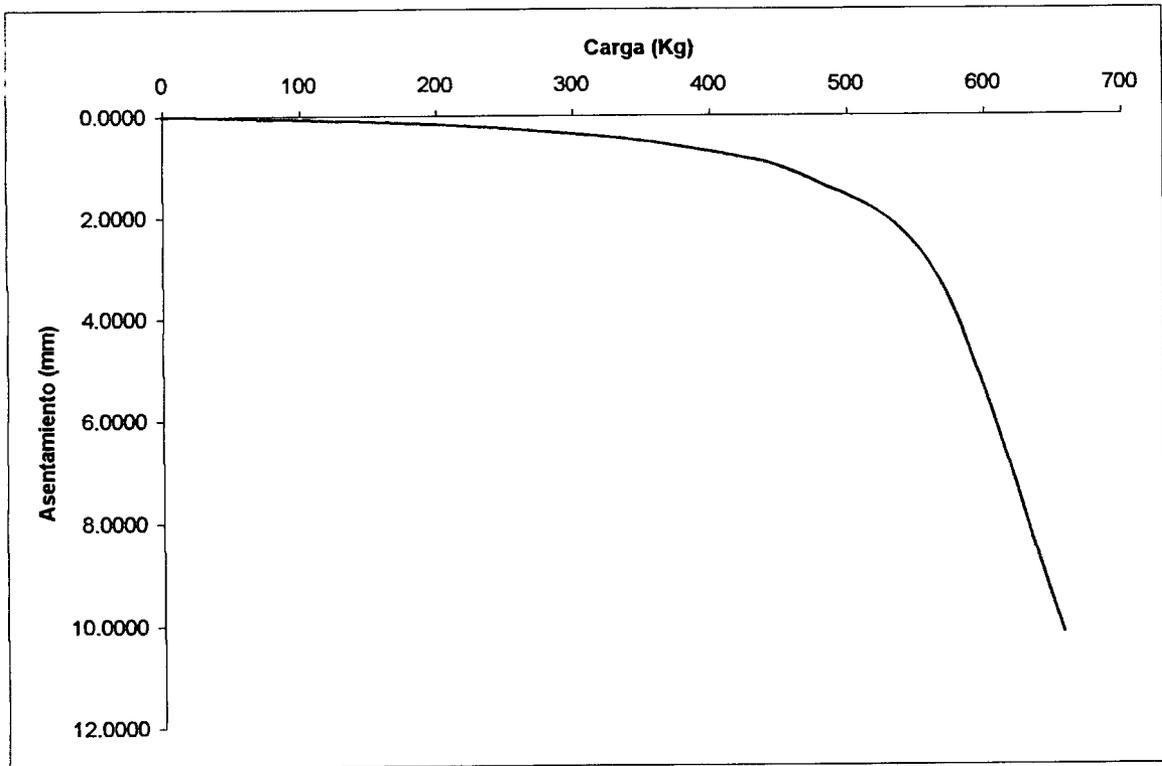


Fig. 4.10 Gráfica de la prueba de carga No. 6 Carga – Asentamiento.

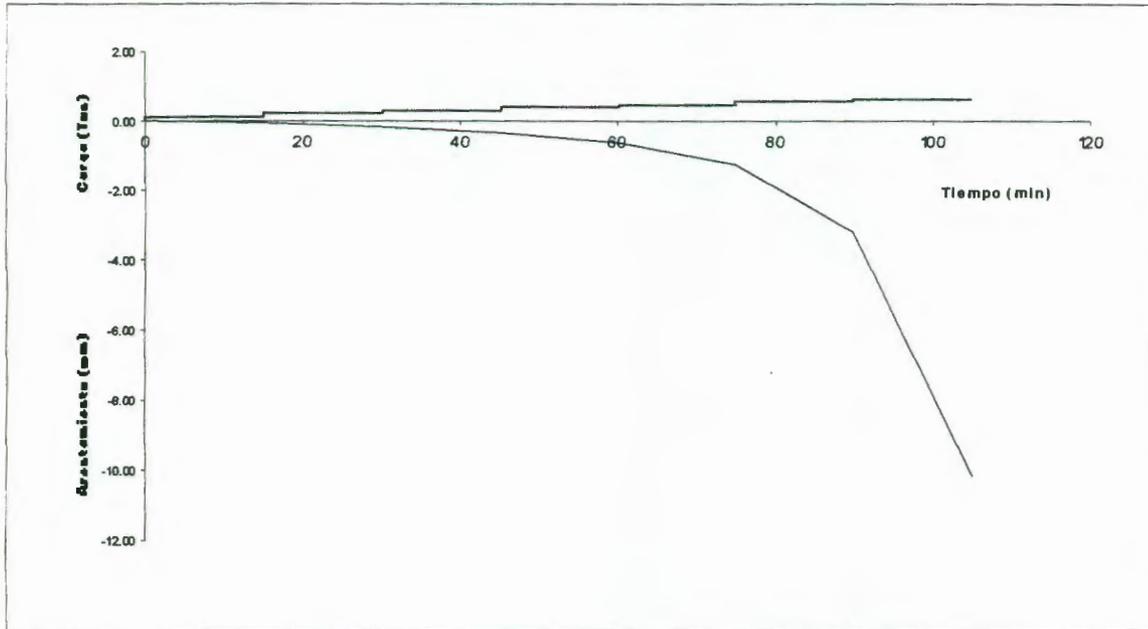


Fig. 4.11 Gráfica de comportamiento en el tiempo de la prueba de carga No. 6

Ensaye Triaxial						
Tipo de prueba:		Triaxial Rápida.				
Ensaye:		6	Prof:	0.92	m	
Probeta	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Propiedades		Resultados del ensaye	
			w%	43.129	c(kg/cm ²)	0.265
1	0.300	0.564	Ss	2.650	ϕ grados	4.135
2	0.600	0.749	e	1.323	r	0.712
3	1.200	0.721	Gw%	86.412	Nc	6.232
			γ_m (kg/m ³)	1632.901	Nq	1.450
			γ_d (kg/m ³)	1140.876	N γ	0.355

Tabla 4.11 Resultados de la prueba triaxial realizada al material utilizado en la prueba No. 5.

Prueba 7

Esta prueba se realizó en condiciones de humedad muy similares a las de la prueba 6, 43%. Sin embargo, el grado de compactación del material fue mucho menor; de modo que no fue posible labrar las probetas para el ensaye triaxial y sólo se realizó una prueba de compresión simple. Entonces, las propiedades mecánicas del material fueron sensiblemente menores a las de el ensaye anterior. Los resultados de la prueba de carga al pilote y las correspondientes gráficas se muestran a continuación.

Carga (Kg)	Asentamiento (mm)
0.00	0.0000
110.5	0.0950
201.4	0.1700
292.3	0.3050
383.2	0.5250
474.2	0.8350
565.1	1.9750
656.0	10.1500
746.9	15.7000

Tabla 4.12 Resultados de la prueba No. 7.

Las medidas del pilote fueron:

Diámetro: 6.67 cm

Longitud: 85.0 cm

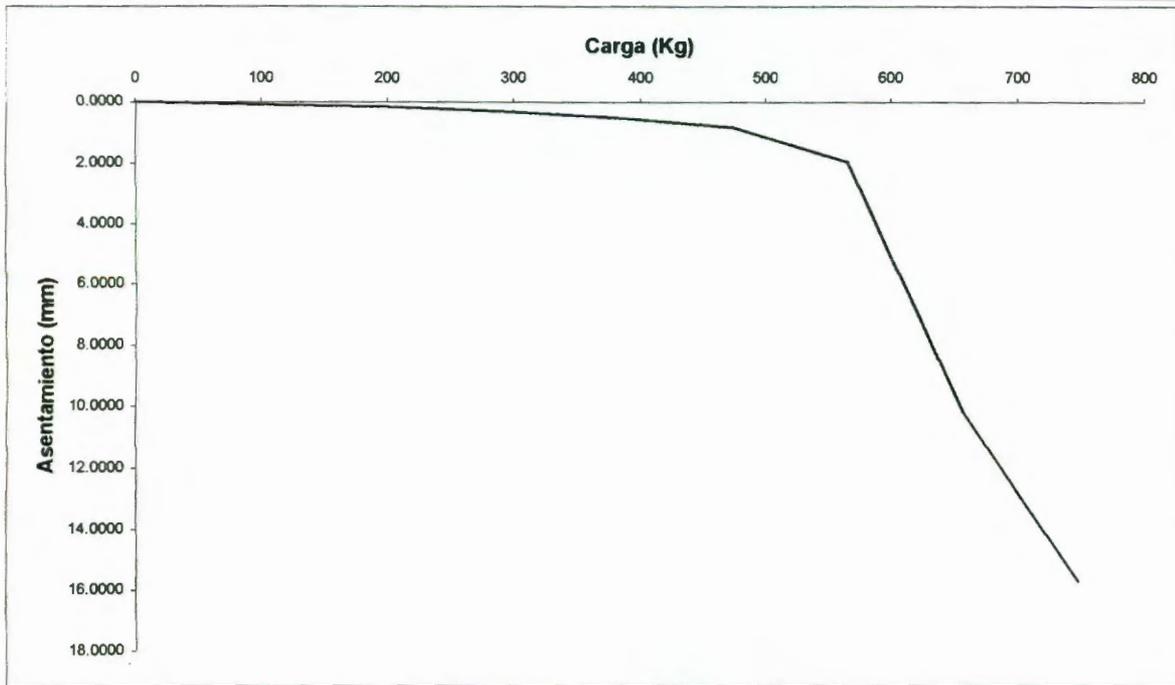


Fig. 4.12 Gráfica de la prueba de carga No. 7 Carga – Asentamiento.

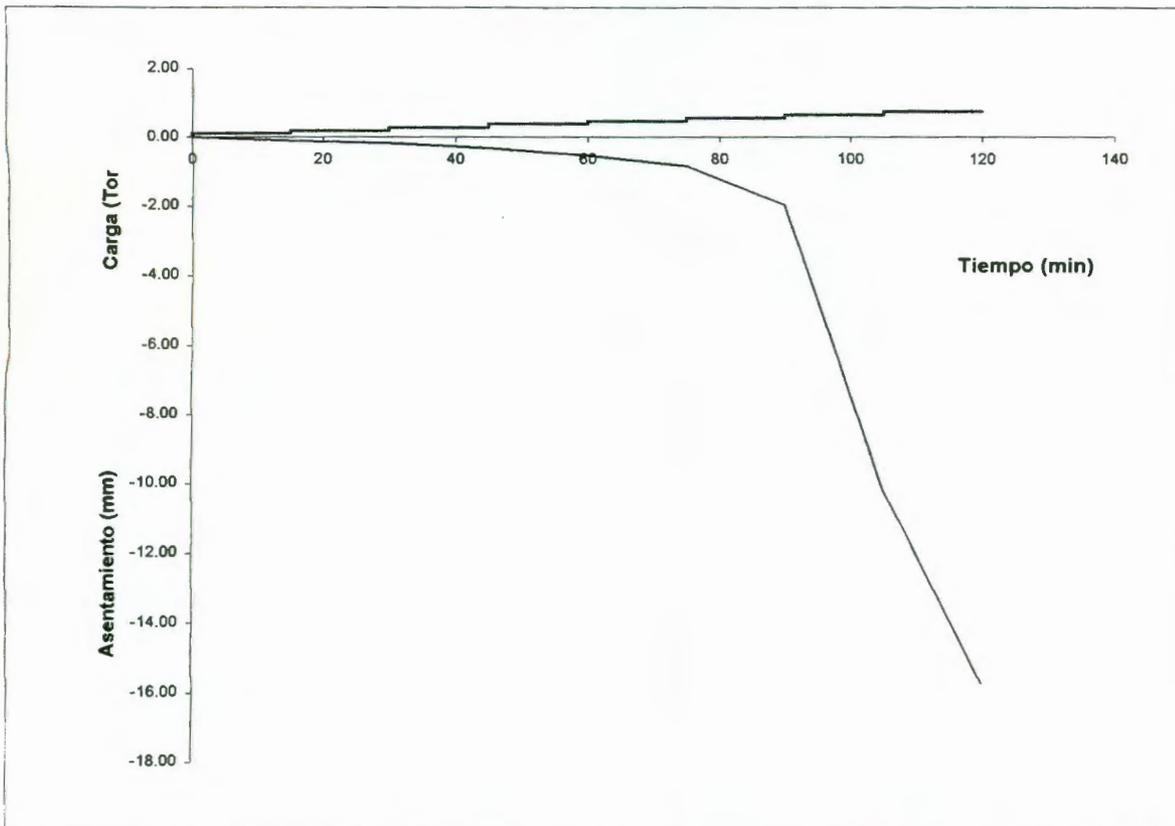


Fig. 4.13 Gráfica de comportamiento en el tiempo de la prueba de carga No. 7

Del ensaye de compresión simple realizado al material de la prueba se obtuvieron los siguientes parámetros:

Propiedad	Valor
Cohesión	0.103 Kg/cm ²
Ángulo de fricción	0
Peso volumétrico	1570.39 Kg/m ³
Humedad	45%

Tabla 4.13 Resultados del ensaye de compresión simple.

Prueba 8

Para realizar esta prueba se preparó el material con una humedad de 18.34% y se compactó en esas condiciones. Después de colado el pilote, se esperó un período de 48 horas y se le aplicó una carga vertical de 250 Kg con el gato. Posteriormente se procedió a iniciar la saturación del material desde la superficie. Se observó durante la saturación y con las lecturas tomadas, que el suelo se expandió 1.41 %. Durante el proceso de saturación, la carga registrada en la celda de carga aumentó de 250 a 430 Kg; esto debido a la fuerza de levantamiento ejercida por el suelo sobre el pilote. Sin embargo, la carga vertical aplicada se disipó a los tres días de saturación, debido al leve descenso del pilote durante el humedecimiento del material.

Después de transcurridos 14 días se observó que el material se había humedecido por completo y se procedió a realizar la prueba de carga. Después de terminar el ensaye se tomaron testigos de humedad a diferentes profundidades y se obtuvieron los siguientes resultados:

Profundidad (cm)	Humedad (%)
0.00-0.15	64.50
0.15-0.40	51.89
0.40-0.65	44.81
0.65-0.90	44.92
0.90-1.20	43.90

Tabla 4.14 Perfil de humedades del material dentro del recipiente.

En la gráfica que se presenta a continuación se observa el comportamiento de la superficie del suelo con respecto a la expansión producida por el humedecimiento:

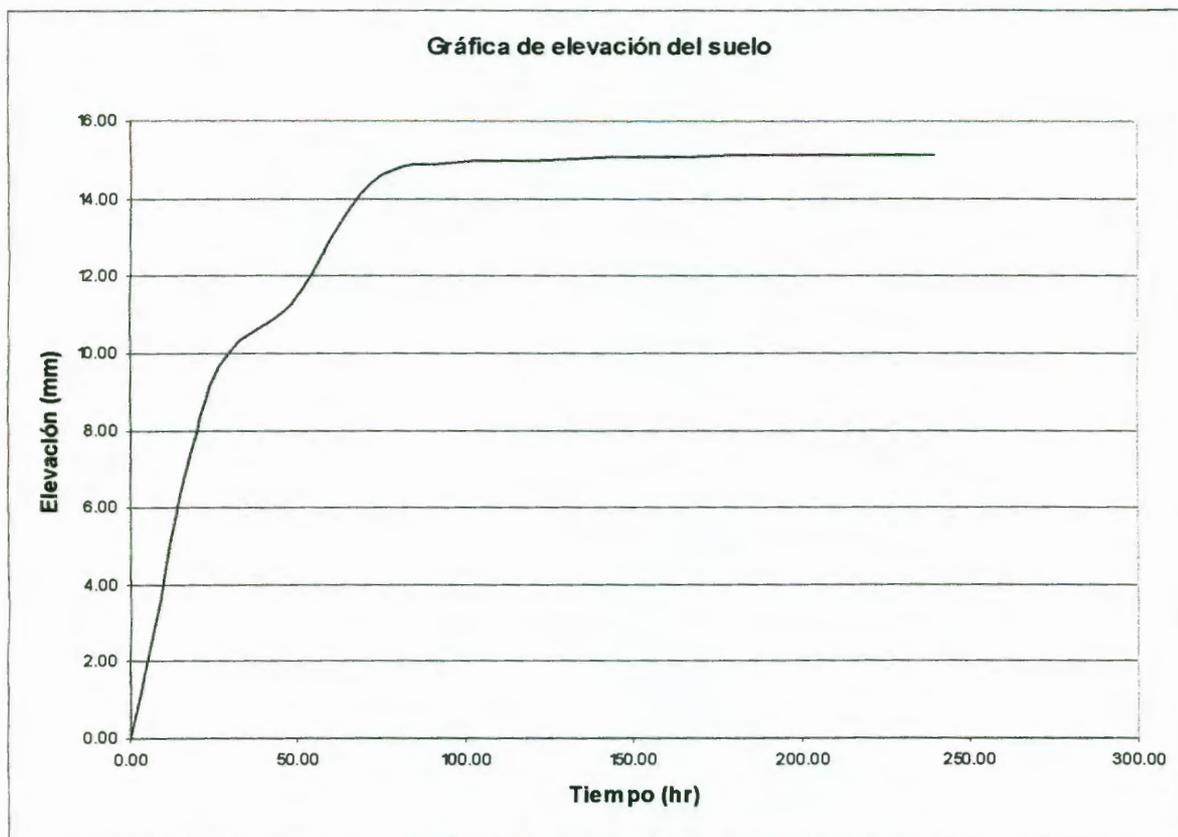


Fig. 4.14 Gráfica de expansión del material en el tiempo.

Los resultados de la prueba de carga y las gráficas obtenidas se muestran a continuación:

Carga (Kg)	Asentamiento (mm)
0.00	0.0000
110.5	0.0190
201.4	0.0520
292.3	0.1020
383.2	0.1510
474.2	0.2170
565.1	0.3420
656.0	0.4920
746.9	0.7050
837.8	3.0000

Tabla 4.15 Resultados de la prueba No. 8.

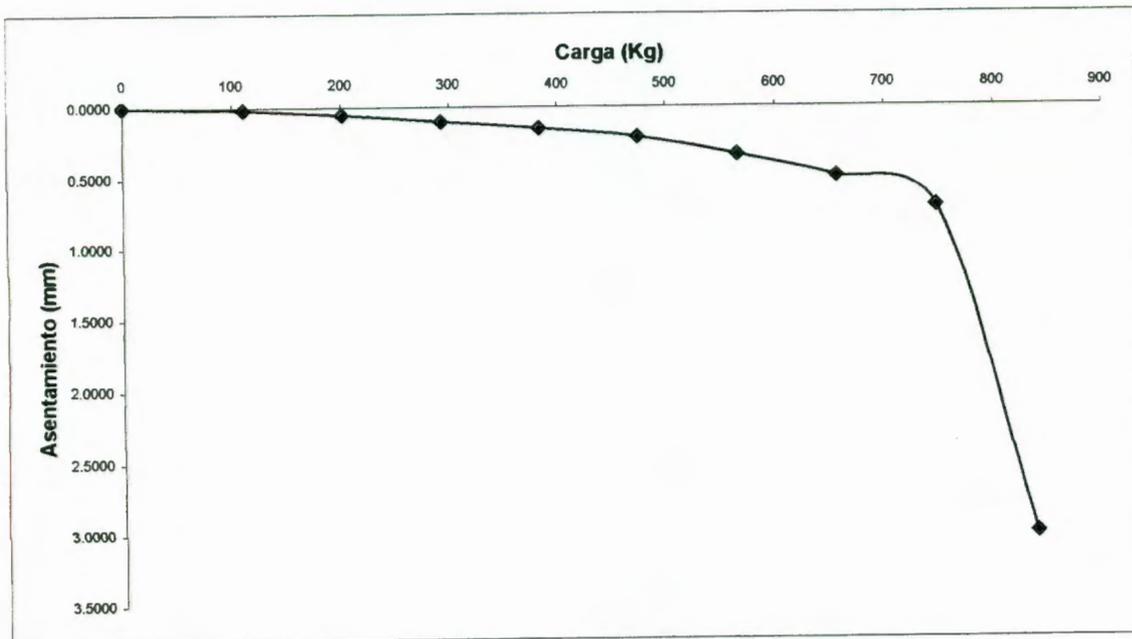


Fig. 4.15 Gráfica de la prueba de carga No. 8 Carga – Asentamiento.

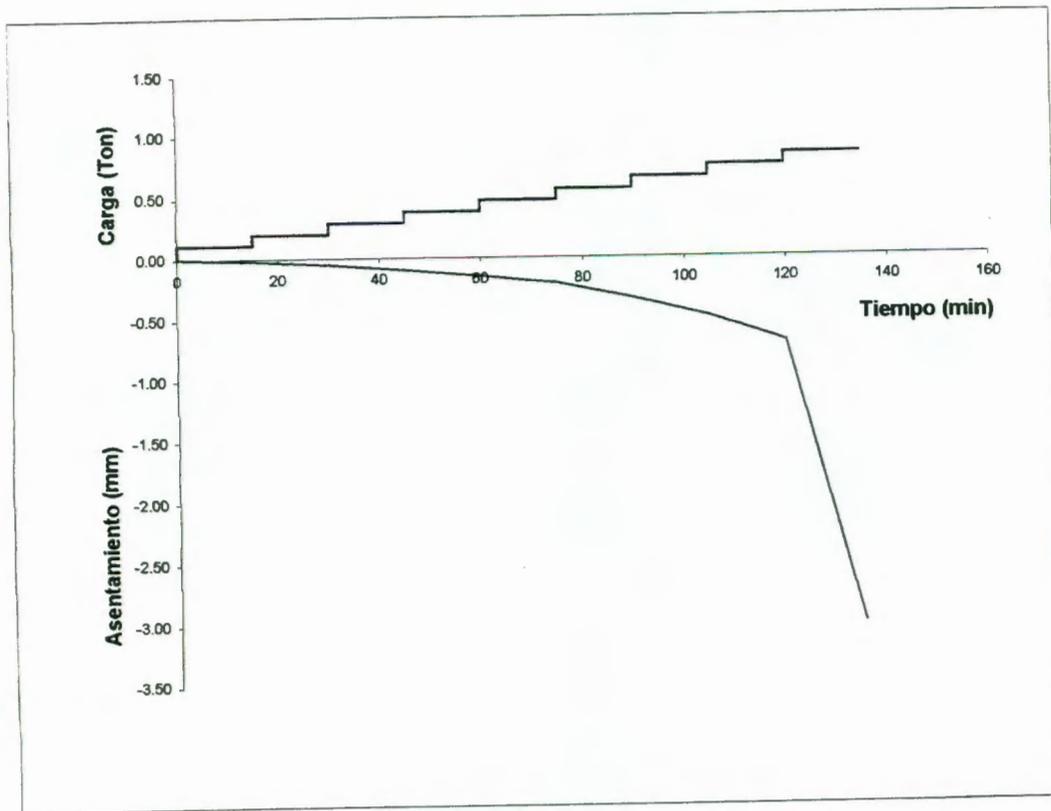


Fig. 4.16 Gráfica de comportamiento en el tiempo de la prueba de carga No. 8

Las medidas del pilote fueron:

Diámetro: 6.68 cm

Longitud: 93.0 cm

Ensaye Triaxial						
Tipo de prueba:		Triaxial Rápida.				
Ensaye:		8	Prof:	0.93	m	
Probeta	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Propiedades		Resultados del ensaye	
			w%	45.435	c(kg/cm ²)	0.104
			Ss	2.650	ϕ grados	3.962
1	0.300	0.263	e	1.589	r	0.996
2	0.600	0.320	Gw%	75.964	Nc	6.178
3	1.200	0.399	γ_m (kg/m ³)	1489.980	Nq	1.425
			γ_d (kg/m ³)	1024.475	N γ	0.336

Tabla 4.16 Resultados del ensaye triaxial realizado al material de la prueba No. 8.

Prueba 9

Para la realización de esta prueba se preparó el material con una humedad del 21% y se realizó al procedimiento anteriormente descrito para el colado del pilote. Una vez transcurridas 48 horas se hizo la prueba de carga y se obtuvieron los siguientes resultados y gráficos:

Carga (Kg)	Asentamiento (mm)
0.00	0.0000
110.5	0.0010
201.4	0.0380
292.3	0.0840
383.2	0.1340
474.2	0.2440
565.1	0.3210
656.0	0.3920
746.9	0.4540
837.8	0.4890
928.7	0.5160
1019.6	0.5460
1110.5	0.6180
1201.5	0.6720
1292.4	0.7520
1383.3	0.8290
1474.2	0.9010
1565.1	1.0090
1656.0	1.1130
1746.9	1.2510
1837.9	1.4120

Tabla 4.17 Resultados de la prueba No. 9.

Las medidas del pilote fueron:

Diámetro: 6.49 cm

Longitud: 95.0 cm

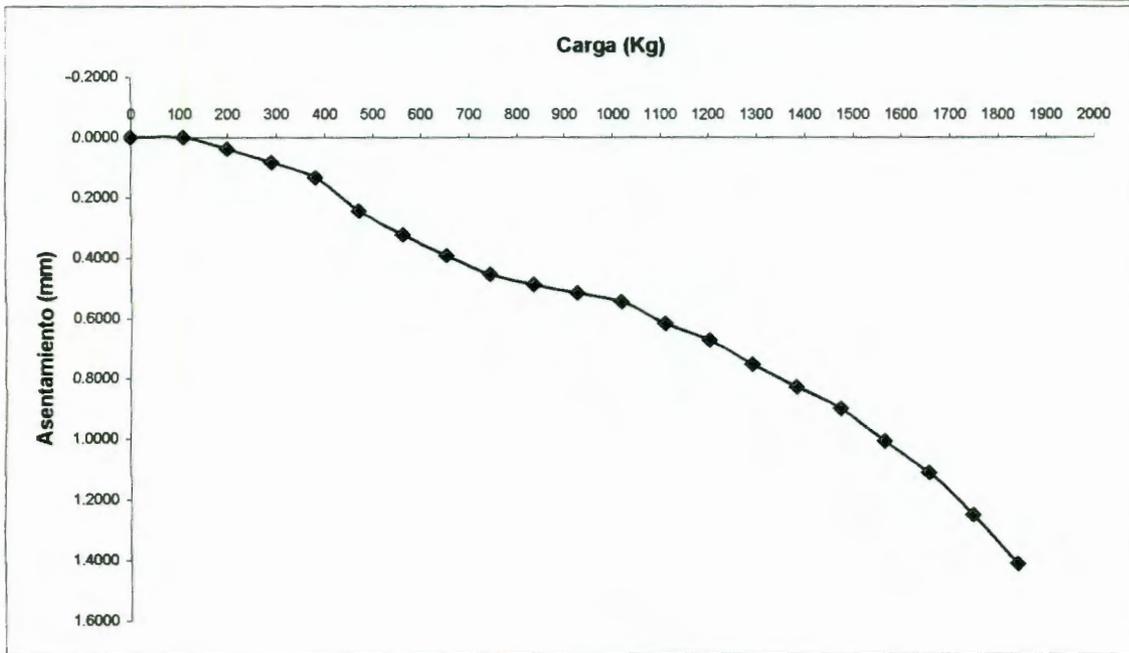


Fig. 4.17 Gráfica de la prueba de carga No. 9 Carga - Asentamiento.

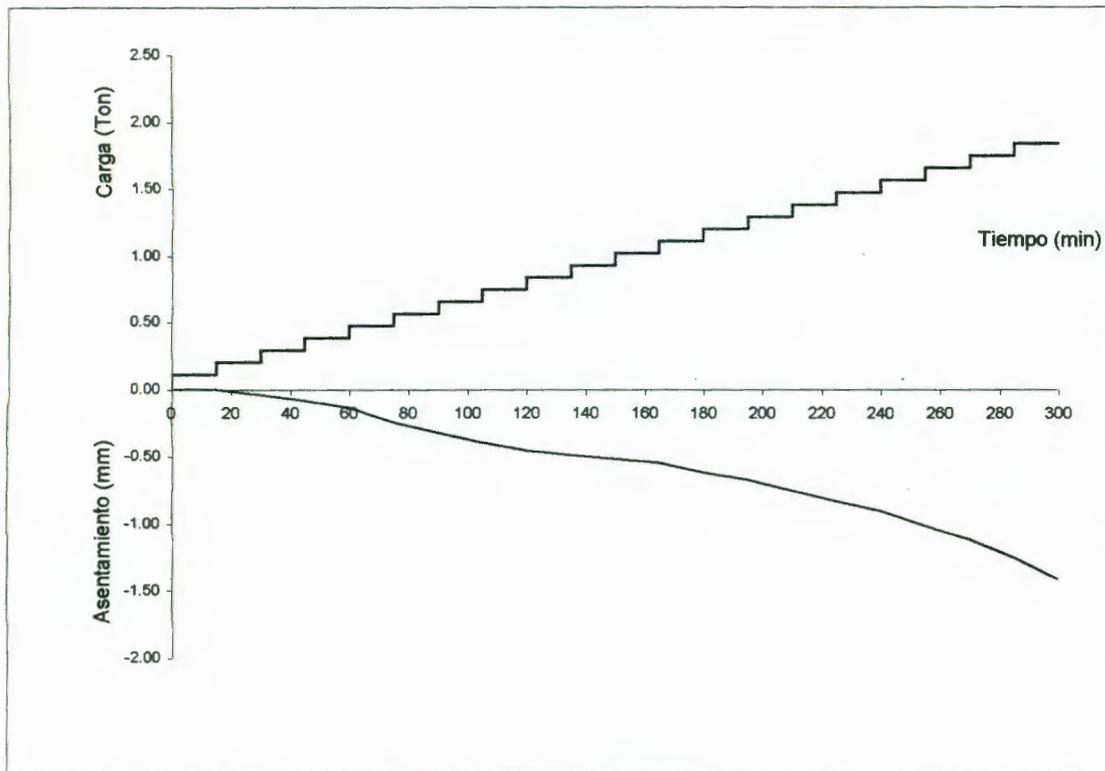


Fig. 4.18 Gráfica de comportamiento en el tiempo de la prueba de carga No. 9

Ensayo Triaxial						
Tipo de prueba:		Triaxial Rápida.				
Ensayo:		9	Prof:	0.95	m	
Probeta	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Propiedades		Resultados del ensaye	
			w%	20.914	c(kg/cm ²)	0.283
			Ss	2.650	ϕ grados	36.947
1	0.300	2.166	e	1.198	r	1.000
2	0.600	2.954	Gw%	46.268	Nc	55.378
3	1.200	4.852	γ_m (kg/m ³)	1457.896	Nq	42.662
			γ_d (kg/m ³)	1205.732	N γ	64.696

Tabla 4.18 Resultados del ensayo triaxial realizado al material de la prueba 9.

Prueba 10

La realización de esta prueba fue, una vez terminada la prueba de carga 9 y devuelto al material tomado para las triaxiales, se le aplicó una carga inicial de 250 Kg al pilote y se comenzó a saturar desde la superficie por un período de 7 días; que fue cuando se observó que el material se había humedecido lo suficiente. El suelo tuvo una expansión de 1.39%. Durante los dos primeros días la lectura de la carga vertical fue aumentando hasta que alcanzó un valor máximo de 320 Kg. Después de esto, la carga comenzó a descender hasta que llegó a cero al tercer día de humedecimiento. Transcurridos los siete días, se realizó la prueba de carga y se obtuvieron los datos y gráficos siguientes:

Carga (Kg)	Asentamiento (mm)
0.00	0.0000
110.5	0.0080
201.4	0.0540
292.3	0.1010
383.2	0.1940
474.2	0.2990
565.1	0.5190
656.0	1.1690
746.9	4.5000

Tabla 4.19 Resultados de la prueba No. 10.

Las medidas del pilote fueron:

Diámetro: 6.49 cm

Longitud: 95.0 cm

A continuación se presenta el gráfico de la elevación de la superficie del suelo con respecto al tiempo:

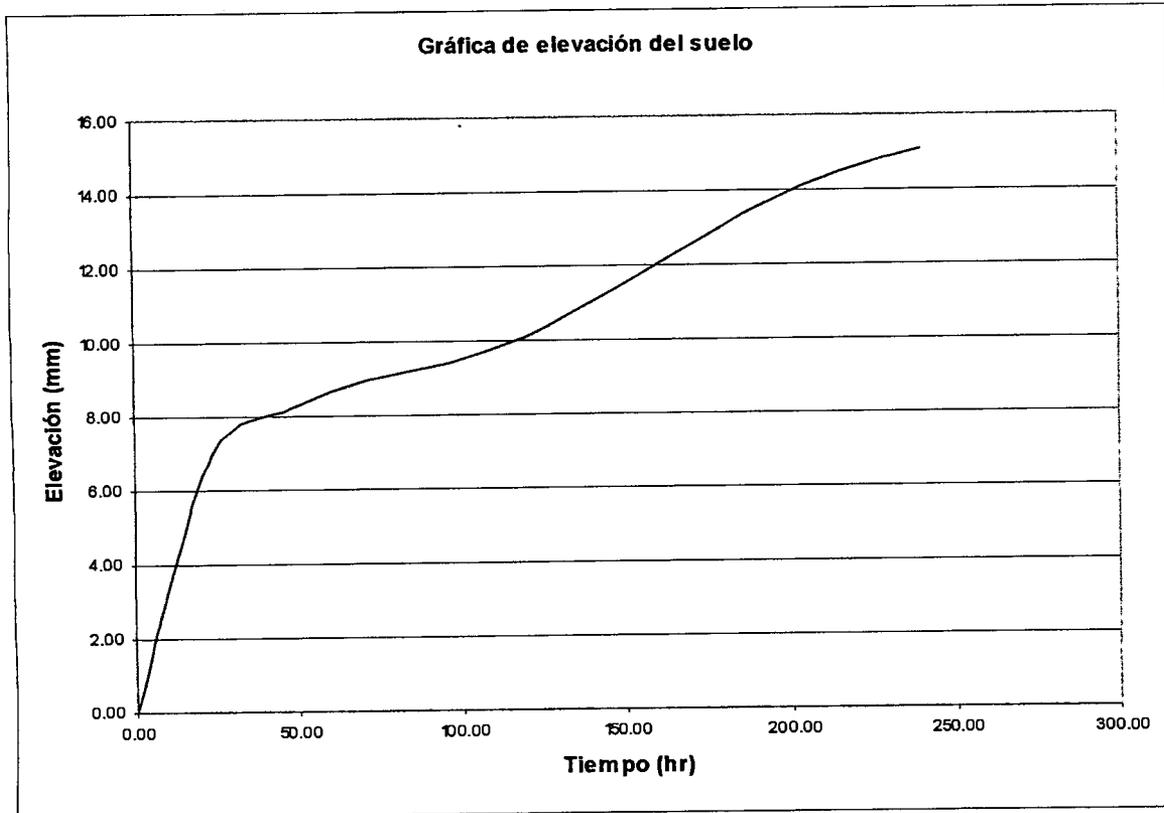


Fig. 4.19 Expansión del material en el tiempo.

Una vez terminada la prueba se tomaron testigos de humedad a diferentes profundidades y se obtuvieron los siguientes valores:

Profundidad (cm)	Humedad (%)
0.00-0.15	61.81
0.15-0.40	48.21
0.40-0.65	46.50
0.65-0.90	42.47
0.90-1.20	41.96

Tabla 4.20 Resultados de la prueba No. 10.

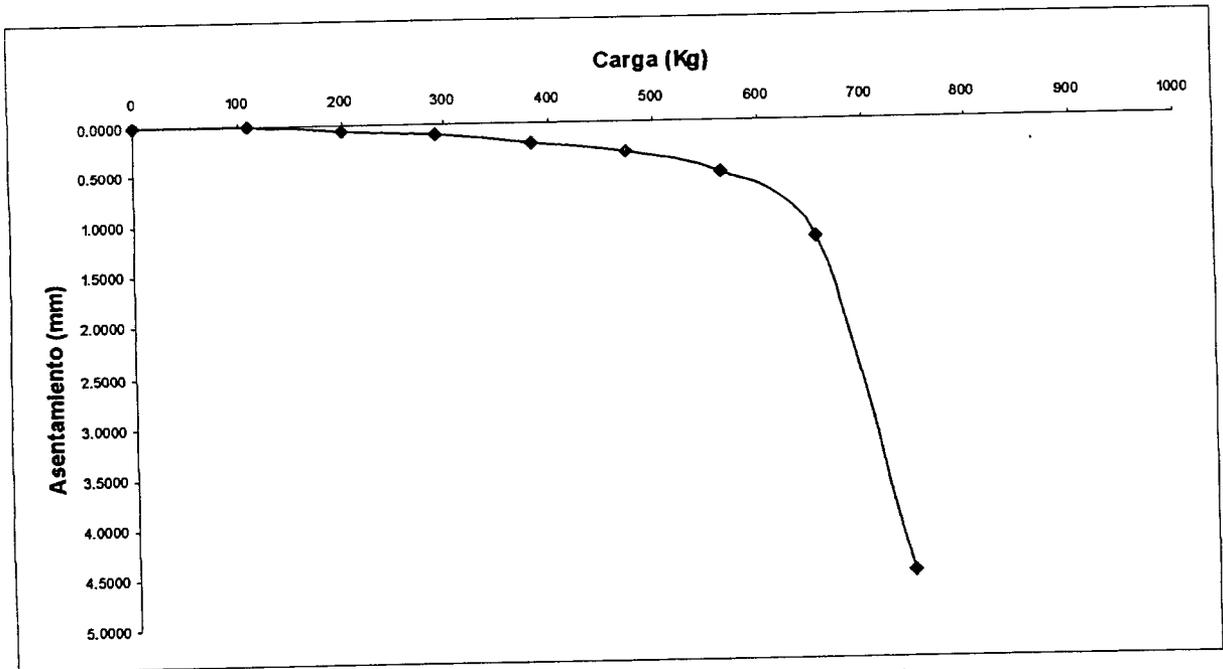


Fig. 4.20 la prueba de carga No. 10 Carga - Asentamiento.

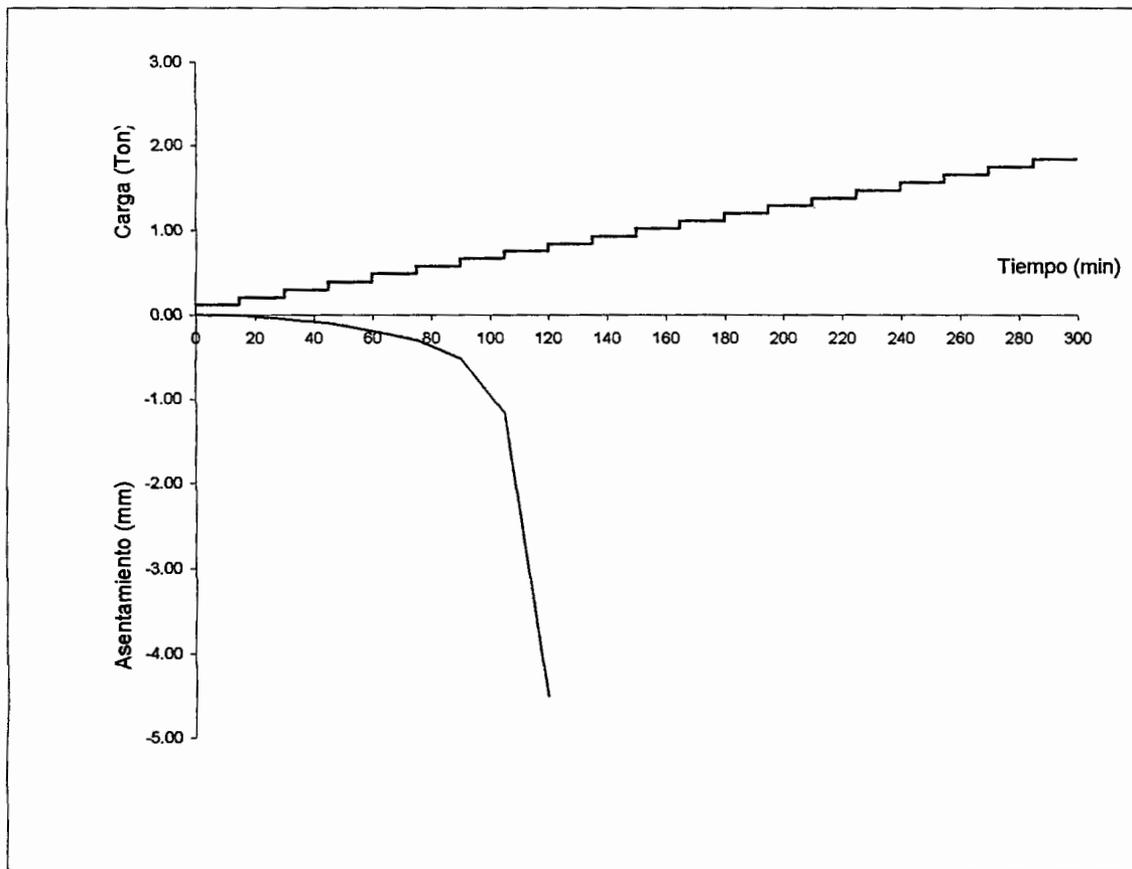


Fig. 4.21 Gráfica de comportamiento en el tiempo de la prueba de carga No. 10

Ensaye Triaxial						
Tipo de prueba:		Triaxial Rápida.				
Ensaye:		10	Prof:	0.95	m	
Probeta	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Propiedades		Resultados del ensaye	
			w%	43.982	c(kg/cm ²)	0.073
1	0.300	0.244	Ss	2.650	ϕ grados	6.404
2	0.600	0.305	e	1.609	r	0.998
3	1.200	0.467	Gw%	72.495	Nc	6.950
			γ_m (kg/m ³)	1462.822	Nq	1.784
			γ_d (kg/m ³)	1015.904	N γ	0.626

Tabla 4.21 Resultados del ensaye triaxial realizado al material de la prueba No. 10.

Prueba 11

El material para esta prueba fue llevado al 28% de humedad y posteriormente fue compactado con el proceso descrito anteriormente. Después de transcurridas 48 horas de haber colado el pilote, se procedió a realizar la prueba de carga y se obtuvieron los siguientes resultados.

Carga (Kg)	Asentamiento (mm)
0.00	0.0000
110.5	0.0010
201.4	0.0110
292.3	0.0380
383.2	0.1030
474.2	0.1770
565.1	0.2680
656.0	0.3510
746.9	0.4430
837.8	0.5630
928.7	0.6810
1019.6	0.8320
1110.5	0.9960
1201.5	1.2380
1292.4	1.5060
1383.3	1.8760
1474.2	2.4820
1565.1	3.0790
1656.0	3.7230
1746.9	4.6200
1837.9	6.0300

Tabla 4.22 Resultados de la prueba No. 11.

Las medidas del pilote fueron:

Diámetro: 6.04 cm

Longitud: 86.0 cm

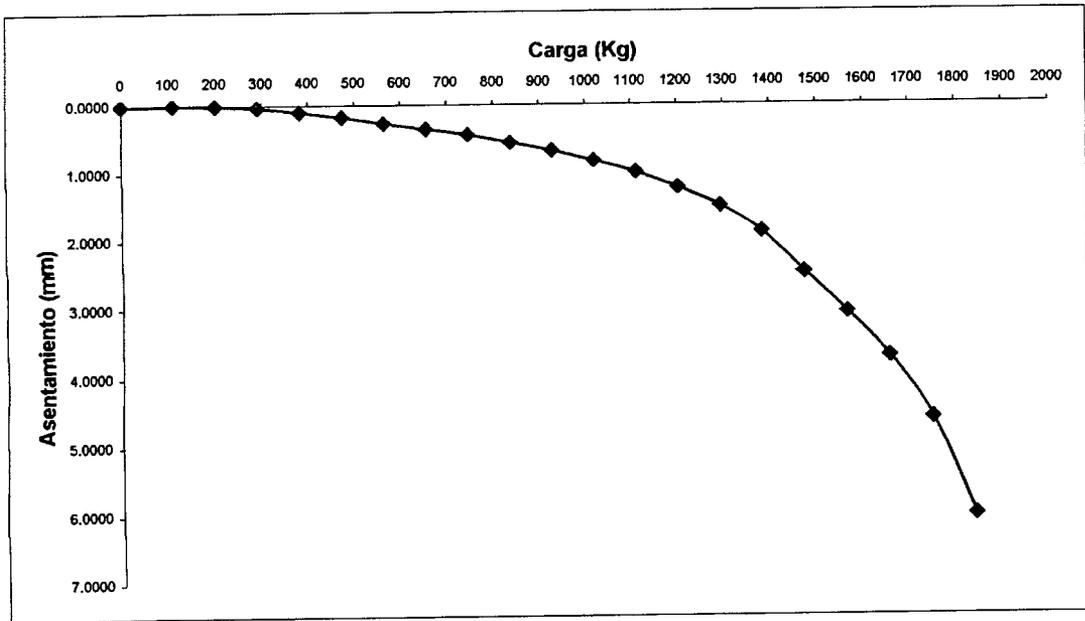


Fig. 4.22 Gráfica de la prueba de carga No. 11 Carga - Asentamiento.

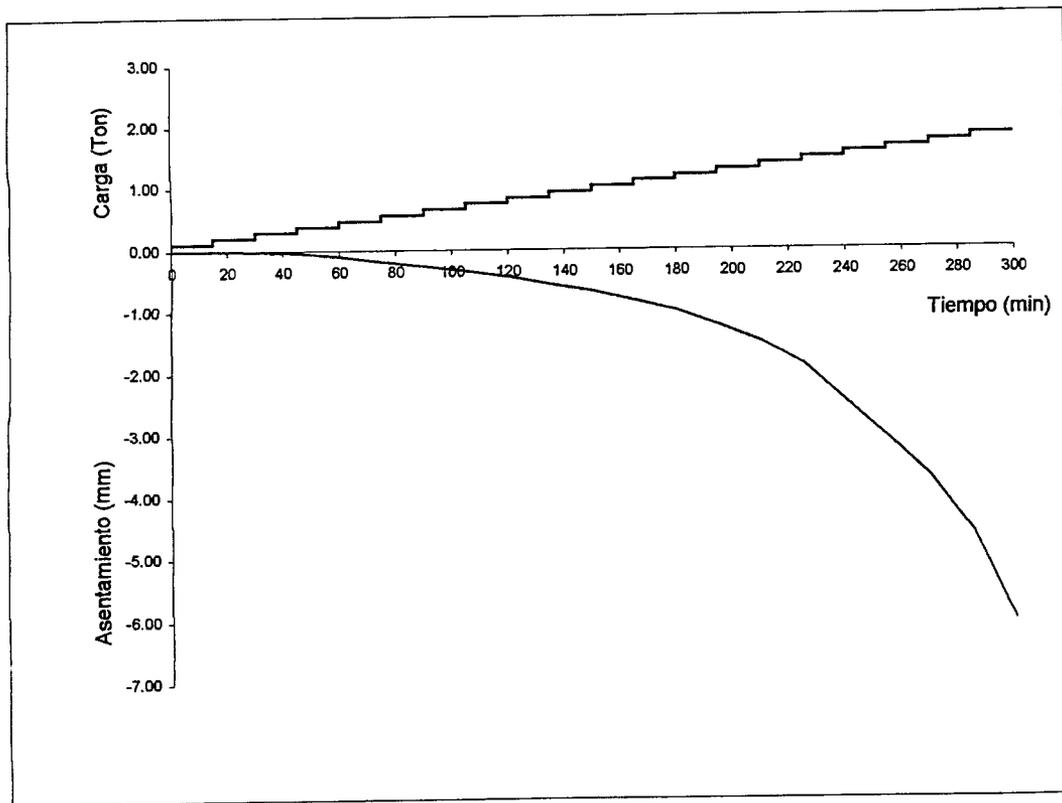


Fig. 4.23 Gráfica de comportamiento en el tiempo de la prueba de carga No. 11

Ensaye Triaxial						
Tipo de prueba:		Triaxial Rápida.				
Ensaye:		11	Prof:	0.86	m	
Probeta	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Propiedades		Resultados del ensaye	
			w%	28.509	c(kg/cm ²)	0.366
1	0.300	2.089	Ss	2.650	ϕ grados	32.889
2	0.600	2.881	e	1.513	r	1.000
3	1.200	4.242	Gw%	49.300	Nc	38.294
			γ_m (kg/m ³)	1353.091	Nq	25.770
			γ_d (kg/m ³)	1054.861	Ny	34.643

Tabla 4.23 Resultados del ensaye triaxial realizado al material de la prueba 11.

Prueba 12

Para la realización de esta prueba se utilizó el pilote montado de la prueba 11, procediendo a saturar el material con agua desde la superficie. El suelo se expandió 2.46%. Durante las primeras 96 horas la presión vertical fue aumentando desde un valor inicial de 235 Kg hasta alcanzar un valor máximo de 475 Kg, después de lo cual comenzó a disminuir dicha carga hasta que transcurridos 7 días la celda de carga registró cero. Después de que se observó el total humedecimiento del material se procedió a realizar la prueba de carga y se obtuvieron los resultados siguientes:

Carga (Kg)	Asentamiento (mm)
0.00	0.0000
110.5	0.1020
201.4	0.2180
292.3	0.3980
383.2	0.7310
474.2	4.3500

Tabla 4.24 Resultados de la prueba No. 12.

Las medidas del pilote fueron, por lo tanto, las mismas que las de la prueba anterior:

Diámetro: 6.04 cm
 Longitud: 86.0 cm

A continuación se muestra la gráfica del comportamiento de la superficie del suelo por la expansión provocada por el humedecimiento:

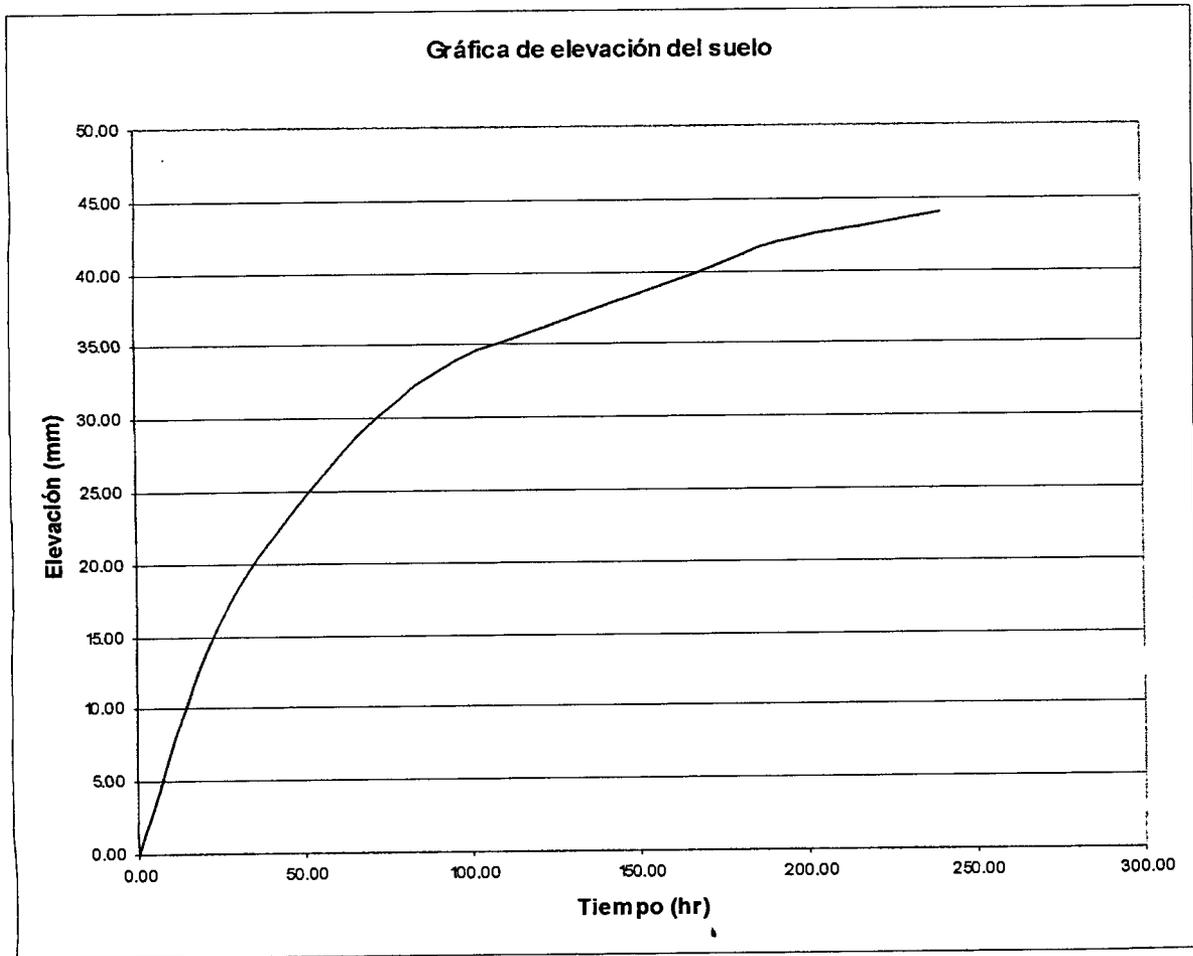
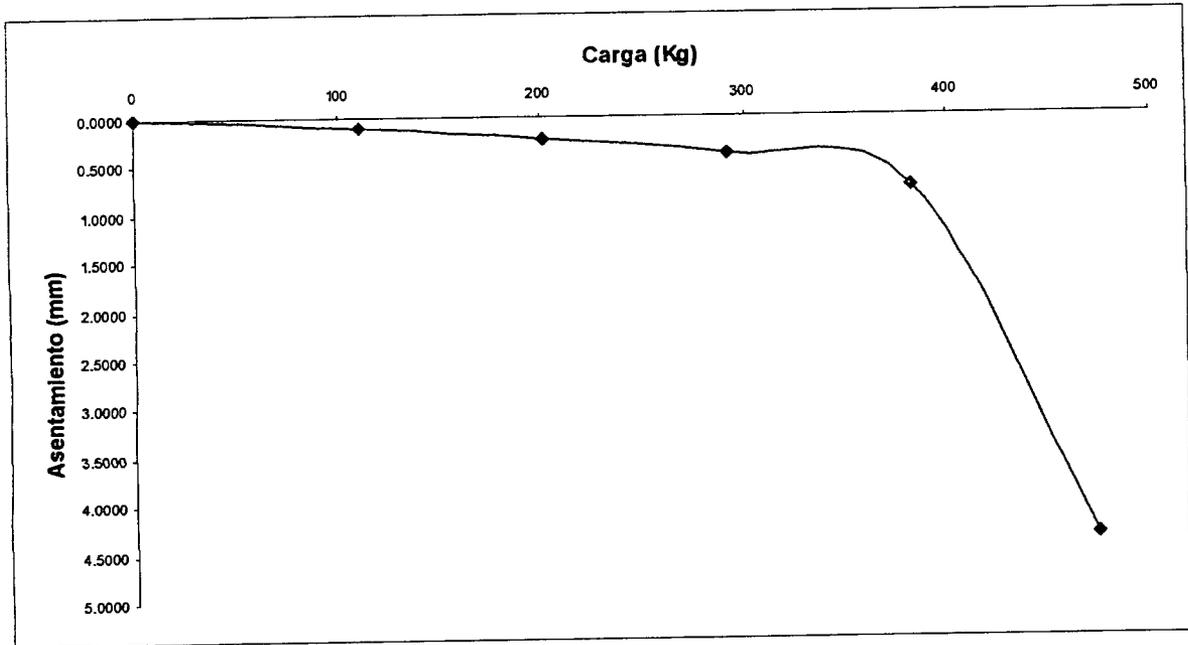
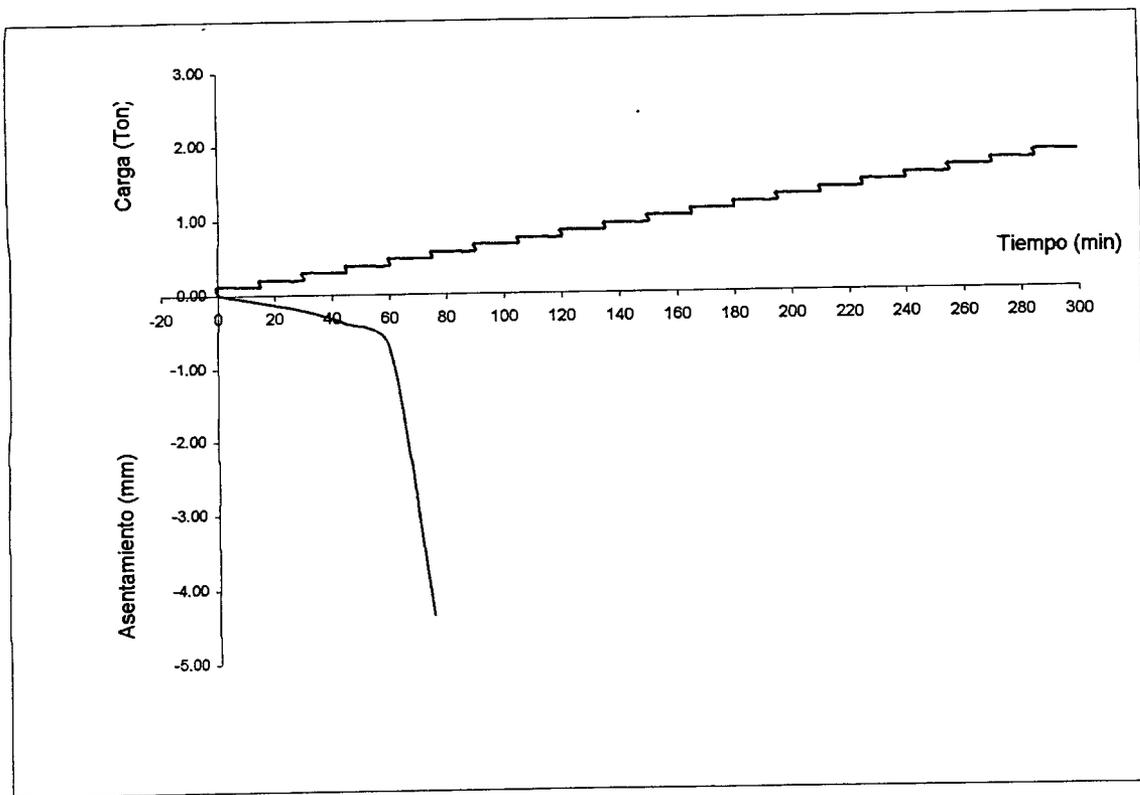


Fig. 4.24 Gráfica de expansión del material en el tiempo.

En la página siguiente se muestran los gráficos obtenidos de la prueba de carga al pilote.



4.25 Gráfica de la prueba de carga No. 12 Carga - Asentamiento.



4.26 Gráfica de comportamiento en el tiempo de la prueba de carga No. 12

Ensaye Triaxial						
Tipo de prueba:		Triaxial Rápida.				
Ensaye:		12 y 13		Prof:		0.86 m
Probeta	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Propiedades		Resultados del ensaye	
			w%	45.992	c(kg/cm ²)	0.226
1	0.300	0.597	Ss	2.650	ϕ grados	6.220
2	0.600	0.622	e	1.498	r	0.980
3	1.200	0.805	Gw%	81.569	Nc	6.887
			γ_m (kg/m ³)	1549.917	Nq	1.755
			γ_d (kg/m ³)	1061.467	N γ	0.601

Tabla 4.25 Resultados de las pruebas triaxiales realizadas al material de la prueba 12.

Prueba 13

Para efectuar esta prueba se dejó reposar el material de la prueba 12 durante 72 horas, habiéndole agregado agua únicamente para evitar desecación durante el período de espera. Una vez transcurrido este tiempo, se procedió a realizar una excavación en el material a la altura de la punta del pilote, con la finalidad de dejarla descubierta y sin material en contacto en la parte inferior. Lo anterior fue hecho para realizar una prueba de carga en el pilote, sin punta, y así determinar la capacidad por fricción del elemento.

Las medidas del pilote y las propiedades mecánicas del material en ambos casos fueron consideradas iguales, por lo que en este caso solamente se presentan los datos de la prueba de carga y los gráficos correspondientes; así como también se muestra una tabla con el perfil de humedades obtenido.

Carga (Kg)	Asentamiento (mm)
0.00	0.0000
110.5	0.0870
201.4	0.2660
292.3	0.6350
383.2	4.2000

Tabla 4.26 Resultados de la prueba No. 13.

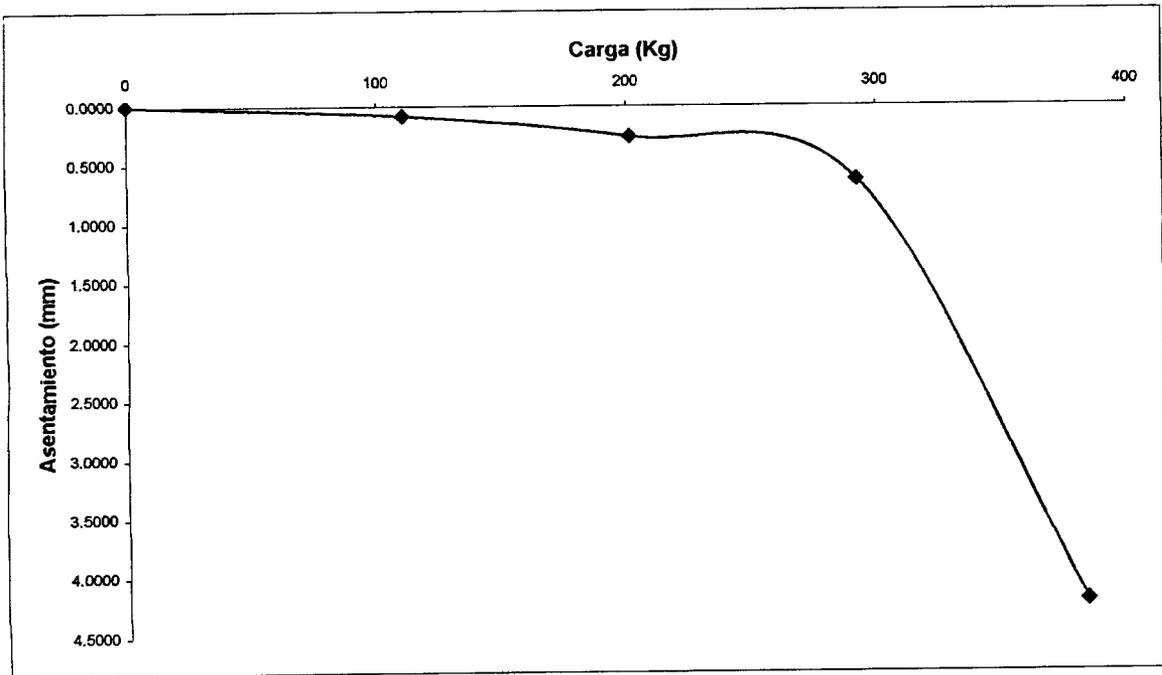


Fig. 4.27 Gráfica de la prueba de carga No. 13 Carga - Asentamiento.

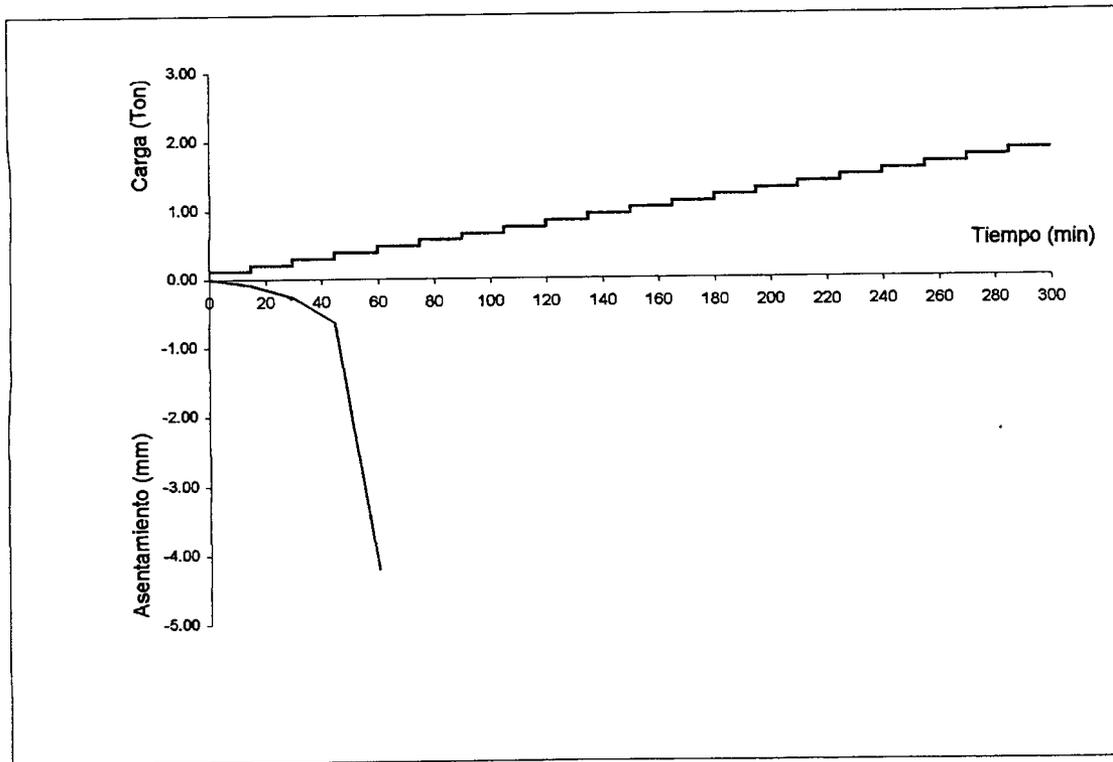


Fig. 4.28 Gráfica de comportamiento en el tiempo de la prueba de carga No. 13

En la tabla siguiente se muestra un resumen de los ensayos realizados:

Prueba	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Humedad inicial (%)	Humedad final (%)	c Kg/cm ²	φ (°)	Gw %	Q ult (Ton)	Observaciones
1	6.60	95.00	22.64	22.64	0.132	36.22	45.35	0.800	En esta prueba se compactó el material con la humedad de 22.64 %, y se realizó la prueba de carga. La resistencia obtenida fue alta.
2	6.53	93.00	44.07	44.07	0.337	8.03	81.85	0.750	El material de esta prueba fue compactado con el 44 % de humedad y se realizó el ensaye. La capacidad fue menor que en el ensaye 1.
3	6.52	86.00	22.00	44.07	0.337	8.03	81.85	0.600	Para esta prueba se compactó el material con 22% de humedad, se saturó por inundación y después se realizó el ensaye de carga.
4	6.87	90.00	22.64	22.64	0.132	36.22	45.35	0.950	El valor de esta prueba fue sin resistencia de punta, por lo que se considera que sólo resistió la fricción del fuste del pilote.
5	6.87	90.00	22.64	30.07	0.226	26.28	56.09	0.600	Esta prueba inició con baja humedad, se saturó y después se realizó el ensaye. También se hizo sin suelo en la punta del pilote, por lo que se obtuvo la resistencia por fricción.
6	6.62	92.00	43.13	43.13	0.265	4.14	86.41	0.500	Esta prueba fue con material compactado con alta humedad.
7	6.67	85.00	43.13	43.13	0.103	0.00	---	0.510	Para la realización de esta prueba se hizo una ampliación en la base del pilote y, a pesar de que las propiedades mecánicas del material fueron mucho menores que las del ensaye 6, la resistencia fue un poco mayor.
8	6.68	93.00	18.34	45.44	0.104	3.96	75.96	0.630	Para esta prueba, el material fue compactado con baja humedad y después saturado.
9	6.49	95.00	20.91	20.91	0.283	36.95	46.27	1.405	La compactación del material de esta prueba fue con la arcilla con baja humedad.
10	6.49	95.00	20.91	43.98	0.073	6.40	72.50	0.490	Para esta prueba se utilizó el montaje de la prueba 9, el material se saturó antes de realizar la carga.
11	6.04	86.00	28.51	28.51	0.366	32.89	49.30	1.305	Esta prueba fue utilizando material compactado a baja humedad.
12	6.04	86.00	28.51	45.99	0.226	6.22	81.57	0.380	Para realizar esta prueba, se inició saturando el material de la prueba 11.
13	6.04	86.00	45.99	45.99	0.226	6.22	81.57	0.280	La realización de esta prueba fue después de haber realizado el ensaye 12, se hizo un agujero en la base del pilote para dejar libre la punta y medir la resistencia por fricción.

Tabla 4.27 Resumen de resultados de las pruebas de carga.

A continuación se presenta un gráfico conteniendo las 13 pruebas de carga realizadas a los pilotes, para poder observar el comportamiento de cada uno de ellos, bajo la misma escala:

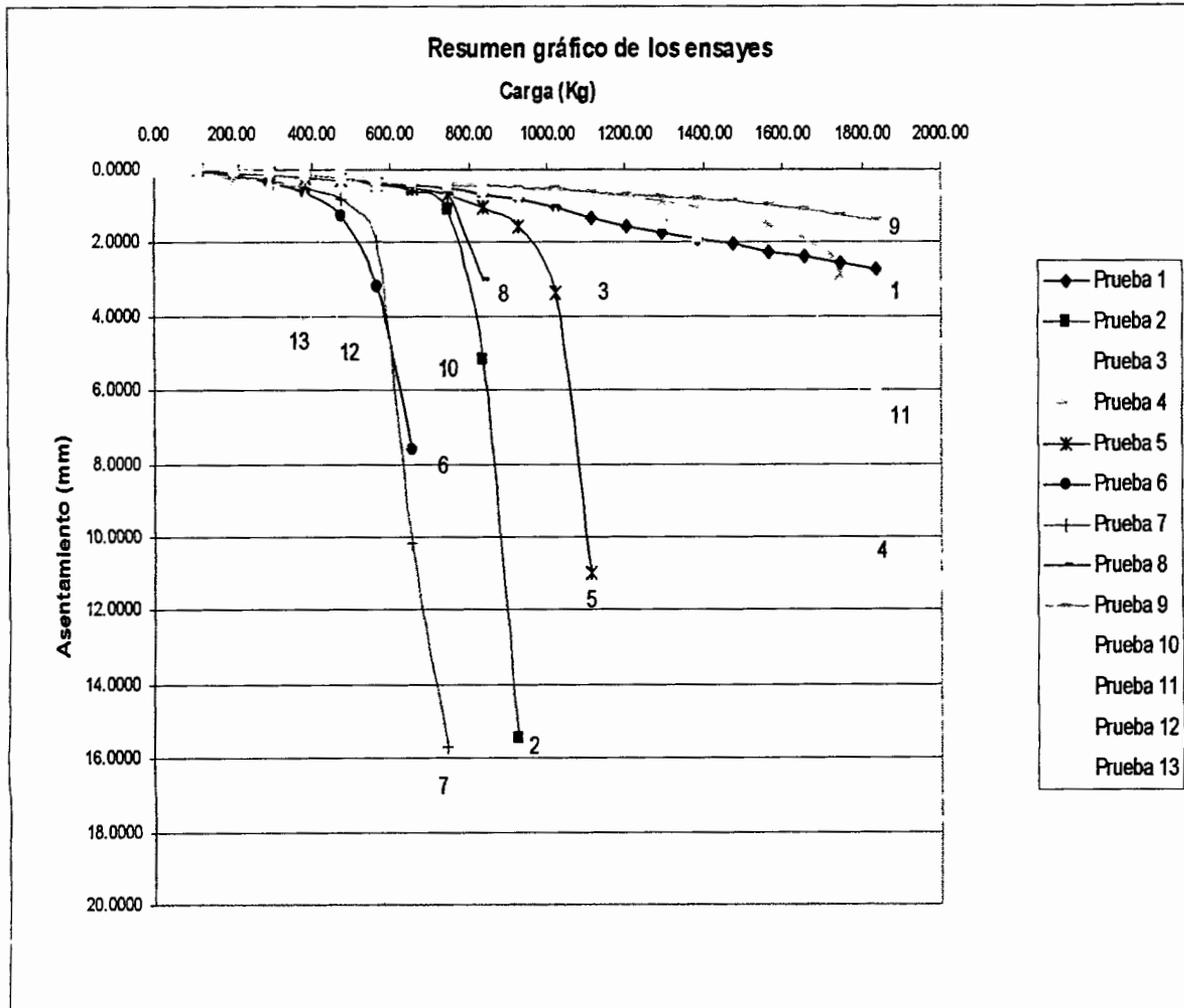


Fig. 4.29 Gráfico de resumen de las pruebas de carga.

4.2 Cálculo de la capacidad de carga de los pilotes de prueba

Para poder tener datos comparativos para validar el método de ensayos de carga en pilotes propuesto, se determinó una ecuación que calculara la capacidad de carga teórica de un pilote. Esta ecuación está basada en la teoría de Terzaghi y el Método α propuesto por Tomlinson. La ecuación es la siguiente:

$$Q_T = A_p [cN_c + \gamma D_f N_q + 0.5 \gamma B N_\gamma] + A_s [\alpha c + \gamma D_f k \tan \delta]$$

Donde: Q_t = Capacidad de carga total última del pilote.

A_p = Área de la punta del pilote.

c = Cohesión no drenada del suelo, obtenida de un ensaye triaxial rápido.

γ = Peso volumétrico del suelo.

D_f = Profundidad de la punta del pilote.

B = Diámetro promedio del pilote.

A_s = Área del fuste del pilote.

α = Parámetro del Método de Tomlinson, que depende del ángulo de fricción del suelo.

δ = Ángulo de fricción entre el pilote y el suelo (0.60ϕ)

ϕ = Ángulo de fricción del suelo, obtenido de una prueba triaxial rápida.

N_c, N_q, N_γ = Parámetros de Terzaghi que dependen del ángulo de fricción del suelo.

Esta fórmula es propuesta por Bowles (1977) para ser usada con esfuerzos efectivos. Sin embargo, en este trabajo se usan para los cálculos los esfuerzos totales ya que menciona que es posible realizar los cálculos de esta manera; además se observó que la regresión lineal de la correlación de los resultados es bastante buena.

Con la fórmula anterior se calcularon las capacidades teóricas de los pilotes. Los resultados obtenidos, comparados con los de la prueba de carga son:

No. de ensaye	Teórica	Capacidad última
1	819.83	800.00
2	769.99	750.00
3	716.60	600.00
4	293.43	950.00
5	476.79	600.00
6	590.23	500.00
7	209.10	510.00
8	246.25	630.00
9	1,502.70	1,405.00
10	186.08	490.00
11	1,246.71	1,305.00
12	441.17	380.00
13	381.64	280.00

Tabla 4.28 Comparación de los resultados de capacidad de carga obtenidos con la fórmula propuesta y el modelo.

El criterio utilizado para definir la capacidad de carga del pilote, con base en las curvas de carga-deformación, consiste en trazar una línea tangente a dicha curva en la parte que se presenta el colapso a descenso brusco del pilote. Esta línea se prolonga hasta el eje de las abscisas y se toma la lectura de la carga en la intersección. El valor así obtenido resulta menor que la carga que llevó al pilote a la falla y se considera segura para fines de diseño. Sin embargo, será necesario calcular la capacidad de carga admisible dividiendo la carga última entre un factor de seguridad de 1.5. La mayor discrepancia se observa en el ensaye 4, por lo que se decidió no tomarlo en cuenta dados los inconvenientes ocurridos durante su elaboración. En la gráfica siguiente se muestra la relación entre los resultados de la tabla anterior, así como el valor de la regresión entre los valores, la cual se considera que es bastante buena.

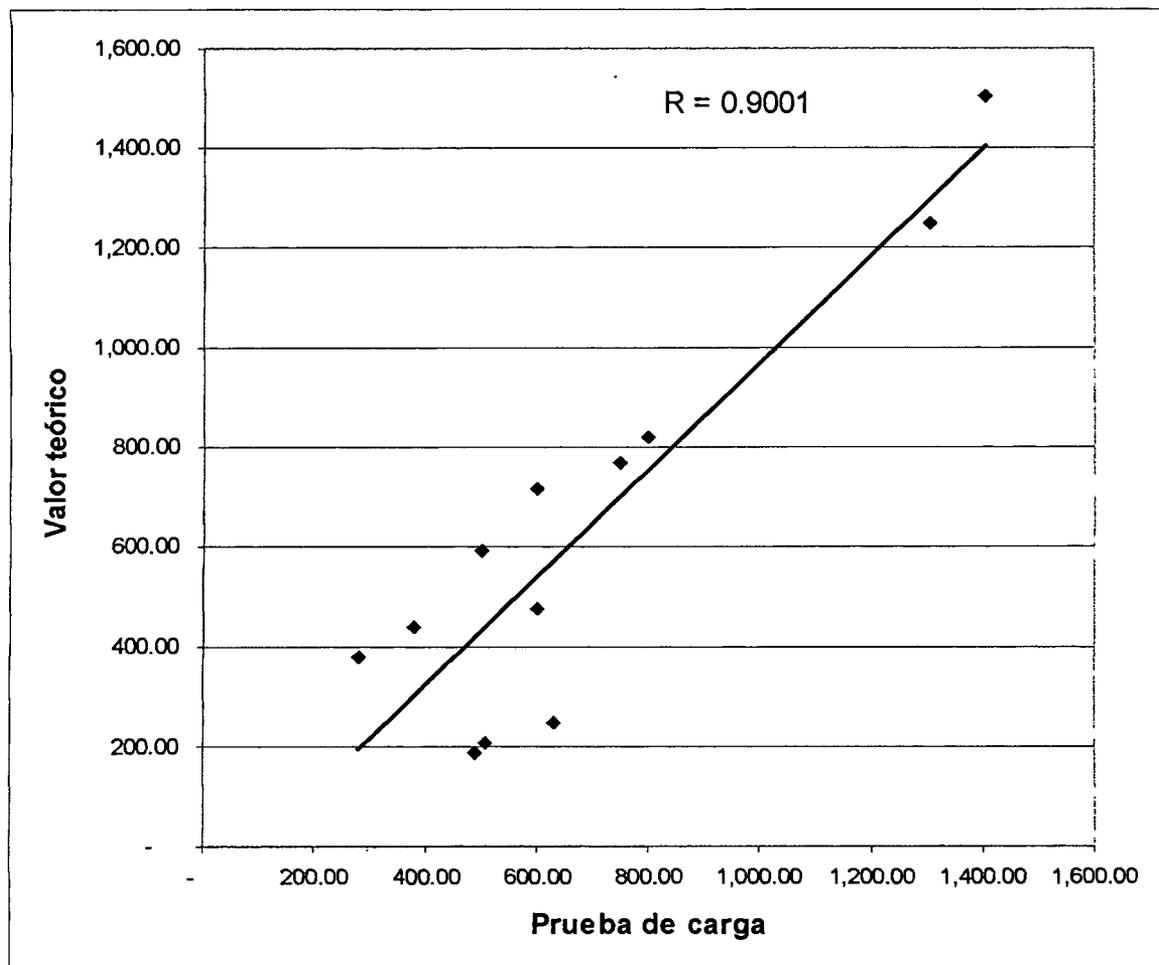


Fig. 4.30 Correlación entre los valores de las capacidades de carga de los pilotes teóricas y las obtenidas de los ensayes de carga.

De los resultados obtenidos en los ensayos de carga se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- La capacidad de carga de un pilote en suelo compactado con baja humedad es mayor que la de un pilote compactado con alto contenido de agua.
- Los resultados de los ensayos realizados en material compactado con bajo contenido de agua muestran muy alta resistencia a la penetración del pilote; además los asentamientos registrados muestran consistencia en la realización de las pruebas.
- La ampliación en la base del pilote aumenta la capacidad de carga de un pilote.
- Es posible medir por separado la capacidad de carga de punta y de fricción de un pilote en el modelo propuesto.
- Se presenta una fuerza de levantamiento aplicada del suelo al pilote, por efecto de la expansión producida por el humedecimiento del suelo; y esta fuerza es posible medirla con los dispositivos adecuados.
- La capacidad de carga por fricción en suelos arcillosos con comportamiento cohesivo es mucho más importante que la capacidad por punta.

4.3 Presión y porcentaje de expansión

Para obtener el valor de la presión de expansión del material utilizado para las pruebas, se realizó la prueba según el método de Chen. Los valores obtenidos se presentan a continuación:

Presión de expansión	6.40 Ton/m ²
Porcentaje de expansión	12.55 %

La gráfica obtenida de la realización de la prueba es la siguiente:

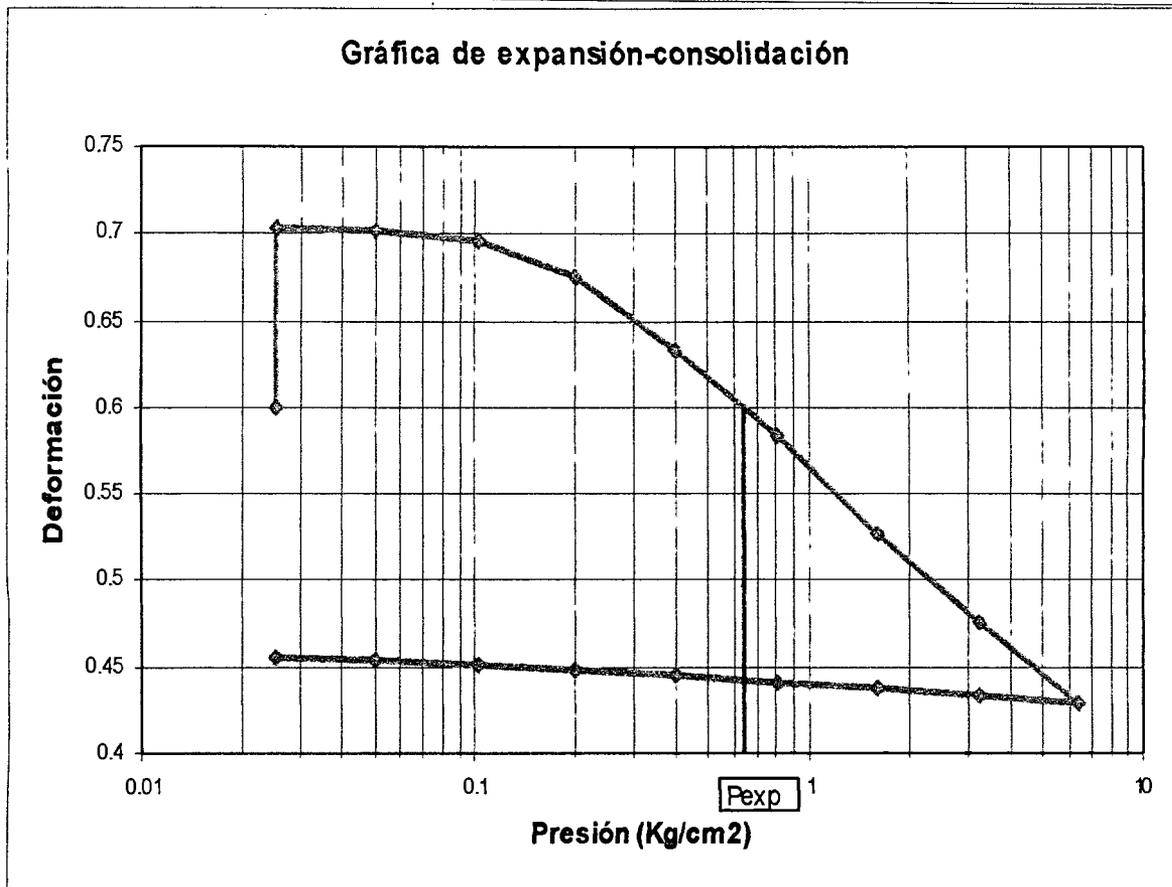


Fig. 4.31 Gráfica de presión de expansión del material

4.4 Prueba de la no deformabilidad del equipo

A continuación se presenta el procedimiento de la prueba realizada para demostrar que el equipo no presenta deformaciones durante la realización de las pruebas que pudieran afectar los resultados obtenidos. Para realizar esta prueba se procedió a compactar el material con el procedimiento indicado. La humedad de compactación del material fue de 21.0%. Posteriormente se procedió a instrumentar las paredes laterales y la tapa metálica del equipo con deformímetros como está indicado en las figuras siguientes.

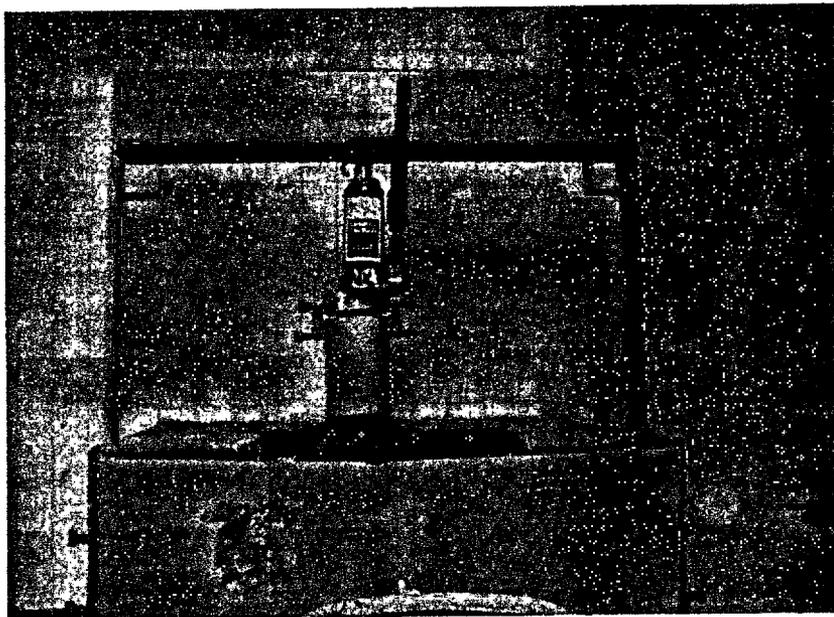
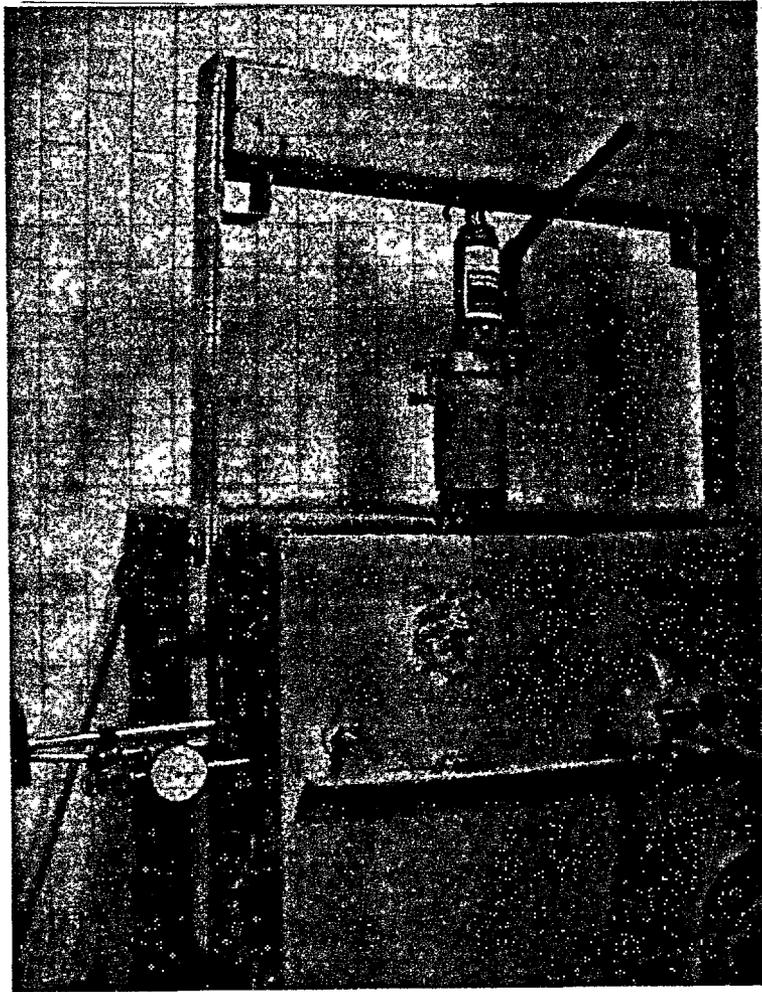


Fig. 4.32 Dispositivos de medición de deformaciones del equipo

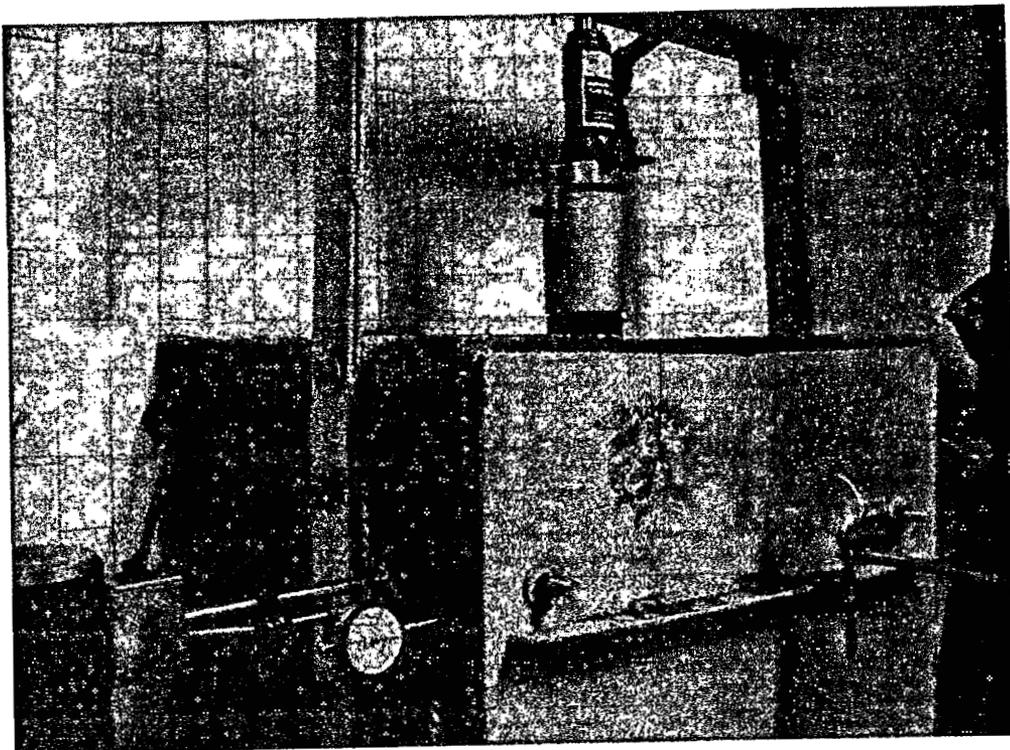
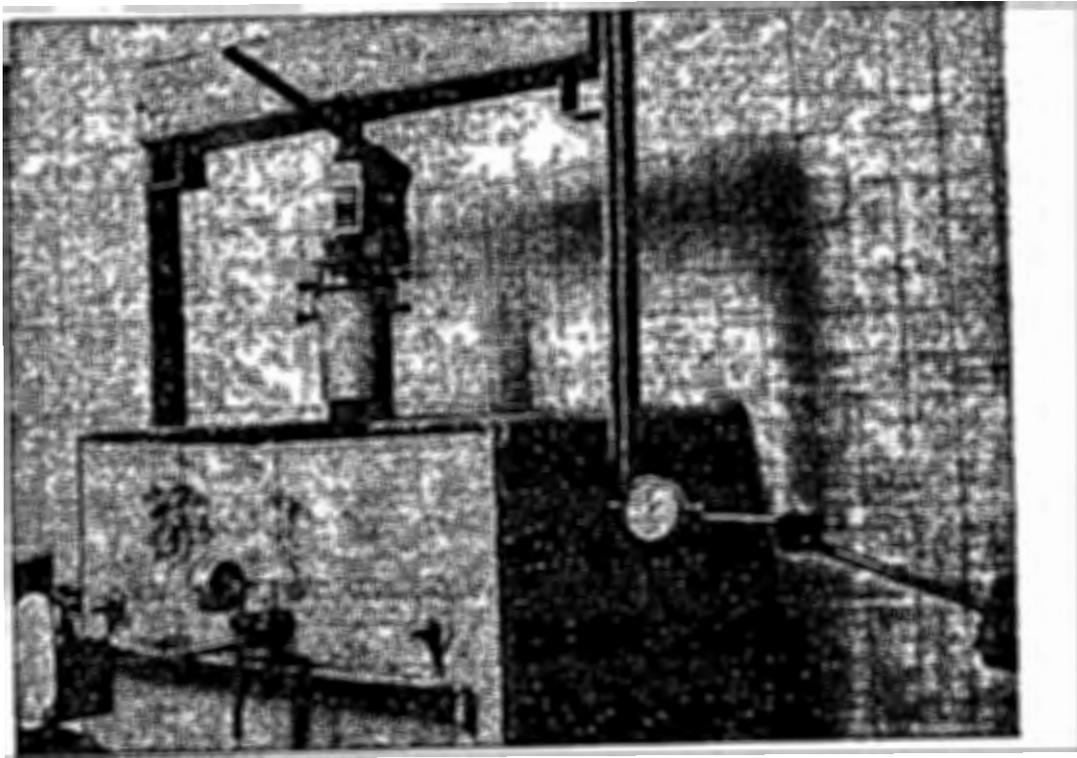


Fig. 4.33 Dispositivos de medición de deformaciones del equipo.

Una vez colocados los instrumentos de medición se procedió a saturar el material con agua para provocar su expansión. El tiempo de humedecimiento fue de 11 días, durante los cuales los deformímetros no registraron movimiento alguno de las paredes. Después de transcurrido este tiempo se procedió a cargar el pilote con el gato hidráulico hasta que se provocó un asentamiento de 5 mm. Durante la carga del pilote se fue verificando la lectura de los deformímetros y se pudo constatar que no existió movimiento en las paredes por efecto de los esfuerzos transmitidos al suelo por el asentamiento del pilote.

Con esta prueba y los datos obtenidos se comprueba que no existe deformación apreciable en el equipo y por lo tanto no es un factor que pueda influir en los resultados de las pruebas de carga realizadas a los pilotes.

5. Análisis Dimensional

En la ingeniería, la principal aplicación del análisis dimensional se encuentra en el diseño de modelos. Un conocimiento del análisis dimensional es necesario para el diseño propio del modelo y la correcta interpretación de los resultados obtenidos de la prueba.

Dimensiones de cantidades físicas

Las dimensiones fundamentales son: la masa, longitud y tiempo; denotándose por M, L y T. Las dimensiones de otras cantidades físicas resultan de su definición o de una ley física. Por ejemplo: la dimensión de la velocidad, LT^{-1} , resulta de su definición; cociente de la longitud por tiempo. Las dimensiones de varias cantidades físicas comunes se dan en la tabla siguiente; donde se nota que la deformación, ángulo y el módulo de Poisson son adimensionales.

Longitud	L
Área	L^2
Volumen	L^3
Tiempo	T
Masa	M
Fuerza	MLT^{-2}
Peso específico	$ML^{-2}T^{-2}$
Densidad	ML^{-3}
Ángulo	1
Presión y esfuerzo	$ML^{-1}T^{-2}$
Velocidad	LT^{-1}
Aceleración	LT^{-2}
Velocidad angular	T^{-1}
Aceleración angular	T^{-2}
Energía, Trabajo	ML^2T^{-2}
Momentum	MLT^{-1}
Potencia	ML^2T^{-3}
Momento de una fuerza	ML^2T^{-2}
Momento de inercia de un área	L^4
Momento de inercia de una masa	ML^2
Módulo de elasticidad	$ML^{-1}T^{-2}$
Deformación	1
Módulo de Poisson	1

Tabla 5.1 Dimensiones de las cantidades físicas.

Productos adimensionales

Dadas cinco variables: longitud, L ; área, A ; deformación, ε ; fuerza, F ; y módulo de elasticidad E ; se puede observar que hay un número infinito de productos de potencias de esas variables. Como ejemplo tenemos: $\mu_1 = L^2 A^3 F^2 E$, $\mu_2 = A^2 \varepsilon^{1/2}$, $\mu_3 = AL^{-2}$, $\mu_4 = F^{-1}EA$. Donde el exponente puede ser un entero o fracción; positivo, cero o negativo. La dimensión de los productos de potencias se calcula reemplazando cada variable por su correspondiente dimensión y computando su exponente resultante de M , L , T . Entonces se reemplaza L por $[L]$, A por $[L]^2$, ε por $[1]$, F por $[MLT^{-2}]$ y se obtiene:

$$\text{Dimensión de } \mu_1 = [L]^2 [L^2]^{-3} [MLT^{-2}]^2 [ML^{-1}T^{-2}] = [M^3 L^9 T^{-6}]$$

$$\text{Dimensión de } \mu_2 = [L^2]^2 [1]^{1/2}$$

$$\text{Dimensión de } \mu_3 = [L^2][L]^{-2} = 1$$

$$\text{Dimensión de } \mu_4 = [MLT^{-2}]^{-1} [ML^{-1}T^{-2}][L^2] = 1$$

En general, la dimensión de un producto de potencias,

$$\mu = L^{k_1} A^{k_2} \varepsilon^{k_3} F^{k_4} E^{k_5} \quad 5.1$$

debe ser,

$$[L]^{k_1} [L^2]^{k_2} [1]^{k_3} [MLT^{-2}]^{k_4} [ML^{-1}T^{-2}]^{k_5} = [M]^{k_4+k_5} [L]^{k_1+2k_2+k_4-k_5} [T]^{-2k_4-2k_5} \quad 5.2$$

Los productos de potencias μ_3 y μ_4 , cuyo exponente de M , L y T son cero, son llamados productos de potencia adimensionales. El producto μ debe ser adimensional si y sólo si el exponente k_1 , k_2 , k_3 , k_4 y k_5 satisfacen las tres ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned} k_4 + k_5 &= 0 \\ k_1 + 2k_2 + k_4 - k_5 &= 0 \\ -2k_4 - 2k_5 &= 0 \end{aligned} \quad 5.3$$

Como ejemplos se tienen $\pi_1 = AL^{-2}$, $\pi_2 = F^{-1}EL^2$, $\pi_3 = F^{-1}EA$, $\pi_4 = A^2L^{-4}$, $\pi_5 = \varepsilon^{-1}$. el uso de π debe ser reservado para designar a los productos de potencias adimensionales de variables, acortando el término se definirá como producto adimensional. Al formar algunos productos de potencias de productos adimensionales se puede notar que,

$$\pi_3 = \pi_1\pi_2$$

$$\pi_4 = \pi_1^2$$

para que π_3 y π_4 puedan ser expresados como productos de potencia de π_1 y π_2 , se plantea la siguiente definición:

Un conjunto de productos adimensionales independientes de variables determinadas, es aquel en el que ninguno de esos productos puede ser expresado como un producto de potencias de otros productos adimensionales en el conjunto.

Por ejemplo, π_1 y π_2 forman un conjunto de productos adimensionales independientes y muchos más conjuntos de productos adimensionales independientes pueden ser formados del infinito número de productos adimensionales. Evidentemente si, en un conjunto de productos adimensionales sólo uno de ellos contiene una particular variable, entonces este producto adimensional debe ser un independiente.

Una forma simple de construir un conjunto de productos adimensionales independientes es por lo tanto hacer que una sola variable aparezca exclusivamente en un producto adimensional, otra variable en otro producto adimensional, etc. Por ejemplo, en el conjunto de productos adimensionales independientes compuesto por π_1 , π_3 y π_5 , L aparece exclusivamente en π_1 , F aparece exclusivamente en π_3 y ε aparece exclusivamente en π_5 .

El análisis dimensional se basa sobre un teorema demostrado primeramente por Buckingham y al cual se le conoce algunas veces como el Teorema π . Para entender este teorema se requieren de algunos conocimientos de las propiedades de las matrices.

Conjunto completo de productos adimensionales

El concepto de un conjunto completo de productos adimensionales es esencial en análisis dimensional y enseguida se da la definición:

Un conjunto de productos adimensionales de unas variables dadas es completo, si cada producto en el conjunto es independiente de otros en el conjunto, y todo producto adimensional de las variables es un producto de potencias de productos adimensionales en el conjunto.

En otras palabras, un conjunto completo de productos adimensionales es un conjunto de productos adimensionales independientes con la propiedad adicional de que todo producto adimensional posible de las variables puede ser expresado como un producto de potencias de los productos adimensionales en el conjunto. Por ejemplo; π_1 y π_2 son independientes uno de otro y forman un conjunto de productos adimensionales independiente. Además, π_3 y π_4 pueden ser expresados como un producto de potencias de π_1 y π_2 . Se muestra, además, que cualquier producto adimensional $\pi = L^{k_1} A^{k_2} \varepsilon^{k_3} F^{k_4} E^{k_5}$ que es expresado como un producto de potencias de π_1 y π_2 deberá formar un conjunto completo.

Después de tratar con los ejemplos previos, el caso general se debe discutir enseguida. Considere n variables cuya dimensión se muestra en una tabla. El arreglo rectangular de números a_i, b_i, c_i ; muestra la dimensión x_1, x_2, \dots, x_n correspondiente a la unidad fundamental de la primera columna, la cual es llamada la matriz dimensional de estas variables.

	x1	x2	xn
M	a _i	a _i	a _n
L	b _i	b _i	b _n
T	c _i	c _i	c _n

Tabla 5.2 Matriz general dimensional de variables.

Evidentemente el producto $x_1^{k_1} x_2^{k_2} \dots x_n^{k_n}$ debe ser adimensional si y sólo si los exponentes k_1, k_2, \dots, k_n satisfacen las tres ecuaciones:

$$\begin{aligned} a_1 k_1 + a_2 k_2 + \dots + a_n k_n &= 0 \\ b_1 k_1 + b_2 k_2 + \dots + b_n k_n &= 0 \\ c_1 k_1 + c_2 k_2 + \dots + c_n k_n &= 0 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Algebraicamente se puede ver que:

1. Las anteriores ecuaciones poseen exactamente $n - r$ soluciones linealmente independientes; donde r es igual al rango de la matriz dimensional.
2. Cualquier solución k_1, k_2, \dots, k_n es una combinación lineal de las $n - r$ soluciones independientes.

Dado que cada solución k_1, k_2, \dots, k_n representa un producto adimensional; la propiedad 1 es equivalente a establecer que esos $n - r$ productos adimensionales son independientes uno de cada otro y la propiedad 2 es equivalente a establecer que todos los productos adimensionales pueden ser expresados como un producto de potencias de esos $n - r$ productos adimensionales. Por lo tanto se menciona un teorema importante sobre el análisis dimensional:

La cantidad de productos adimensionales en un conjunto completo es igual al número total de variables menos el rango de su matriz dimensional. Por lo tanto, acumulando cualquier $n-r$ productos adimensionales independientes, un conjunto completo es obtenido.

Retornando a nuestro ejemplo de este capítulo, se tienen las cinco variables: longitud L , área A , deformación ε , fuerza F y módulo de elasticidad E . Su dimensión se da en la tabla siguiente que muestra la matriz dimensional de las variables:

	L	A	ε	F	E
M	0	0	0	1	1
L	1	2	0	1	-1
T	0	0	0	-2	-2

Tabla 5.4 Matriz dimensional de variables del ejemplo.

Homogeneidad dimensional

Una ecuación es dimensionalmente homogénea si la forma de la ecuación no depende de las unidades de medida. Por ejemplo: la ecuación de caída libre de los cuerpos ($h = 0.5gt^2$) es válida cuando la longitud es medida en pies, metros o pulgadas; y cuando el tiempo es medido en horas, años o segundos; previniendo que g se mida en las mismas unidades de longitud y tiempo. Si $g = 32.2 \text{ ft/sec}^2$ se sustituye en la ecuación, resulta $h = 16.1 \text{ t}^2$. y por lo tanto, esta ecuación se aplica sólo si la longitud es medida en pies y el tiempo es medido en segundos; y por lo tanto no es dimensionalmente homogénea.

Las ecuaciones fundamentales de la mecánica son dimensionalmente homogéneas y las relaciones que se deriven de ellas son consecuentemente dimensionalmente homogéneas.

Se cita, sin demostración, un teorema fundamental del análisis dimensional llamado el Teorema de Buckingham:

Si una ecuación es dimensionalmente homogénea, esta se puede reducir a una relación entre un conjunto completo de productos adimensionales.

5.1 Determinación de la relación dimensional modelo - prototipo

Cualquier serie de ensayos que sean útiles para obtener el comportamiento de modelos, y que dicho comportamiento sea extrapolado a la realidad (prototipo) debe cumplir con lo siguiente:

$$\sigma = \sigma (x, y, z, L, P, Q, R, S, E, \nu, U) \quad 5.5$$

En el prototipo:

$$\sigma_p = \sigma (x_p, y_p, z_p, L_p, P_p, Q_p, R_p, S_p, E_p, \nu_p, U_p) \quad 5.6$$

En el modelo:

$$\sigma_m = \sigma (x_m, y_m, z_m, L_m, P_m, Q_m, R_m, S_m, E_m, \nu_m, U_m) \quad 5.7$$

Exponentes de cada uno de los elementos y las relaciones fundamentales:

	σ	x	y	z	L	P	Q	R	S	E	ν	U
M	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
L	-1	1	1	1	1	1	0	-1	-2	-1	0	1
T	-2	0	0	0	0	-2	-2	-2	-2	-2	0	0

Tabla 5.5 Exponentes de los elementos.

Para hacer adimensionales estos elementos, es necesario dividir cada uno de ellos entre E, L o productos de ambos.

$$\sigma/E = \sigma/E (x/L, y/L, z/L, L/L, P/EL^2, Q/EL, R/E, S/E, E/E, \nu, U/L) \quad 5.8$$

Ahora, aplicando esto al prototipo:

$$\sigma_p/E_p = \sigma_p/E_p (x_p/L_p, y_p/L_p, z_p/L_p, \dots) \quad 5.9$$

Y al modelo:

$$\sigma_m / E_m = \sigma_m / E_m (x_m / L_m, y_m / L_m, z_m / L_m, \dots) \quad 5.10$$

Igualando término a término, en el prototipo y en el modelo, se tiene:

Relaciones entre esfuerzos

$$\sigma_p / E_p = \sigma_m / E_m \quad 5.11$$

$$\sigma_p = E_p \sigma_m / E_m$$

Relaciones entre longitudes

$$x_p / L_p = x_m / L_m \quad 5.12$$

$$x_p = L_p x_m / L_m$$

Relaciones entre fuerzas concentradas

$$P_p / E_p L_p^2 = P_m / E_m L_m^2 \quad 5.13$$

$$P_p = E_p L_p^2 P_m / E_m L_m^2$$

Relaciones entre pesos volumétricos

$$S_p L_p / E_p = S_m L_m / E_m \quad 5.14$$

$$S_m = E_m S_p L_p / L_m E_p$$

$$S_m = S_p L_p / L_m$$

Si se tiene el mismo material. La relación anterior no es fácil hacer que se cumpla en el modelo, a menos que se modifique la aceleración de la gravedad de manera artificial. Por ello se usan centrífugas en la ingeniería geotécnica; pero esto queda fuera de nuestro alcance.

A la relación L_m / L_p se le da el nombre de λ . Si en los pilotes se usa una relación:

$$\lambda = L_m / L_p = 0.32$$

5.15

	Prototipo	Modelo
Longitud	3.00 m	0.95 m
Diámetro	0.20 m	0.065 m

Tabla 5.6 Escalamiento del pilote modelo.

5.2 Cálculo de las capacidades de carga de los pilotes reales

Tomando las relaciones entre las fuerzas concentradas se obtiene que:

$$P_p = L_p^2 P_m / L_m^2$$

Puesto que $\lambda = 0.32$, se tiene que:

$$\lambda^2 = 0.1024$$

Entonces, para determinar la capacidad de carga de un pilote de 20 cm de diámetro y 3.0 m de longitud, basta con dividir la capacidad de carga del modelo entre 0.1024. Utilizando la fórmula anterior, y calculando las capacidades de carga de los pilotes reales con la fórmula presentada en el capítulo 5 de este trabajo, se obtiene la siguiente tabla comparativa:

Pilote	Teórica	Prueba
1	12,854.32	7,812.50
2	8,225.80	7,324.22
3	7,435.88	5,859.38
5	5,482.51	5,859.38
6	6,180.66	4,882.81
7	2,288.75	4,980.47
8	2,725.97	6,152.34
9	20,516.37	13,720.70
10	2,328.64	4,785.16
11	14,423.62	12,744.14
12	5,260.76	3,710.94
13	4,419.11	2,734.38

Tabla 5.7 Comparación de los resultados de capacidad de carga de los pilotes modelo con el análisis dimensional y los obtenidos en la prueba de carga.

Y con los datos de la tabla anterior se construyó el siguiente gráfico, que presenta la relación entre los valores obtenidos; así como el valor de la regresión lineal, la cual se considera muy aproximada.

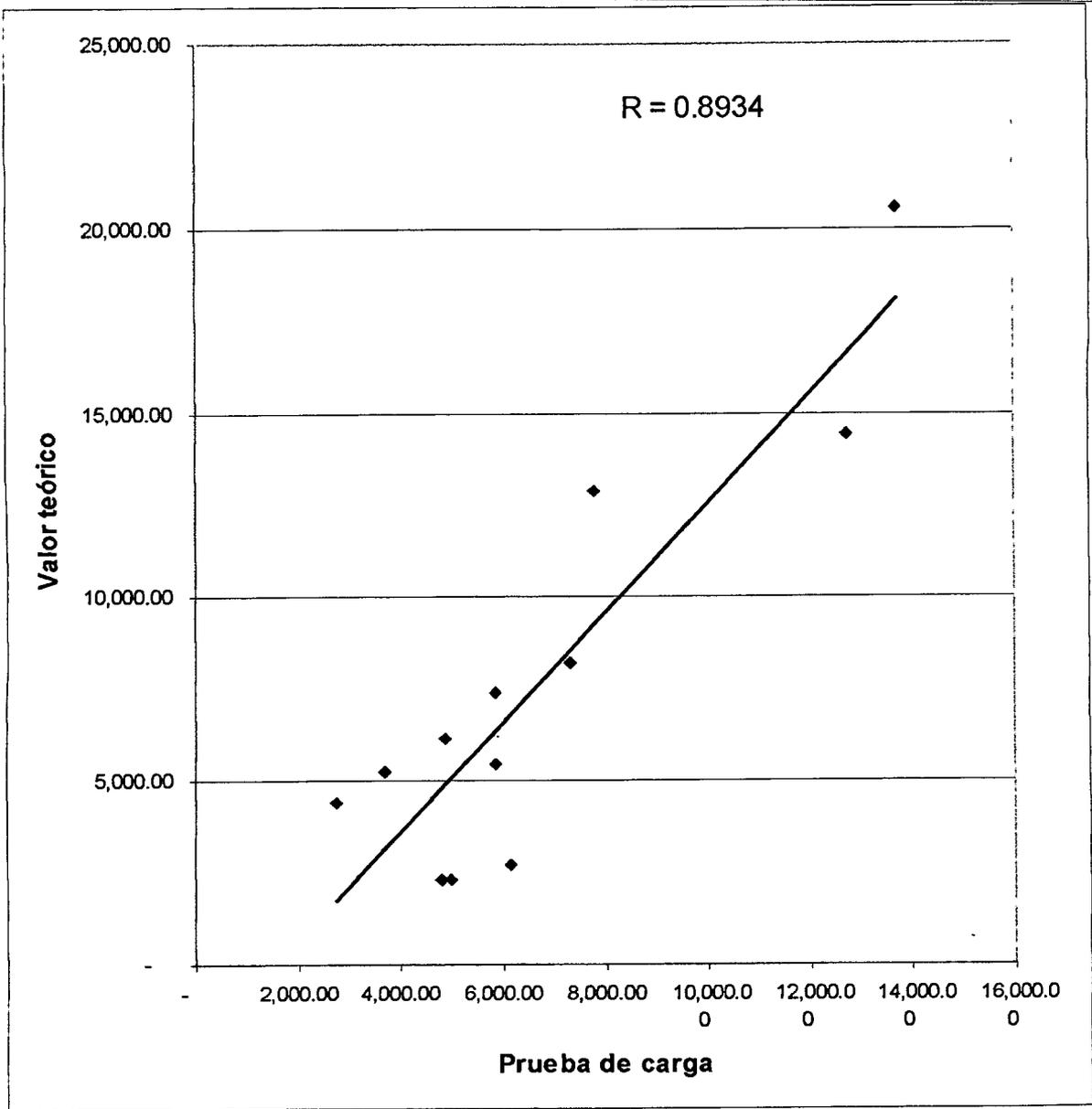


Fig. 2 Gráfico de correlación entre los resultados de las pruebas de carga y el análisis dimensional.

6. Aplicación a un caso práctico: diseño de cimentación de casa habitación.

Para ejemplificar el uso de los pilotes cortos como una opción para cimentar sobre suelos expansivos, se utilizará el diseño de una casa habitación de tipo común en Querétaro. A continuación se presenta la planta de cimentación de dicha vivienda:

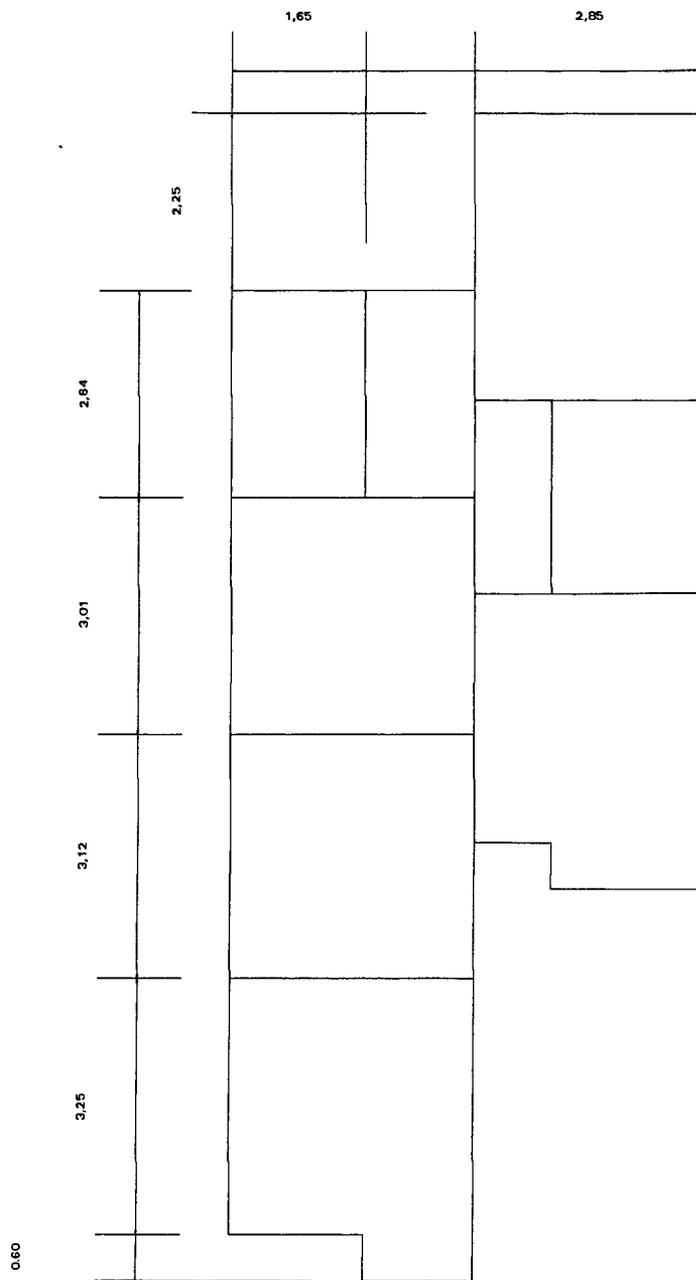


Fig. 6.1 Planta de cimentación de casa habitación.

El primer paso que se recomienda para el método es visitar el lugar de la obra, para determinar cuántos sondeos habrán de hacerse para conocer las propiedades del subsuelo del lugar.

A continuación se propone una distribución de pilotes para la cimentación y se indican en el plano:

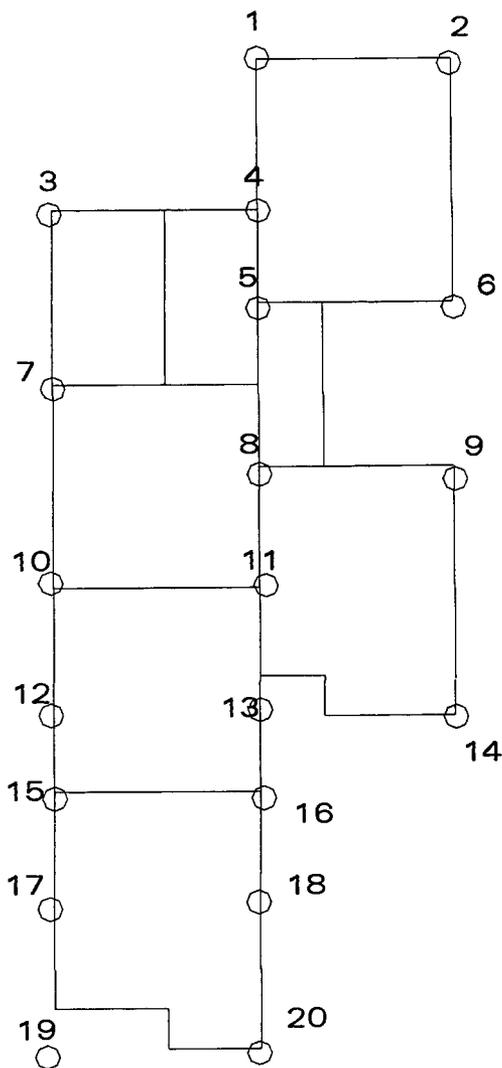


Fig. 6.2 Distribución y numeración de los pilotes para la cimentación de la casa habitación.

Posteriormente, con la información del proyecto se determina la carga que habrá de transmitirse a la cimentación. Los datos para el ejemplo que se presenta son los siguientes:

Pilote	A losa m2	A piso m2	L muros ml	W pilote Ton
1	1.5000	1.5000	2.50	2.96
2	2.6250	2.6250	3.25	4.62
3	1.8750	1.8750	2.75	3.51
4	3.5625	3.5625	3.00	5.56
5	4.6500	4.6500	3.00	6.80
6	3.0000	3.0000	4.00	5.42
7	3.4200	3.4200	4.00	5.90
8	4.0300	4.0300	4.40	6.79
9	3.3750	3.3750	3.75	5.72
10	3.1250	3.1250	3.75	5.44
11	5.0500	5.0500	2.25	6.88
12	2.5000	2.5000	2.00	3.85
13	4.3750	4.3750	3.00	6.49
14	2.0000	2.0000	3.25	3.91
15	2.1875	2.1875	3.00	3.99
16	2.1875	2.1875	3.00	3.99
17	2.5000	2.5000	2.00	3.85
18	2.5000	2.5000	2.00	3.85
19	1.2500	1.2500	2.25	2.55
20	1.2500	1.2500	2.25	2.55

Tabla 6.1 Cargas que soportarán cada uno de los pilotes.

Una vez hecho lo anterior deberá hacerse un estudio completo de mecánica de suelos para determinar los parámetros mecánicos del suelo. Con éstos parámetros conocidos, se toma material suficiente para efectuar las pruebas de carga en el laboratorio, representando de manera fiel las condiciones del suelo.

Como la capacidad de carga de un suelo disminuye con el incremento de la humedad, se le agrega agua al suelo y posteriormente se compacta al mismo peso específico seco que tenía en el campo.

Una vez hecho lo anterior se realiza la prueba de carga al pilote y se determinan las propiedades del suelo. Para el ejemplo que nos ocupa los parámetros son los siguientes:

Humedad (%)	44.0
Peso volumétrico (Kg/m ³)	1573.14
Cohesión no drenada (Kg/cm ²)	0.340
Ángulo de fricción	8.03
Profundidad del estrato estable	2.00

Tabla 6.2 Propiedades del material de la prueba.

De la prueba se obtiene que la capacidad de carga última del pilote modelo fue de 1.12 Ton. Al efectuar el cálculo teórico de la capacidad de carga del pilote modelo se obtiene que el valor es 0.95 Ton. Entonces se decide tomar el valor de la prueba de carga y aplicando la fórmula presentada en el capítulo de análisis dimensional se obtiene que:

$$Q_t = Q_u / 0.1024$$

$$Q_t = 10.94 \text{ Ton.}$$

Aplicando el factor de seguridad propuesto de 1.5 obtenemos la capacidad de carga admisible del pilote:

$$Q_{adm} = 10.94 / 1.5 = 7.29 \text{ Ton.}$$

Dicha capacidad de carga admisible es mayor que la carga máxima transmitida a cualquiera de los pilotes.

En la tabla siguiente se muestra el resumen de los resultados:

Pilote	A losa m2	A piso m2	L muros ml	W pilote Ton	D m	L m	Qt (Fórmula) Ton	Qt (Prueba) Ton	Qadm (Prueba) Ton
1	1.5000	1.5000	2.50	2.96	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
2	2.6250	2.6250	3.25	4.62	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
3	1.8750	1.8750	2.75	3.51	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
4	3.5625	3.5625	3.00	5.56	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
5	4.6500	4.6500	3.00	6.80	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
6	3.0000	3.0000	4.00	5.42	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
7	3.4200	3.4200	4.00	5.90	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
8	4.0300	4.0300	4.40	6.79	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
9	3.3750	3.3750	3.75	5.72	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
10	3.1250	3.1250	3.75	5.44	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
11	5.0500	5.0500	2.25	6.88	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
12	2.5000	2.5000	2.00	3.85	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
13	4.3750	4.3750	3.00	6.49	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
14	2.0000	2.0000	3.25	3.91	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
15	2.1875	2.1875	3.00	3.99	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
16	2.1875	2.1875	3.00	3.99	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
17	2.5000	2.5000	2.00	3.85	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
18	2.5000	2.5000	2.00	3.85	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
19	1.2500	1.2500	2.25	2.55	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29
20	1.2500	1.2500	2.25	2.55	0.20	3.00	9.74	10.94	7.29

Tabla 6.3 Resumen de resultados obtenidos para el ejemplo.

Adicionalmente se recomienda revisar la fuerza de levantamiento que puede actuar sobre el pilote; para lo cual será necesario determinar la presión de expansión y aplicar alguna de las teorías (la de Chen, por ejemplo) o bien, obtener la fuerza de levantamiento como se indica en las pruebas 3, 8, 10 y 12 de este trabajo.

Como ejemplo de lo anterior se tomará el incremento en la fuerza vertical registrada por la celda de carga en el ensaye 10, que fue de 70 Kg. Aplicando el factor de escala λ (0.1024), se obtiene que la fuerza de levantamiento del pilote es de 683 Kg; dicha fuerza resulta menor que la carga que soporta cualquiera de los pilotes.

Ahora, usando el método de Chen para calcular la fuerza de levantamiento se usará la siguiente expresión:

$$U = 2\pi r f u(D - d) \quad 6.1$$

Donde: U = Fuerza de levantamiento.

r = Radio del pilote.

f = Coeficiente de levantamiento = 15% de la presión de expansión.

u = Presión de expansión.

D = Longitud total del pilote.

d = Longitud del pilote empotrada en el estrato estable.

Aplicando la fórmula para el pilote de la prueba 10:

$$U = 1838 \text{ Kg.}$$

De donde se observa que la fuerza de levantamiento obtenida con la fórmula de Chen es mayor que la obtenida de la prueba de carga. Esto puede ser explicado por el hecho de que la expresión propuesta por Chen fue realizada para suelos diferentes a los que existen en Querétaro; por lo que es recomendable realizar pruebas para encontrar una expresión adecuada para los suelos de esta zona. Sin embargo, para efectos de diseño, es recomendable utilizar el mayor valor obtenido de la fuerza de levantamiento, que en este caso fue de 1,838 Kg y que se obtuvo con el método de Chen.

El método paso por paso se explica a continuación:

Procedimiento propuesto para la utilización de este método:

1. Visitar el lugar en que se habrá de construir la obra.
2. Realizar un estudio de mecánica de suelos para determinar la estratigrafía del lugar y determinar al suelo los siguientes parámetros:

-
- Peso volumétrico.
 - Contenido de agua.
 - Grado de saturación.
 - Cohesión no drenada.
 - Grado de compactación.
 - Peso volumétrico seco máximo.
3. Realizar un análisis de las cargas que habrá de soportar la cimentación y cada uno de los pilotes.
 4. Hacer la “siembra” de los pilotes para determinar la carga que habrá de resistir cada uno de ellos; procurando hacer la distribución de manera que las cargas en cada pilote sean lo más parecidas posible.
 5. Tomar material del lugar de la obra y colocarlo en el equipo de prueba, preparándolo y compactándolo de tal manera que sean similares los parámetros determinados en el paso 2.
 6. Realizar el ensaye de carga como se ha indicado en el trabajo y obtener así la capacidad de carga última del pilote modelo.
 7. Usar la fórmula propuesta en este trabajo para obtener la capacidad de carga del pilote prototipo.
 8. Se propone usar un factor de seguridad de 1.5 para así obtener la capacidad de carga admisible del pilote prototipo.

7. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en las pruebas de carga y los cálculos de las capacidades con las teorías propuestas, podemos obtener las siguientes conclusiones:

- La aplicación de las teorías para el cálculo de la capacidad de carga en suelos con características arcillosas da resultados conservadores, pero dichos resultados son más cercanos a los valores obtenidos con las pruebas en material con alto valor de humedad, que los valores que se obtuvieron con el suelo con bajo contenido de agua. En este último caso se aprecia que la resistencia del pilote a la carga es mayor que la que se obtuvo con la aplicación de las teorías.
- De los valores obtenidos con la prueba 5, se aprecia que la resistencia por fricción en suelos con alto valor de humedad es mucho más importante que aquella que se desarrolla en suelos con bajo contenido de agua, en los que el comportamiento del suelo es más friccionante que cohesivo.
- Comparando las resistencias de las pruebas 2 y 3, se aprecia que en ésta última existe un aumento en la capacidad de carga del pilote, a pesar de que las condiciones de humedad eran más desfavorables. Esto puede atribuirse a un cambio en el comportamiento mecánico del suelo provocado por la expansión que, si bien le hace perder consistencia en la parte superior, es posible que en la parte inferior la expansión genere fuerzas horizontales que ayudan a resistir de mejor manera las cargas aplicadas; además de las fuerzas de levantamiento transmitidas al fuste del pilote por el suelo al expandirse.
- Con la comparación de los valores de capacidad de carga con la teoría de Terzaghi y el método α de Tomlinson, se observa que existe consistencia en los resultados obtenidos con las pruebas de carga.
- La realización de los ensayos de carga en el modelo propuesto pueden ayudar a eliminar las incertidumbres acerca de cómo se comportaría el suelo bajo las cargas transmitidas por el pilote y el humedecimiento.
- Es posible medir directamente la fuerza de levantamiento que ejerce el suelo sobre el pilote al presentarse el fenómeno de expansión.

-
- La utilización de éste método para determinar la capacidad de carga de pilotes para cimentar casas habitación está basada en resultados que se obtienen directamente de la medición de los efectos producidos por las cargas, cambios de humedad y propiedades mecánicas del suelo.
 - Con este trabajo se abre una importante línea de investigación acerca del comportamiento de los pilotes en suelos expansivos.
 - Existe un aumento considerable de la capacidad de carga de un pilote haciendo una ampliación en la base.

8. Recomendaciones

Puesto que este es un trabajo experimental, y a pesar de haber obtenido resultados consistentes en los ensayos de carga, es importante tomar en cuenta las siguientes recomendaciones para utilizar el método propuesto:

- Para confirmar el resultado obtenido en un ensayo de carga, si se va a utilizar para calcular la capacidad de carga de un pilote real, se sugiere hacer por lo menos otro ensayo bajo las mismas condiciones y ponderar las probables diferencias entre los resultados obtenidos.
- Realizar los ensayos de carga con el suelo saturado, ya que esta será su condición crítica de capacidad.
- Calcular la capacidad de carga teórica del pilote modelo y compararla con el resultado de la prueba de carga, para evaluar la consistencia de los valores obtenidos.
- Calcular las fuerzas de levantamiento ejercidas al pilote. Es posible determinar un valor realizando la prueba como se describió en los ensayos 3, 9 y 12; pero también es recomendable compararla con los valores teóricos.
- Si el área de construcción es grande y la estratigrafía varía, así como las propiedades del suelo superficial; se recomienda realizar los ensayos de carga con los diferentes tipos de suelo que se encuentren en el lugar.
- Para mejorar el funcionamiento del equipo, se recomienda fabricar un sistema para aplicar carga, tal que ésta no se pierda por el asentamiento del pilote. Una propuesta es utilizar un brazo de palanca con el mismo funcionamiento del que tienen los consolidómetros. Es posible sujetarlo de la parte posterior del recipiente de concreto, y puede hacerse del largo necesario para amplificar la carga del portapesas de modo que se pueda cargar un pilote hasta la falla.
- Con la utilización del equipo se pueden instrumentar los pilotes con deformímetros (strain-gauges) colocados a diferentes profundidades dentro del pilote, para sí obtener la distribución de esfuerzos en el pilote. Esto con el fin de dar al equipo un uso alternativo a las pruebas de carga para calcular la capacidad.

9. Bibliografía

1. Binder, R. C. Mecánica de fluidos. Ed. Trillas. 1ª edición. México. 1978.
2. Bowles J.E. (1977). Foundation Analysis and Design. 2nd Edition. Ed. McGraw Hill. U.S.A.
3. Braja M. Das. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. 1ª Impresión. Ed. Thompson Editores S.A. de C.V. México. 2001.
4. Cambefort, H. Reconocimiento de suelos y cimentaciones especiales. Ed. Omega S.A. 1ª edición. España. 1967.
5. Castañeda. Estado del Arte de Cimentaciones Sobre Suelos expansivos. Trabajo de Investigación. DEPMI – UAQ.
6. Comentarios, Ayudas de Diseño y Ejemplos de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones, Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM. No. ES – 6, Julio 1993.
7. Chellis, R.D. Cimentaciones profundas. Ed. Diana. 2ª edición. México. 1971.
8. Chen F.H. Foundation on Expansive Soils. Elsevier Scientific Publishing Co.
9. Department of the Navy, Naval Facilities Engineering Command. Design Manual, Soil Mechanics. U.S.A. 1971.
10. Elsevier. Methods of Foundation Engineering. Holanda. 1979.
11. Fredlund D.G., Rahardjo H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley and Sons Inc.
12. Giles, R.V. Mecánica de los fluidos e hidráulica. Ed. McGraw Hill. 2ª edición. México. 1983.
13. Holman, J.P. Experimental methods for engineers. Ed. McGraw Hill. 1971. México.
14. Jiménez J.A. (1980). Geotecnia y Cimientos, T – III. Ed. Rueda. España.
15. Juárez B., Rico R. (1984) Mecánica de Suelos T-1 y T-2.
16. Manual de Diseño de Obras Civiles, Estructuras, Fascículo C.2.2: Diseño Estructural de Cimentaciones. Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Eléctricas. México. 1981.
17. Nelson D.J., Miller J.D. (1992) Expansive Soils Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering.

18. Peck. R., Hanson W.M. Thornburn T. Ingeniería de Cimentaciones. Ed. Limusa. 3ª Reimpresión. México. 1988.
19. Perrusquia, G.G. Presa "Charcos Verdes". Estudio en modelo reducido. Trabajo de Investigación. UAQ. Noviembre 1977.
20. Poulos H.G., Davis E.H. Pile Foundation, Analysis and Design. Robert E. Krieger Publishing Company. 1ª Reimpresión. U.S.A. 1990.
21. Proceedings of the 8th Asian Regional Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering. 1987. Japan.
22. Reyes A., J. Análisis Dimensional. UAQ. 2001.
23. Scott, C.R. An intruduction to soil Mechanics and foundations. Galliard Printers LTD. 3a edición. Inglaterra. 1980.
24. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. Manual de Diseño y Construcción de Pilas y Pilotes. 2ª reimpresión, 1989, México.
25. Sotelo, A.G. Hidráulica General Volumen I, Fundamentos. Ed. Limusa. 7ª reimpresión. México. 1974.
26. Streeter, V.L.; Wylie, E.B. Mecánica de los fluidos. Ed. McGraw Hill. 6a edición. México. 1979.
27. Terzaghi K., Peck R. Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica. 2ª Edición. Ed. El Ateneo. Argentina. 1958.
28. Tomlinson M.J. Cimentaciones, Diseño y Construcción. Ed. Trillas. 1ª Edición. México. 1996.
29. Winterkorn H., Fong H.Y. Foundation Engineering Handbook. Ed. Lytton, Educational Publishing Inc. U.S.A. 1975.
30. Zambrana, P.W. Estudio en modelo reducido del vertedor de la presa "Altotonga". Trabajo de Investigación. UAQ. 1978.
31. Zepeda J.A. Cimentaciones sobre Arcillas Expansivas. DEPFI – UAQ. 1986.
32. Zepeda J.A. Y Castañeda. (1987). Distribución de Suelos Expansivos en la República Mexicana. Revista Investigación No. 21 – 22. UAQ, Oct. – Dic.