

01149  
10

# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

## **FACULTAD DE INGENIERIA**

### **DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

#### **“Efecto del envejecimiento en la capacidad de carga a extracción de modelos de pilote en arcilla marina”**

#### **T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA  
(GEOTECNIA)**

PRESENTA:

**EDGAR CRUZ CASTRO**

DIRECTOR DE TESIS: M. en I. Manuel J. Mendoza López

México, D.F., a 30 de septiembre de 2003.

Ciudad Universitaria.

1

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

# PAGINACIÓN DISCONTINUA



Recibí Notificación para formar parte del jurado para el examen de Maestría en Ingeniería en el campo del conocimiento **Ingeniería Civil (Geotecnia)** del alumno: **EDGAR CRUZ CASTRO.**

JURADO

FIRMA FECHA

PRESIDENTE:	DR. GABRIEL AUVINET GUICHARD	<i>[Signature]</i>	11/07/03
VOCAL:	M EN I. MANUEL J. MENDOZA LOPEZ	<i>[Signature]</i>	11/07/03
SECRETARIO:	DR. EFRAIN OVANDO SHELLEY	<i>[Signature]</i>	11/07/03
SUPLLENTE:	DR. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO	<i>[Signature]</i>	11/07/03
SUPLLENTE:	DR. VICTOR M. TABOADA URTUZUASTEGUI	<i>[Signature]</i>	11/07/03

BJS\*jac.

2

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA

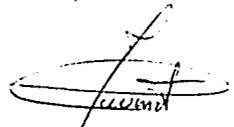
**DR. WILFRIDO RIVERA GOMEZ FRANCO**  
Coordinador del Programa de Posgrado  
en Ingeniería,  
UNAM.  
P r e s e n t e

Por este medio comunico a usted que he leído la tesis titulada:  
"EFECTO DEL ENVEJECIMIENTO EN LA CAPACIDAD DE CARGA A EXTRACCION  
DE MODELOS DE PILOTE EN ARCILLA MARINA" para obtener el grado de  
Maestro en Ingeniería en el campo del conocimiento INGENIERIA  
CIVIL (GEOTECNIA), que presenta el alumno **EDGAR CRUZ CASTRO**.

Considero que el mencionado trabajo es satisfactorio, por lo que  
lo apruebo sin otorgarle créditos académicos.

Quedo enterado de que formaré parte del jurado en la fecha y hora  
en que se me comunicará posteriormente.

Atentamente,

  
**DR. GABRIEL AUVINET GUICHARD**

BJS\*jac.

**UNAM**  
**POSGRADO**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA**

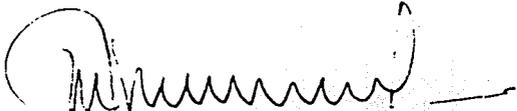
**DR. WILFRIDO RIVERA GOMEZ FRANCO**  
Coordinador del Programa de Posgrado  
en Ingeniería,  
UNAM.  
P r e s e n t e

Por este medio comunico a usted que he leído la tesis titulada:  
"EFECTO DEL ENVEJECIMIENTO EN LA CAPACIDAD DE CARGA A EXTRACCION  
DE MODELOS DE PILOTE EN ARCILLA MARINA" para obtener el grado de  
Maestro en Ingeniería en el campo del conocimiento **INGENIERIA  
CIVIL (GEOTECNIA)**, que presenta el alumno **EDGAR CRUZ CASTRO**.

Considero que el mencionado trabajo es satisfactorio, por lo que  
lo apruebo sin otorgarle créditos académicos.

Quedo enterado de que formaré parte del jurado en la fecha y hora  
en que se me comunicará posteriormente.

Atentamente,

  
M EN. I. MANUEL J. MENDOZA LOPEZ

BJS:jac.

4

TESTE CON  
FALLA DE ORIGEN



## PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA

**DR. WILFRIDO RIVERA GOMEZ FRANCO**  
Coordinador del Programa de Posgrado  
en Ingeniería,  
U N A M .  
P r e s e n t e

Por este medio comunico a usted que he leído la tesis titulada:  
"EFECTO DEL ENVEJECIMIENTO EN LA CAPACIDAD DE CARGA A EXTRACCION  
DE MODELOS DE PILOTE EN ARCILLA MARINA" para obtener el grado de  
Maestro en Ingeniería en el campo del conocimiento **INGENIERIA  
CIVIL (GEOTECNIA)**, que presenta el alumno **EDGAR CRUZ CASTRO**.

Considero que el mencionado trabajo es satisfactorio, por lo que  
lo apruebo sin otorgarle créditos académicos.

Quedo enterado de que formará parte del jurado en la fecha y hora  
en que se me comunicara posteriormente.

Atentamente,

**DR. EFRAIN OVANDO SHELLEY**

BJS+jac.



## PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA

**DR. WILFRIDO RIVERA GOMEZ FRANCO**  
Coordinador del Programa de Posgrado  
en Ingeniería,  
U N A M .  
P r e s e n t e

Por este medio comunico a usted que he leído la tesis titulada:  
"EFECTO DEL ENVEJECIMIENTO EN LA CAPACIDAD DE CARGA A EXTRACCION  
DE MODELOS DE PILOTE EN ARCILLA MARINA" para obtener el grado de  
Maestro en Ingeniería en el campo del conocimiento INGENIERIA  
CIVIL (GEOTECNIA), que presenta el alumno **EDGAR CRUZ CASTRO**.

Considero que el mencionado trabajo es satisfactorio, por lo que  
lo apruebo sin otorgarle créditos académicos.

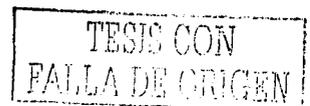
Quedo enterado de que formará parte del jurado en la fecha y hora  
en que se me comunicará posteriormente.

Atentamente,

  
DR. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO

BJS·jac.

6



**UNAM**  
**POSGRADO**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA**

**DR. WILFRIDO RIVERA GOMEZ FRANCO**  
Coordinador del Programa de Posgrado  
en Ingeniería,  
UNAM.  
P r e s e n t e

Por este medio comunico a usted que he leído la tesis titulada:  
"EFECTO DEL ENVEJECIMIENTO EN LA CAPACIDAD DE CARGA A EXTRACCION  
DE MODELOS DE PILOTE EN ARCILLA MARINA" para obtener el grado de  
Maestro en Ingeniería en el campo del conocimiento **INGENIERIA  
CIVIL (GEOTECNIA)**, que presenta el alumno **EDGAR CRUZ CASTRO**.

Considero que el mencionado trabajo es satisfactorio, por lo que  
lo apruebo sin otorgarle créditos académicos.

Quedo enterado de que formará parte del jurado en la fecha y hora  
en que se me comunicará posteriormente.

Atentamente,

**DR. VICTOR M. TABOADA URTUZUASTEGUI**

BJS+jac.

## **Agradecimientos**

---

### **A DIOS.**

Gracias Señor mío y Dios mío, por haberme dado la gracia de permanecer en ti y buscar tu auxilio en los momentos más difíciles y la fe para confiar en ti.

“Recibid Señor mi memoria, mi entendimiento, todo mi haber y poseer, vos me los disteis, a vos Señor los torno, disponed de todo a vuestra voluntad, que con tu Amor y tu Gracia, que eso me baste”. (San Ignacio de Loyola).

### **A mi familia.**

Por el amor, apoyo y ayuda incondicional incesante de toda la vida.

### **Al M. I. Manuel J. Mendoza L.**

Por haberme dado la oportunidad de participar en esta investigación.

### **A los sinodales: Dr. Gabriel Auvinet G., Dr. Efraín Ovando S., Dr. Rigoberto Rivera C., y Dr. Víctor M. Taboada U.**

Por sus valiosas observaciones y disposición de ayuda. Gracias.

### **Al Ing. Iván Rivera Cruz**

Por su invaluable ayuda, ideas, y creatividad en la realización de los ensayos experimentales, así como por la amistad brindada. Sin tu ayuda habría sido muy difícil terminar.

### **Sr. Eleno Guzmán.**

Por enseñarme, darme la confianza y auxiliarme en la solución de difíciles tareas experimentales.

### **CONACyT.**

Por la beca crédito otorgada para la realización de los estudios de maestría.

### **II UNAM e IMP.**

Por las becas recibidas durante el desarrollo de esta tesis.

### **A mis amigos y compañeros de la maestría.**

Especialmente al M. I. Osvaldo Flores por sus comentarios y sugerencias durante el desarrollo de esta investigación experimental. A Oscar y Enrique por introducirme en este tema. A Gaspar, Ricardo, Pánfilo, Adrián, Juan José, Lorena, por hacer un ambiente agradable dentro del laboratorio.

### **A los Ingenieros.**

Enrique Gómez y Alfredo Olivares por su ayuda en la solución de problemas relacionados con electrónica, Prócoro Barrera y Diego Cruz por el apoyo ofrecido.

### **A los laboratoristas y trabajadores del taller mecánico del IIUNAM.**

Por sus comentarios y sugerencias durante las preparativos experimentales, con especial agradecimiento al Sr. Angel y Sr. Maya.

**A todas las demás personas que de alguna forma me animaron a continuar, gracias.**

---

## RESUMEN

---

Con el propósito de conocer el efecto de envejecimiento en la capacidad de carga de pilotes para el sitio de la Sonda de Campeche, se realizó un estudio experimental tendiente a observar la evolución de la resistencia a la extracción de modelos de pilotes. Para ello, estos modelos fueron embebidos en una arcilla marina previamente reconstituída en laboratorio y perteneciente al sitio en cuestión. Los pilotes fueron extraídos con diferentes lapsos de reposo, para conocer la evolución de su resistencia por fuste, así como de su rigidez. Con respecto al proceso de hincado se observó un aumento en la resistencia del suelo, cuando éste se efectuó con interrupciones, de la misma forma que se presenta en la instalación de pilotes a escala real. Los resultados obtenidos indican, en términos generales, un aumento de resistencia y rigidez de la interfaz suelo-pilote con el tiempo.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 Antecedentes.....	1-1
1.1.1 Estructura jacket.....	1-1
1.1.2 Cimentación de la estructura jacket.....	1-3
1.1.3 Instalación de pilotes.....	1-5
1.2 Definición del problema.....	1-6
1.3 Objetivo.....	1-7
1.4 Organización de la tesis.....	1-7
<b>2. ANÁLISIS DE FUNDAMENTOS</b>	
2.1 Envejecimiento de suelos.....	2-1
2.1.1 Ejemplos del efecto de envejecimiento.....	2-2
2.1.2 Factores sugeridos para explicar el envejecimiento.....	2-13
2.1.3 Factores sugeridos para el envejecimiento de la capacidad de carga en pilotes.....	2-18
2.1.4 Estudios experimentales previos para determinar el envejecimiento en la capacidad de carga de pilotes.....	2-19
<b>3. ESTUDIO EXPERIMENTAL</b>	
3.1 Diseño experimental.....	3-1
3.2 Sistemas auxiliares para la ejecución de ensayos con modelos de pilote.....	3-4
3.2.1 Descripción del sistema electroneumático de aplicación de cargas estáticas y cíclicas.....	3-4
3.2.2 Descripción del sistema de adquisición automática de datos.....	3-10
3.2.3 Sistema de instalación del pilote.....	3-12
3.3 Odómetro O-97-5.....	3-15
3.3.1 Construcción del odómetro O-97-5.....	3-15
3.3.2 Instrumentación del odómetro O-97-5.....	3-18

3.4 Preparativos para la ejecución de ensayos con modelos de pilote.....	3-20
3.4.1 <i>Formación de un suelo artificial</i> .....	3-20
3.4.2 <i>Modificaciones mecánicas</i> .....	3-24
3.4.3 <i>Modificaciones neumáticas</i> .....	3-29
3.4.4 <i>Aplicación de presión externa al suelo</i> .....	3-30
3.5 Ensayes de extracción de modelos de pilote.....	3-36
3.5.1 <i>Procedimiento de ejecución de ensayos</i> .....	3-36
3.5.2 <i>Ensayes de extracción preliminares</i> .....	3-42
3.5.3 <i>Ensayes de extracción definitivos</i> .....	3-45
3.5.4 <i>Ensayes de extracción adicionales</i> .....	3-50
<b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	
4.1 Efecto del envejecimiento en la resistencia durante el hincado.....	4-1
4.2 Efecto del envejecimiento en la rigidez y en la capacidad de carga por fuste....	4-3
4.2.1 <i>Ensayes de extracción preliminares</i> .....	4-3
4.2.2 <i>Ensayes de extracción definitivos</i> .....	4-9
4.2.3 <i>Ensayes de extracción adicionales (pilotes rehincados)</i> .....	4-19
4.2.4 <i>Resultados conjuntos: ensayos de extracción preliminares, definitivos y adicionales (con rehincado)</i> .....	4-24
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	5-1
<b>6. REFERENCIAS</b> .....	6-1

*"Todo comienzo tiene su encanto."  
J. W. V. Goethe.*

# **1. INTRODUCCIÓN**

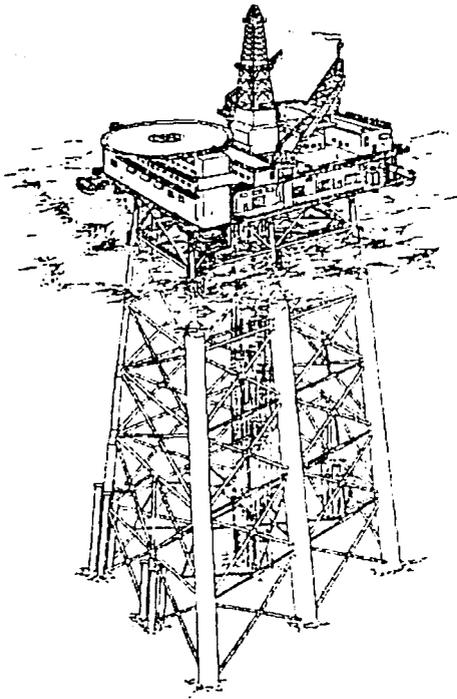
---

## **1.1 ANTECEDENTES**

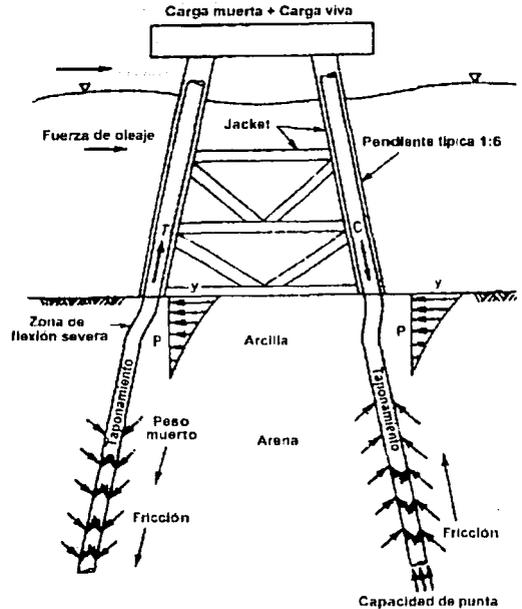
Como parte del Programa de Formación y Desarrollo del Factor Humano del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), a través del fondo FIES (Fondo de Investigación con Instituciones de Educación Superior), se realizó un convenio de colaboración con el Instituto de Ingeniería de la UNAM. El convenio tiene por objeto desarrollar un proyecto de investigación denominado: "Respuesta de la cimentación de una plataforma marina fija bajo el efecto de cargas cíclicas y dinámicas en la Sonda de Campeche". En este proyecto se pretende dilucidar y obtener un mejor entendimiento de las variables geotécnicas más importantes que intervienen en el comportamiento de la cimentación de una plataforma del tipo *jacket*.

### **1.1.1 Estructura jacket**

La estructura *jacket* es una armadura tridimensional constituida por grandes miembros tubulares de acero. El *jacket* se instala en el mar y ofrece una superficie libre en medio del océano. –cuya elevación de la cubierta es función de la altura de ola de diseño (para la Sonda de Campeche la elevación oscila de 19 a 22 m, IMP, 1997)– y se utiliza para realizar los distintos trabajos y operaciones para la explotación de hidrocarburos principalmente. Así mismo, los tubos metálicos de la estructura se utilizan como una guía para hincar los pilotes que constituirán su cimentación. Fig. 1.1



(a) Estructura jacket



(b) Cimentación del jacket.  
(interacción suelo-pilote)

Figura 1.1. Plataforma marina tipo jacket (Gerwick, 2000)

La estructura jacket comprende la vasta mayoría de las estructuras fuera de la costa. Estas estructuras constituyen la opción para las instalaciones permanentes en profundidades de agua del orden de 450 m (1500 pies). Mas allá de estas profundidades, la amplificación dinámica llega a ser muy difícil de eliminar y las estructuras dúctiles son la mejor opción (Murff, 2001).

México comenzó su desarrollo en la industria fuera de la costa en 1955, pero hasta el año de 1978 se inició la explotación en la región de la Sonda de Campeche donde se encuentra la mayoría de las plataformas del país y de las cuales el tipo jacket es el más común (Valle, 1997).

### 1.1.2. Cimentación de la estructura jacket

Existen dos tipos de cimentaciones utilizadas para soportar las estructuras convencionales fuera de la costa. Cimentaciones superficiales temporales y cimentaciones permanentes constituidas por pilotes.

La cimentación superficial del jacket es simplemente una losa reticulada ajustada a la base de la estructura y constituyen el apoyo temporal del jacket en el fondo marino. Esta cimentación se diseña para resistir la flotación del jacket antes de la instalación de los pilotes y deben ser dimensionadas para prevenir una penetración significativa en el suelo, volteo de la estructura o un posible deslizamiento.

Los pilotes que forman la cimentación permanente del jacket deben estar diseñados para resistir fuerzas de tensión y compresión, así como las fuerzas hidrodinámicas que provocan la tendencia al volteo en la estructura. Dados los notables tirantes de agua, considerables longitudes de columnas no soportadas, grandes cargas axiales y laterales cíclicas, así como la combinación de todas estas fuerzas, obligan a utilizar pilotes de gran diámetro y longitud. La mayoría de los pilotes que se utilizan fuera de la costa son tubos de acero cuyos diámetros varían de 1 hasta 2 m (y aún 4m) , y longitudes de 40 a 300 m. (Gerwick, 2000). En México, generalmente se utilizan diámetros de 0.50 m a 1.20m y longitudes de 100 a 120 m (FugroMcClelland-PEMEX , 1996). Evidentemente, el acero está sujeto a una variedad de fenómenos corrosivos. La pintura y recubrimiento de los miembros de acero debe ser una práctica común. En Japón se aplican recubrimientos de polietileno desde su fabricación en planta. Otro tipo de recubrimientos utilizados son los epóxicos densos o enriquecidos con zinc, los cuales proporcionan buena resistencia a la abrasión. Así mismo se encuentran los llamados *alloys* que son sustancias con propiedades metálicas que incluyen dos o más elementos en solución sólida, aplicados en forma de spray, con buen aislamiento a la corrosión. Los recubrimientos anticorrosivos –aplicados en la superficie de los tubos de acero–, ciertamente influyen en sus características de rugosidad y fricción desarrollada en la interfaz suelo-pilote durante sollicitaciones axiales. Adicionalmente se tiene la protección de corriente catódica: dado que la corrosión del acero es un proceso electroquímico, la protección catódica proporciona un sistema eléctrico externo que interrumpe dicho proceso.

Para resistir las fuerzas de compresión, el pilote transfiere su carga por fricción al suelo a través de su perímetro exterior y por punta. Se asumen dos casos. En el primero, Fig. 1.2.a. el suelo que se introduce en el interior del tubo se considera que permanece en la misma posición, mientras el pilote penetra como un abocardador en la masa de suelo interior y exterior a su pared. En este modelo, la resistencia al esfuerzo cortante del suelo se desarrolla en ambas paredes del tubo, interior (fricción interna) y exterior (fricción externa), así como la resistencia de punta en la parte anular del pilote. Para propósitos de cálculo, los valores de la fricción interna y externa se admiten iguales. En el segundo caso, Fig. 1.2.b. se considera que la intrusión de suelo se moviliza conjuntamente con el pilote formándose un taponamiento, de tal forma que la capacidad por punta se desarrolla a través de toda la base del pilote; en este caso, sólo se desarrolla la fricción externa. La capacidad de carga del pilote se calcula para ambos mecanismos de falla, y el valor mínimo de éstos se considera para el diseño (Murff, 2001).

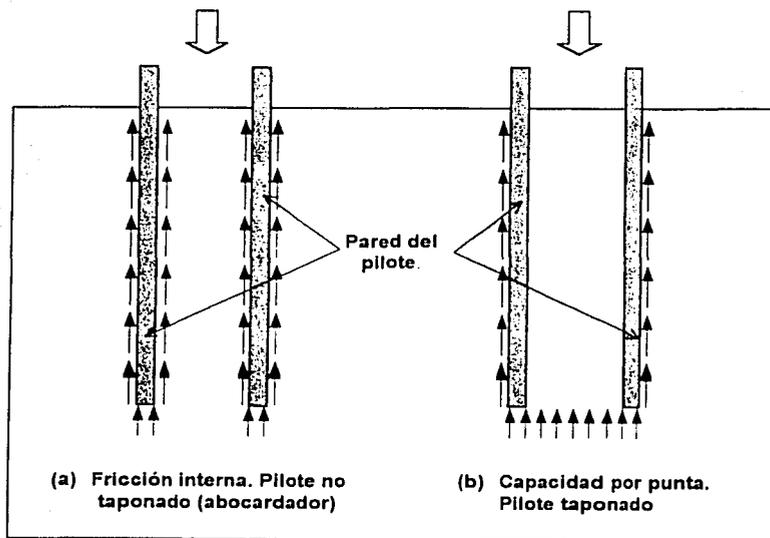


Figura 1.2. Modelo de capacidad de carga (Murff, 2001)

La capacidad de carga por fricción y por punta no se desarrollan al mismo tiempo. Para un desplazamiento determinado, la fricción moviliza gran parte de su capacidad de carga antes que la punta. Por esta razón, estas cimentaciones se diseñan primeramente como pilotes de fricción.

Para resistir fuerzas de tensión, se cuenta con el peso propio del pilote, el suelo introducido en éste y la fricción externa desarrollada.

Para resistir cargas laterales, la mayoría de las estructuras fuera de la costa en aguas profundas dependen de la resistencia a flexión del pilote interactuando con la resistencia pasiva del suelo en los estratos superficiales. El pilote debe tener suficiente resistencia para soportar el momento resultante en esos niveles y para prevenir el volteo local. La capacidad para resistir cargas laterales puede mejorarse incrementando la rigidez del pilote en la zona crítica de la línea de lodos, mediante el uso de mayores espesores en la pared del tubo de acero alrededor de esta zona, y rellenando el pilote con alguna mezcla en esta región. Otro método alternativo para resistir cargas laterales es inclinar suficientemente los pilotes para desarrollar un componente horizontal en su capacidad axial.

### 1.1.3 Instalación de pilotes

Para instalar los grandes pilotes requeridos en las plataformas se han tenido que desarrollar equipos y métodos especiales. El hincado con martillos de gran capacidad es todavía el método preferido para la mayoría de los casos debido a su rapidez. Sin embargo, cuando las condiciones del suelo no permiten la instalación mediante hincado y en otros casos especiales, se utiliza la perforación, a la cual sigue la colocación del pilote y posteriormente una inyección de mezcla en el hueco perforado donde se sitúa el pilote.

La selección de un martillo depende de la geometría del pilote y de la resistencia del suelo estimada durante el hincado. El modelo denominado *ecuación de la onda* se utiliza típicamente para la planeación y diseño de la instalación de pilotes. El modelo básico se desarrolló en la década de los cincuentas e inicios de los sesentas. Consiste en un modelo basado en una serie de masas concentradas y resortes que idealizan el sistema pilote-martillo y el suelo se modela como resortes y amortiguadores desacoplados y no lineales. Las ecuaciones que gobiernan el fenómeno se resuelven numéricamente. Los modelos más recientes utilizan el método de diferencias finitas o elemento finito para resolver las ecuaciones diferenciales que rigen el fenómeno. Este modelo ha sido calibrado con suficientes datos de campo y se ha convertido en una herramienta confiable para determinar la resistencia del suelo durante el hincado. Con este análisis se determina la

mejor combinación de martillo-pilote para lograr la penetración deseada y evaluar los esfuerzos que el pilote podría experimentar durante el hincado con un martillo específico.

Durante el proceso de hincado se tienen que interrumpir las operaciones para añadir secciones de pilote o cambiar martillos. Estas interrupciones pueden demorar de 6 a 8 horas. Sin embargo, se pueden presentar atrasos de algunos días debido a mal tiempo o problemas con el equipo. Durante este tiempo, las arcillas ganan resistencia a medida que el exceso de presión de poros se disipa y las partículas de suelo se reorientan. Debido a este fenómeno, la resistencia del suelo al hincado al comienzo del mismo puede aumentar hasta el punto de rechazo. Se tiene conocimiento que este fenómeno se presenta en las arcillas marinas de la Sonda de Campeche donde actualmente se construyen plataformas; sin embargo, se dispone de escasa investigación al respecto.

Por otra parte, el entendimiento de la evolución de la capacidad de carga a largo plazo es importante, no sólo para realizar un diseño adecuado, sino para evaluar el desempeño de estructuras existentes. A este respecto, el Criterio Transitorio para Evaluación y Diseño de Plataformas en la Sonda de Campeche (IMP, 1997) indica un incremento del 20% en la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos arcillosos para plataformas con más de 10 años de haber sido instaladas. No obstante, resulta conveniente sustentar con investigaciones adicionales lo indicado por el Criterio Transitorio.

## 1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Como se puede inferir, el efecto del tiempo juega una situación muy importante, tanto en el proceso de instalación del pilote, como en su desempeño a largo plazo. De lo anterior, se desprende el siguiente problema de investigación:

*“Efecto del envejecimiento en la capacidad de carga a extracción de modelos de pilote en arcilla marina reconstituida de la Sonda de Campeche”.*

### 1.3 OBJETIVO

Conocer la evolución de la capacidad de carga a extracción de pilotes embebidos en arcilla marina, obtenida en un modelo experimental. Esto es con el fin de identificar, de manera preliminar, la evolución real en la capacidad de carga que presentan los pilotes utilizados en las estructuras fuera de la costa en la Sonda de Campeche.

La razón para efectuar pruebas de extracción se debe a que se tiene la capacidad de carga por fuste como única variable de medición. La compresión implica, adicional al aporte por fuste, el de la punta, cuyo discernimiento es difícil de realizar sin el auxilio de instrumentación en el cuerpo del pilote, siendo este el caso de los pilotes utilizados en esta experimentación. Por otra parte, los pilotes utilizados en las plataformas marinas, son pilotes de fricción (cuyo trabajo puede estar sujeto a extracciones o compresiones, dependiendo de las condiciones de carga), por lo cual interesa conocer a detalle la evolución de la capacidad de carga por fuste.

### 1.4 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Para abordar este tema, la tesis se organizó de la siguiente manera: en el capítulo 2 se analizan los fundamentos necesarios para entender el concepto de envejecimiento y los factores posibles que intervienen en el mejoramiento de las propiedades ingenieriles del suelo, con particular énfasis en la resistencia cortante en la interfaz suelo-pilote. El capítulo 3 describe el estudio experimental llevado a cabo para determinar el efecto de envejecimiento en la capacidad de carga por fuste en modelos de pilote embebidos en la arcilla marina reconstituida de la Sonda de Campeche. En el capítulo 4 se analizan las curvas carga – desplazamiento obtenidas de las pruebas estáticas de extracción y finalmente, el capítulo 5 presenta las conclusiones de esta investigación, fundamentalmente experimental.

"El tiempo descubre la verdad."  
Lucio A. Séneca.

## 2. ANÁLISIS DE FUNDAMENTOS

### 2.1. ENVEJECIMIENTO DE SUELOS

Los suelos no son materiales inertes, sino que pueden y frecuentemente lo hacen, cambiar con el tiempo y con las condiciones ambientales. A este respecto, Mitchell (1986) describe una serie de problemas prácticos, en los cuales se ilustra, colectivamente, un comportamiento inesperado en los suelos, debido al efecto del tiempo o *envejecimiento*. Así mismo, una revisión de la literatura muestra otros ejemplos significativos de envejecimiento en las propiedades ingenieriles de los suelos.

De acuerdo con Schmertmann (1991), define al envejecimiento como "puro" cuando solamente indica el paso del tiempo. Así mismo, realiza una distinción entre el envejecimiento puro y *eventos* que pueden ocurrir en el tiempo. Es decir, estos eventos no se consideran parte del envejecimiento y están relacionados principalmente con cambios en esfuerzos horizontales y verticales externos. Entre ellos se pueden mencionar fluctuaciones en el nivel freático, expansiones y contracciones, sismos, hincado de pilotes, así como ataques biológicos o exposición de agentes químicos. En la figura 2.1 se trata de aclarar mejor esta explicación.

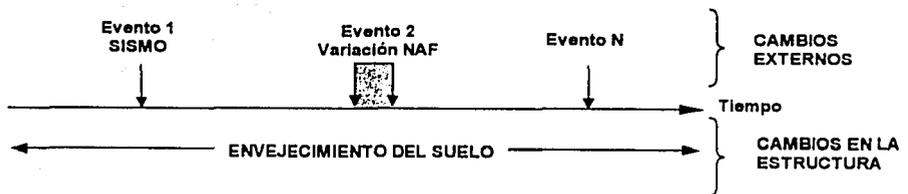


Figura 2.1 Distinción entre *envejecimiento puro* y *eventos* en el suelo

Aun así, resulta difícil realizar una separación completa de estos conceptos, ya que ambos ocurren en el tiempo. Lo que sí se puede aclarar es que los efectos que provoca un evento en el suelo, a través del tiempo, se pueden estudiar con un enfoque de envejecimiento. Por ejemplo, si se considera que el hincado de un pilote es el evento, los efectos inducidos en el suelo circundante se observarán con el paso del tiempo o envejecimiento.

La concepción anterior es la que se utilizará en el presente trabajo para explicar precisamente el envejecimiento en la capacidad de carga de pilotes, así como otros casos de envejecimiento en las propiedades de los suelos que se presentan a continuación.

### 2.1.1. Ejemplos del efecto de envejecimiento

#### Preconsolidación

La preconsolidación por envejecimiento ha sido observada por diversos investigadores. Leonards (1972) encontró en un estudio experimental de sedimentación artificial de arcilla, un incremento aproximado del 40% en el esfuerzo de preconsolidación atribuible al envejecimiento, ver Fig. 2.2.

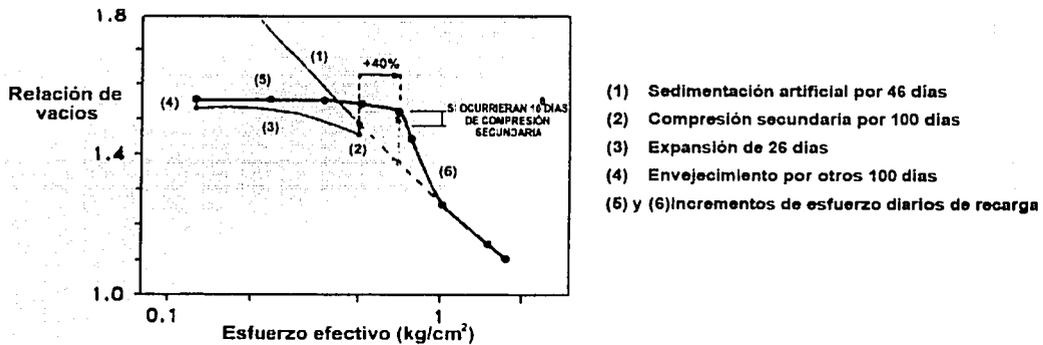


Figura 2.2. Ejemplo de envejecimiento en la carga de preconsolidación, en una sedimentación artificial en laboratorio (Leonards, 1972)

Así mismo, señala que en su experiencia con depósitos de arcillas naturales no ha encontrado una arcilla normalmente consolidada que no haya mostrado los efectos de envejecimiento por preconsolidación.

A su vez, Zeevaert (1983) presenta la preconsolidación por envejecimiento, la cual denomina *endurecimiento* en las arcillas de la Ciudad de México.

En la figura 2.3 se muestra un depósito de arcilla tal como lo reporta Eide y Holmberg (1972). El sitio geológicamente correspondería a una consolidación normal. Sin embargo, pruebas triaxiales y de odómetro mostraron una relación de preconsolidación de 1.5 a 2. Los autores atribuyen este cambio al efecto de envejecimiento.

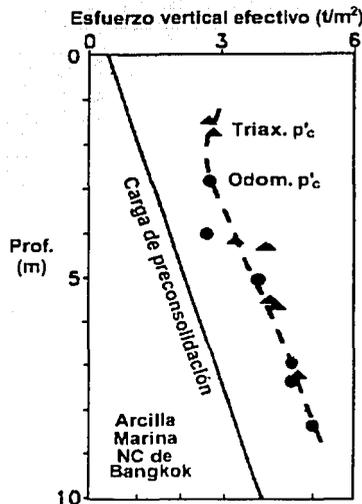


Figura 2.3. Ejemplo de envejecimiento en la carga de preconsolidación en campo (Eide y Holmberg, 1972)

Por su parte, Schmertmann (1991) reporta una situación similar para las arcillas localizadas en el delta del Río Mississippi, alrededor de New Orleans y Baton Rouge. En su opinión y experiencia duda de la existencia de una verdadera arcilla normalmente consolidada en el campo, y sugiere que este concepto sólo constituye una ficción en la imaginación geotécnica, condicionada por la experiencia común de pruebas de laboratorio, que por la calidad del equipo utilizado, existe la incertidumbre, si se trata efectivamente, de suelos normalmente consolidados.

En el mismo artículo, Schmertmann señala que la preconsolidación por efecto del envejecimiento también puede ocurrir en una arena. Esta aseveración la sustenta con base en un experimento realizado en la Universidad de Florida. A grandes rasgos, el experimento consistió

en realizar una prueba de placa en un contenedor con arena. Se utilizó un sistema neumático para aplicar las cargas en la placa, celdas de carga y deformímetros eléctricos para medir carga y desplazamiento, respectivamente. En la figura 2.4 se muestra la gráfica Carga Vs. Asentamiento de la placa, para una parte de la prueba que incluye una carga sostenida de 325 lb (147.5 kg) en la placa, con un tiempo de reposo de 844 min.

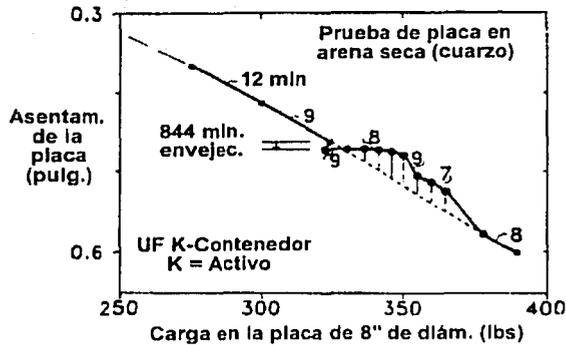
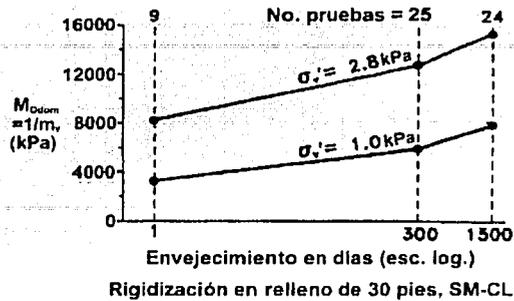


Figura 2.4. Demostración del efecto de envejecimiento en la carga de preconsolidación en la realización de una prueba de placa en un contenedor de arena (Schmertmann, 1991)

Los números entre los puntos muestran el tiempo en minutos entre cada incremento de carga. Se distingue un cambio drástico en la curva, después de la carga sostenida en 844 minutos, a lo cual Schmertmann le da la interpretación de una preconsolidación por efecto del envejecimiento.

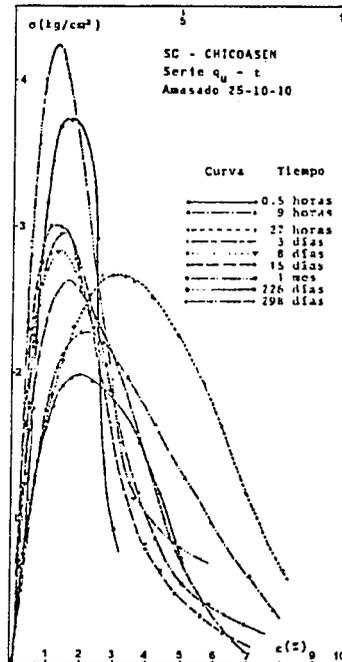
### Módulo

Un módulo odométrico puede incrementarse por el envejecimiento y puede ocurrir en rellenos compactados. Considérense los datos de la figura 2.5, los cuales corresponden a un relleno cohesivo de 30 pies (9.14m) de espesor, diseñado para soportar una planta de electricidad. Schmertmann (1991) realizó una revisión muy cuidadosa de los resultados de las pruebas de odómetro a partir de las muestras de este relleno. Así mismo, observó un importante incremento en el módulo odométrico ( $I/m_v$ ), con el incremento de la edad del relleno. En la figura se presenta el incremento del módulo versus tiempo después de la compactación para dos magnitudes representativas del esfuerzo vertical efectivo. Se observa que el módulo odométrico obtiene un incremento alrededor del 100% durante 1500 días de envejecimiento.



**Figura 2.5. Ejemplo de incremento en el módulo odométrico por envejecimiento, en un relleno cohesivo compactado (Schmertmann, 1991)**

Por su parte, Mendoza (1982), realizó una investigación experimental en suelos compactados. En dicho estudio se presentan resultados de curvas esfuerzo–deformación (SC-Chicoasén, Serie  $q_u-t$ , amasado 25-10-10), de especímenes compactados, fallados bajo compresión no confinada y con diferentes tiempos de reposo, Fig. 2.6.



**Figura 2.6. Rigidización de suelos compactados por efecto de envejecimiento. Compresión no confinada (Mendoza, 1982)**

Se observa que la ganancia de resistencia y la reducción de la deformación de falla repercuten en el módulo de deformación. A este respecto, Mendoza señala que el módulo secante al 50% del esfuerzo de falla,  $M_{50}$ , alcanza valores hasta tres veces mayores que el inicial por efecto del tiempo.

En la figura 2.7 se presentan los resultados obtenidos a partir de una prueba cross-hole realizada por Long (1980), usando los mismos sondeos receptores hasta 212 días después de la construcción de un relleno cohesivo. Este ejemplo ilustra el incremento del módulo  $G_0$  en el campo por efecto del envejecimiento.

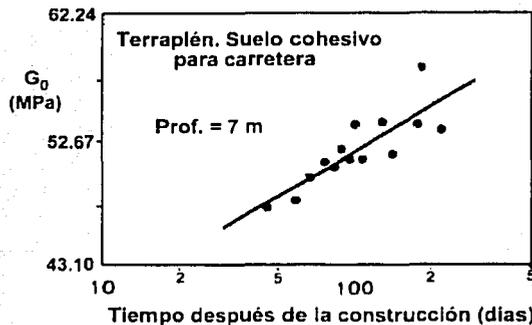


Figura 2.7. Incremento del módulo de rigidez  $G$  en campo (Stokoe y Long, 1980)

### Resistencia

Además, el envejecimiento puede incrementar la resistencia de una arcilla, como se observa, por ejemplo, en la medición de pruebas con veleta. Bjerrum (1972) reconoció este hecho cuando realizó pruebas de veleta en muestras de arcillas y separó los valores de resistencia obtenidos, correspondientes a depósitos geológicamente jóvenes y envejecidos. La figura 2.8 muestra las proporciones de aumento de resistencia, para valores diferentes de índice de plasticidad, por causas atribuibles al envejecimiento geológico.

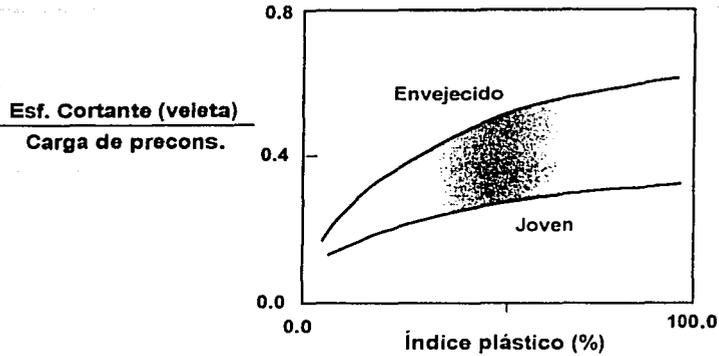


Figura 2.8. Envejecimiento geológico en la resistencia de pruebas de veleta en arcilla "cuasi" NC (Bjerrum, 1972)

El incremento en la resistencia de una arcilla también puede ocurrir en un tiempo ingenieril y observable en el laboratorio. La figura 2.9 presenta los resultados de una investigación realizada por Yasuhara y Ue (1983), en la que se aprecia un incremento aproximado del 50% en la resistencia no drenada ejecutada en una prueba de corte directo, con tiempos de envejecimiento de 30 minutos a 30 días.

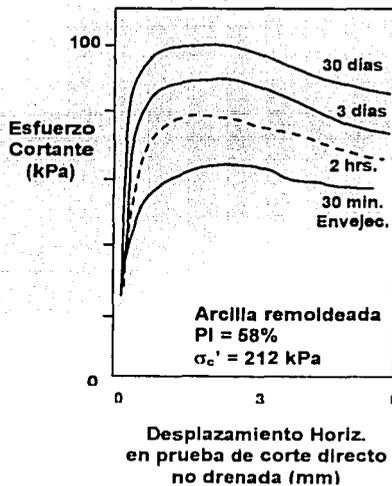


Figura 2.9. Incremento en la resistencia no drenada de una arcilla por envejecimiento (Yasuhara y Ue, 1983)

Así mismo, en la figura 2.6, previamente mostrada, Mendoza (1982) presenta resultados similares para pruebas en suelos compactados y ensayados en compresión simple.

Osterman (1960) observó el aumento de resistencia por envejecimiento en un sitio en el cual se realizó una sobrecarga empleando una capa de arcilla de 5 metros de espesor. Después de la finalización de la consolidación primaria, determinada por las mediciones de presión de poro y asentamientos, Osterman observó que los valores obtenidos con pruebas de veleta obtuvieron un incremento promedio alrededor del 50% durante un envejecimiento cercano de 12 años.

Por otra parte, la resistencia en arenas, como la medida en pruebas de penetración estándar puede incrementarse por efecto del envejecimiento, y apreciarse en un tiempo de interés ingenieril. Con referencia a la figura 2.10, Schmetmann (1991) presenta datos de resistencia registrada en pruebas de cono eléctrico después de una compactación dinámica efectuada en un relleno de arena limosa de 10 m de espesor. Se observa que la resistencia obtiene un incremento significativo en un lapso de 60 días y el incremento es mayor a medida que el número de golpes utilizado en la compactación dinámica aumenta. Schmetmann sugiere que, presumiblemente, ocurre un incremento en la disgregación de la estructura natural a medida que aumenta el número de golpes en la compactación y este cambio en su estructura induce el envejecimiento subsecuente, cuyo incremento, posiblemente se explique a través de un microcontacto de partículas (en el tiempo), tal y como lo propone Mesri (1990).

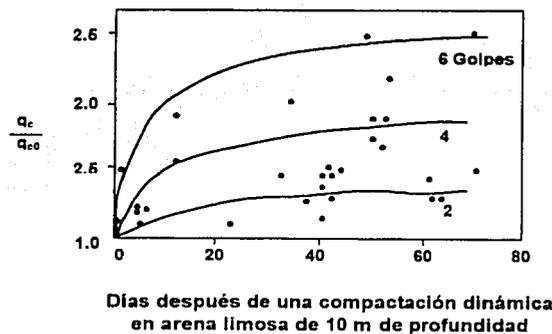


Figura 2.10. Incremento normalizado en la capacidad de carga del cono estático después de una compactación dinámica (Schmetmann, 1991)

**Límite líquido e índice de liquidez**

Con referencia al límite líquido y para el caso particular de arcillas *sensitivas*, Mitchell (1976) señala que éste puede sufrir un incremento por efecto del tiempo, así como un decremento en el índice de liquidez, sin cambios en el contenido de agua. Lo anterior se fundamenta en un estudio realizado por Lessard y Mitchell (1985) en una arcilla sensitiva de LaBaie, Quebec. Esta arcilla fue analizada bajo diferentes condiciones tales como índice de liquidez, pH y concentración de varios tipos de iones, en función del tiempo, Fig. 2.11. De los resultados obtenidos se concluye que el envejecimiento incrementa la salinidad del agua de poro y la concentración de cationes divalentes, así como una disminución en el valor del pH. Colectivamente, esos cambios son responsables del incremento del límite líquido y el correspondiente decremento del índice de liquidez debido a que disminuyen las fuerzas de repulsión entre partículas.

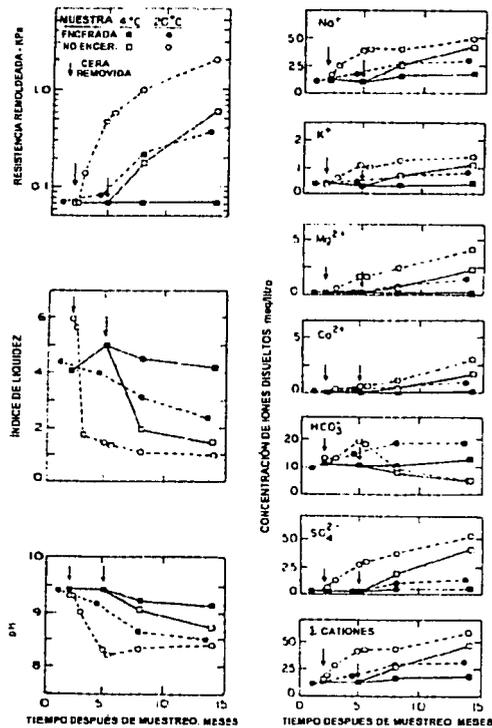


Figura 2.11. Efecto del tiempo en las propiedades de la arcilla de LaBaie (Lessard y Mitchell, 1985)

### Capacidad de carga en pilotes

Se ha llegado al punto de particular interés en esta tesis, el cual es el efecto de envejecimiento sobre la resistencia cortante no drenada, misma que determina la evolución de la capacidad de carga de pilotes hincados. Durante la instalación e hincado, el suelo alrededor del pilote, experimenta un fuerte remoldeo y cambios en la presión de poro. El exceso de dicha presión desarrollada durante este proceso reduce la resistencia efectiva al esfuerzo cortante y la capacidad de carga última. Después de la finalización del hincado, el suelo experimenta una consolidación local, para el caso de arcillas, manifestada por la disipación del exceso de presión de poro en la interfaz suelo-pilote y acompañada por un incremento en la capacidad de carga del pilote. No obstante, este incremento resulta no sólo del efecto de disipación de presión de poro, sino además del envejecimiento involucrado en el suelo remoldeado alrededor del pilote, Schmertmann (1991).

A este respecto, Karlsrud y Haugen (1986), realizaron una serie de pruebas con un modelo de pilote instrumentado desarrollado en el Instituto Geotécnico Noruego (NGI). En la figura 2.12 se muestra el promedio de la presión total y presión de poro a lo largo del pilote, inmediatamente después de la instalación y además el equilibrio de presiones después de una consolidación completa (7 días).

Las observaciones más importantes de la instalación del pilote fueron:

- El esfuerzo horizontal efectivo a lo largo de la superficie del pilote durante la penetración es cercano a cero, lo cual enfatiza que existe un severo remoldeo de la arcilla alrededor del pilote.
- La presión total a lo largo de la superficie del pilote decrece significativamente durante el proceso de consolidación.

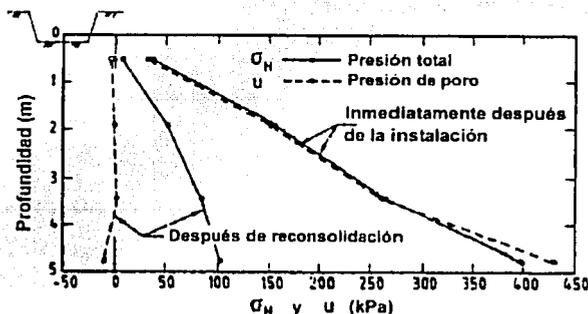


Figura 2.12. Distribuciones de la presión total y de poro después de la instalación del pilote instrumentado (Karlsrud y Haugen, 1986)

Posteriormente se realizaron una serie de pruebas individuales con el mismo pilote para determinar la capacidad de carga en extracción; en una arcilla preconsolidada, en la figura 2.13, cada punto representa una prueba individual del pilote. La tendencia de los puntos muestra claramente un incremento en su capacidad de carga para un esfuerzo horizontal efectivo constante. Este comportamiento, los autores lo atribuyen al envejecimiento. Los datos muestran un incremento aproximado del 20% en la capacidad, después de 30 días de envejecimiento.

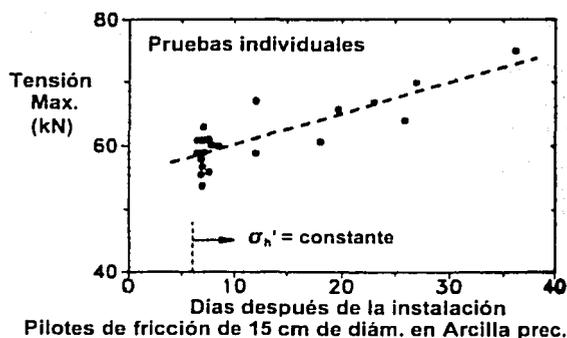


Figura 2.13. Incremento en la capacidad de carga de pilotes, en pruebas de tensión, durante el envejecimiento bajo condiciones de esfuerzo efectivo constante (Karlsrud y Haugen, 1986)

El aumento en la capacidad de carga también ha sido observada en arenas. Tavenas y Audy (1972) reportan un incremento en la capacidad estática de 45 pilotes hincados en arena con un coeficiente de permeabilidad de  $k=10^{-2}$  cm/s. El exceso de la presión de poro se disipó en pocas horas. No obstante, se presentó un incremento en la capacidad de carga alrededor del 70% aproximadamente en tres semanas. Los autores atribuyen este incremento a los cambios ocurridos en la estructura de la arena alrededor del pilote.

Fellenius (1989) por su parte reporta una experiencia similar en una serie de pruebas de carga a compresión y pruebas dinámicas (CAPWAP). En la figura 2.14 se observa un incremento del 50% de la capacidad de carga para un lapso de 20 días.

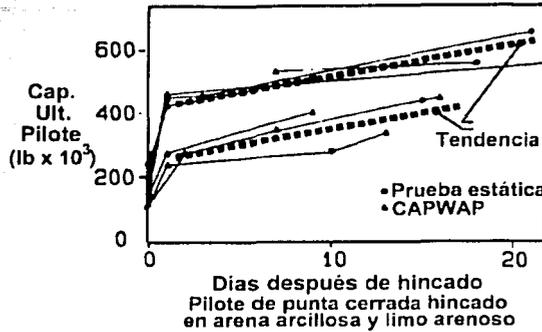


Figura 2.14. Pruebas de carga en pilotes con incremento en la capacidad con el tiempo (Fellenius, 1989)

Así mismo, Kehoe (1989) obtuvo resultados de pruebas de carga por métodos dinámicos (CAPWAP) en dos sitios durante la construcción de un puente en Florida. La estratigrafía estuvo constituida por intercalaciones de arena y arcillas. Se registró un incremento en la capacidad de carga en un rango del 58 al 200% transcurridos 11 días para los dos sitios, con la mitad de este incremento ocurrido en los primeros 100 minutos después del hincado. Kehoe especula que esta primera ganancia de resistencia relaciona a los efectos de disipación de presión de poro y la parte remanente a efectos de envejecimiento. Una determinación interesante de Kehoe es que este incremento ocurre principalmente en la capacidad por fuste, sin evolución significativa en la punta.

Estos y algunos casos adicionales presentados en la literatura, muestran que el aumento en la capacidad de carga de pilotes de debe a efectos de consolidación y envejecimiento, los cuales se manifiestan paralelamente.

Hasta aquí se han expuesto varios ejemplos del efecto del envejecimiento, tanto en el laboratorio como en campo, presentados en arcillas y arenas. A continuación se expondrán algunos factores sugeridos por algunos investigadores para explicar las causas de los cambios en la estructura de suelos arcillosos quizá responsables para la mayoría de los casos de envejecimiento mencionados anteriormente.

### 2.1.2. Factores sugeridos para explicar el envejecimiento

Eminentemente, con el paso del tiempo ocurren cambios en la estructura del suelo. Algunos investigadores (Terzaghi 1941, Mitchell 1960, Schmertmann, 1991) han tratado de explicar este hecho. Algunas de sus concepciones se muestran a continuación.

#### Proceso de solidificación.

Terzaghi propuso en 1941 una explicación de la manera en que las arcillas inalteradas adquieren su resistencia y rigidez. De acuerdo con su teoría, éstas se obtienen primordialmente por "procesos fisicoquímicos lentos" ocasionados por la actividad superficial de sus partículas arcillosas. Considera que alrededor de los minerales se tiene una capa de agua adsorbida sólida. Al continuar la sedimentación y consolidación, las porciones sólidas de las capas adsorbidas van entrando lentamente a un contacto verdadero, lo que Terzaghi denominó *proceso de solidificación*; como consecuencia, la masa se hace más rígida. Supone que el remoldeo rompe los contactos entre las capas sólidas, desplaza las partículas y pone en contacto las capas adsorbidas viscosas. la arcilla se encuentra entonces en un *estado lubricado* y se muestra plástica.

Aunque este proceso tiene una connotación que puede tomar varios años podría pensarse válido para tiempos de práctica común en un laboratorio. Lo anterior puede sustentarse, en parte, con base en resultados experimentales –tal como el caso de suelos compactados en laboratorio (Mendoza, 1982)–, donde la evolución de la resistencia y rigidez es significativa y de observación en tiempo ingenieril.

#### Compresión secundaria

La compresión secundaria es un proceso fenomenológico que se caracteriza por un comportamiento viscoso intergranular; esto origina un reordenamiento de las partículas del suelo a una estructura ligeramente más densa (menor relación de vacíos). A su vez, este factor tiene una asociación muy cercana con los efectos del envejecimiento, Schmertmann (1991). Mesri (1990) y otros autores atribuyen que algunos o todos los efectos del envejecimiento pueden explicarse por cambios en la densidad del suelo que se llevan a cabo durante la compresión secundaria. Leonards (1972) en su estudio experimental de sedimentación de una arcilla, explica que el aumento observado en la carga de preconsolidación ocurrió simplemente por dejar la arcilla en compresión secundaria. Mendoza (2000), distingue adicionalmente que el proceso de compresión

secundaria se combina con un endurecimiento tixotrópico.

### Tixotropía

El diccionario define al término *tixotropía* como la propiedad que presentan ciertos gels de experimentar licuación cuando son sujetos a fuerzas vibratorias, y solidificarse nuevamente cuando las fuerzas cesan.

Terzaghi y Peck (1967) retomaron este término y le dieron una connotación propia para la mecánica de suelos. Refiriéndose a suelos arcillosos, cuando éstos se someten a una acción de remoldeo, existe un desequilibrio entre las fuerzas de atracción y repulsión de las partículas de arcilla. De esta forma, las partículas tienden a rotar y asumir configuraciones más estables con el tiempo. Así, la resistencia al esfuerzo cortante puede incrementarse, y se dice entonces que el suelo presenta *tixotropía*.

Posteriormente, Mitchell (1976) puntualiza otros aspectos. Explica la tixotropía como un proceso isotérmico, reversible y dependiente del tiempo que ocurre bajo condiciones de composición y volumen constante por medio del cual, un material se rigidiza con el paso del tiempo y se ablanda o se licúa con el remoldeo. Cabe señalar que el estudio del mecanismo tixotrópico tiene como punto de partida las mezclas diluidas agua-arcilla, cuyos resultados se extrapolan a los sistemas agua-arcilla muy concentrados como los suelos arcillosos reconstituidos.

La tixotropía es fundamentalmente un efecto estructural; es decir, esta propiedad cambia con el tiempo, como resultado de arreglos de partículas, estructura de agua adsorbida y distribuciones de iones en el fluido de poro. Adicionalmente, algunos efectos químicos pueden tomarse en consideración.

De acuerdo con Mitchell, la tixotropía se presenta cuando el balance de la fuerza neta de interpartículas es tal que el suelo se floculará. Cuando un suelo tixotrópico se remoldea o compacta, una parte de la energía externa aplicada se encarga de dispersar las partículas de arcilla a un arreglo uniforme y paralelo; esto es, la energía externa aplicada ayuda a las fuerzas de repulsión entre partículas, lo cual produce un sistema disperso. Las capas de agua adsorbida e

iones se distribuyen de acuerdo con este alto nivel de energía, resultante en una estructura similar a la mostrada en la Fig. 2.15a.

Sin embargo, tan pronto como la energía externa aplicada cesa, las fuerzas de repulsión netas decrecen, o dicho de otra forma, las fuerzas de atracción ahora exceden las fuerzas de repulsión para los determinados arreglos de partículas y distribuciones de agua. Como consecuencia, la estructura tiende a un ajuste de ella misma a través de una nueva condición de energía. La disipación de la energía puede estar acompañada por cambios en los arreglos de partículas, estructura del agua adsorbida y distribución de iones. Debido a que los cambios estructurales de este tipo son dependientes de los movimientos físicos actuales de partículas, agua e iones, ellos son dependientes del tiempo. Estos cambios estructurales internos se reflejan en el comportamiento físico del suelo (tal como el incremento en la resistencia).

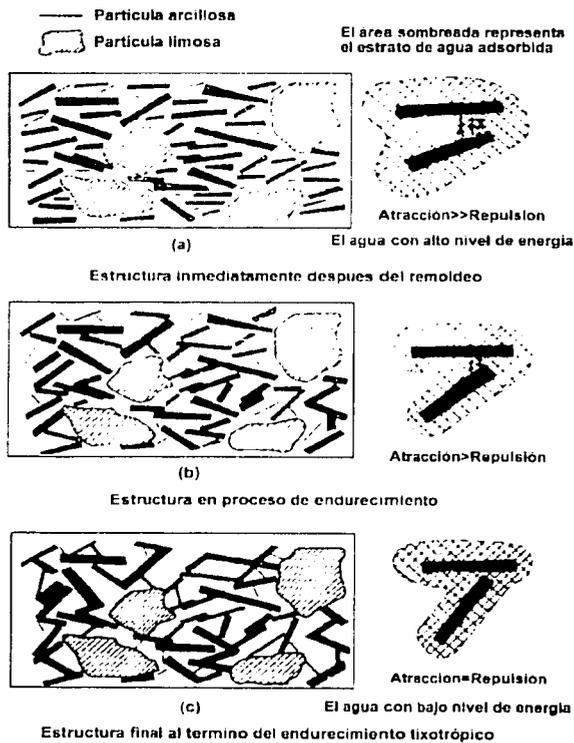


Figura 2.15. Diagrama esquemático del cambio estructural de un suelo tixotrópico (Mitchell, 1960)

El sistema puede ser visualizado como un exceso de energía interna para las nuevas condiciones. Posteriormente, comienza la disipación de esta energía. Debido a que, en el caso donde la atracción excede la repulsión, se requiere una energía mínima y hace que las partículas se flocculen. Si esto sucede, se requieren redistribuciones de iones en la doble capa y en la doble capa de agua propia. Simultáneamente a este proceso se forma una ligera estructura de agua adsorbida alterada, debido a que este proceso requiere un desplazamiento de partículas y movimientos de los iones de agua, no ocurren instantáneamente. Un flujo viscoso de agua está involucrado y el cual requiere tiempo.

De esta forma, la disipación del exceso de energía no es instantánea, sino que ocurre en períodos prolongados. Como resultado, los cambios en las propiedades son graduales. Un diagrama de la estructura del suelo en este nivel intermedio de tiempo después del remoldeo se muestra en la figura 2.15b, y la estructura final se presenta en la figura 2.15c. El tiempo requerido para alcanzar el equilibrio variará con la diferencia inicial entre la "estructura no remodelada" y la estructura equilibrada y la movilidad de las partículas, las cuales están relacionadas a factores tales como el contenido de agua, distribución del tamaño de partículas, forma de partículas, la facilidad del desplazamiento de las moléculas de agua adsorbida y la magnitud del esfuerzo efectivo durante el envejecimiento.

Schmertmann (1991), efectivamente, pudo comprobar cómo la movilidad de las partículas influye en la evolución de las propiedades de un suelo. Para ello, utilizó una cámara triaxial denominada IDS, desarrollada por él mismo. La cámara IDS permite separar los componentes básicos de la resistencia al esfuerzo cortante. El primer componente es la fricción, denotado por el símbolo  $\tan \phi''$  o simplemente  $\phi''$ . Dado que  $\phi'$  es el parámetro más básico de resistencia que  $\phi$ , debido a que considera el efecto de la presión de poro,  $\phi''$  representa el parámetro más básico de resistencia debido a que toma en cuenta el efecto de la estructura variable del suelo. Así mismo,  $c''$  es el parámetro más básico de cohesión e incluye los efectos de curvatura de la envolvente, así como alguna cementación o unión básica. La cámara IDS determina ambas,  $\phi''$  y  $c''$  en función de la deformación. Schmertmann la utilizó para observar posibles evidencias de cómo influye el movimiento de partículas en la resistencia a nivel macroscópico. Para esto realizó una serie de ensayos a compresión utilizando caolinita compactada, saturando sus poros con una

variedad de fluidos, con una consolidación isotrópica y sujetando todas las pruebas a la misma velocidad de carga. La figura 2.16 muestra los resultados para la componente  $c''$ , donde se observa que la viscosidad del fluido de poro no determina ningún orden. No obstante, en la figura 2.17 se observa un incremento dramático en el componente  $\tan \phi''$  para todas las deformaciones, con un decremento en la densidad y viscosidad del fluido de poro. Schmertmann concluye que mientras la viscosidad y densidad decrecen, el fluido de poro interfiere menos con el movimiento de partículas asociado con el envejecimiento. De esta forma, una baja viscosidad en el fluido de poro y baja densidad de partículas permiten una mayor movilidad de éstas en el proceso de envejecimiento que aquellos con alta viscosidad y densidad.

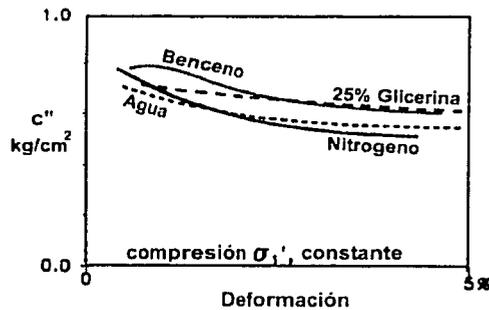


Figura 2.16. Movilización de  $c''$  a partir de pruebas de compresión, usando caolinita saturada con diferentes fluidos en sus poros (Schmertmann, 1991)

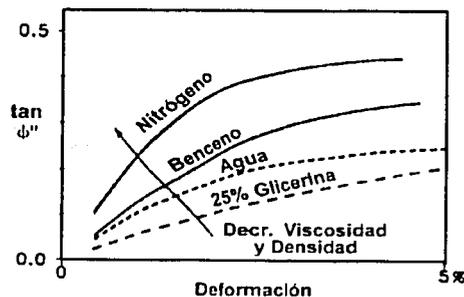


Figura 2.17. Movilización de  $\tan \phi''$  con referencia a las mismas pruebas de la figura 2.16 (Schmertmann, 1991)

En conclusión, cuando un suelo se remoldea o compacta se induce una estructura, la cual es compatible con los esfuerzos exteriores aplicados. Cuando los esfuerzos cesan, el suelo queda con un exceso de energía interna, la cual es disipada a través de pequeños movimientos de partículas y redistribuciones de agua hasta que se crea una estructura en equilibrio.

### **2.1.3 Factores sugeridos para el envejecimiento de la capacidad de carga en pilotes**

De los factores discutidos anteriormente y para el caso particular del envejecimiento en la capacidad de carga de pilotes embebidos en arcillas, se distinguen los siguientes:

- Consolidación local y secundaria.
- Tixotropía y solidificación.

Como se presentó anteriormente en los casos de envejecimiento en suelos, el proceso de hincado de un pilote induce remoldeo en la masa de suelo y genera a su vez, un incremento en la presión de poro en el suelo circundante al pilote. Con el tiempo, durante y después de la instalación, la presión de poro se disipa por un proceso de consolidación local radial, con el consecuente aumento en esfuerzos efectivos. Paralelamente, se lleva a cabo el mecanismo tixotrópico, por medio del cual, la estructura no equilibrada de la arcilla tiende a asumir configuraciones más estables con el tiempo —en función de la movilidad de sus partículas—, con viscosidad intergranular o compresión secundaria, aunado al proceso de solidificación en el cual ocurren cambios en la estructura de agua adsorbida que favorecen el contacto en los arreglos de las partículas de arcilla. Estos factores, en su conjunto, pueden explicar el aumento de resistencia con el tiempo, observado en la capacidad de carga en pilotes.

Con referencia a estos factores, sería deseable realizar su cuantificación para poder estimar la evolución de la capacidad de carga por efecto del envejecimiento. Terzaghi (1967) ya se refería a este hecho y consideró al fenómeno en términos de relaciones muy complejas y todavía impredecibles, cuya cantidad de incremento varía considerablemente con la naturaleza del suelo. No obstante, de todos los factores sugeridos, sólo se ha podido medir la disipación en la presión de poro durante el proceso de consolidación local. A ese respecto, Bogard y Matlock (1990) son los primeros en proponer correlaciones para predecir los tiempos requeridos para alcanzar diferentes niveles de resistencia, con base sólo en el mecanismo de consolidación local.

Cuantificar los demás factores y la magnitud con la cual contribuyen en la evolución de la capacidad de carga constituye un gran reto. Por lo anterior, en la mayoría de los casos sólo se ha procedido a realizar mediciones directas de la capacidad de carga y su evolución en el tiempo para las condiciones de interés de un sitio particular. Algunos de estos casos se presentan a continuación.

#### 2.1.4. Estudios experimentales previos para determinar el envejecimiento en la capacidad de carga de pilotes

Diversos investigadores, de forma directa o indirecta, se han encargado de estudiar el envejecimiento en la capacidad de carga de pilotes (Ravi (1980), Karlsrud y Haugen (1986), Thorburn (1980), Tavenas y Audy (1972), Bogard y Matlock (1990), Bullock (1999)). La mayor parte de estos estudios experimentales se ha realizado a escala real. Así mismo, se distinguen dos enfoques: envejecimiento a *corto* y a *largo plazo*.

##### Envejecimiento: Corto plazo

En este caso, el interés principal es conocer cómo evoluciona la capacidad de carga durante el proceso de hincado. Esto es con el fin de estudiar la hincabilidad de pilotes (selección de martillos y accesorios). Los ingenieros que están involucrados en estas tareas saben que durante las interrupciones de un hincado, el suelo adquiere resistencia transcurrido el lapso necesario para reiniciar operaciones. Por lo anterior, es importante conocer la resistencia que ofrecerá un pilote durante un hincado continuo y cuando se reinician las operaciones después de una interrupción. A este respecto Ravi (1980), realizó una recopilación de registros de pilotes hincados pertenecientes a nueve plataformas localizadas al norte del Golfo de México (región de EEUU). A partir de estos datos, muestra la reducción de la capacidad axial estática durante el hincado continuo. Así mismo, presenta el incremento en la capacidad de carga que tiene lugar durante las interrupciones del hincado. Para reportar lo anterior, lo expresa en términos de tres factores definidos como:

- 1) Factor de resistencia al hincado continuo,  $F_D = \frac{Q_S}{Q_D}$
- 2) Factor de resistencia para reinicio de hincado,  $F_R = \frac{Q_S}{Q_R}$
- 3) Factor de instalación,  $F_S = \frac{Q_R}{Q_D}$

Donde:

$Q_s$ , es la capacidad de carga axial estática última, calculada con métodos semiempíricos del estado de la práctica (API, Lambda).

$Q_c$ , es la capacidad de carga axial durante hincado continuo y.

$Q_h$ , capacidad de carga axial al reinicio de las operaciones de hincado.

Para determinar  $Q_c$  y  $Q_h$  existen tres métodos disponibles. El primer método consiste en graficar los resultados obtenidos en un análisis de ecuación de onda, correspondiente a una penetración específica del pilote, geometría, martillo y accesorios utilizados, ver Fig. 2.18. A partir de esta curva se obtienen los valores de  $Q_c$  y  $Q_h$  con base en los valores conocidos de  $N_c$  (número de golpes por pie de penetración en hincado continuo) y  $N_h$  (número de golpes por pie de penetración en el reinicio de hincado), ambos valores obtenidos en campo.

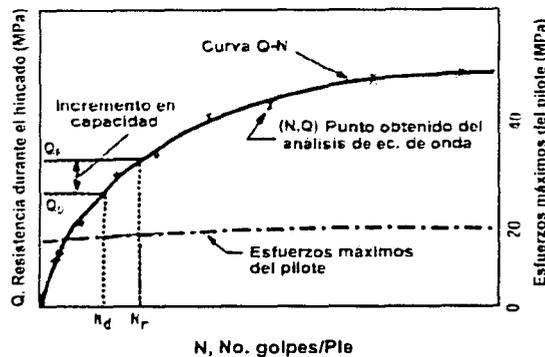


Figura 2.18. Representación gráfica de un análisis de ecuación de onda (Ravi, 1980)

El segundo método consiste en adquirir datos de fuerza-tiempo por medio de sensores electrónicos instalados en la cabeza del pilote y un sistema de adquisición de datos. Esta información se utiliza como datos de entrada para realizar el análisis de ecuación de onda, en vez del número de golpes de los registros de hincado.

En el tercer método se utilizan deformímetros y acelerómetros que se sujetan al pilote a pocos metros debajo de su cabeza. Las señales que generan se procesan en tiempo real, y proporcionan información de la energía del martillo y la máxima fuerza en cada golpe.

En el sentido físico,  $F_D$  mide la reducción de la capacidad de carga axial última durante el hincado continuo (si su valor aumenta mayor es la reducción).  $F_R$ ,  $F_S$  proporcionan una idea del incremento en la capacidad de carga si el pilote se detiene por un tiempo durante el hincado.

En la Tabla 2.1 se presenta parte de los datos recopilados por Ravi, durante la instalación de los pilotes en las nueve plataformas, así como los factores  $F_D$ ,  $F_R$ ,  $F_S$  calculados.

Tabla 2.1. Reducción e incremento en la capacidad de carga durante el hincado (Ravi, 1980)

Sitio	Diámetro (pulgadas)	Penetración (pies)	Retraso (hrs)	$Q_S$	$Q_D$	$Q_R$	$F_D = Q_S/Q_D$	$F_R = Q_S/Q_R$	$F_S = Q_R/Q_D$
1	42	160	9.0	1619	762	1512	2.125	1.071	1.984
2	48	152	60.5	1563	700	1825	2.233	0.856	2.607
3	48	219	6.2	3950	2187	2560	1.806	1.543	1.171
4	42	148	20.8	1800	450	1288	4.000	1.398	2.862
5	42	105	-	1288	1450	1888	0.888	0.682	1.302
6	42	125	2.3	1300	350	1037	3.714	1.254	2.963
7	48	125	14.3	1226	450	1600	2.724	0.766	3.556
8	42	149	-	1150	192	550	5.990	2.091	2.865
9	48	172	10.9	2000	812	1608	2.463	1.244	1.980

De los datos mostrados en la tabla anterior se observa que la capacidad axial del pilote durante el hincado es significativamente menor que la resistencia axial estática calculada con métodos de la práctica. Por otra parte, un retraso de varios días durante el hincado puede necesitar el uso de martillos de mayor capacidad.

Por último, Ravi propone una gráfica esquemática como un auxiliar para la selección de los martillos de hincado, Fig. 2.19. Esta gráfica toma en consideración todos los ritmos durante el proceso de hincado (continuo, retraso, reanudación) y su repercusión en la capacidad de carga ( $Q_S$ ,  $Q_D$  y  $Q_R$ ) con sus respectivos factores  $F_D$ ,  $F_R$ ,  $F_S$ .

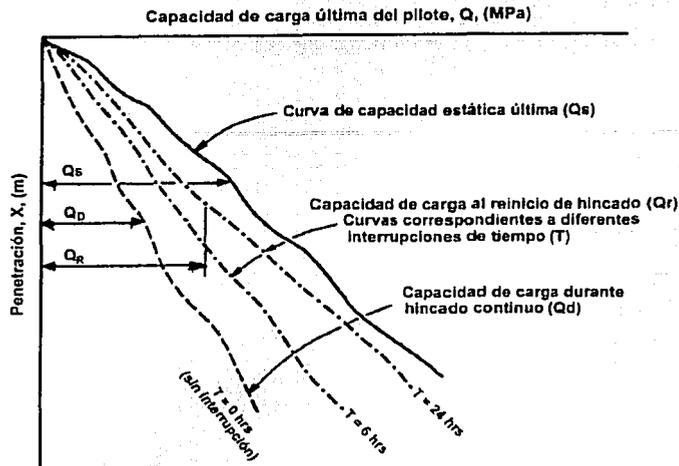


Figura 2.19. Ilustración de un enfoque racional para la selección de martillos de hincado (Ravi, 1980)

### Envejecimiento: Largo plazo

En cuanto al envejecimiento a largo plazo se han realizado varios estudios en los cuales se ha determinado la capacidad de carga, en lapsos comprendidos entre un mes y cuatro años. El estudio de Karlsrud y Haugen (1986) constituye un ejemplo con este enfoque, el cual ya se mencionó con anterioridad. Sin embargo, cabe destacar otro aspecto relevante de su investigación. Durante la ejecución de estos ensayos encontraron que el *efecto de falla previa* (la inducida por cargas estáticas) influye notablemente en la evolución de la capacidad de carga estática en el tiempo. Este efecto fue evidenciado en la ejecución de varias pruebas estáticas en el mismo pilote, pero con diferentes tiempos entre pruebas. En la figura 2.20 se ilustran los resultados de una serie específica de cuatro pruebas en un pilote no instrumentado. Las capacidades estáticas a partir de estas pruebas son representadas como una función del tiempo después de la instalación del pilote y se observa claramente el efecto de una falla previa.

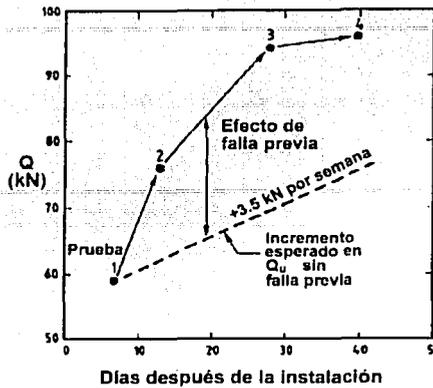


Figura 2.20. Influencia de falla previa en la capacidad estática de pilotes (Karlrsrud y Haugen, 1986)

De acuerdo con la figura, este efecto provoca un incremento adicional al incremento por envejecimiento en la capacidad de carga del pilote. Para comprender mejor esta situación, los investigadores realizaron pruebas similares con un modelo de pilote instrumentado. Lo anterior, con el propósito de obtener datos que explicaran el efecto de falla previa en términos del esfuerzo cortante, presión de poro y esfuerzo horizontal efectivo medido a lo largo de su fuste. La figura 2.21 muestra un ejemplo de distribuciones del esfuerzo cortante y esfuerzo horizontal efectivo en carga última en la primera y segunda prueba estática. El incremento de capacidad de carga, para este caso fue de 22%. Los autores sugieren que este incremento se puede explicar parcialmente por un incremento en el esfuerzo horizontal efectivo. La movilización de la "relación efectiva de fricción" en carga última ( $\tau_s'/\sigma_h'$ ) también se incrementa en un promedio de 0.50 a 0.60, debido a la falla previa.

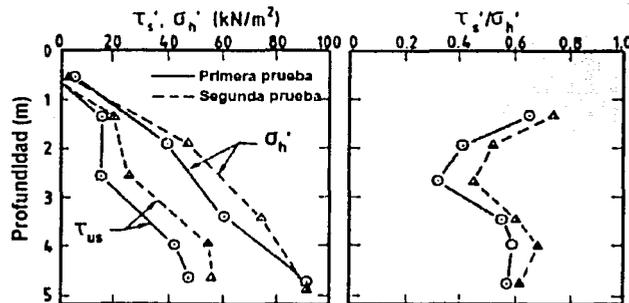


Figura 2.21. Distribuciones de esfuerzo cortante y esfuerzo horizontal efectivo en carga última (Karlrsrud y Haugen, 1986)

Los autores concluyen que este efecto no puede explicarse exclusivamente por procesos puros de consolidación local. Evidentemente, el mecanismo tixotrópico, de compresión secundaria y solidificación contribuyen en cierta medida.

Con un enfoque similar, Tavenas y Audy (1972) realizaron un estudio experimental de pilotes hincados en arena a escala real, el cual ya se mencionó previamente. No obstante, cabe destacar los siguientes puntos:

Se utilizaron pilotes hexagonales de concreto pretensado, con diámetro equivalente de 305 mm, y longitudes de 8.5 a 13 m. los cuales se utilizaron como cimentación de muros de retención. El objetivo principal del estudio fue investigar la precisión de las fórmulas de hincado para predecir la capacidad de carga. Durante la construcción se realizaron 45 pruebas de carga en pilotes. El diseño de las cimentaciones se basó en el hincado a escala real y el programa de pruebas efectuado antes de la construcción, incluyendo pilotes de concreto pretensado similares a los utilizados en la construcción. En este programa, se realizaron pruebas de carga estática en los pilotes, transcurridas 12 horas después de su hincado. Los resultados de las pruebas de carga en las diferentes etapas de la construcción fueron diferentes de aquellos obtenidos en el programa de prueba de pilotes e indicaron incremento en la capacidad de carga. En la figura 2.22 se muestra la relación entre el tiempo después de la instalación del pilote y la relación de la capacidad de carga de cada pilote ensayado con respecto a la capacidad correspondiente al pilote ensayado después de 12 horas del hincado.

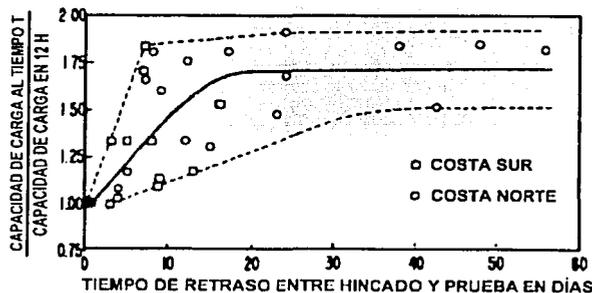


Figura 2.22. Incremento en la capacidad de carga con el tiempo, Québec Canadá, (Tavenas y Audy, 1972)

Los resultados de las pruebas indican una tendencia de incremento en la capacidad de carga alrededor del 70% durante las primeras dos o tres semanas.

Por otra parte, Thorburn (1980) realizó dos pruebas de carga axial estática en pilotes embebidos en un suelo aluvial arcilloso fuera de la costa. Los pilotes se fabricaron con concreto, con diámetro de 525 mm y una profundidad de hincado aproximada de 15 m. Las pruebas de carga estática se realizaron bajo la modalidad de "velocidad constante de penetración". En la figura 2.23 se muestra claramente la ganancia en la capacidad de carga última con el tiempo, para el caso de uno de los pilotes. Las observaciones se realizaron en un lapso de 66 días.

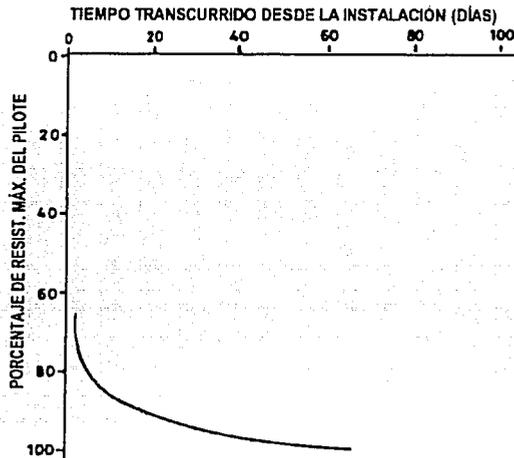


Figura 2.23. Cambio en la capacidad de carga con el tiempo (Thorburn, 1980)

A su vez, Bogard y Matlock (1990) llevaron a cabo un vasto programa de pruebas con modelos de pilotes instrumentados en arcilla normalmente consolidada en los sitios de Harvey y Empire, en Louisiana. El objetivo fundamental fue el entendimiento del comportamiento de pilotes cargados axialmente. Para ello obtuvieron datos de presión de poro, presión total lateral, carga y desplazamiento del pilote, para una variedad de cargas estáticas y cíclicas. Dentro de

estas pruebas se incluyó la observación de la capacidad de carga versus tiempo. Confirmaron, al igual que otras investigaciones, un incremento en la capacidad. Con base en sus registros de presión de poro, desarrollaron correlaciones para predecir los tiempos necesarios para alcanzar diferentes niveles de resistencia, como se comentó anteriormente. Así mismo observaron que el tiempo de consolidación local es función de la cantidad de suelo desplazado por el pilote durante su instalación. En otras palabras, un pilote de punta cerrada induce un mayor desplazamiento de suelo durante el hincado que uno de punta abierta. La interfaz remodelada que se genera es menor para el segundo caso, por lo cual, el proceso de consolidación local se realiza más rápido.

Un estudio reciente y de particular interés fue realizado por Bullock (1999). Su objetivo principal fue examinar el incremento en la capacidad de carga con el tiempo. En su investigación, además de realizar pruebas axiales estáticas en pilotes a escala real, consideró un estudio experimental de laboratorio. Para el primer caso, utilizó cinco pilotes de concreto pretensado, cuadrados de 457 mm, los cuales fueron hincados en cuatro sitios durante la construcción de un puente en Florida. El suelo estuvo constituido por arcillas y arenas. Los pilotes fueron instrumentados para medir carga axial y presión total a lo largo de su fuste, además de la instalación de piezómetros. La última prueba se realizó en un lapso de 1727 días después de hincado el pilote. Con los datos experimentales se obtuvo la curva de evolución de la capacidad de carga versus tiempo. Adicionalmente, se realizó el *rehincado* de ciertos pilotes para pruebas adicionales, cuyos datos sirvieron para una mejor definición de la curva. Con respecto al estudio de laboratorio, éste consistió en un modelo de pilote ensayado en una centrifuga. El pilote fue hincado en arena seca y ensayado en tensión transcurridas 6 horas después de su hincado. Sin embargo, no se observó ningún incremento en su capacidad de carga.

Recapitulando, cada investigador ha estudiado el efecto del envejecimiento en la capacidad de carga de pilotes, tanto en escala real como en modelos, en arcillas o arenas, con enfoques distintos en función del tiempo de observación, es decir a corto o largo plazo (instalación o vida útil). Como una contribución adicional para el entendimiento de este fenómeno, se presenta en esta tesis, los resultados de un estudio experimental de laboratorio. En él se puso énfasis en la evolución de la capacidad de carga durante el hincado, así como su evolución durante un lapso de 114 días. Las pruebas se realizaron en arcilla marina de la Sonda de Campeche, reconstituida en laboratorio. La descripción detallada de esta investigación se presenta en el siguiente capítulo.

*“Es de importancia para quien desee alcanzar una certeza en su investigación, el saber dudar a tiempo.”  
Aristóteles.*

## **3. ESTUDIO EXPERIMENTAL**

---

El estudio experimental para determinar el efecto del envejecimiento en la capacidad de carga a extracción de modelos de pilote embebidos en arcilla marina (motivo de esta tesis), forma parte de un proyecto de investigación realizado en forma conjunta entre el II UNAM y el IMP, el cual se titula: “Respuesta de la cimentación de una plataforma marina fija bajo el efecto de cargas cíclicas y dinámicas en la Sonda de Campeche”. En él se pretende estudiar principalmente el comportamiento de pilotes de fricción sujetos a carga axial y lateral estática y cíclica, con el uso de modelos físicos. Para ello se utilizaron las instalaciones del Laboratorio de Mecánica de Suelos del II UNAM. El diseño experimental se realizó de la siguiente forma.

### **3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL**

- 1) *Reconstitución de un suelo arcilloso marino.* Se reconstituyó una gran muestra de suelo marino traído de la Sonda de Campeche, en el cual se realizan los ensayos con los modelos de pilotes. Para alojar a la gran muestra, se diseñó y construyó un odómetro denominado O-97-5 junto con dos extensiones, las cuales se fueron retirando de acuerdo con el nivel de suelo que se tenía durante los procesos de sedimentación, consolidación por peso muerto, por presión neumática y finalmente por presión hidráulica. El seguimiento de tal reconstitución, así como sus resultados se presentan en diversas publicaciones Mendoza, et. al., 1998; Ibarra, 2002, entre otras.

- 2) *Sistemas auxiliares.* Para la experimentación con los modelos de pilotes fue necesario contar con los siguientes sistemas: aplicación de cargas, adquisición automática de datos e instalación del pilote. La descripción detallada de cada sistema se menciona en una tesis de maestría (Luna, 2002).
- 3) *Modelo de pilote instrumentado.* Se diseñó, construyó y calibró un modelo de pilote de fricción instrumentado, el cual cuenta con 21 sensores en su cuerpo agrupados de la siguiente manera: 4 sensores de carga axial, 4 de presión total, 4 de presión de poro y 9 de flexión. Con esta instrumentación se pretenden registrar las variables geotécnicas más significativas que rigen el fenómeno (Luna, 2002).
- 4) *Modelos de pilote sin instrumentación.* Se fabricaron cuatro modelos de pilotes sin instrumentación en su cuerpo, para su extracción a diferentes tiempos después de su hincado en la arcilla marina reconstituida, con el propósito de conocer el efecto de envejecimiento en la capacidad de carga. Un pilote adicional se utilizó para obtener resultados preliminares. Los resultados obtenidos se presentan en esta tesis.
- 5) *Ensayes preliminares.* Se efectuaron ensayos preliminares tanto en el modelo de pilote de fricción instrumentado como en el carente de instrumentación. Para el primer caso, los ensayos se ejecutaron con la finalidad de verificar la instrumentación del modelo y el funcionamiento de los sistemas auxiliares. Para ello se hincó en un suelo artificial (mezcla de caolín, bentonita, cemento y agua), realizándose pruebas bajo carga axial estática y cíclica (Luna, 2002). Para el modelo de pilote sin instrumentación, los ensayos se ejecutaron en el suelo arcilloso marino reconstituido en el odómetro O-97-5. Éstos consistieron en pruebas ante carga axial estática y cíclica con deformación controlada. Su propósito fue adquirir destreza suficiente para los ensayos subsecuentes, así como obtener elementos de juicio para diseñar las pruebas definitivas.
- 6) *Ensayes definitivos.* La primera serie de ensayos definitivos constituyó la observación del efecto del envejecimiento en la capacidad de carga por fuste, de los modelos de pilotes sin instrumentación. Posteriormente se planea un programa de ensayos enfocados a la observación de los fenómenos asociados a la capacidad de carga axial y lateral estática, cíclica y dinámica, con el modelo de pilote instrumentado.

- 7) *Validación de soluciones teórico-numéricas* con los resultados de los ensayos, lo cual será la pauta para definir estrategias de diseño de pilotes de fricción en ambientes marinos.

La presente tesis comprende el estudio experimental referente al efecto del envejecimiento contemplado en los incisos 4, 5 y 6.

El diseño experimental realizado corresponde a un modelo distorsionado de acuerdo con la clasificación de Meymand (1998). En un modelo distorsionado las condiciones de similitud entre modelo y prototipo no se cumplen cabalmente, debido a los parámetros no escalados. En efecto, cuando se estudian problemas donde los parámetros están gobernados por esfuerzos en el medio, debido al peso propio de los materiales, es prácticamente imposible cumplir con la similitud en ensayos con ambiente meramente gravitacional (1-g). Una manera de lograr la similitud entre modelo y prototipo, es realizar la experimentación en máquinas centrífugas, las cuales proveen al modelo de una aceleración artificial de varias veces la aceleración de la gravedad. Esto permite construir un modelo físico a escala, donde las características de los materiales son de fácil acceso y la aceleración a la que estará sujeto el modelo dependerá del factor de escala requerido entre el modelo y prototipo. Existen diversas desventajas en los ensayos con centrífuga; una de ellas y tal vez la más importante, es el alto costo de realizarlos.

No obstante, advirtiendo la importancia del estado de esfuerzos, se indujo una presión externa en la masa de suelo reconstituido, con el propósito de modelar un tramo de pilote embebido a cierta profundidad del fondo marino. Es importante comentar que aunque no se escalaron los valores de las variables atendiendo al análisis dimensional, la modelación distorsionada constituye una buena opción en el entendimiento del fenómeno.

A partir de estas condiciones se realizó el estudio experimental del efecto de envejecimiento en la capacidad de carga por fuste, con la arcilla reconstituida del sitio de la Sonda de Campeche. Como se hizo referencia en el capítulo anterior, este efecto puede observarse tanto en el proceso de hincado del pilote (corto plazo), como en su vida útil (largo plazo). En el primer caso, el mecanismo de consolidación local asociado influye de forma importante, aunque simultáneamente actúan los factores de envejecimiento, siendo éstos más notorios en el segundo caso.

La instalación, medición y control de los ensayos se efectuó con los sistemas auxiliares, descritos con todo detalle en (Luna, 2002); su recapitulación se presenta a continuación.

### 3.2 SISTEMAS AUXILIARES PARA LA EJECUCIÓN DE ENSAYES CON MODELOS DE PILOTE

#### 3.2.1. Descripción del sistema electroneumático de aplicación de cargas estáticas y cíclicas

El Sistema electroneumático de Aplicación biaxial de Cargas (SAC) fue adquirido a la compañía Geotechnical Consulting and Testing Systems y está constituido por actuadores neumáticos, celdas de carga externa, transductores de desplazamiento lineal LVDT, servoválvulas electroneumáticas, un módulo acondicionador de señales, una tarjeta Analógica/Digital/Analógica (A/D/A) para computadora, una interfaz de la computadora y un servoamplificador para el manejo de las servoválvulas. Con este sistema se pueden realizar pruebas bajo carga o deformación controlada en ciclo cerrado, así como la aplicación conjunta de cargas axiales y laterales.

En forma simplificada, el funcionamiento del SAC se muestra en la figura 3.1., distinguiendo dos partes: mecánica y electrónica. En la parte mecánica, se suministra presión a las servoválvulas, las cuales generan el diferencial de presión entre las dos recámaras (presión de la recámara superior  $p_s$  e inferior  $p_i$ ) del actuador neumático, generando una acción mecánica que registra el transductor y se transmite hasta el modelo. La respuesta de los actuadores depende del correcto suministro de aire a presión de las servoválvulas. La parte electrónica incluye las demás partes, que interactúan por medio de un *software* proporcionado por el fabricante. Es en este programa donde el usuario selecciona el tipo de prueba, ya sea carga o deformación controlada, generando un comando o función desde la computadora, (Fig. 3.1), que por medio de la tarjeta A/D/A se transforma de señal digital a analógica. Esta señal llega a la interfaz de computadora y al servoamplificador, controlando el funcionamiento de la servoválvula. Posteriormente, el transductor manda la señal de respuesta que llega al acondicionador de señales y a la interfaz de computadora, la cual es enviada nuevamente a la tarjeta A/D/A convirtiendo tal respuesta analógica a una digital. La respuesta se compara con el comando mediante un algoritmo de control denominado PID (*Proportional Integral Derivative*: Integración derivativa proporcional),

el cual corrige la señal de salida (comando) de acuerdo con la respuesta obtenida, cerrando así el ciclo. En todo el proceso se van registrando los datos de respuesta en la computadora.

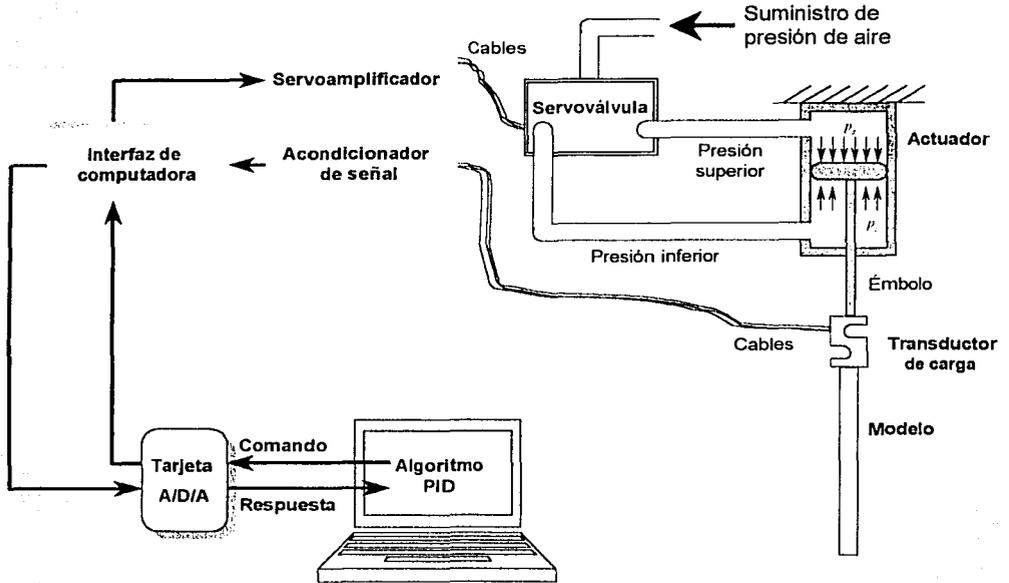


Figura 3.1. Esquema de funcionamiento del Sistema de Aplicación de Cargas (SAC). (Luna, 2002)

El sistema cuenta con dos servoválvulas, cada una controla un actuador o pistón de doble recámara para aplicar carga axial y lateral al modelo de manera simultánea, controlando su movimiento desde la computadora. La respuesta del sistema, en su arreglo completo, está dada por cuatro transductores: dos transductores de carga y dos de desplazamiento, uno de cada tipo dispuesto en cada actuador formando cuatro canales, registrando la carga y el desplazamiento aplicado al modelo por los actuadores.

Una de las ventajas del SAC con respecto a sistemas de ciclo abierto es el control del ensayo. dado que corrige en tiempo real la aplicación de la carga o desplazamiento de acuerdo con la función preestablecida. Asimismo, al recibir la señal del transductor de carga y de desplazamiento en un ensayo dado, se reduce el riesgo de rebasar la capacidad de los

transductores y/o dañar el modelo, dado que cuenta con límites de carga o desplazamiento, denominados *interlocks*.

Los límites en el SAC adquieren importancia en el ensaye de pilotes, ya que por descuido se puede obligar al actuador a la aplicación de una carga mayor a la capacidad de carga del modelo, obligando a un desplazamiento súbito del mismo. Esto se evita reduciendo el intervalo de desplazamiento del transductor por medio de sus límites, con lo cual, el equipo trataría de llegar a la carga programada pero se detendría al momento de rebasar el valor de desplazamiento prescrito.

Los ensayos pueden ser ejecutados en tres etapas distintas, utilizando para ello el programa de la computadora, permitiendo así la alternación de aplicación de cargas estáticas y cíclicas. Por ejemplo, se puede programar una etapa de carga axial estática monotónicamente creciente, una segunda etapa con carga cíclica y una tercera etapa con carga axial estática para descargar el modelo de pilote. Esta selección dependerá del diseño de una prueba en particular, así como de lo que se pretenda simular.

Las servoválvulas son una de las partes fundamentales del sistema. En ellas entra aire a presión y se genera un diferencial de presión entre sus salidas, gracias a que cuentan con una válvula de dos vías que se mueve de acuerdo al diferencial que se quiere aplicar. El movimiento del diafragma es controlado desde el servoamplificador y se mantiene en vibración antes y después de generar el diferencial.

La puesta en operación del SAC agrupa distintos aspectos, los cuales se comentan a continuación.

### **Marco de carga**

Este elemento sirve de reacción a los actuadores neumáticos y fue diseñado y construido con perfiles de acero estructural, con el fin de evitar la deformación del marco ante cargas altas. El marco se muestra esquemáticamente en la figura 3.2, donde se distinguen las columnas, la trabe superior, la trabe inferior, los apoyos y el arreglo de los actuadores axial y lateral.

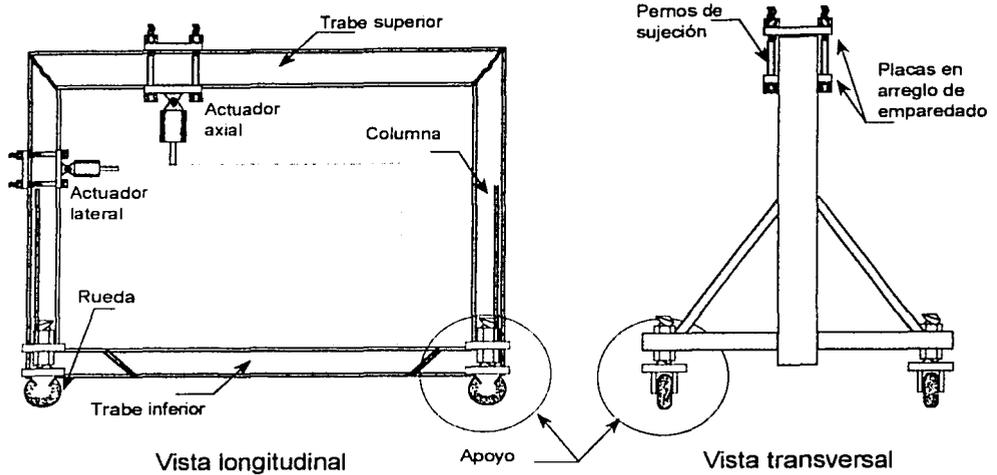


Figura 3.2. Esquema del marco de carga. (Luna, 2002)

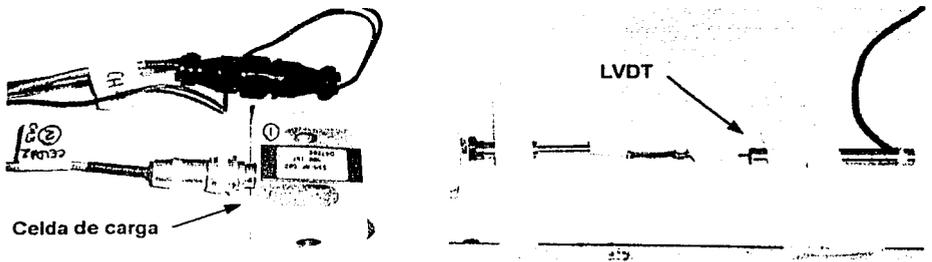
Este marco se diseñó para sujetarlo al odómetro O-97-5 por medio de una trabe inferior que pasa por debajo del mismo. además se le proveyó de ruedas fuera del plano del marco para asegurar su estabilidad, tanto transversal como longitudinal. El marco puede bajar su altura al momento de colocar la trabe inferior. y subirlo hasta llegar al contacto con la placa base del odómetro, gracias a que las ruedas cuentan con tornillos de doble tuerca.

Los actuadores se sujetan al marco por medio de placas de acero en forma de emparedado, aprisionando el perfil estructural con pernos largos. La razón de tal sujeción es la flexibilidad que se tiene de mover el actuador a lo largo de la trabe superior o de la columna del marco, pudiendo realizar los ensayos en cualquier posición en planta de la superficie del suelo.

Asimismo, puede colocarse en 8 posiciones diametrales distintas, con lo cual se pueden realizar 16 ensayos cercanos a la periferia del odómetro, además de ensayos en el centro o intermedios.

**Calibración de transductores**

El SAC cuenta con celdas de carga tipo "S" y medidores de desplazamiento denominados LVDT (*Longitudinal Vertical Displacement Transducer*), Fig. 3.3, siendo los transductores que envían la señal de respuesta o retroalimentación a la computadora.



**Figura 3.3. Transductor de carga y desplazamiento**

Las celdas de carga están basadas en *strain gages* en arreglo de puente completo, semejantes a las celdas de carga del modelo de pilote. Para su calibración se utilizó una balanza Toledo, aplicando carga y registrando el voltaje de la celda correspondiente. El programa cuenta con una ventana donde aparece el voltaje de cada transductor, el cual se relaciona a la acción mecánica ejercida. Los valores de las constantes de calibración de las celdas de carga se muestran en la Tabla 3.1, teniendo una respuesta lineal.

**Tabla 3.1 Pendientes de calibración para las celdas de carga del SAC**

Transductor	Pendiente kg/V	Canal	Capacidad kg
Celda de carga axial N/S: D50664	-47.285	1	+/- 400
Celda de carga lateral N/S: D47080	-22.941	3	+/- 200

Los transductores de desplazamiento funcionan por medio de campos electromagnéticos, contando con tres bobinas, una central que genera el campo y las otras en los extremos, la corriente generada en la bobina central viaja a través de una barra metálica interna y la reciben las bobinas externas, por lo que la posición de la barra es directamente proporcional al diferencial de corriente registrado en el transductor. Este diferencial de corriente se correlaciona con el

desplazamiento real ejercido y se grafica obteniendo las pendientes de calibración que se muestran en la Tabla 3.2. Estos transductores mostraron una respuesta lineal.

**Tabla 3.2 Pendientes de calibración de los LVDT del SAC**

Transductor	Pendiente mm/V	Canal	Capacidad mm
LVDT axial N/S: CD375-500	1.1459	2	+/- 10
LVDT lateral N/S: CD375-250	0.3713	4	+/- 3

Es importante el dotar al sistema con los valores de las pendientes y su signo, ya que el cambiarlas implicaría un movimiento no deseado del actuador.

Para los ensayos presentados en esta tesis, solo se utilizaron la celda de carga y el transductor desplazamiento correspondiente al actuador axial.

### Selección de parámetros PID

El PID es un algoritmo que calcula el error que se tiene entre el comando y la respuesta del sistema, corrigiendo el comando hasta que el error sea aceptable. El nivel de corrección del comando depende de las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ ; es decir, constantes de proporción (P), integración (I) y derivación (D) respectivamente. Al ser modificados permite que la respuesta se ajuste al comando adecuadamente.

Como se comentó previamente, el estudio del efecto de envejecimiento implicó la realización de ensayos de extracción, es decir, la aplicación de una carga estática axial monótonicamente creciente, cuya función en el SAC corresponde a una rampa. De esta forma, las constantes del PID se ajustaron mediante prueba y error hasta encontrar los valores adecuados para un ajuste satisfactorio entre el comando y la respuesta del sistema. El control de los ensayos se realizó con desplazamiento, y bajo esta modalidad correspondieron las siguientes constantes: (P=100, D=1, I=1), Fig. 3.4.

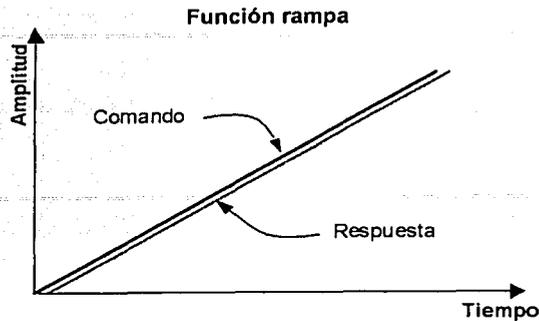


Figura 3.4. Comando vs. respuesta en el SAC con ajuste de constantes PID para una función rampa

### Ajuste de servoválvulas

Las servoválvulas están ajustadas a una frecuencia de vibración desde su fabricación, la cual debe modificarse físicamente con base en los ensayos que se pretenden realizar. Este ajuste se realiza dentro del servoamplificador con unos interruptores en serie; el arreglo de éstos determina la frecuencia de oscilación del diafragma de la servoválvula (GCTS Operating Instructions, 1999).

Para la realización de los ensayos presentados en este trabajo, se aumentó la frecuencia de vibración para tener una mejor respuesta del sistema, sin provocar oscilación en el actuador; lo anterior se logró a través del giro de un potenciómetro ubicado en la parte trasera del servoamplificador denominado *dither*.

### 3.2.2. Descripción del sistema de adquisición automática de datos

Se cuenta con un sistema fabricado por *National Instruments*, constituido por los componentes siguientes: a) Bloque terminal de conexiones que recibe los extremos de los cables con la señal de cada uno de los sensores, alimentados con una fuente de poder externa; b) Módulos multiplexores para la amplificación y barrido de señales de bajo nivel dispuestos en un chasis externo y relativamente cercano a los sensores; c) Chasis externo que aloja y conecta a los multiplexores; d) Tarjeta Analógica/Digital (A/D) que convierte las señales analógicas (voltajes) en señales digitales, insertada en una computadora; y e) Software *Lab View*, que es la plataforma de programación para registrar y procesar las señales digitales de los sensores.

Además de los elementos anteriores, el Sistema de Adquisición de Datos (SAD) cuenta con tarjetas de acondicionamiento de señal externas, diseñadas y construidas en el Departamento de Instrumentación del Instituto de Ingeniería, con la participación del Ing. Enrique Gómez; estas tarjetas reciben la alimentación desde la fuente de poder y la distribuyen a cada sensor de manera independiente. Asimismo, cada sensor se conecta a las tarjetas pudiendo ajustar su lectura inicial a cero, también de manera independiente, por medio de potenciómetros.

Esquemáticamente, el SAD se muestra en la figura 3.5, distinguiendo los elementos arriba descritos.

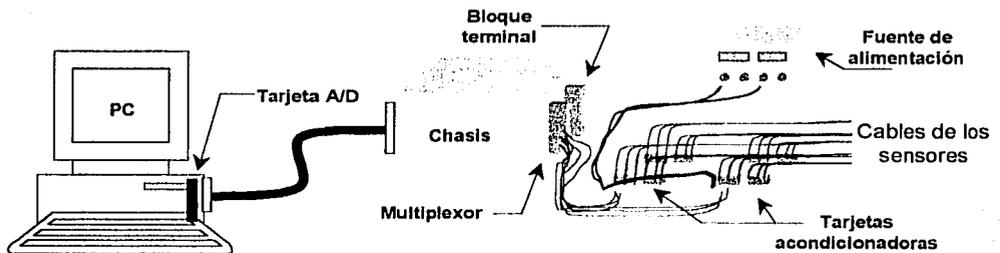


Figura 3.5. Esquema del Sistema de Adquisición de Datos (SAD). (Luna, 2002)

La descripción detallada de la puesta en marcha de este sistema (manejo físico de señales y programación) se encuentra en la tesis de Luna (2002).

Cabe destacar que para la ejecución de los ensayos presentados en esta tesis, se pudo prescindir del uso del SAD, dado que se utilizaron modelos de pilotes sin instrumentación en su cuerpo. El SAD se utiliza principalmente para el registro de todas las señales físicas provenientes de los sensores del modelo de pilote instrumentado. Para los modelos de pilote carentes de instrumentación, bastó sólo con el uso del programa del SAC para registrar las únicas variables: carga y desplazamiento en la cabeza. No obstante, para las señales originadas por la instrumentación del odómetro O-97-5, (consistente en dos celdas de presión total y tres transductores de presión de poro) sí fue necesario el empleo de este sistema.

### 3.2.3. Sistema de instalación del pilote

#### Marco guía y placas guía

Para guiar al modelo de pilote en el hincado, se implementó un marco guía formado por tubos de hierro galvanizado de 1" cédula 80 y conexiones del mismo material. El marco guía consiste en tres postes (tubos de hierro), dos de los cuales forman propiamente el marco y el tercero se ligó a estos dos en su parte superior por medio de un cuadro tubular, con el objeto de darle estabilidad en la dirección perpendicular; además, los postes principales tienen conexiones para alojar travesaños en seis elevaciones diferentes. Adicionalmente, se utilizaron unas placas guía, hechas de soleras de acero de  $\frac{1}{4}$ " de espesor, con baleros radiales que sirven para el apoyo y deslizamiento del pilote en el momento de su hincado. El marco guía y las placas guía, en su versión original, fueron diseñadas y construidas en otro proyecto de investigación, realizado en el Instituto de Ingeniería, (Jaime et al., 1991). Los baleros quedan en contacto con el fuste del pilote y a su vez, éstos se sujetan a las soleras. Estas placas guía tienen dos orejas que se sujetan a los travesaños del marco, procurando tener dos o tres niveles de sujeción. En la figura 3.6 se muestra el marco y la placa guía.

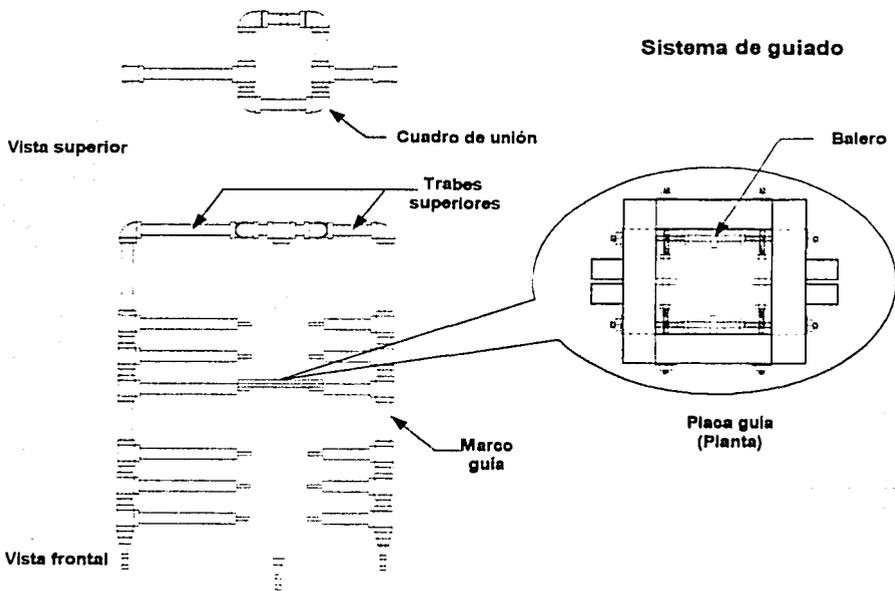


Figura 3.6. Marco guía y placas guía para la instalación del pilote

Este marco está diseñado para sujetarse en tres puntos diametrales del odómetro, precisamente en las orejas de sujeción. Cuando se revisó la geometría del marco original y las dimensiones del odómetro O-97-5, se realizaron modificaciones a los tubos del marco, ya que la longitud de la trabe superior era adecuada para un odómetro de mayor diámetro. Asimismo, se tuvo que cambiar la posición original del apoyo perpendicular del marco, para lograr que el cuadro de unión de los elementos quedara en la posición prescrita para los ensayos. La posición del marco guía se esquematiza en la Fig. 3.7.

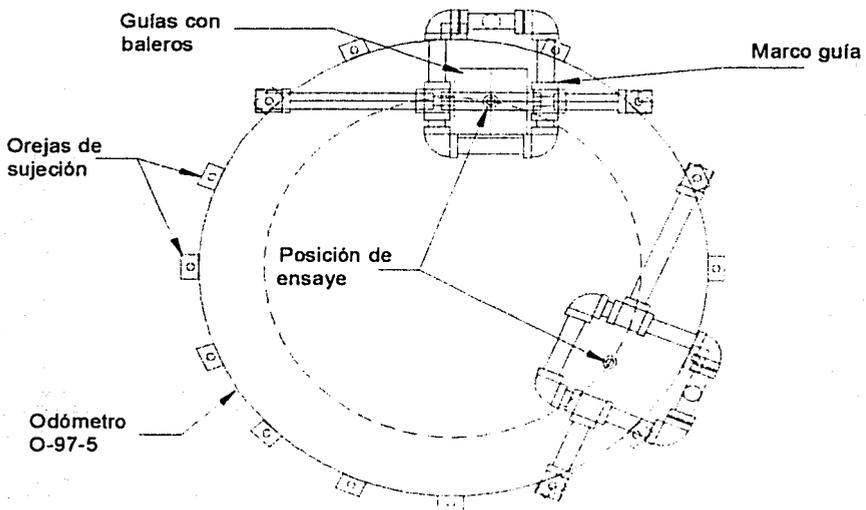


Figura 3.7. Posición del marco guía en el odómetro O-97-5 (Luna, 2002)

### Sistema de hincado

Se decidió que el hincado del modelo de pilote fuera a percusión, dado que en campo se realiza de la misma manera, además de que el hincado a presión se complicaba por los aditamentos adicionales que se hubieran necesitado.

El sistema consiste en una barra de acero inoxidable de 50 cm de largo y  $\frac{1}{2}$ " de diámetro, la cual sirve como guía para una masa cilíndrica de acero, de 3" de diámetro externo,  $\frac{9}{16}$ " de

diámetro interno y 8.6 cm de altura, y peso de 3 kg que puede deslizarse a lo largo de la barra. Adicionalmente se cuenta con otra masa cilíndrica de 4" de diámetro exterior, con la misma perforación concéntrica de 9/16" y una altura de 14 cm y 8.8 kg de peso. La barra se conecta a la cabeza del modelo de pilote con una extensión cilíndrica de 2" de diámetro y 33 cm de altura (necesaria para guiar el modelo de pilote durante el hincado) hecha de aluminio, donde se coloca un disco de neopreno y recibe el golpe de la caída de la masa. Esquemáticamente, el sistema se muestra en la figura 3.8, distinguiéndose los elementos anteriores.

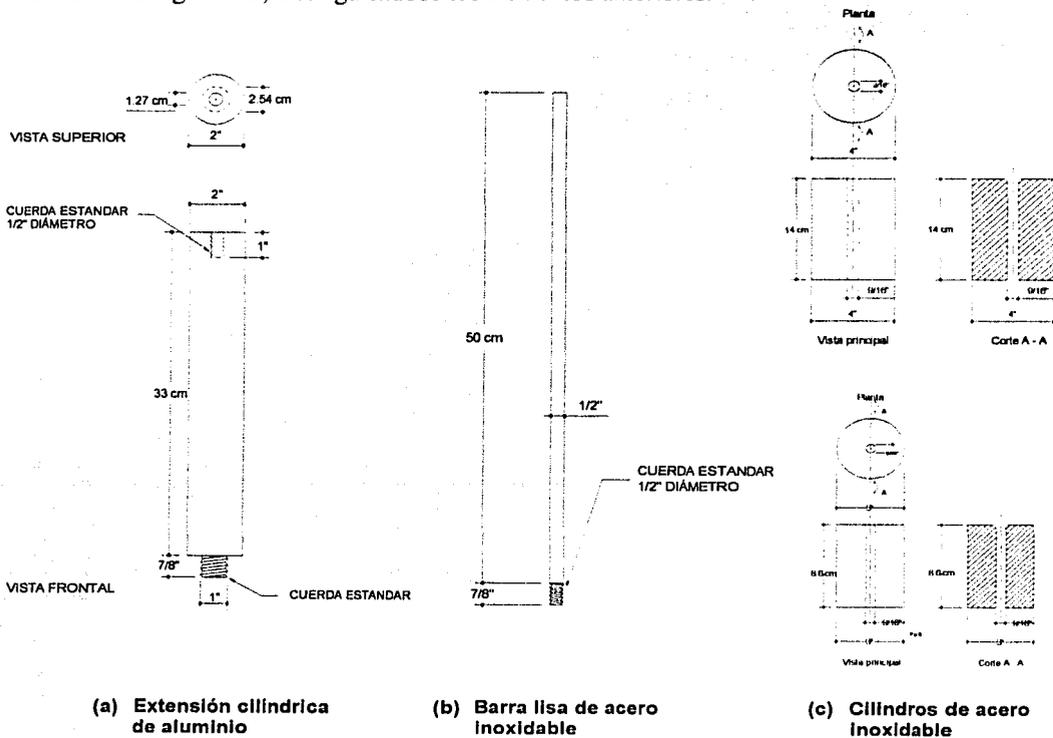


Figura 3.8. Elementos del sistema a percusión

El funcionamiento es simple, se conecta la extensión a la cabeza del pilote y después se une la barra de acero al soporte, se coloca un disco de neopreno y se pone el cilindro de acero que funciona como martillo o martinete; posteriormente se coloca un prisionero el cual se instala en la barra para fijar la altura de caída de la masa. Finalmente, la instalación es manual levantando y dejando caer la masa con un cierto ritmo, de manera similar a la prueba de penetración estándar.

En la figura 3.9 se muestra gráficamente este procedimiento para el hincado del pilote en el suelo marino reconstituido.

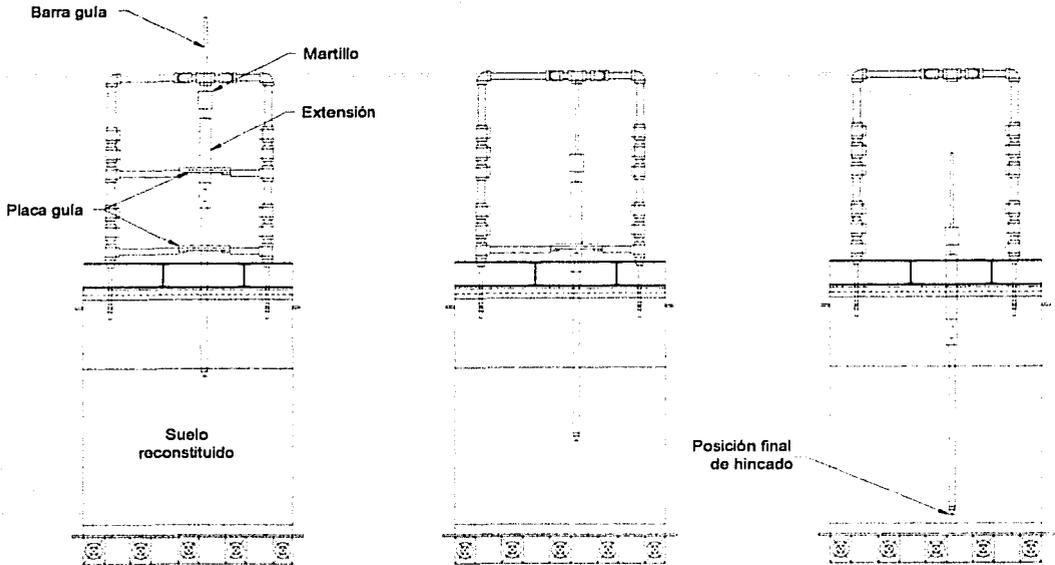


Figura 3.9. Proceso de hincado de un pilote en el suelo marino reconstituido

### 3.3 ODÓMETRO O-97-5

Como se comentó al inicio del capítulo, se construyó un odómetro gigante denominado O-97-5 para reconstituir un suelo arcilloso marino. Así mismo se instalaron sensores de presión total en la base, presión de poro en el interior a tres alturas y transductores de desplazamiento en la superficie, los cuales permitieron conocer la historia de estas variables durante la reconstitución del suelo. Su descripción detallada y análisis se encuentran en las tesis de grado Sánchez, 2000 e Ibarra, 2002. El resumen de la construcción del odómetro, así como su instrumentación se presentan a continuación.

#### 3.3.1. Construcción del odómetro O-97-5

La geometría del odómetro (diámetro y altura) se determinó a partir del volumen calculado de suspensión que se formaría para reconstituir el suelo; lo anterior se tradujo en un diámetro

de 97 cm, para una altura de suspensión de 2.6 m. De esta forma se diseñó un gran recipiente conformado por un odómetro de acero con altura de 122 cm y dos extensiones cilíndricas: una intermedia de acero de 81 cm de altura y una superior de fibra de vidrio de 80 cm de altura. El odómetro está fabricado con lámina de acero estructural con espesor de 1/8", la cual se roló y soldó a una placa base del mismo material de 1/2" de espesor y 110 cm de diámetro, formando un cilindro hermético por la base y su extremo superior abierto. El odómetro descansa en el piso sobre bases prismáticas de madera que permiten el libre paso de las mangueras de drenaje, cables de instrumentación y el ajuste del marco de carga en diferentes posiciones para los ensayos con pilotes. La extensión intermedia se fabricó con lámina rolada de acero del mismo espesor que la del odómetro. La extensión superior fue hecha con fibra de vidrio color natural con espesor de 5 mm, lo que permitió la observación del proceso de sedimentación y consolidación por peso propio a través de su pared translúcida, Fig. 3.10.

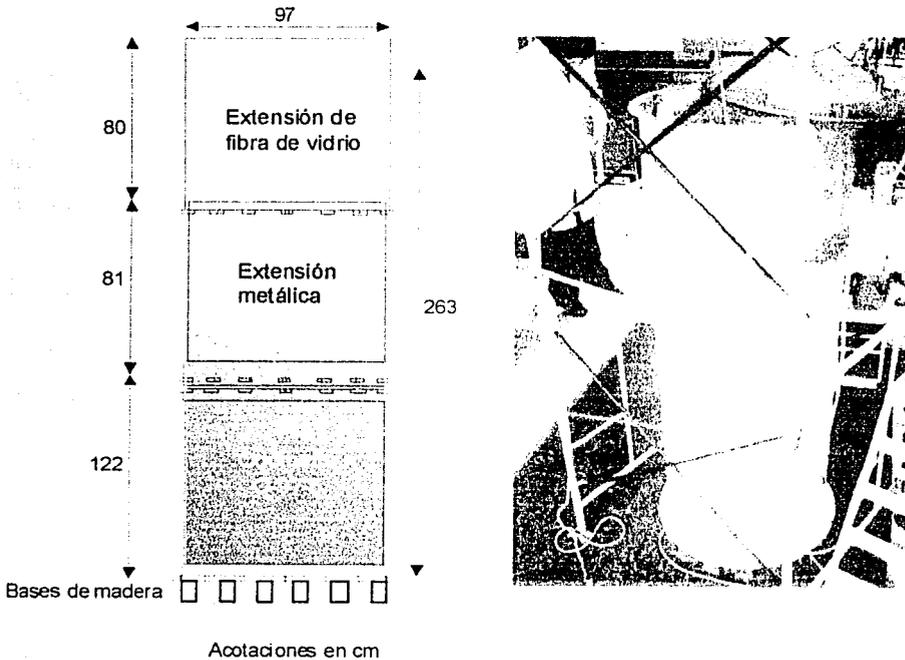


Figura 3.10. Odómetro O-97-5 y sus extensiones (Ibarra, 2002)

Finalizada la etapa de sedimentación y consolidación por peso propio, se retiró la primera extensión. Posteriormente se inició el proceso de consolidación por incrementos de carga, mediante la colocación de pesos muertos, aplicación de presión neumática con una membrana ahulada y finalmente con el auxilio de un gato hidráulico. Lo anterior obligó el retiro de la segunda extensión. La estabilización del asentamiento para el último incremento de carga condujo a una altura final de suelo de 80 cm.

Para la consolidación por incrementos de carga se fabricó una tapa con el objeto de servir de reacción a la carga externa aplicada al suelo. Para ello se consideró una tapa de acero reforzada mediante cuatro perfiles estructurales de sección I, de 5" de peralte, ubicados de forma radial y concéntrica, soldados a la placa circular de acero de 1/2" de espesor. Fig. 3.11.



Vista inferior



Vista lateral

Figura 3.11. Tapa de acero reforzada

Así mismo, se construyó un cabezal de carga formado por dos placas de acrílico con 96.4 cm de diámetro y refuerzos radiales del mismo material, con altura total de 10 cm. Su propósito fue distribuir lo mas uniforme posible la carga externa aplicada al suelo. La placa inferior en contacto con el suelo cuenta con múltiples perforaciones de 1/8" de diámetro que permitieron el drenaje durante la consolidación; así mismo, fue cubierta con fieltro para evitar la fuga de partículas finas durante este proceso, Fig. 3.12.

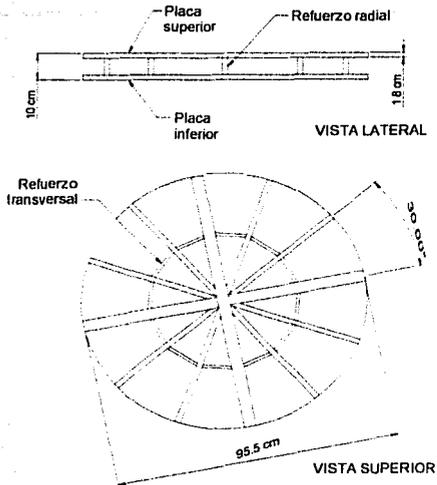


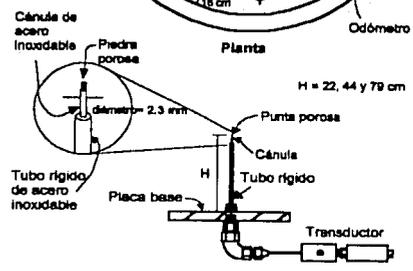
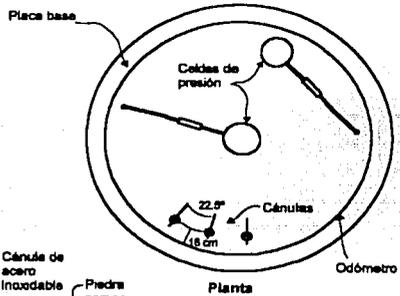
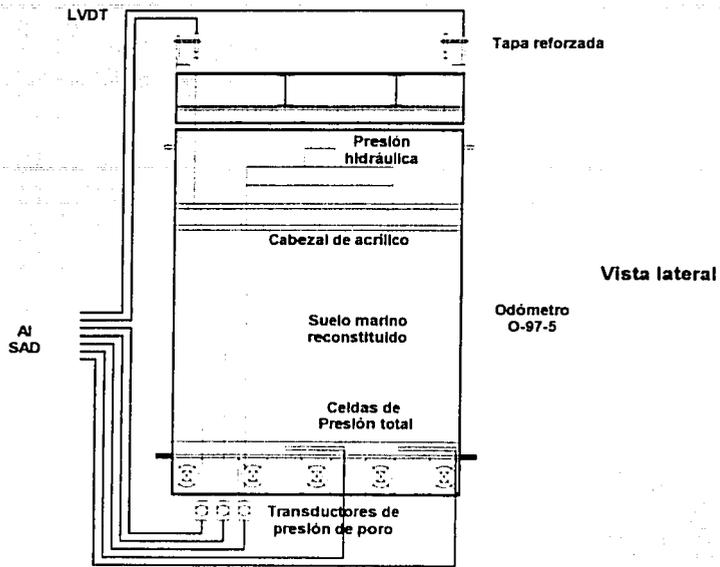
Figura 3.12. Cabezal de acrílico

Para evitar la corrosión provocada por la salinidad del suelo, todos los elementos de acero se protegieron exterior e interiormente con un baño de pintura blanca anticorrosiva.

### 3.3.2. Instrumentación del odómetro O-97-5

La instrumentación permanente instalada en el odómetro O-97-5 consiste en:

- Dos celdas de presión total, marca *Geokon* modelo 3500, con capacidad de 50 psi (3.5 kg/cm<sup>2</sup>). Éstas fueron instaladas al centro y tangente a la pared del odómetro sobre la placa base de éste y dentro de una cama de arena de 5 cm de espesor, Fig. 3.13.
- Tres transductores de presión de poro, marca *Sensotec* modelo 10/6076, con capacidad de 50 psi (3.5 kg/cm<sup>2</sup>). Éstos se ubicaron fuera del odómetro y conectados directamente a cánulas embebidas en la masa de suelo cuyas puntas porosas se localizaron a 21, 40.5 y 75 cm desde la placa base. La conexión hacia las cánulas se realizó a través de una cámara de saturación con válvulas de purga, la cual aseguró la eliminación de burbujas de aire en el sistema, Fig. 3.13.



Detalle de la conexión entre la cánula y el transductor de presión de poro

Figura 3.13. Instrumentación del odómetro O-97-5 (Mendoza, et. al., 1998)

La instrumentación no permanente en el odómetro consistió en la instalación de transductores de desplazamiento LVDT. Éstos se colocaron sobre la tapa reforzada y permitieron registrar el asentamiento durante todo el proceso de reconstitución del suelo mediante tres barras de acero dispuestas a 120° conectadas al cabezal de acrílico. Éstos fueron retirados una vez estabilizado el asentamiento por el último incremento de carga.

Todas las señales de presión total, de poro, así como desplazamiento axial fueron adquiridos mediante el SAD.

### 3.4 PREPARATIVOS PARA LA EJECUCIÓN DE ENSAYES CON MODELOS DE PILOTE

Con el propósito de efectuar los ensayos con modelos de pilotes en el odómetro O-97-5 fue necesario realizar una serie de preparativos tales como la formación de un suelo artificial, así como adecuaciones mecánicas y neumáticas descritas a continuación.

#### 3.4.1. Formación de un suelo artificial

La ejecución de un ensaye implica el hincado del modelo de pilote, la realización de la prueba misma, así como su extracción total fuera del odómetro. Esta última acción provoca una alteración en el suelo reconstituido debido al hueco originado por el pilote, y crea una zona de relajación de esfuerzos y alteración en su homogeneidad. Para evitar esta situación se emprendió la tarea de encontrar una mezcla artificial de suelo, con el fin de rellenar los huecos dejados por los pilotes durante los ensayos. Para esta mezcla se buscaron propiedades de resistencia y permeabilidad similares a las que posee el suelo marino reconstituido. En la formación de esta mezcla se experimentaron con los siguientes materiales: caolín, bentonita, cemento y agua, en diferentes proporciones. Con base en lo anterior, se propusieron tres tipos de mezclas:

Suelo artificial { Mezcla de caolín - cemento - agua.  
Mezcla de bentonita - cemento - agua.  
Mezcla de caolín - bentonita - cemento - agua.

### **Resistencia de las mezclas de suelo artificial. Pruebas de compresión simple**

Para determinar la resistencia adquirida de cada mezcla, se decidió efectuar pruebas de compresión simple. Se realizaron bajo la modalidad de carga controlada, aplicando un incremento a cada 2 minutos. Las pruebas de compresión simple siempre antecedieron a las pruebas de consolidación.

### **Permeabilidad de las mezclas de suelo artificial. Pruebas de consolidación**

El objetivo de estas pruebas fue determinar, principalmente, el coeficiente de permeabilidad de la mezcla de suelo artificial respectiva. Sin embargo, sólo se realizaron pruebas de consolidación en aquellas mezclas cuya resistencia a la compresión simple fue similar a la que se tiene en el suelo marino reconstituido.

### **Resistencia y permeabilidad del suelo marino reconstituido**

Debido a que el suelo reconstituido dentro del odómetro O-97-5 debe permanecer con la menor alteración posible para evitar su heterogeneidad, (y consecuentemente, obtener una mejor interpretación en los resultados durante los ensayos), en esta etapa no se puede muestrearse para evaluar resistencia o permeabilidad. No obstante, al inicio de los preparativos para la formación de la gran muestra contenida en el O-97-5 se reconstituyeron muestras del mismo suelo marino en dos odómetros pequeños, de 8.1 cm de diámetro y 16 cm de altura, y de 11.6 cm por 31.4 cm, respectivamente. Su procedimiento de formación fue el mismo seguido para la gran muestra. A partir de ellas, se obtuvieron especímenes para ser ensayados en pruebas de consolidación, compresión simple, UU y CU. Su objetivo fue determinar las propiedades de resistencia, hidráulicas y de compresibilidad generadas en el suelo donde se ejecuten los ensayos con los pilotes. De las pruebas de consolidación se determinó el coeficiente de permeabilidad para diferentes incrementos de esfuerzos. De estos resultados se infirió la permeabilidad de la muestra reconstituida en el odómetro gigante, y dado su estado de esfuerzos actuales se estima del orden de  $10^{-7}$  cm/s. Por otra parte, la relación esfuerzo-deformación obtenida en una prueba de compresión simple, arrojó una resistencia de poco más de 1.2 kg/cm<sup>2</sup>. La curva esfuerzo-deformación se presenta a continuación:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

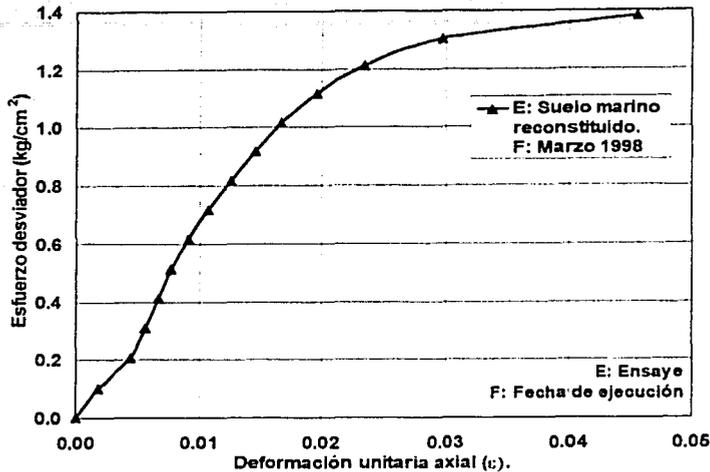


Figura 3.14. Curva esfuerzo-deformación en compresión simple del suelo marino reconstituido en un odómetro pequeño (Mendoza, et. al., 2002)

Por lo anterior, se buscó una mezcla de suelo artificial con un coeficiente de permeabilidad del orden de  $10^{-7}$  cm/s y que presentara una curva esfuerzo-deformación en compresión simple, similar a la mostrada en la Fig. 3.14.

**Mezcla de caolín-bentonita-cemento-agua**

De los tres tipos de mezclas y todos los intentos experimentales respectivos, se encontró satisfactorio el resultado de la mezcla compuesta por caolín, bentonita, cemento y agua, cuyas proporciones se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Mezcla de caolín-bentonita-cemento-agua(Mendoza, et. al., 2002)

Denominación de la mezcla	100 % Sólidos en peso			Contenido de agua w, %
	% Caolín	% Bentonita	% Cemento	
C-B-Ce-A	79	15	6	170

*Resistencia en compresión simple*

La relación esfuerzo-deformación de esta mezcla, para la prueba de compresión simple se muestra en la Fig. 3.15.

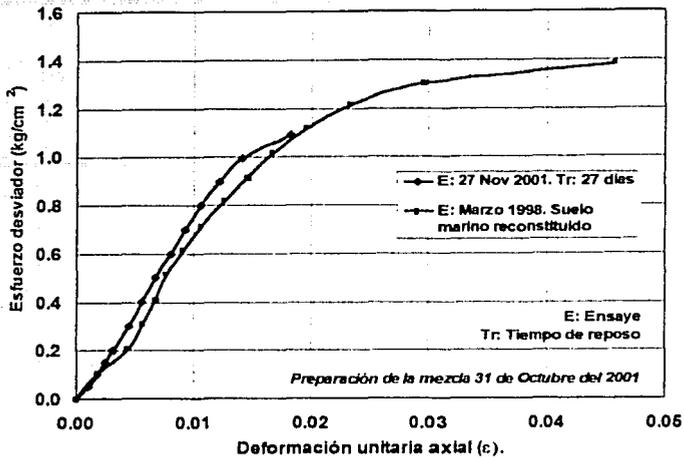


Figura 3.15. Curvas esfuerzo-deformación en compresión simple para diferentes lapsos de reposo. Mezcla: C-B-Ce-A-2 y la del prototipo: Suelo marino reconstituido (Mendoza, et. al., 2002)

Como se desprende de esta figura, el comportamiento esfuerzo-deformación de esta mezcla es muy parecida al suelo marino. Para determinar su permeabilidad se realizó una prueba de consolidación unidimensional.

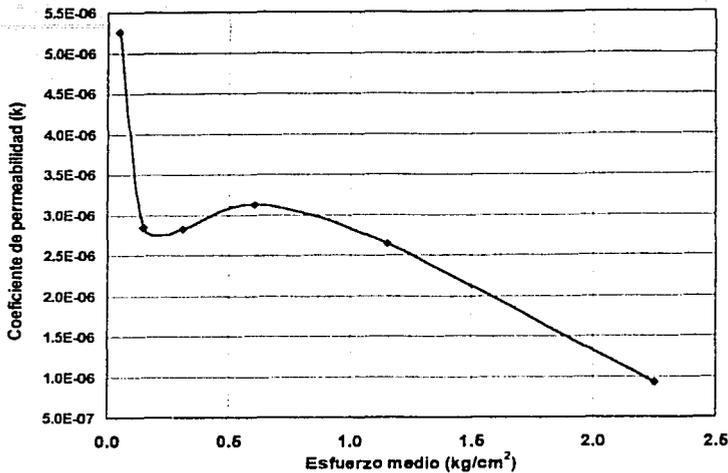
*Permeabilidad obtenida en prueba de consolidación*

Los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad, para diferentes incrementos de esfuerzo fueron los siguientes:

Tabla 3.4. Coeficiente de permeabilidad. Mezcla C-B-Ce-A2 (Mendoza, et. al., 2002)

$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\Delta \sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{med}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	$m_v$ (cm <sup>2</sup> /kg)	$k$ (cm/s)
0.000	0.000	-	-	-	-
0.094	0.094	0.047	1.216E-01	0.0433	5.262E-06
0.206	0.112	0.150	1.208E-01	0.0236	2.850E-06
0.412	0.206	0.309	1.131E-01	0.0250	2.829E-06
0.806	0.393	0.609	7.689E-02	0.0407	3.129E-06
1.499	0.693	1.152	2.171E-02	0.1216	2.640E-06
2.997	1.499	2.248	1.200E-02	0.0776	9.316E-07

Tiempo de reposo de la mezcla: 12 días



**Figura 3.16.** Variación del coeficiente de permeabilidad con el nivel de esfuerzo.  
Mezcla: C-B-Ce-A-2 (Mendoza, et. al., 2002)

De la Tabla 3.4 y la figura 3.16, se distingue que el coeficiente de permeabilidad de la mezcla alcanza valores del orden de  $10^{-6}$  cm/s; y en el último incremento, se obtiene el primer valor del orden de  $10^{-7}$  cm/s. Estos valores se aproximan a la permeabilidad del suelo marino reconstituido.

Por lo mencionado anteriormente, esta mezcla presentó las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante y permeabilidad que mejor se asemejan a las del suelo marino reconstituido. Se reitera que la mezcla cuenta con características hidráulicas y mecánicas similares a las del suelo marino, aunque debe señalarse que en su reestructuración juega un papel decisivo el cemento.

### 3.4.2. Modificaciones mecánicas

*Corte de la tapa de acero reforzada del odómetro.* Como se comentó anteriormente, la ejecución de los ensayos se lleva a cabo aplicando presión externa sobre la masa de suelo contenida en el odómetro. Para aplicar esta presión se utiliza un gato hidráulico de alta presión que reacciona contra la tapa reforzada. Dada la presencia de esta tapa, fue necesario efectuarle el corte de un sector, tal como se muestra en la Fig. 3.17, a fin de contar con el espacio necesario para las maniobras del hincado y la ejecución en sí del ensaye con el modelo de pilote.

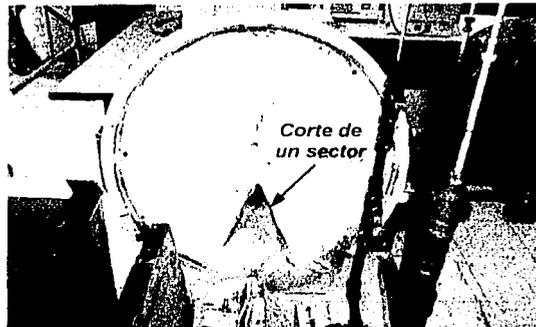


Figura 3.17. Corte de un sector circular en la tapa reforzada

*Perforaciones en el cabezal de acrílico.* Se realizaron doce perforaciones de 1 ½" de diámetro en la placa superior e inferior del cabezal, con equidistancia de 11 cm respecto a la pared del odómetro y separación centro a centro de 14.3 cm; se omitieron cuatro perforaciones debido a la presencia de la vigas de refuerzo principal que unen las placas superior e inferior, Fig.3.18. La modificación anterior se efectuó con la finalidad de permitir el paso de los pilotes por ensayar para descubrir los lugares necesarios donde se llevaron a cabo los ensayos de extracción, así como los que se efectuarán con el modelo de pilote instrumentado bajo condiciones de carga axial y carga axial cíclica. Cabe mencionar que se pueden ejecutar 16 ensayos con presión externa, bastando sólo con una rotación del cabezal para encontrar las cuatro posiciones restantes.

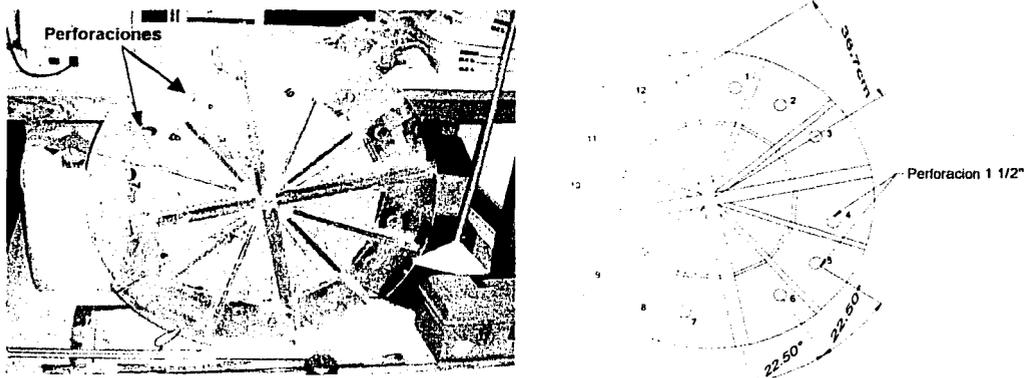


Figura 3.18. Perforaciones de 1 ½" en el cabezal de acrílico

*Instalación de ruedas para el andamio.* La colocación de ruedas ahuladas al andamio, fue con el objeto de mejorar su maniobrabilidad durante los ensayos, Fig. 3.19. Este andamio se utiliza alrededor del odómetro para poder maniobrar su tapa metálica de varias decenas de kilogramos, así como el cabezal plástico. Como este andamio debe intercambiarse con el marco de carga, fue considerado conveniente adosarle ruedas para su fácil movimiento.

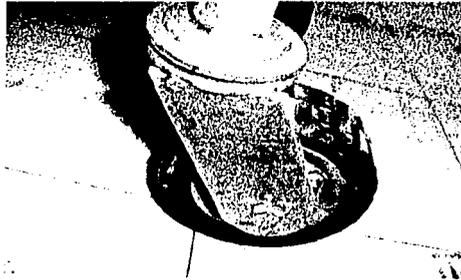
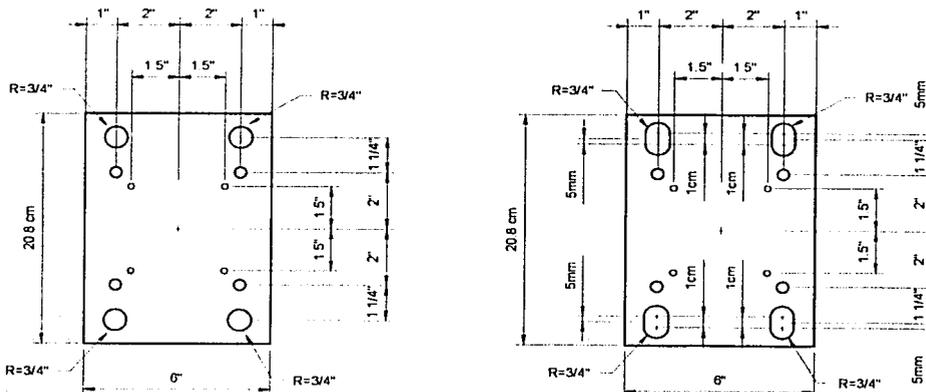


Figura 3.19. Instalación de ruedas (rodajas) en el andamio

*Realización de perforaciones oblongas en la placa metálica.* Se cuenta con una placa metálica que soporta al actuador axial neumático y que lo sujeta al marco de carga del odómetro gigante. Esta placa a su vez es sujeta por tornillos que atraviesan dicha placa en perforaciones, que inicialmente fueron circulares. A estas perforaciones se les dio una forma oblonga, tal como se aprecia en la Fig. 3.20, con el objeto de contar con cierta holgura para realizar el centrado del actuador en la posición del ensaye.



Pieza original.

Pieza modificada. Realizar corte de ampliación en los barrenos de  $\frac{3}{4}$ ".

Figura 3.20. Realización de perforaciones oblongas en la placa metálica

*Levantamiento del odómetro O-97-5.* El actuador neumático se encuentra instalado en el marco de carga del odómetro. Como se comentó previamente, este marco fue diseñado con una viga inferior desmontable con la que se cierra el marco, y que debe pasar por debajo del odómetro. Una vez atornillada al resto del marco y al odómetro, el marco reacciona contra el peso del odómetro durante la ejecución de los ensayos. Sin embargo, debido a que los polines de apoyo sufrieron compresión vertical, y dadas las imperfecciones del piso del laboratorio, la separación entre el piso y la base del odómetro fue insuficiente para el paso de la viga inferior. Lo anterior obligó a levantar el odómetro con gatos hidráulicos y calzarlo con unas maderas para incrementar el espacio requerido por la viga, ver Fig. 3.21.



**Figura 3.21. Levantamiento del odómetro con respecto al piso del laboratorio**

*Maquinado de los modelos de pilote no instrumentados.* Para obtener estos modelos de pilote, se empleó un tubo de hierro galvanizado de 6 m de longitud. A partir de éste se obtuvieron 5 tubos de 84.5 cm de longitud, en los cuales se realizaron cuerdas de tipo listón en sus extremos y se afinaron sus puntas, Fig. 3.22. Estos modelos se utilizaron para realizar los ensayos de extracción enfocados a estudiar el efecto de envejecimiento en la capacidad de carga por fuste.

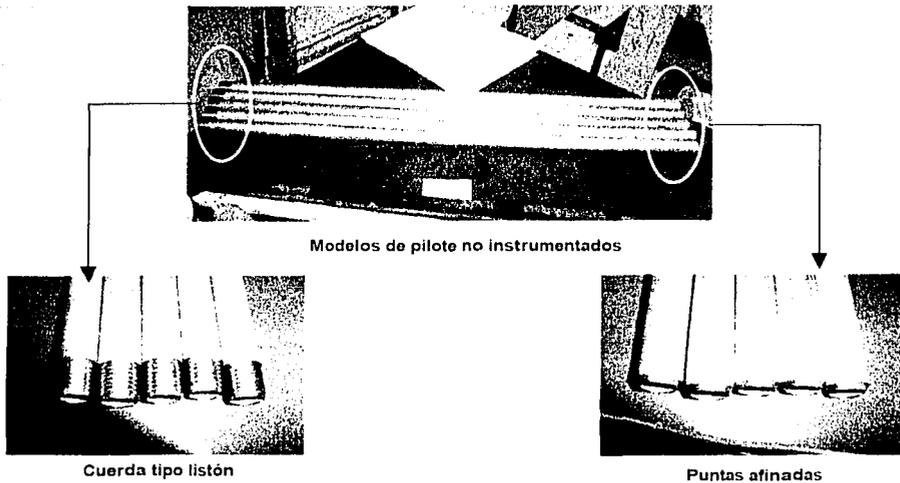
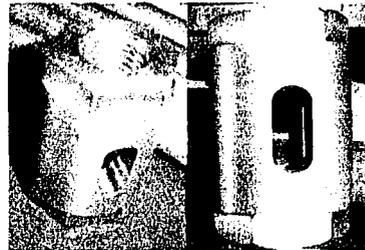
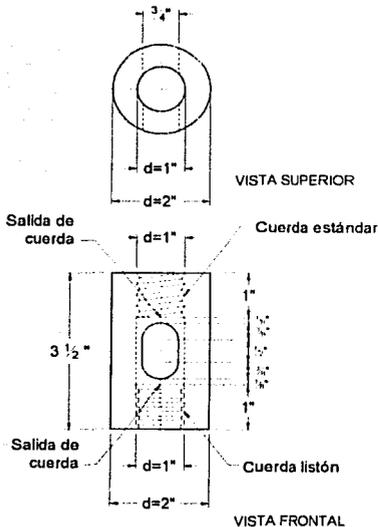


Figura 3.22. Fabricación de modelos de pilote no instrumentados

*Maquinado del cabezal del pilote.* Consiste en una conexión tipo cople entre el modelo de pilote y el sistema de hincado y aplicación de cargas; se eligió latón para su fabricación, Fig. 3.23.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.23. Cabezal tipo cople para los modelos de pilote no instrumentados

*Maquinado de una pieza de soporte para LVDT.* Se realizó la fabricación de una pieza de aluminio para soportar el transductor de desplazamiento LVDT, el cual mide el desplazamiento en la cabeza del pilote durante los ensayos, Fig. 3.24.

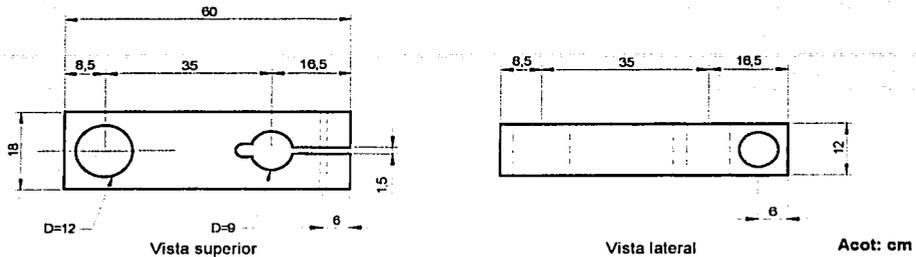


Figura 3.24. Pieza de soporte para el transductor de desplazamiento LVDT

### 3.4.3. Modificaciones neumáticas

*Adecuación de la línea de aire para los actuadores neumáticos de aplicación de cargas.* Para evitar posibles fluctuaciones en la presión o en el movimiento del vástago del actuador neumático, se decidió instalar un contenedor de aire con volumen de unos 15 litros; su objetivo fue proporcionar un mayor volumen de aire a presión regulada, que el que proporcionan sólo las mangueras, y así proveerle al sistema neumático una mayor estabilidad. Así mismo, se reemplazó el diámetro de la manguera de la línea de aire de  $\frac{1}{4}$ " a  $\frac{1}{2}$ " de diámetro, a partir del contenedor hasta el actuador neumático con el mismo fin, Fig. 3.25.

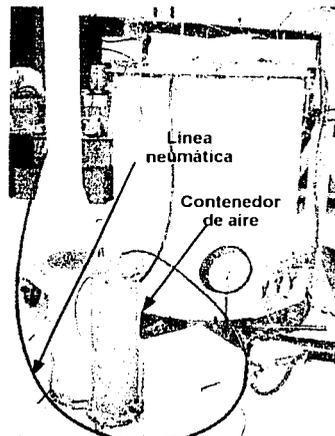


Figura 3.25. Adecuación de la línea de aire para los actuadores neumáticos (axial y lateral)

*Intercambio de conexiones en la línea de alimentación neumática.* Originalmente se instalaron cierto tipo de conexiones (codos, nipples, tees, conectores machos, etc) en la línea de alimentación neumática. No obstante, durante la ejecución de pruebas preliminares se observó la existencia de fugas de aire en determinadas conexiones. Lo anterior obligó a reemplazarlas por otras de mejor manufactura y principalmente en aquellas donde se necesita conectar y desconectar periódicamente debido a la instalación del equipo para la realización de ensayos.

#### 3.4.4. Aplicación de presión externa al suelo

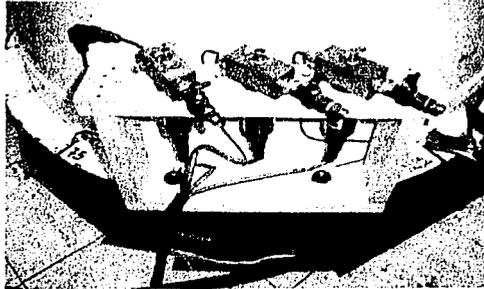
La presión externa más alta ejercida al suelo marino en proceso de reconstitución fue de  $1.5 \text{ kg/cm}^2$ . Una vez estabilizado el asentamiento en el tiempo, se obtuvo una altura final de suelo de 80 cm. Dado que se tenía que realizar modificaciones en la tapa metálica reforzada y el cabezal de acrílico, fue necesario la liberación de esta presión, Fig. 3.26.



**Figura 3.26. Liberación de la presión externa ejercida en el suelo marino reconstituido**

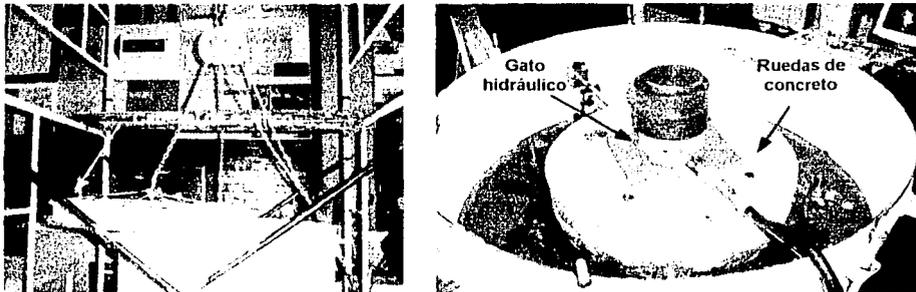
El suelo se mantuvo en esta condición casi cuatro meses hasta que se finalizaron las modificaciones en la tapa y cabezal. Durante este lapso se registró una expansión de 1.7 cm, medida con un flexómetro, a partir de la arista del extremo superior de odómetro.

Antes de aplicar nuevamente la presión externa se procedió a la reinstalación y calibración de los transductores de presión de poro, Fig. 3.27.



**Figura 3.27. Reinstalación de los transductores de presión de poro en el odómetro O-97-5**

Posteriormente se colocó el cabezal de acrílico y dos ruedas de concreto, cuya función es proporcionarle al gato hidráulico la altura necesaria para el contacto y la consecuente reacción contra la tapa reforzada. Fig. 3.28.



**Figura 3.28. Colocación del cabezal de acrílico y ruedas de concreto**

Se decidió aplicar una presión externa menor a la máxima experimentada por el suelo de  $1.5 \text{ kg/cm}^2$ , y de esta forma, obtener las condiciones de un suelo preconsolidado. La situación anterior se debe al predominio de suelos preconsolidados en la Sonda de Campeche (Fugro McClelland-PEMEX, 1996). De esta forma se procedió a ejercer una presión externa de  $1 \text{ kg/cm}^2$ , efectuado en dos incrementos de  $0.75 \text{ kg/cm}^2$  y  $0.25 \text{ kg/cm}^2$ , respectivamente, con la consecuente relación de preconsolidación de 1.5. Durante este proceso se registró la variación de la presión de poro, presión total, así como el asentamiento en dos puntos con separación angular de  $120^\circ$ .

### Medición de presión de poro

En la figura 3.29 se presentan las lecturas diarias obtenidas de la presión de poro en la parte superior, media e inferior del suelo marino reconstituido (75, 40.5 y 21 cm, respectivamente, a partir de la base del odómetro), correspondiente a la presión total externa de  $0.75 \text{ kg/cm}^2$ . Así mismo, como una referencia, se muestra la línea de presión hidrostática.

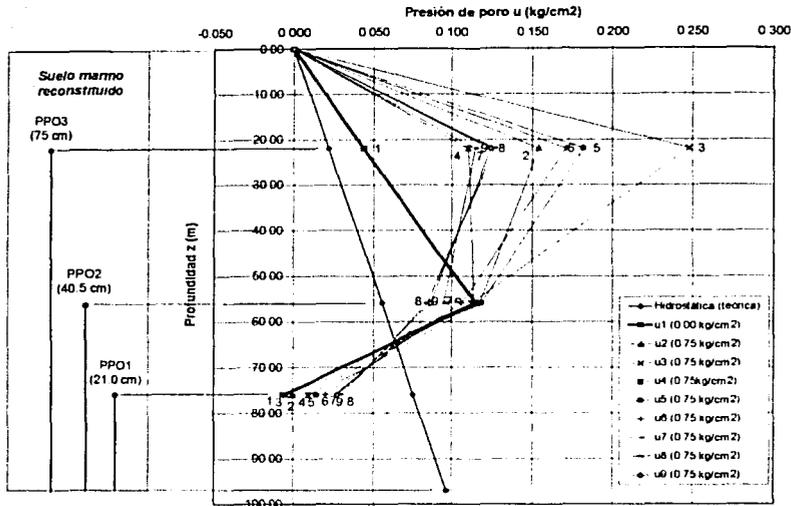


Figura 3.29. Variación de la presión de poro durante la aplicación de sobrecarga externa de  $0.75 \text{ kg/cm}^2$

Antes de aplicar la presión externa al suelo se registraron las lecturas iniciales de los transductores. Se esperaba que estas lecturas se encontraría próximas a la presión hidrostática de debido a la ausencia de sobrecarga externa. No obstante, en la parte superior e intermedia de la masa de suelo, las presiones de poro registradas fueron mayores a la hidrostática (del orden de 200% en ambos casos). En la parte inferior se registró una presión prácticamente nula, cuya presión hidrostática relacionada es  $0.076 \text{ kg/cm}^2$  (lo cual indicó cierto comportamiento de succión). Al aplicar la presión externa de  $0.75 \text{ kg/cm}^2$ , en la misma figura 3.29 se observan comportamientos erráticos, consistentes en ascensos y descensos de presión sin un patrón de orden definido para las tres alturas, durante el lapso de aplicación de esta sobrecarga, alrededor de una semana. Para el nivel de 75 cm, la última lectura adquirida reportó un incremento del 280% con respecto a su lectura inicial. Análogamente, para el nivel intermedio se observó un decremento del 75%, y finalmente, el nivel inferior un aumento del 280%.

La figura 3.30 muestra la variación diaria de la presión de poro correspondiente a la presión total externa de  $1 \text{ kg/cm}^2$ , tomando como referencia las últimas lecturas de presión de poro de la etapa de sobrecarga anterior.

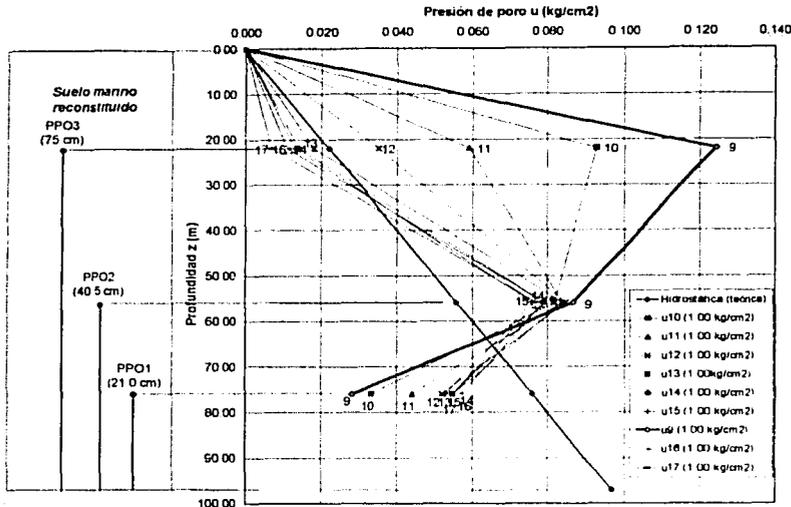


Figura 3.30. Variación de la presión de poro durante la aplicación de sobrecarga externa de  $1 \text{ kg/cm}^2$

En esta figura se distingue lo siguiente: (1) en la altura de 75 cm, la presión de poro disminuye gradualmente hasta llegar a un valor del 30% de la presión hidrostática; (2) para el nivel intermedio, la presión disminuye aunque es 140% mayor que la hidrostática; (3) finalmente, la parte inferior del suelo registra un aumento gradual de la presión aunque debajo de la presión hidrostática.

Para los dos casos de sobrecarga externa, el comportamiento de la presión de poro presenta variaciones muy erráticas y difíciles de comprender, considerando este hecho desde sus lecturas iniciales. Lo anterior sugiere la posibilidad de atribuir este comportamiento a errores de medición debido a fallas en la instrumentación. Cabe destacar que el estado físico de los transductores es correcto, ya que durante su calibración se comprobó su buen funcionamiento, además de obtenerse constantes de calibración similares a las registradas al inicio de su operación. Las fallas

entonces, posiblemente se presentan en la parte de la instrumentación interna instalada en el odómetro, es decir, cánulas, tubos interiores y piedras porosas. Tal vez se trate de un taponamiento en los poros de las piedras, así como en el interior de la línea de saturación, debido a la precipitación e incrustación de sales marinas.

Por lo anterior, las lecturas de presión de poro que se registran no se consideran confiables para realizar alguna interpretación física.

### Medición de presión total

En la figura 3.31 se presenta la evolución de la presión total registrada por las celdas central y tangente a la pared del odómetro ubicadas en su base del mismo, debido a la aplicación de la presión externa.

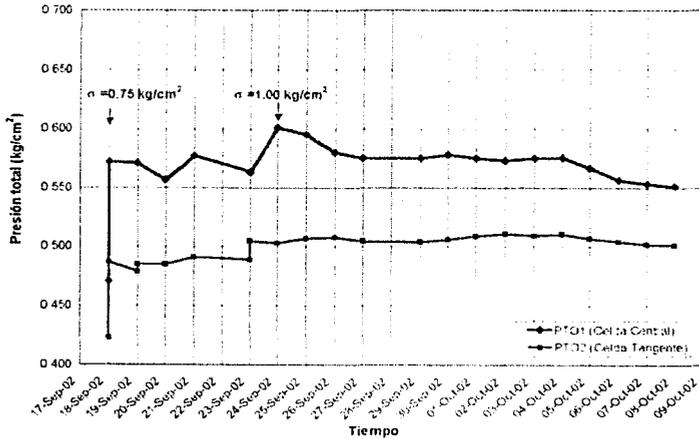


Figura 3.31. Variación de la presión de total durante la aplicación de sobrecarga externa

Para la sobrecarga de  $0.75 \text{ kg/cm}^2$  se registró un ligero incremento de esfuerzos en la celda central y tangente del 21% y 15%, respectivamente, tomando como referencia sus valores iniciales. Posteriormente se tomaron lecturas en las celdas por espacio de cinco días, observándose en ambos casos ciertas fluctuaciones. Cuando se aplicó la presión final de  $1 \text{ kg/cm}^2$ , la celda central experimentó un incremento del 7% con respecto a su último valor. No obstante, la celda tangente permaneció sin cambios. A partir de ese momento se continuó el registro de lecturas por un lapso de 14 días, distinguiéndose una estabilización de presión en la celda tangente y una relajación de ésta para la celda central.

Se observa que en el centro se presenta una mayor concentración de esfuerzos, lo cual es acorde con la teoría de distribución de esfuerzos en la masa de suelo. Por otra parte, la fricción generada entre el suelo y la pared del odómetro disminuye el esfuerzo vertical aplicado, lo cual se traduce en un esfuerzo mayor al centro y menor en la periferia. Si se considera que la instrumentación no sufrió alteraciones debido a efectos del tiempo (desde su instalación hasta la aplicación de esta presión externa), entonces se puede afirmar que aproximadamente el 50% de la sobrecarga externa se disipa por la fricción en las paredes del odómetro, transmitiéndose el otro 50% restante hacia el fondo.

### Medición del asentamiento

Finalmente, en la figura 3.32 se muestra la evolución del desplazamiento axial del suelo marino reconstituido, adquirido en dos puntos, debido a la sobrecarga de  $0.75 \text{ kg/cm}^2$  y  $1 \text{ kg/cm}^2$ , observándose los primeros indicios de estabilización después de 22 días desde la aplicación de la primera sobrecarga, con una compresión promedio total de 1.6 cm. Naturalmente, durante este proceso existió disipación de la presión de poro manifestada por la expulsión y drenado del agua por la base del odómetro y parte superior de las perforaciones en el cabezal de acrílico. El drenaje de agua concluyó aproximadamente después de un mes de ser tomadas las últimas lecturas del asentamiento.

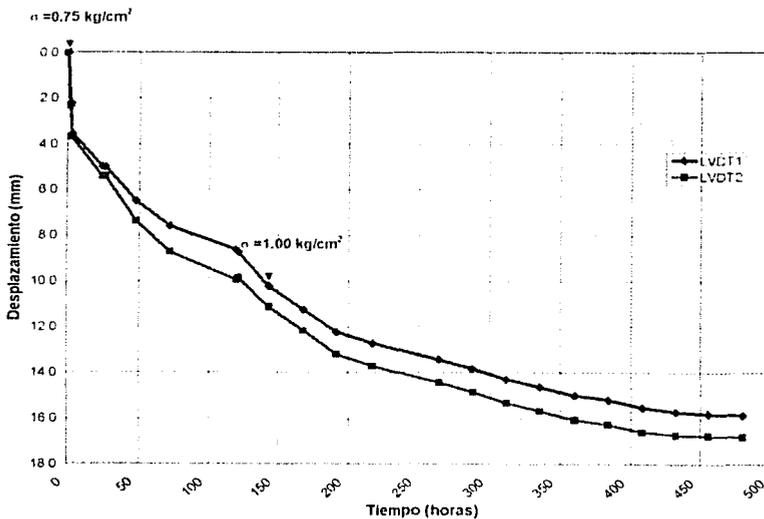


Figura 3.32. Variación del asentamiento durante la aplicación de sobrecarga externa

### 3.5 ENSAYES DE EXTRACCIÓN DE MODELOS DE PILOTE

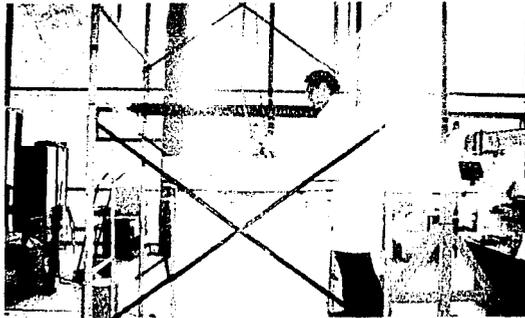
Concluidos todos los preparativos y estabilizado el asentamiento y drenado del agua del suelo reconstituido, se procedió a la ejecución de los ensayos con modelos de pilotes no instrumentados. Como se comentó anteriormente, éstos se utilizaron con el propósito de conocer el efecto de envejecimiento, tanto en la resistencia durante el hincado (corto plazo), así como en la capacidad de carga por adherencia-fricción después del hincado (largo plazo). Para ello se hincaron los modelos de pilote por impactos y, particularmente, en uno de ellos se realizó con interrupciones programadas en un lapso definido, a fin de observar la evolución de la resistencia durante el proceso de hincado; así mismo, se efectuó la extracción controlada de cada uno de ellos transcurridos diferentes lapsos de reposo después de su hincado. Se optó por realizar extracciones para medir sólo la evolución del aporte por fuste, dado que el trabajo de los pilotes en plataformas marinas es por fricción, debido a los desplazamientos permisibles para su diseño; por otra parte, en virtud de la falta de instrumentación en el cuerpo del pilote no se puede discernir el aporte por fuste y punta si se hubieran realizado pruebas de compresión. Por lo anterior, se realizaron ensayos de extracción preliminares, definitivos y adicionales; las únicas variables medidas fueron la carga y el desplazamiento en la cabeza del pilote, obteniéndose las curvas carga – desplazamiento respectivas. El procedimiento de ejecución de los ensayos, así como los resultados preliminares, definitivos y adicionales obtenidos se describen a continuación.

#### 3.5.1 Procedimiento de ejecución de ensayos

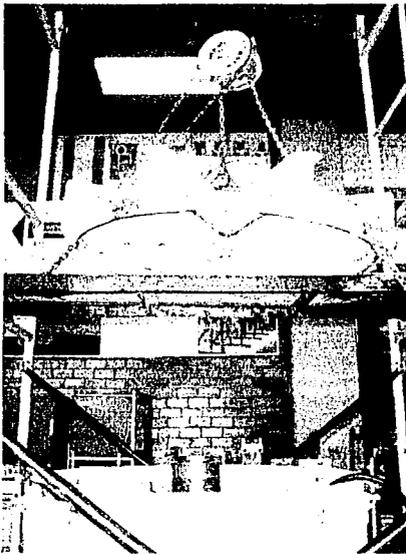
El procedimiento general para la ejecución de todos los ensayos consistió en los siguientes puntos:

*Hincado:*

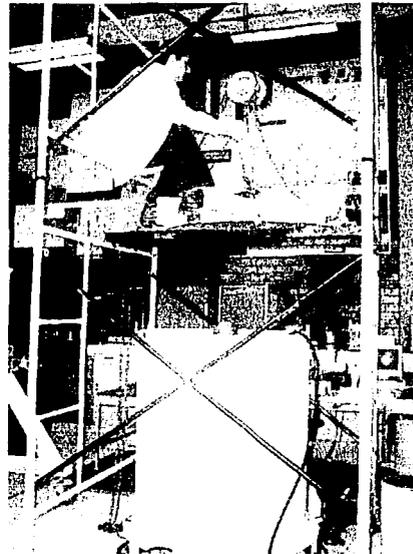
- 1) *Posicionamiento de la tapa reforzada en el lugar de la prueba.* Puesto que el hincado de cada pilote se realizó en una de las perforaciones practicadas al cabezal de acrílico, fue necesario ubicar la abertura realizada en la tapa reforzada en cada una de éstas. Antes de realizar la maniobra de posicionamiento de la tapa, se retiró la presión externa; posteriormente se levantó ésta utilizando un polipasto con capacidad de 600 kg instalado en la parte superior del andamio o torre y se procedió a su rotación para hacer coincidir la abertura con la perforación del cabezal, Fig. 3.33.



(a) Sujeción de la tapa reforzada al polipasto



(b) Levantamiento y rotación de la tapa



(c) Posicionamiento en la posición de ensaye

Figura 3.33. Posicionamiento de la tapa reforzada en el lugar de la prueba

- 2) *Aplicación de presión externa al suelo.* Una vez posicionada e instalada la tapa reforzada en el odómetro, se aplicó nuevamente la presión externa, Fig. 3.34. Cabe destacar que la realización del punto 1, así como éste, se efectuaron de la forma más rápida posible, a fin de minimizar la expansión del suelo, cuyo valor generalmente fluctuó de 1 a 2 mm. Su valor se registró con dos micrómetros instalados en el interior del odómetro y en contacto con la superficie del cabezal; sus lecturas sólo se utilizaron como una referencia para conocer el tiempo necesario para la estabilización del asentamiento por la recompresión después de la expansión, el cual comúnmente fue de un día.

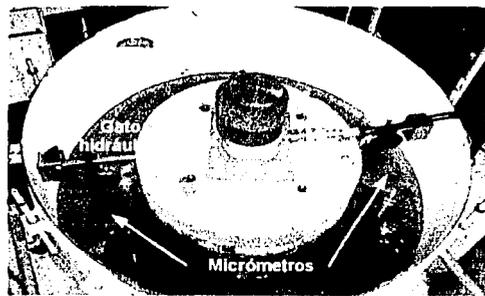
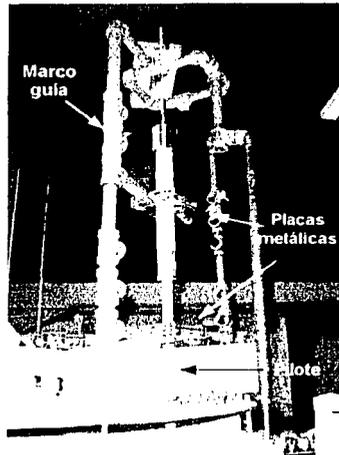


Figura 3.34. Preparación para la aplicación de presión externa al suelo

- 3) *Instalación del marco guía y placas metálicas en el odómetro para el hincado.* Para realizar el proceso de hincado se instaló el marco guía y las placas metálicas, con la finalidad de procurar la verticalidad del modelo de pilote. Fig. 3.35.



(a) Vista frontal del marco guía



(b) Marco guía y placas

Figura 3.35. Instalación del marco guía y placas metálicas en el odómetro para el hincado

4) *Hincado del modelo de pilote*. Se realizó con la instalación de la extensión cilíndrica, la barra guía, disco de neopreno para inducir amortiguamiento, y la utilización del martillo o masa golpeadora. Fig. 3.36.



(a) Proceso de hincado

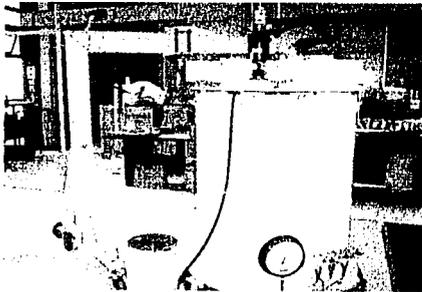


(b) Conteo del número de golpes a cada 10 cm de penetración

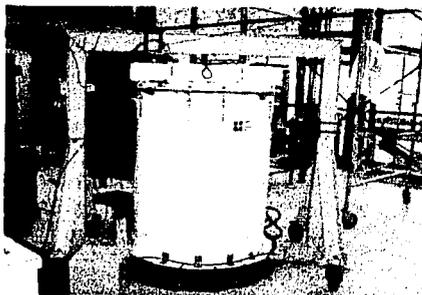
Figura 3.43. Proceso de hincado del modelo de pilote

*Extracción:*

- 5) *Instalación del marco de reacción en el odómetro.* Hincado el pilote, se efectuó la instalación del marco de reacción, colocando la viga inferior por debajo del odómetro y conectándola al marco para cerrarlo. Fig. 3.37.



(a) Colocación de viga inferior y traslado del marco

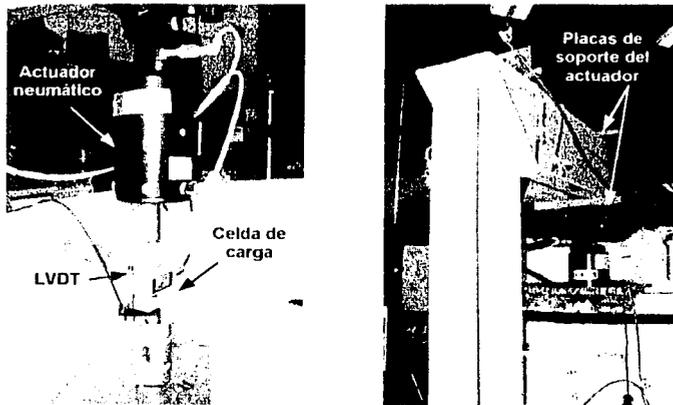


(b) Conexión de la viga inferior al marco de reacción

Figura 3.37. Instalación del marco de reacción en el odómetro

6) *Instalación del actuador neumático axial y el transductor de desplazamiento LVDT.*

Previo a la instalación del actuador neumático, se acopló la celda de carga en el vástago de éste, junto con la pieza de soporte del LVDT. Ésta última contó con una conexión tipo niple, a través de la cual se efectuó la instalación del actuador con el cabezal del pilote. Este procedimiento se realizó procurando la menor perturbación del pilote ya hincado. El actuador, a su vez, se sujetó al marco de reacción por medio de las placas de soporte y finalmente se instaló el LVDT en su pieza respectiva, y tanto éste como la celda de carga se conectaron al SAC. Fig. 3.38.



**Figura 3.38. Instalación del actuador neumático axial y el transductor de desplazamiento**

7) *Extracción del pilote.* Programada la función específica en el SAC (función rampa), se ejecutó la extracción del modelo de pilote, asegurando suficiente desplazamiento para la observación de su falla última. Fig. 3.39.



(a) Programación de la prueba en el SAC

(b) Ejecución de la prueba

**Figura 3.39. Ejecución del ensayo de extracción**

### 3.5.2 Ensayes de extracción preliminares

Se realizaron ensayos preliminares con el objeto de verificar el funcionamiento del Sistema de Aplicación de Cargas (SAC) y de Adquisición de Datos (SAD), así como la detección de posibles fallas en la instalación de todo el equipo (marco de reacción, actuador axial y LVDT). Estos ensayos se realizaron en un solo modelo de pilote, denominado 1. Su hincado se realizó a percusión, con variación en la energía aplicada debido al cambio en la altura de caída de la masa y la utilización de dos masas con pesos diferentes, tal como se observa en la Tabla 3.5 y Fig. 3.40. La variación impuesta estuvo enfocada a encontrar una relación de penetración del orden de 1cm/golpe. Lo anterior se logró aproximadamente con el uso de la masa de 8.79 kg, y una altura de caída de 20 cm.

Tabla 3.5. Registro de hincado: Ensaye preliminar

No. Golpes N	Despl. (cm) $\delta$	Altura caída (cm)	Masa utilizada (kg)	Hincado (cm/golpe)
107	7.60	3	2.983	0.075
10	2.30	20		0.230
10	3.20	30		0.320
10	6.80	12	8.790	0.680
13	12.50	20		0.962
11	9.00	20		0.818

Fecha de hincado: 15/Oct/02

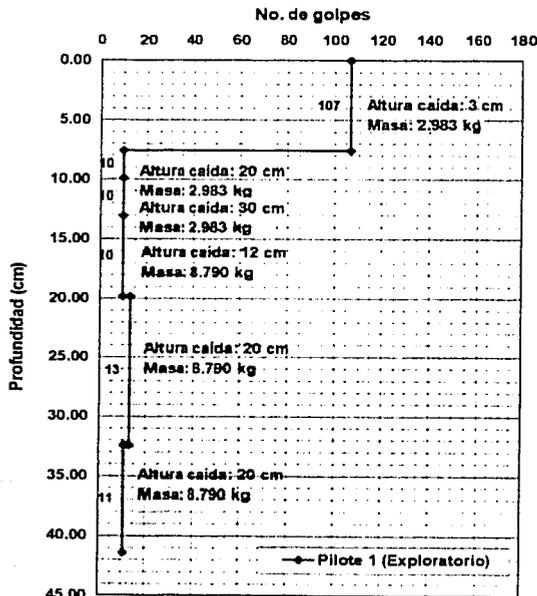


Figura 3.40. Proceso de hincado a percusión del pilote 1

El primer problema detectado fue la instalación incorrecta del marco de reacción, el cual consistió en una ligera falta de horizontalidad en la viga superior; lo anterior indujo cierta inclinación del actuador, que para fines prácticos fue insignificante, sin embargo suficiente para provocar un desplazamiento inadecuado en su vástago. En consecuencia, el marco se niveló a través de sus tornillos de doble tuerca instalados en sus apoyos, logrando así la verticalidad del actuador. En ensayos posteriores, se verificó esta condición antes del inicio de cada prueba.

Durante la ejecución de las primeras pruebas se observó la existencia de un desplazamiento del actuador en su conjunto, causado por una holgura del perno en la conexión de sujeción del actuador al marco de reacción; lo anterior provocó un error de medición del desplazamiento en la cabeza del pilote, toda vez que los ensayos se controlaron con desplazamiento, siendo ésta medición afectada por el desplazamiento adicional del actuador. Dada la situación anterior, se suspendieron los ensayos y se procedió al ajuste de la conexión en el taller mecánico. Existieron algunos descuidos tales como la presencia de ligeras fugas de aire, las cuales fueron selladas y evitadas en ensayos posteriores.

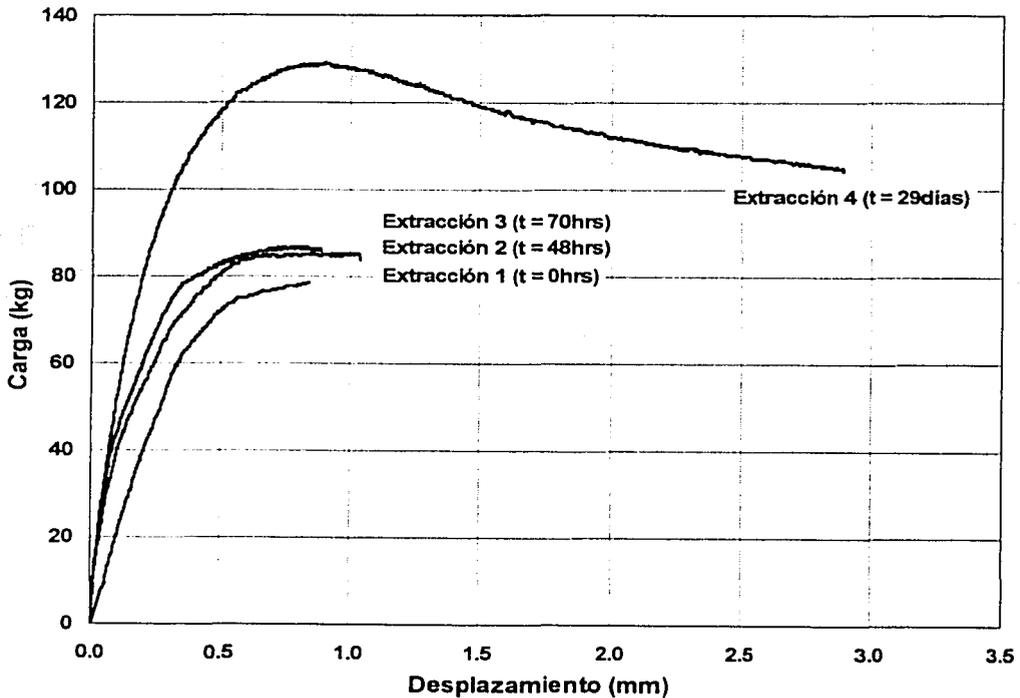
Superadas las limitaciones citadas, se reinició otra serie de pruebas estáticas de extracción, con el mismo modelo de pilote 1, sin olvidar la historia de cargas y fallas impuestas previas. En estos ensayos se buscó aprovechar al máximo el pilote 1 para efectuar los ensayos preliminares que permitiesen visualizar la evolución de la capacidad de carga por fuste debido al efecto del tiempo. Para ello se efectuaron 4 pruebas de extracción, con tiempos de reposo de 29 días, 0 hrs (inmediato), 48 hrs y 70 hrs, siguiendo precisamente esta secuencia. Debe tenerse presente que el inicio de cada prueba tuvo como antecedente una falla previa y el tiempo de reposo respectivo para su extracción. Las condiciones para iniciar la ejecución de cualquier prueba preliminar consistieron en la descarga de toda fuerza que sujetara al pilote a una extracción o compresión con el auxilio del SAC; el establecimiento del cero de referencia en la medición del desplazamiento se hizo a través del programa de la computadora del SAC, procurando que físicamente el transductor contase con suficiente carrera. A partir de estas condiciones se realizaron las pruebas.

Las características que se mantuvieron constantes en cada una de las pruebas ejecutadas se presentan en la Tabla 3.6. Debe enfatizarse que a fin de poner en evidencia la evolución de la resistencia con el tiempo de reposo, se procedió de manera sistemática y repetitiva en cada una de las pruebas, modificando tan sólo la variable observada. En la figura 3.41 se presentan las curvas carga-desplazamiento obtenidas.

**Tabla 3.6. Características de las pruebas de extracción preliminares. Pilote 1**

Ensaye de extracción	Amplitud (mm)	Control	Vel. de deformación	Valores iniciales	Función	Grabación
Extracción 1 (0 hrs)	0.84	Despl.	1mm/10min	0.00 kg 0.00 mm	Rampa	@ 1 seg
Extracción 2 (48 hrs)	1.03					
Extracción 3 (70 hrs)	0.89					
Extracción 4 (29 días)	2.90					

Cabe destacar que durante la ejecución de los ensayos, no se tuvo ningún funcionamiento anómalo de todo el equipo en general.



**Figura 3.41. Ensayes de extracción preliminares para conocer la evolución en la capacidad de carga por fuste. Pilote 1**

### 3.5.3 Ensayes de extracción definitivos

Se utilizaron cuatro modelos de pilote, sin instrumentación en su cuerpo, con los siguientes tiempos de reposo a la extracción después de su hincado: 2 hrs (inmediato), 19 hrs, 5 días y 114 días. La descripción de las pruebas, así como sus características se presentan a continuación.

#### Hincado de los modelos de pilote

El hincado de los modelos de pilote se efectuó a percusión. Para ello se utilizó una masa con peso de 2.983 kg, con una perforación concéntrica por medio de la cual se guió a través de una varilla y se dejó caer libremente a partir de una altura de 20 cm. Finalizado cada hincado se observó una intrusión de suelo cuyo valor osciló de 24.2 cm a 27.3 cm (aproximadamente 30% de la longitud del pilote embebida en el suelo). En la Tabla 3.7 se presenta el registro de hincado efectuado en cada modelo de pilote, donde se observa el número de golpes requeridos para 10 cm de penetración. Cabe destacar que el hincado del pilote 5 se realizó con interrupciones programadas, con lapsos de 30 minutos en cada penetración. En la figura 3.42 se muestra el registro de hincado de cada pilote gráficamente.

**Tabla 3.7. Registro del hincado de los modelos de pilote**

Pilote	No. golpes	Despl. (cm)	Vel. (cm/golpe)	Fecha de hincado	Observaciones
2	21	10	0.476	27-Dic-02	Hincado continuo. T = 2 horas (extracción)
	44	10	0.227		
	51	10	0.196		
	67	10	0.149		
	80	10	0.125		
	90	10	0.111		
3	42	4	0.095	21-Dic-02	Hincado continuo. T = 19 horas (extracción)
	23	10	0.435		
	44	10	0.227		
	62	10	0.161		
	72	10	0.139		
	87	10	0.115		
4	104	10	0.096	11-Dic-02	Hincado continuo. T = 5 días (extracción)
	11	1.4	0.127		
	24	10	0.417		
	47	10	0.213		
	63	10	0.159		
	76	10	0.132		
89	10	0.112	103	10	0.097
47	4.2	0.089			

Continúa Tabla 3.7

Pilote	No. golpes	Despl. (cm)	Vel. (cm/golpe)	Fecha de hincado	Observaciones
5	20	10	0.500	28-Dic-02	Hincado no continuo (interrupciones programadas). T = 114 días (extracción)
	64	10	0.156		
	80	10	0.125		
	104	10	0.096		
	127	10	0.079		
	162	10	0.062		
	14	1.5	0.107		

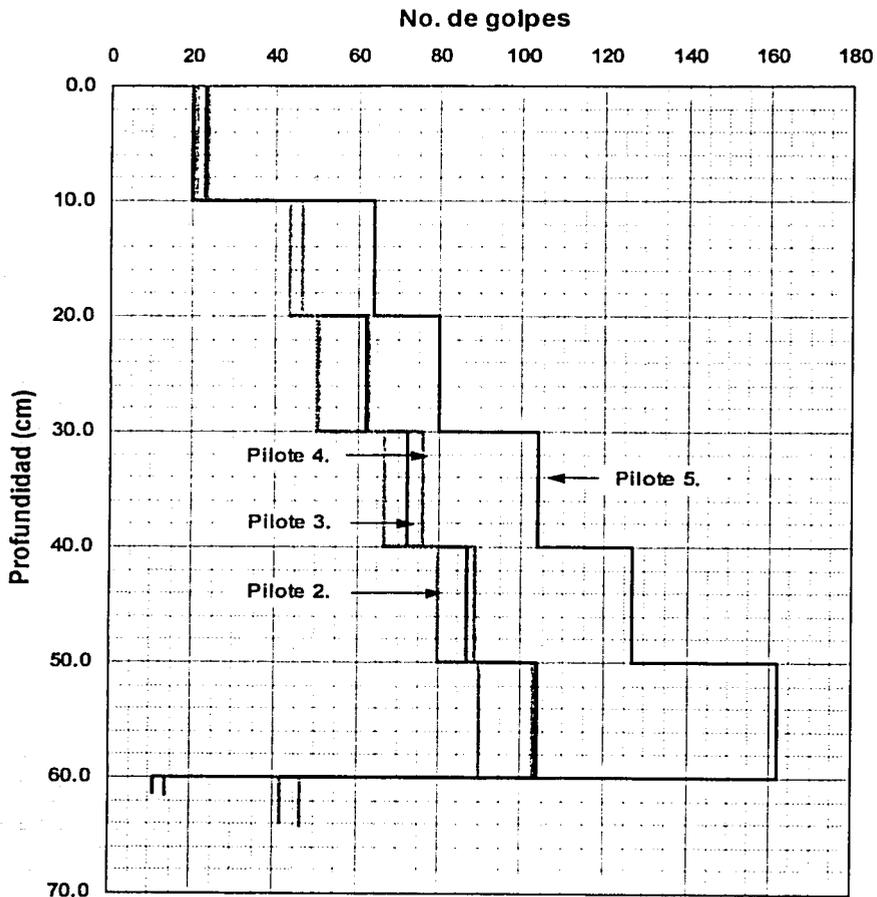


Figura 3.42. Gráfica del hincado de los modelos de pilote

**Ensayes de Extracción–Compresión y Extracción complementarios.**

La Tabla 3.8 presenta los ensayos realizados en cada modelo de pilote. Se tienen cuatro pruebas principales y tres complementarias. Las primeras son las pruebas de extracción –con tiempos de reposo distinto después del hincado–, y su descarga respectiva en el sentido de la compresión (Ensayes Extracción–Compresión). Estas son: P2-E2H-C, P3-E19H-C, P4-E5D-C y P5-E114D-C. En la figura 3.43 se presentan las curvas carga–desplazamiento respectivas. Los ensayos complementarios consistieron en extracciones posteriores a las pruebas principales efectuadas en los pilotes 2 y 3 y corresponden a: P2-E19H, P3-E0H y P3-E19H. Las curvas carga – desplazamiento respectivas se muestran en las Figs. 3.44 a 3.46.

**Tabla 3.8. Características de las pruebas realizadas en los modelos de pilote**

Pilote	Denominación de la prueba <sup>1</sup>	Características							Observaciones
		Fase	Control	Vel.Def/Duración	Val. iniciales	Función	Amplitud	Grabación	
2	P2-E2H-C	Fase 1 Extracción	Despl.	1mm/10mn	0.00 kg 0.00 mm	Rampa	6 mm	@ 1 seg	Extracción 2 horas-Compresión (prueba principal)
		Fase 2 Compresión	Despl.	1mm/10mn	Previo de fase 1	Rampa	-7 mm	@ 1 seg	
	P2-E19H	Fase única Extracción	Carga	34 min	0.00 kg 0.00 mm	Rampa	120 kg	@ 1 seg	Extracción 19 horas después de prueba principal P2-E2H-C
3	P3-E19H-C	Fase 1 Extracción	Despl.	1mm/10mn	0.00 kg 0.00 mm	Rampa	6 mm	@ 1 seg	Extracción 19 horas-Compresión (prueba principal)
		Fase 2 Compresión	Despl.	1mm/10mn	Previo de fase 1	Rampa	-7 mm	@ 1 seg.	
	P3-E0H	Fase única Extracción	Despl.	1mm/10mn	0.00 kg 0.00 mm	Rampa	4 mm	@ 1 seg	Extracción inmediata después de prueba principal P3-E19H-C
	P3-E19H	Fase única Extracción	Despl.	1mm/10mn	0.00 kg 0.00 mm	Rampa	3 mm	@ 1 seg	Extracción 19 horas después de las pruebas P3-E19H-C y P3-E0H
4	P4-E5D-C	Fase 1 Extracción	Despl.	1mm/10mn	0.00 kg 0.00 mm	Rampa	3 mm	@ 1 seg	Extracción 5 días-Compresión (prueba principal)
		Fase 2 Compresión	Despl.	1mm/10mn	Previo de fase 1	Rampa	-4 mm	@ 1 seg.	
5	P5-E114D-C	Fase 1 Extracción	Despl.	1mm/10mn	0.00 kg 0.00 mm	Rampa	6 mm	@ 1 seg.	Extracción 114 días-Compresión (prueba principal)
		Fase 2 Compresión	Despl.	1mm/10mn	Previo de fase 1	Rampa	-7 mm	@ 1 seg.	

<sup>1</sup> Significado de la denominación: P (Pilote), E (Extracción), C (Compresión)

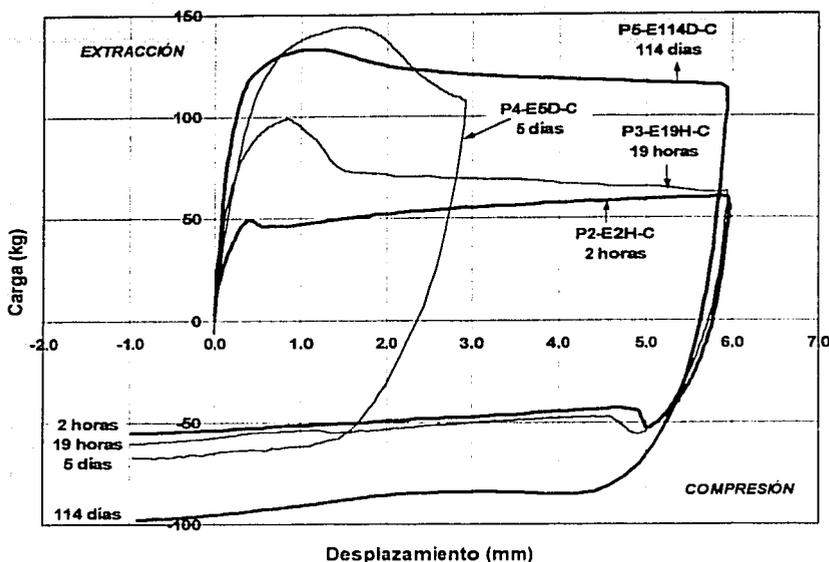


Figura 3.43. Ensayos de extracción definitivos para conocer la evolución en la capacidad de carga por fuste en modelos de pilotes distintos

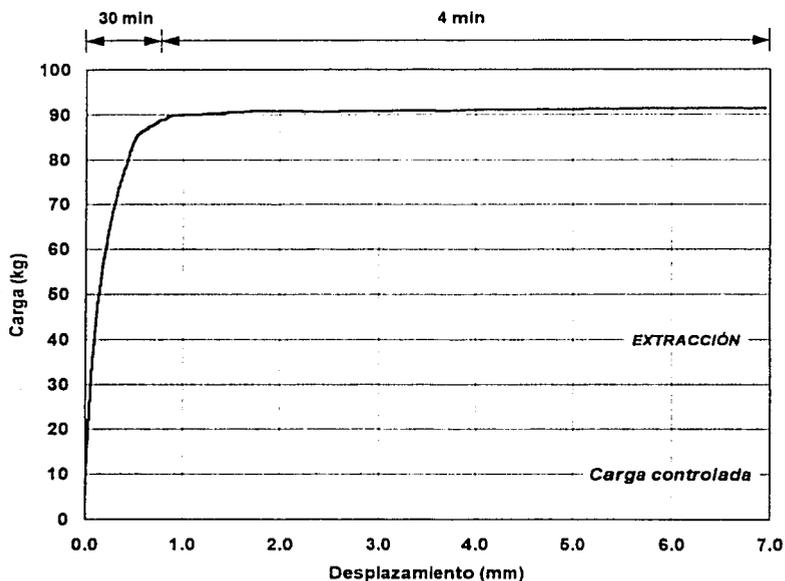


Figura 3.44. Prueba de extracción t = 19 hrs., (P2-E19H) posterior al ensayo de extracción t = 2 hrs - compresión (P2-E2H-C). Pilote 2

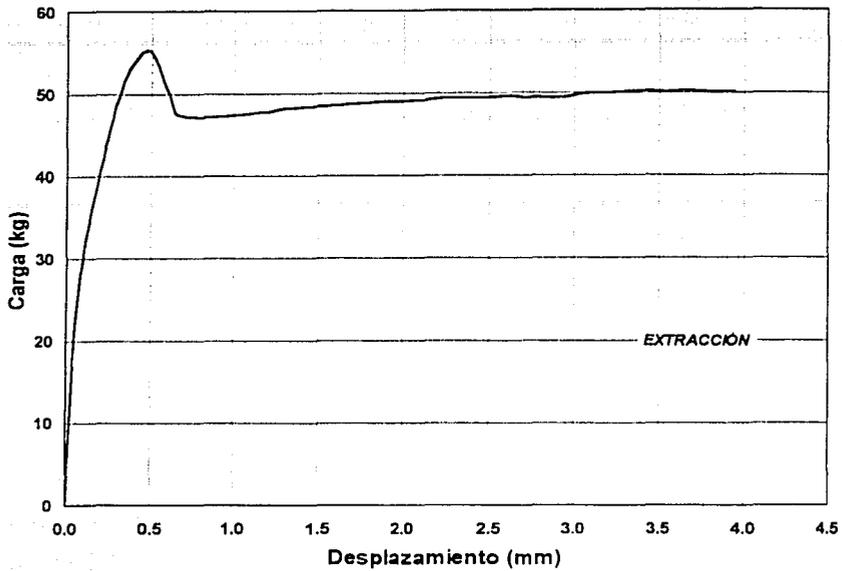


Figura 3.45. Prueba de extracción (P3-E0H) posterior al ensaye de extracción  $t = 19$  hrs - compresión (P3-E19H-C). Pilote 3

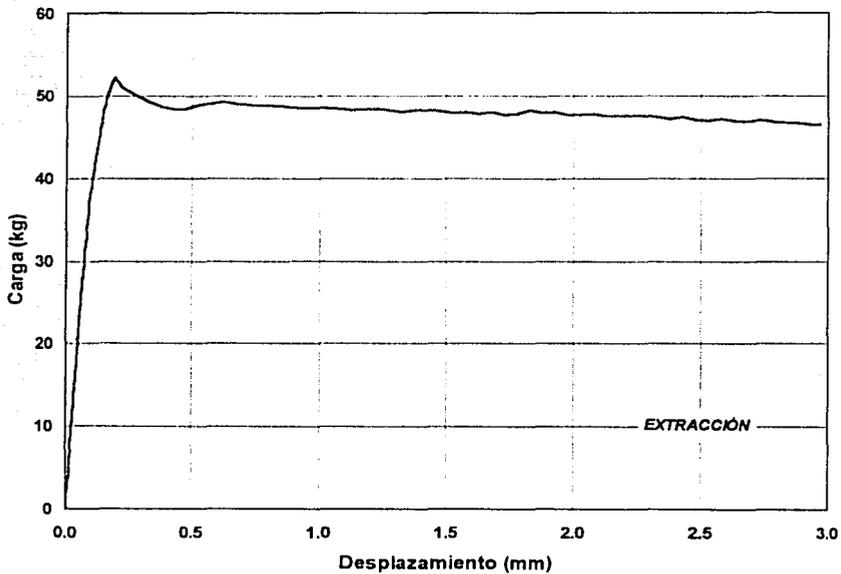


Figura 3.46. Prueba de extracción con  $t = 19$  horas (P3-E19H) e historia de fallas previas. Pilote 3

### 3.5.4 Ensayes de extracción adicionales

Después de finalizado cada ensaye definitivo y pruebas adicionales, se optó por realizar un *rehincado* en cada pilote, tan sólo de unos milímetros, con el objeto de ensayarlos nuevamente a extracción – compresión. La intención original fue observar el comportamiento y evolución de la capacidad por fuste, – en ensayes de extracción –, con la falla previa de un rehincado.



Figura 3.47. Proceso de rehincado

### Ensayes de Extracción–Compresión

El rehincado se efectuó utilizando la masa de 2.983 kg y dejándola caer cinco veces, desde una altura de 20 cm, y sin la aplicación de presión externa, Fig. 3.47.

Las características particulares de cada ensaye se presentan en la Tabla 3.9. En la figura 3.48 se muestran las curvas carga–desplazamiento correspondientes.

Tabla 3.9. Características de las pruebas realizadas en los modelos de pilote con rehincado

Pilote	Denominación de la prueba	Características							Observaciones
		Fase	Control	Vel.Def./Duración	Val. iniciales	Función	Amplitud	Grabación	
2	P2-R-E60D-C	Fase 1 Extracción	Despl.	1mm/10min	0.00 kg 0.00 mm	Rampa	6 mm	@ 1 seg	Extracción 60 días- Compresión (rehincado)
		Fase 2 Compresión	Despl.	1mm/10min	Previo de fase 1	Rampa	-7 mm	@ 1 seg	
3	P3-R-E30D-C	Fase 1 Extracción	Despl.	1mm/10min	0.00 kg 0.00 mm	Rampa	6 mm	@ 1 seg	Extracción 30 días- Compresión (rehincado)
		Fase 2 Compresión	Despl.	1mm/10min	Previo de fase 1	Rampa	-7 mm	@ 1 seg	
4	P4-R-E8H-C	Fase 1 Extracción	Despl.	1mm/10min	0.00 kg 0.00 mm	Rampa	5 mm	@ 1 seg	Extracción 8 horas- Compresión (prueba rehincado)
		Fase 2 Compresión	Despl.	1mm/10min	Previo de fase 1	Rampa	-2 mm	@ 1 seg	

<sup>1</sup> Significado de la denominación: P (Pilote), R (Rehincado), E (Extracción), C (Compresión)

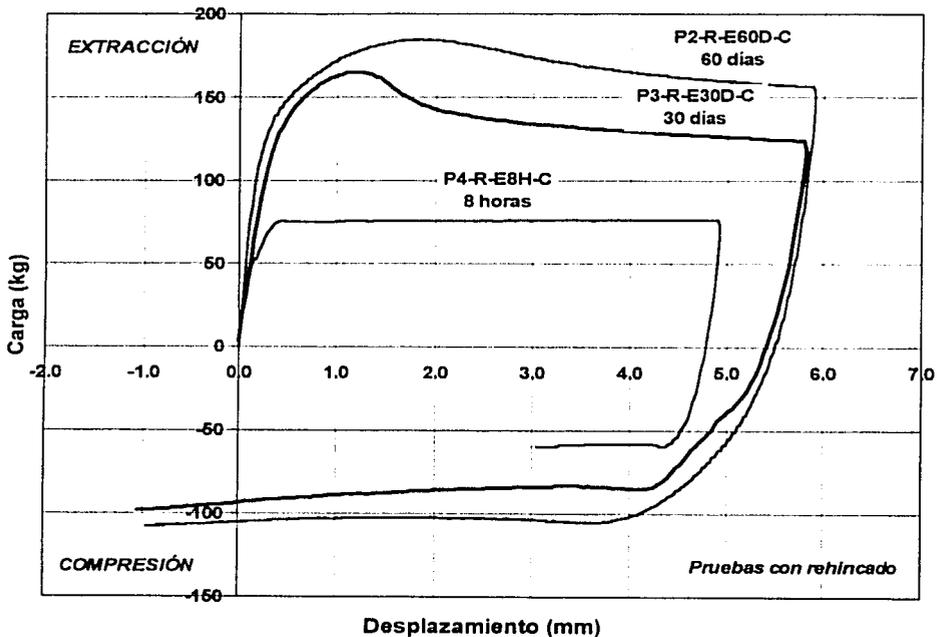


Figura 3.48. Ensayos de extracción con rehincado para conocer la evolución en la capacidad de carga por fuste en modelos de pilotes distintos

El análisis de resultados de todos los ensayos realizados (preliminares, definitivos y adicionales) se presentan en el capítulo siguiente.

*"Sorprenderse, extrañarse, es comenzar a entender."  
José Ortega y Gasset.*

## **4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

A partir de las curvas carga – desplazamiento obtenidas de los ensayos, se procedió a determinar la capacidad de carga, módulo tangente inicial y módulo secante con el fin de analizar el efecto del envejecimiento (largo plazo) en términos de resistencia y deformabilidad. Por otra parte, se utilizaron los registros de hincado de cada modelo de pilote para observar la evolución de la resistencia durante este proceso (corto plazo), descrito a continuación.

### **4.1 EFECTO DEL ENVEJECIMIENTO EN LA RESISTENCIA DURANTE EL HINCADO**

En la figura 4.1 se presentan las gráficas de resistencia durante el hincado registradas en los modelos de pilote 2, 3, 4 y 5. Para los tres primeros, el hincado se realizó en forma continua, observándose cierta repetición de resultados, con una ligera variación para el pilote 2. Lo anterior indica la homogeneidad que existe en el suelo marino reconstituido para estas zonas. No obstante, en el pilote 5 se distingue un aumento en la resistencia. La situación anterior se debe a que su hincado no se realizó en forma continua, sino con interrupciones programadas de 30 minutos entre cada penetración de 10 cm. La intención fue observar el efecto de este lapso en la evolución de la resistencia durante el hincado.

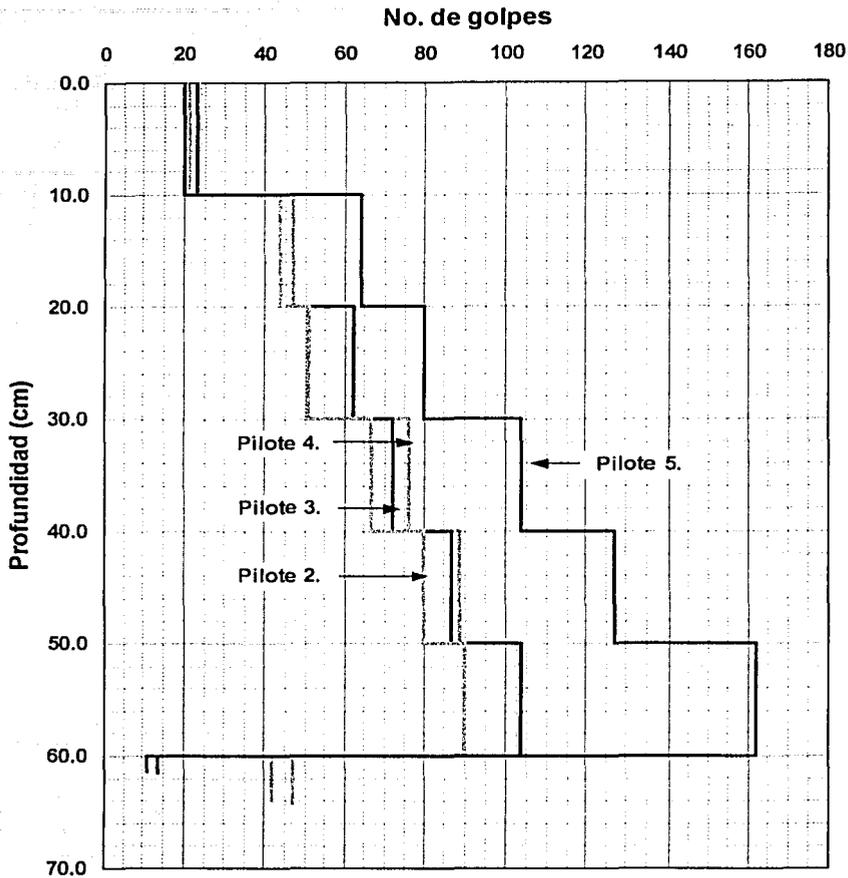


Figura 2.32. Efecto del tiempo en la resistencia durante el hincado

Esta ganancia en resistencia puede explicarse por el proceso de consolidación local radial inducido por el hincado así como los factores de envejecimiento presentes, tal y como se describió en el capítulo 2. Con respecto a la consolidación local, a través de la medición de la disipación de la presión de poro es posible proponer correlaciones para predecir los tiempos requeridos para alcanzar diferentes niveles de resistencia, tal y como lo propusieron Bogard y Matlock (1990). Desafortunadamente, no se pudieron realizar mediciones de presión de poro dado que se utilizaron modelos de pilote sin instrumentación en su cuerpo. Los factores de

envejecimiento (mecanismo tixotrópico y solidificación) actúan en forma simultánea al proceso de consolidación local y después de éste, aunque su discernimiento sólo es evidente cuando la consolidación local prácticamente ha finalizado —con base en mediciones de presión de poro—, observándose que prosigue un aumento en la resistencia mas allá del tiempo requerido para efectuarse dicha consolidación, así como es reportado por Karlsrud y Haugen (1986). Se trata de un problema muy complejo y por esta razón aún no se han podido establecer expresiones en términos de factores de envejecimiento, aunque en función de la consolidación local se dispone el procedimiento sugerido por Bogard y Matlock.

## 4.2 EFECTO DEL ENVEJECIMIENTO EN LA DEFORMABILIDAD Y EN LA CAPACIDAD DE CARGA POR FUSTE

Para toda la serie de ensayos realizados, la capacidad de carga y el desplazamiento respectivo a la falla se determinó con un criterio gráfico. Con la finalidad de obtener parámetros para juzgar la evolución de la rigidez del sistema suelo-pilote, se obtuvieron los módulos tangentes iniciales de las curvas carga-desplazamiento utilizando el criterio propuesto por Kondner (1963), adicionalmente al módulo secante determinado gráficamente. De esta forma, se analizó la evolución de la resistencia y deformabilidad en los ensayos preliminares, definitivos y adicionales efectuados.

### 4.2.1. Ensayes de extracción preliminares

#### Capacidad de carga

Debido a la forma obtenida en algunas curvas, es preferible aclarar los términos que se utilizarán en su descripción y análisis posterior, con auxilio de la Fig. 4.1.

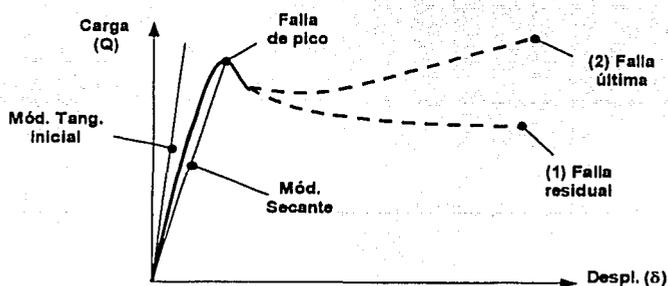


Figura 4.1. Términos de falla y rigidez en curvas carga – desplazamiento

La capacidad de falla de pico, el desplazamiento requerido para alcanzarla, así como los módulos tangentes iniciales y secante, correspondientes a los ensayos preliminares se presentan a continuación.

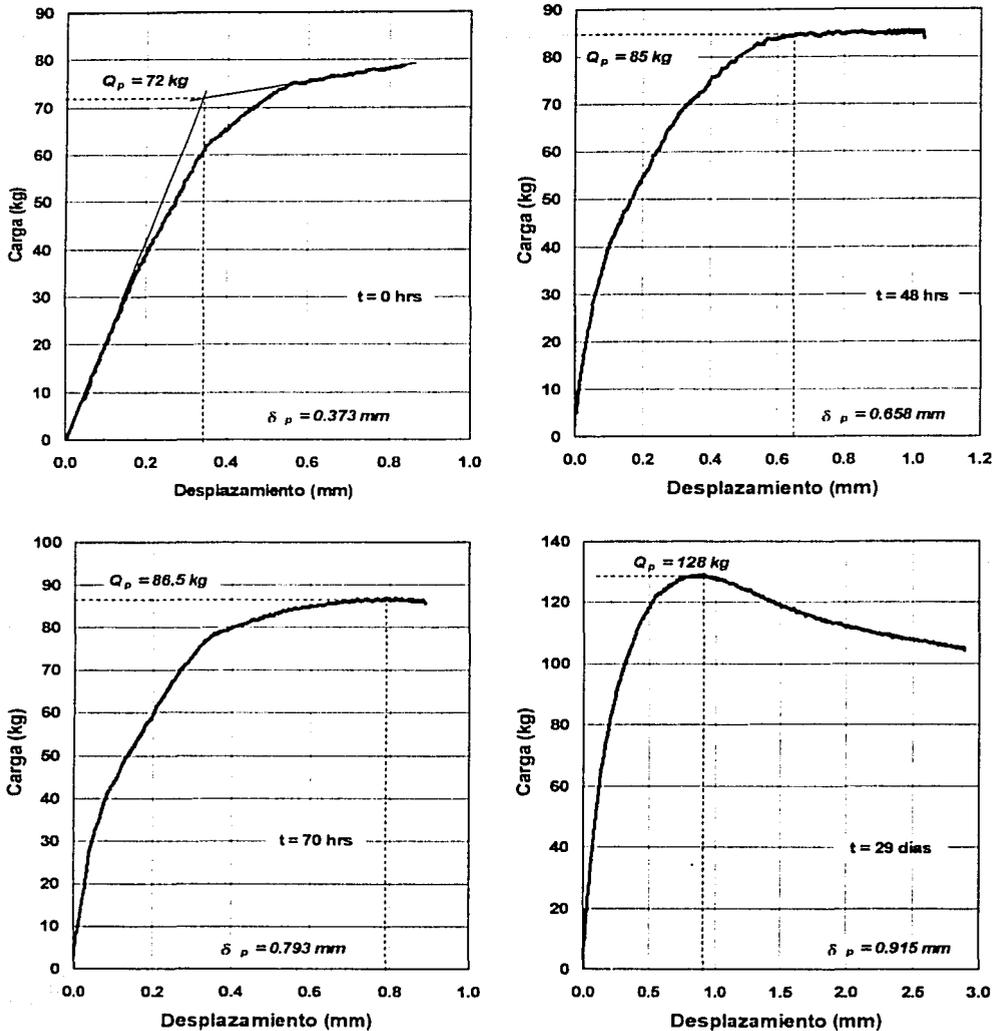


Figura 4.2. Determinación de la capacidad de carga en la falla de pico y desplazamiento a la falla en ensayos preliminares de extracción en el mismo pilote (No.1).

Módulo tangente inicial

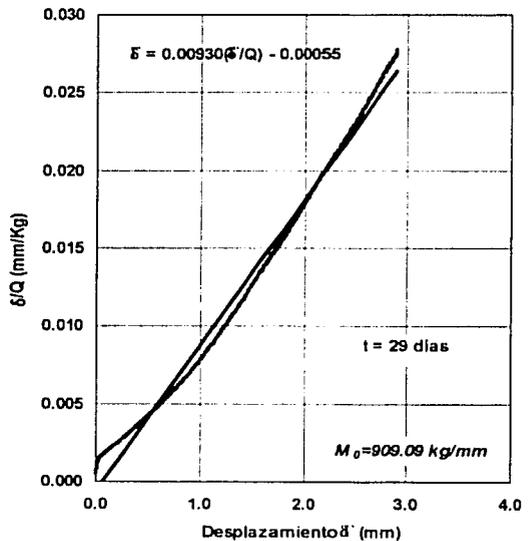
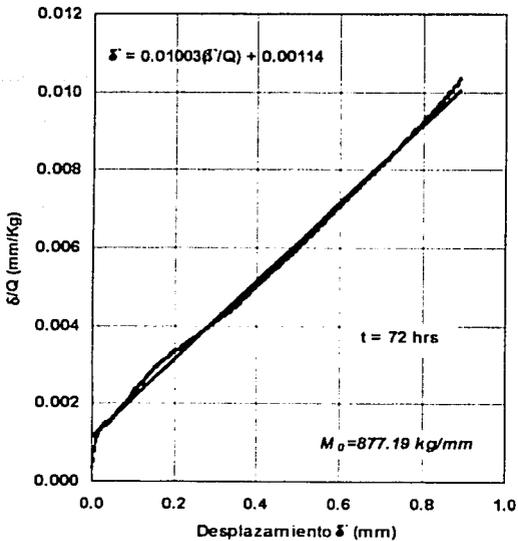
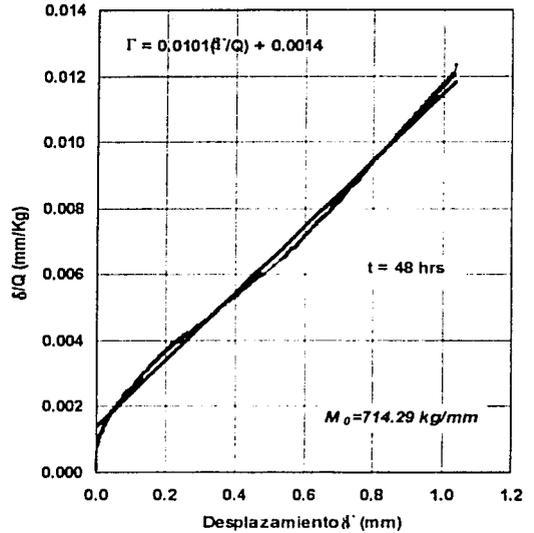
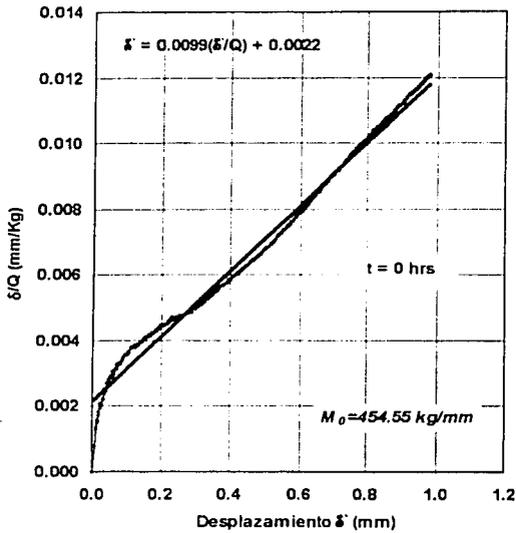


Figura 4.3. Determinación del módulo tangente inicial en ensayos preliminares de extracción en el mismo pilote (No. 1).

**Módulo secante en la falla de pico**

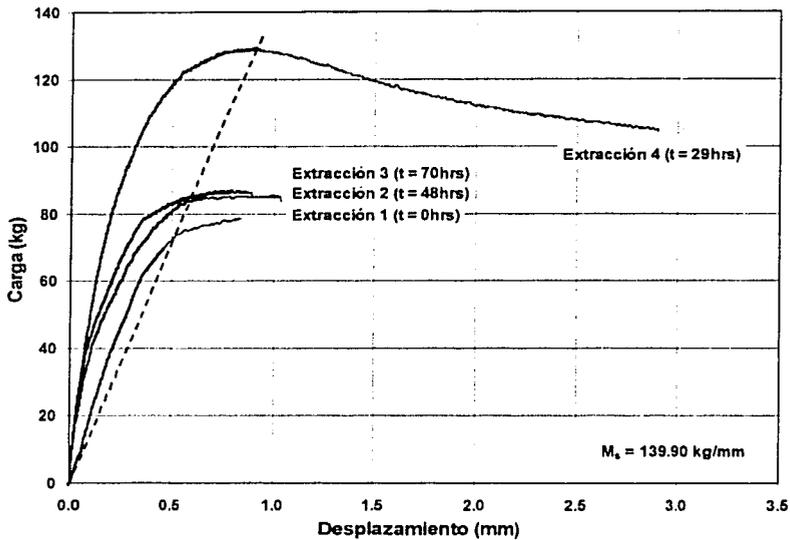
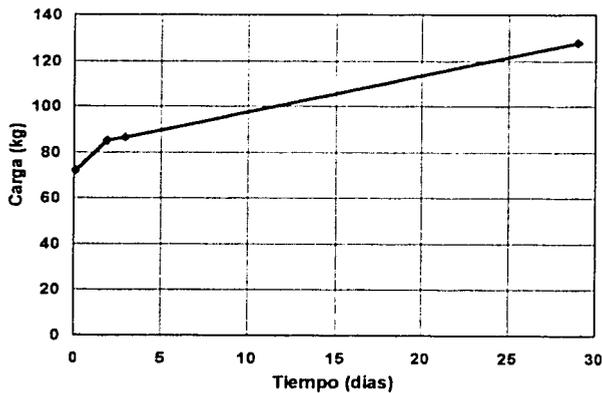


Figura 4.4. Determinación del módulo secante en la falla de pico en ensayos preliminares de extracción en el mismo pilote (No.1)

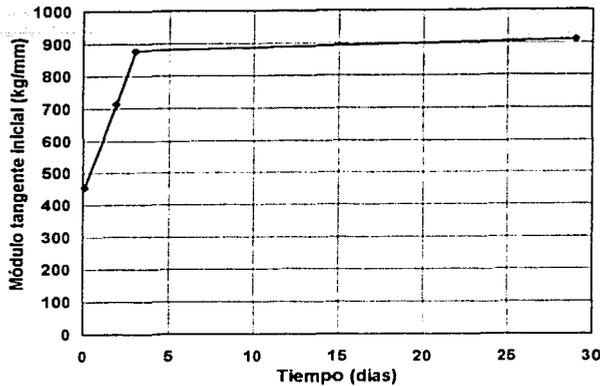
**Efecto del envejecimiento en la capacidad de carga y rigidez**

En la figura 4.5 se presenta en efecto del tiempo en la capacidad de carga y módulo tangente inicial del sistema suelo-pilote.



(a) Capacidad de carga en la falla de pico

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



(b) Módulo tangente inicial

**Figura 4.5. Efecto del tiempo en la capacidad de carga y módulo tangente inicial en ensayos preliminares de extracción en el mismo pilote (No.1)**

Como puede apreciarse en la figura 4.5.a. ocurre un aumento de la capacidad de carga con el tiempo. Cabe recordar que estos ensayos fueron efectuados en un solo pilote; las condiciones para el inicio de cada prueba lo constituyó un remoldeo de la interfaz suelo-pilote inducido por la aplicación de una carga cíclica, adicional a la historia de cargas y fallas previas. La secuencia para su ejecución fue la siguiente: 29 días, 0 hrs (inmediata), 48 hrs, y 70 hrs. El lapso transcurrido para ejecutar la primera prueba a partir del hincado inicial fue de 43 días. Es decir, después del hincado transcurrieron 14 días donde se realizaron las primeras pruebas preliminares, cuyos resultados no se decidió presentar debido a los errores de ejecución involucrados, los cuales, evidentemente afectan toda interpretación de resultados. Con referencia a la última falla del pilote en esta etapa, se consideró ésta como la condición inicial a partir de la cual transcurrieron 29 días, para ensayarse nuevamente a extracción. Aunque se desconoce el tiempo práctico necesario para la disipación completa de la presión de poro generada por el hincado, se especula un tiempo inferior de 43 días; lo anterior puede sustentarse, en parte, por la aplicación de la teoría de consolidación aplicada a pilotes para estudiar el efecto del tiempo, desarrollada por Soderberg (1962). En este estudio, se plantea la ecuación diferencial parcial para modelar el comportamiento de un pilote individual en un medio semi-infinito, con el objeto de predecir la disipación del exceso de la presión hidrostática en función del tiempo. Para solucionar la ecuación, las condiciones iniciales que se necesitan conocer son: (1) la distribución inicial de la

presión de poro y, (2) coeficiente de consolidación horizontal. El primer punto implica el uso de instrumentación para su medición directa ó asumir distribuciones analíticas. En el segundo, se puede suponer el coeficiente de consolidación horizontal igual al vertical. Soderberg resuelve la ecuación diferencial, –la cual se plantea en un plano horizontal representativo–, utilizando una distribución teórica para la presión de poro, consideraciones simplificadorias y el método de diferencias finitas, para obtener finalmente la función grado de consolidación U, Fig. 4.6

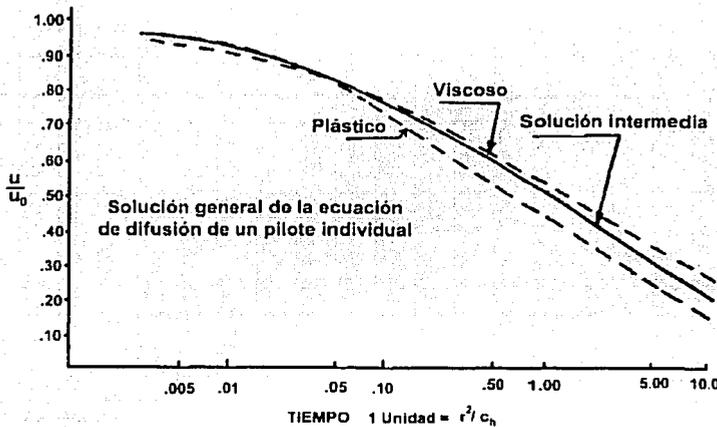


Figura 4.6. Función grado de consolidación U para un pilote individual (Soderberg, 1962)

En la figura se observa que el tiempo requerido para la disipación del exceso de la presión de poro es función de la relación  $(r^2/c_h)$ ; es decir, del radio del pilote y del coeficiente de consolidación horizontal. En otras palabras, la consolidación local tomará más tiempo a medida que el radio del pilote aumente y el coeficiente de consolidación disminuya. El valor de la relación es unitaria para el 50% de la consolidación total. Soderberg recomienda este grado de consolidación para estimar  $c_h$  cuando se tienen mediciones directas de la capacidad de carga de un pilote en el tiempo, y cuya gráfica tiene una forma similar a la mostrada en la Fig. 4.6. Para grados de consolidación mayores, el autor advierte que la estimación es menos confiable y

progresivamente empeora después del 80%, donde los resultados son poco confiables. Por lo anterior, se calculó el tiempo requerido para ocurrir el 50% de la consolidación para el modelo de pilote de esta experimentación. Para esto,  $r = 1.35$  cm y  $c_v \approx c_h = 1.9 \times 10^{-1}$  cm<sup>2</sup>/s (Ibarra, 2002), por lo tanto  $t_{50} = 2.66$  horas. Con base en lo anterior se puede inferir que la consolidación total podría tomar menos de 43 días.

La resistencia observada en la extracción a los 29 días con referencia en su última falla, indica un incremento debido al proceso de consolidación local, prácticamente finalizado, además de los factores de envejecimiento presentes. Al efectuar las pruebas restantes, el aumento de resistencia hasta un lapso de 70 horas es poco evidente. No obstante, se observa un incremento notable en la rigidez inicial. Fig. 4.5.b., atribuible principalmente a factores de envejecimiento y la disipación de presión de poro generada por fallas previas. Es interesante observar que el módulo secante en la falla de pico es común en todas las pruebas, (con ligeras variaciones en algunas pruebas, debido al lugar donde se determinaron sus fallas). Así mismo, los módulos secantes que pueden trazarse antes de la falla de pico en cada prueba, llegan a converger en este módulo secante a la falla común a todas ellas. Fig. 4.4.

#### 4.2.2. Ensayes de extracción definitivos

La capacidad de carga en la falla de pico, el desplazamiento requerido para alcanzarla, así como los módulos tangentes iniciales y secante, correspondientes a los ensayes definitivos se presentan a continuación. Cabe recordar que estos resultados se obtuvieron en pilotes distintos, los cuales se indican en las figuras respectivas.

Capacidad de carga

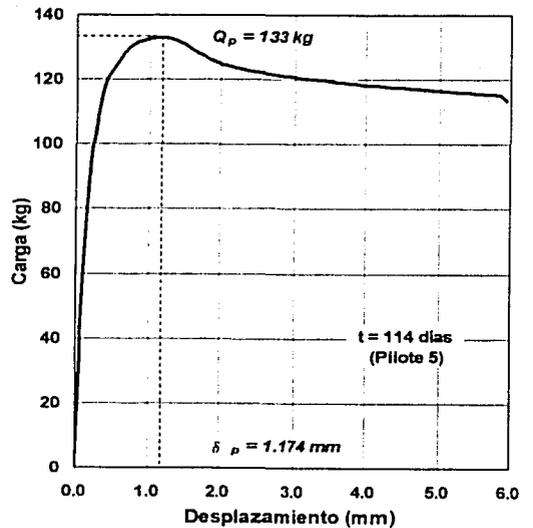
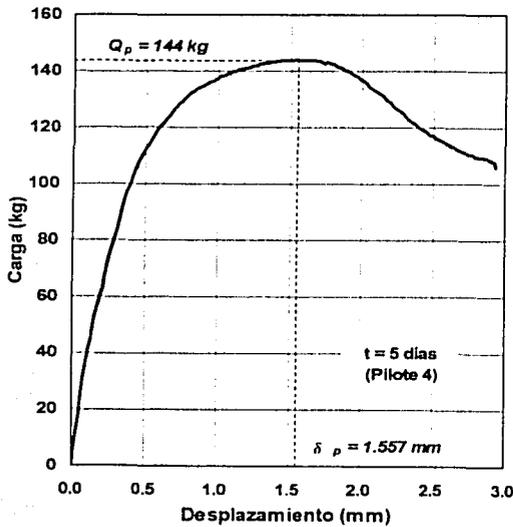
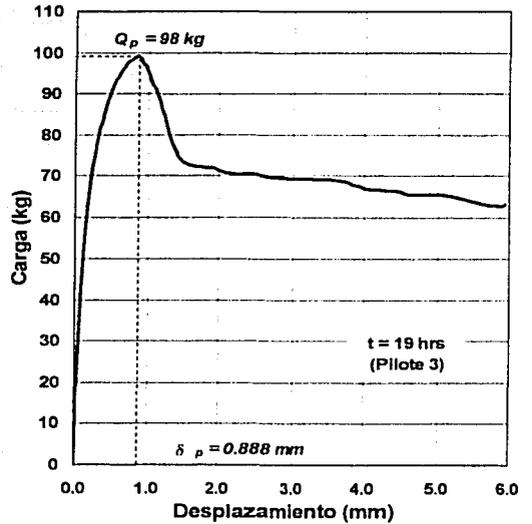
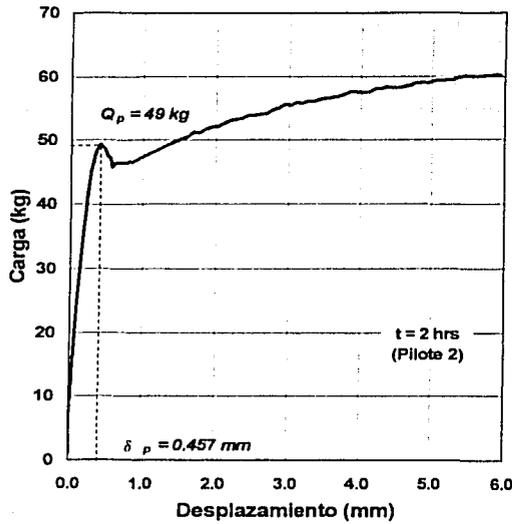


Figura 4.7. Determinación de la capacidad de carga en la falla de pico y desplazamiento a la falla en ensayos de extracción definitivos

Módulo tangente inicial

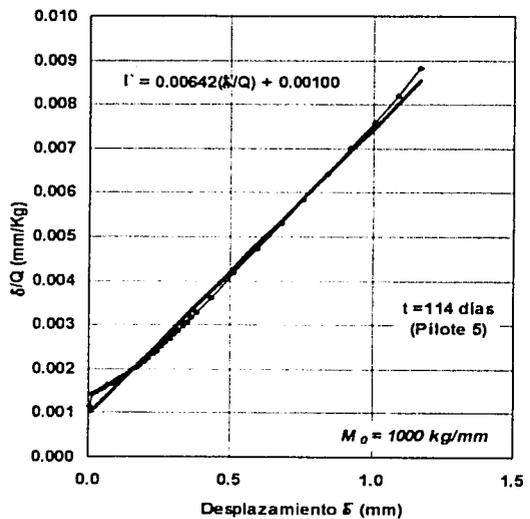
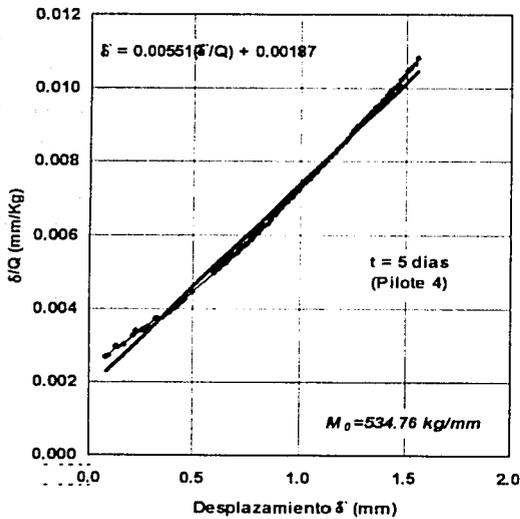
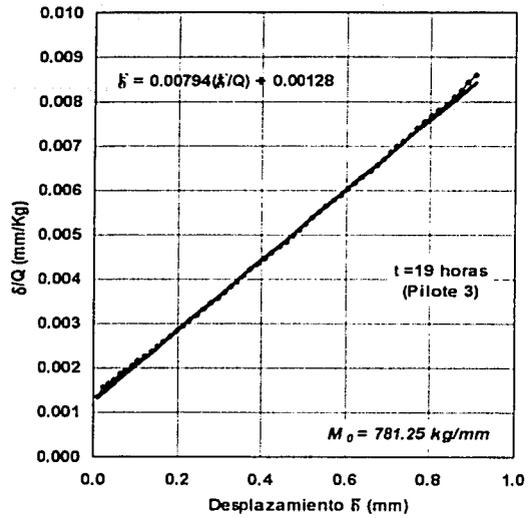
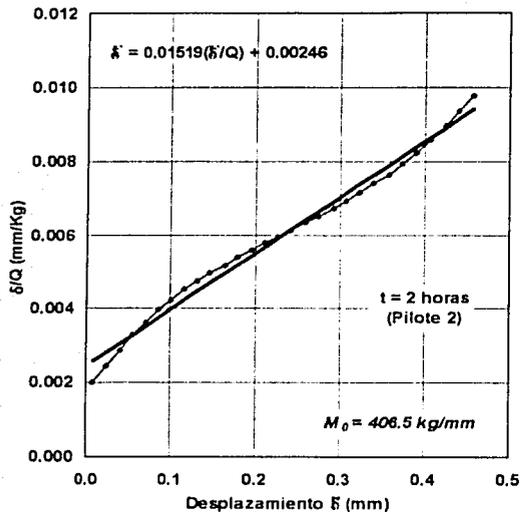


Figura 4.8. Determinación del módulo tangente inicial en ensayos de extracción definitivos

Módulo secante en la falla de pico

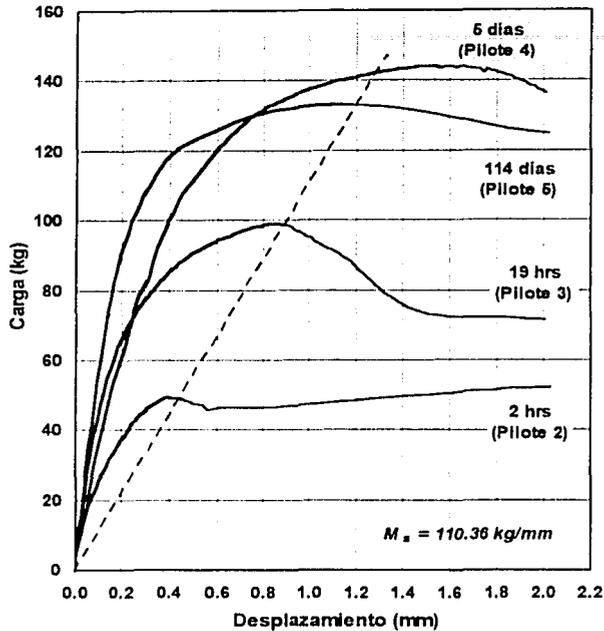


Figura 4.9. Determinación del módulo secante en la falla de pico en ensayos de extracción definitivos

Efecto del envejecimiento en la capacidad de carga y rigidez

La figura 4.10 presenta el efecto del tiempo en las curvas carga–desplazamiento obtenidas en los cuatro ensayos definitivos, tanto en su fase de extracción como en compresión. En las figuras 4.11 y 4.12 se observa la evolución de la capacidad de falla de pico y del módulo tangente inicial, respectivamente.

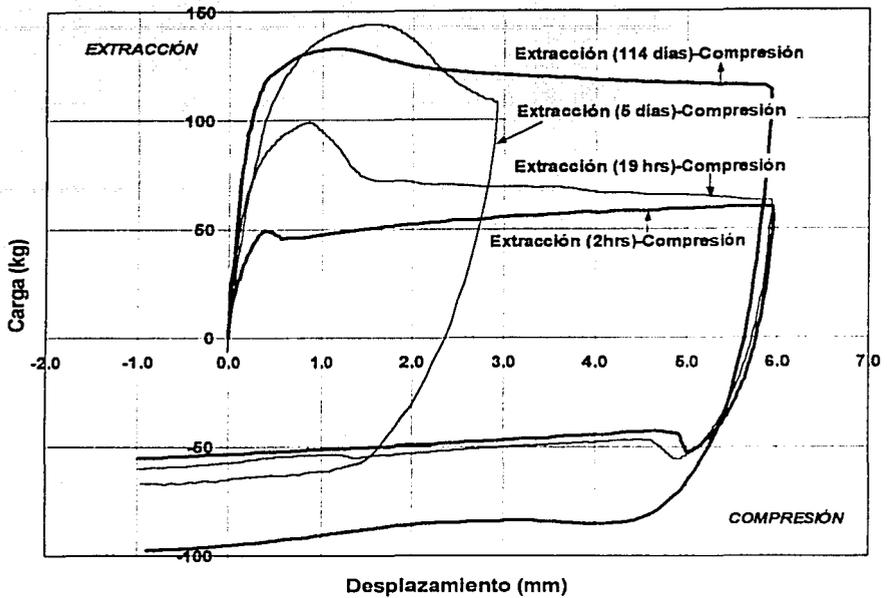


Figura 4.10. Efecto del envejecimiento en las curvas carga-desplazamiento en ensayos definitivos

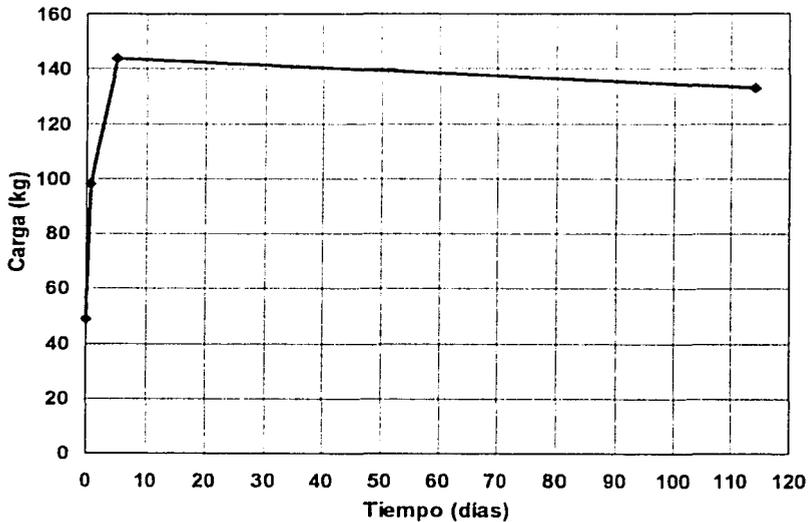
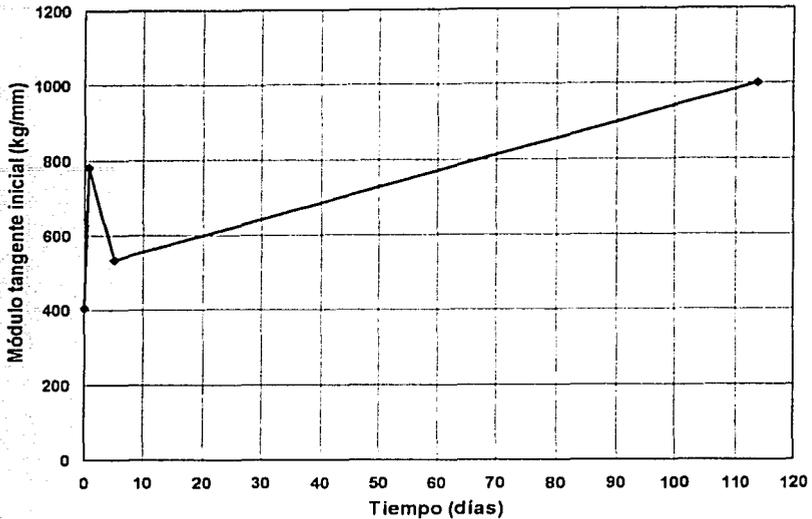


Figura 4.11. Efecto del envejecimiento en la capacidad de carga en la falla de pico en ensayos de extracción definitivos



**Figura 4.12. Efecto del envejecimiento en el módulo tangente inicial en ensayos de extracción definitivos**

Con respecto a la capacidad de carga en la falla de pico correspondientes a las extracciones efectuadas, Fig. 4.10 y 4.11, se observa un aumento en la medida en que transcurre mayor tiempo después del hincado; a excepción de la última prueba ejecutada a los 114 días, donde se aprecia una ligera disminución, en relación con el resultado del pilote con 5 días de reposo. La razón de lo anterior puede atribuirse a lo siguiente: (1) el suelo marino reconstituido pudo no tener la misma homogeneidad en la zona donde se realizó la prueba; (2) la forma en la ejecución del hincado parece influir en la capacidad de carga a largo plazo. Para este caso, el hincado no se realizó en forma continua como en las demás pruebas, sino con demoras programadas de 30 minutos entre cada penetración de 10 cm.

No obstante, para un desplazamiento alrededor del 1% del diámetro del pilote, la evolución de la capacidad de carga por fuste en la falla de pico, muestra un aumento del 238%, al comparar el resultado del ensayo de 114 días con referencia al de 2 horas.

Contrario a lo observado con la resistencia de pico, pudo comprobarse que la resistencia última y residual experimenta una variación creciente conforme transcurre tiempo de reposo después del hincado, Fig. 4.10. La explicación a esto podría ser justificada por los factores de envejecimiento presentes y el incremento del esfuerzo efectivo en la interfaz suelo-pilote, causada por la consolidación local. Cabe destacar que el ensaye de extracción de 2 horas y su compresión respectiva, observan un endurecimiento por deformación en la zona donde usualmente se define la resistencia residual, atribuible precisamente a las causas antes señaladas (consolidación local y mecanismos de envejecimiento). Por otra parte, la resistencia residual en extracción registrada para el ensaye de 5 días, se determinó hasta un desplazamiento de 3 mm, debido a que fue la primera prueba realizada, y a falta de una experiencia previa, se supuso que ese desplazamiento daría una buena definición de la resistencia residual. Al observar la curva obtenida, se optó por efectuar las pruebas posteriores con el doble de desplazamiento.

Así mismo, el efecto del tiempo se ve reflejado en la curvas obtenidas en el sentido de la compresión. Esta compresión descargó y retornó a cada modelo de pilote a su posición inicial y un milímetro mas allá de ésta. La evolución en la resistencia se distingue, aun a pesar de la alteración de la interfaz causada por la falla previa en extracción. En otras palabras, durante el regreso de cada pilote se encontró mayor resistencia para desplazarlos a medida que aumentó el tiempo. La principal causa puede ser atribuida a los factores de envejecimiento presentes, si se considera que la prueba de 114 días prácticamente ha completado su consolidación local.

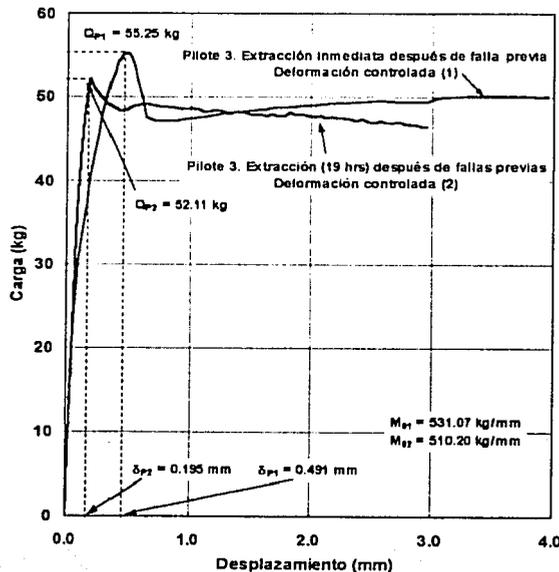
En la figura 4.12 se observa la rigidización inicial del sistema suelo-pilote conforme aumenta el tiempo, a excepción de las pruebas de 19 horas y 5 días, donde la primera resultó con mayor rigidez que la segunda hasta un desplazamiento del orden del 1% del diámetro del pilote. La situación anterior podría explicarse por las siguientes razones: (1) una posible mala instalación del marco de reacción para el ensaye de 5 días, al dejar una holgura casi imperceptible entre éste y la base del odómetro, y sólo notada durante la ejecución de la prueba. Dado que la prueba se realizó con deformación controlada, ésta medición pudo quedar afectada por dicha holgura. Cabe aclarar que en las pruebas subsecuentes se corrigió este hecho ajustando el marco de reacción de tal forma que se eliminó el desplazamiento infimo causado por la holgura; (2) durante la

ejecución de la prueba de 5 días se presentaron ligeras fluctuaciones en el SAC durante el control de la prueba. Sin embargo, puede concluirse que ocurre una clara rigidización por efecto del tiempo de reposo después del hincado, considerando los módulos tangentes iniciales –para bajas deformaciones–, correspondientes a las pruebas de 2 horas, 19 horas y 114 días, ya que la prueba de 5 días presenta incertidumbre debido a los inconvenientes presentados durante su ejecución. El incremento en el módulo es poco menos de dos veces y media, al comparar el valor del ensaye de 114 días con referencia al de 2 horas.

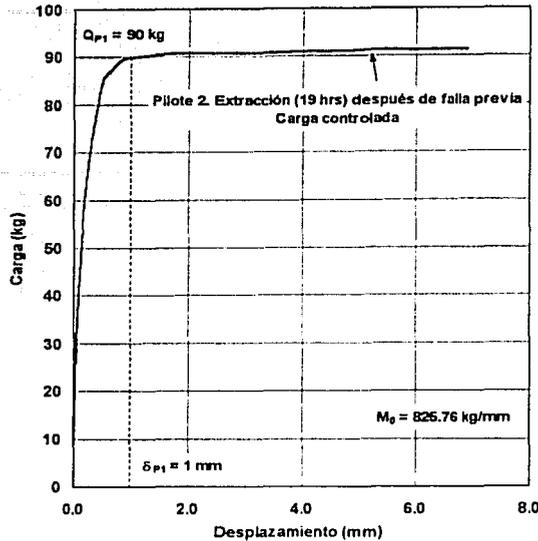
En la figura 4.9 se trazó un módulo secante a la falla de pico. Al igual que en las pruebas preliminares, este módulo es compartido por los cuatro ensayos definitivos y corta precisamente en el lugar donde se estableció la falla de pico con una ligera variación para el ensaye de 5 días. El valor del módulo es de 110.36 kg/mm. Lo anterior implica además un aumento en el desplazamiento necesario para alcanzar la falla de pico, conforme el tiempo se incrementa.

### Ensayes posteriores

Con respecto a los ensayos posteriores efectuados después de las pruebas principales de extracción–compresión correspondientes a los lapsos de 19 horas y 2 horas, se determinaron las capacidades de carga en la falla de pico, los desplazamientos requeridos para alcanzarlas y los módulos tangentes iniciales, Fig. 4.13 (a) y (b).



(a) Ensayes de extracción posteriores al ensaye principal de extracción 19 horas–compresión



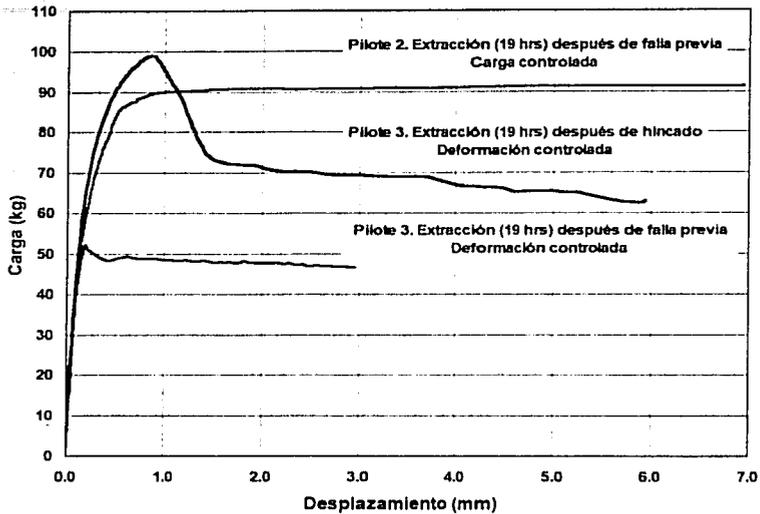
(b) Ensayo de extracción posterior al ensayo principal de extracción 2 horas-compresión

**Figura 4.13. Capacidad de carga, desplazamiento en la falla de pico y módulo tangente inicial en pruebas de extracción posteriores a los ensayos principales de extracción-compresión**

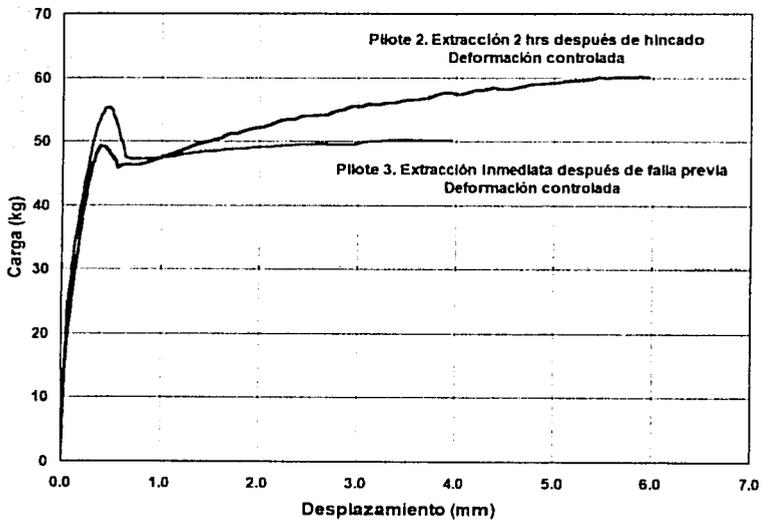
En la figura 4.13 (a), la extracción inmediata fue precedida de fallas estáticas. La extracción con lapso de reposo de 19 horas tuvo como historia de fallas previas la extracción inmediata, además de una serie de ensayos cíclicos, los cuales indujeron una degradación en la resistencia de la interfaz, reflejado en un valor inferior en su capacidad de carga en la falla de pico, a pesar del tiempo esperado. No obstante, para un desplazamiento comprendido entre 0.15 y 0.19 mm, la capacidad de carga de la curva de 19 horas es mayor con respecto a la de 2 horas. La rigidez inicial prácticamente es la misma en ambos casos.

La única prueba realizada bajo la modalidad de carga controlada corresponde al ensayo de extracción presentado en la Fig. 4.13 (b).

Con estos resultados se realizó una comparación de las curvas de extracción correspondientes a los tiempos de 2 y 19 horas, Fig. 4.14 (a) y (b)



(a) Pruebas de extracción  $t = 19$  horas



(b) Pruebas de extracción  $t =$  Inmediato

Figura 4.14. Comparación de resultados: ensayos de extracción principales Vs. ensayos de extracción posteriores,  $t = 19$  horas e inmediato

En la figura 4.14 (a) se distingue que la capacidad de carga en la falla de pico correspondiente a la extracción efectuada en el pilote 3, inmediatamente después del hincado, es aproximadamente el doble del valor perteneciente a la prueba de extracción efectuada en el mismo pilote, pero con fallas previas. Aunque el tiempo de reposo es común en ambas, es evidente que la historia de cargas y fallas previas disminuye notablemente la capacidad de carga de pico, cuyo límite es la resistencia residual obtenida para una interfaz muy degradada. Cuando esta interfaz no ha sido muy alterada, el valor de la capacidad de carga de pico se ve disminuida en menor medida, tal y como puede observarse en la prueba efectuada en el pilote 2; en ella, el control se realizó con carga, lo cual se refleja en la forma de la curva donde usualmente se define la resistencia residual. Se admite que la comparación del ensaye del pilote 2 con respecto a la extracción del pilote después del hincado, no es rigurosa, precisamente por la diferencia en el control. La rigidez inicial prácticamente es la misma, a excepción del ensaye del pilote 3 con fallas previas.

Con referencia a las extracciones con lapso de reposo inmediato (0 y 2 horas), Fig. 4.14 (b), la capacidad de carga pico resultó ser ligeramente mayor para el ensaye con antecedentes de falla previa que aquel efectuado inmediatamente después del hincado. Lo anterior puede explicarse por las posiciones distintas donde se efectuaron estos ensayos, aunque prácticamente la diferencia no es significativa. Con respecto a la forma de las curvas donde se define la resistencia residual, se observa, para ambos casos, la tendencia de un ligero aumento en la carga con el desplazamiento, o dicho de otra forma, endurecimiento por deformación. La causas de este comportamiento pueden atribuirse a las relaciones complejas existentes en la interacción del proceso de consolidación local y los mecanismos de envejecimiento. La rigidez inicial es ligeramente mayor para el ensaye llevado a cabo en el pilote 3.

En general, la influencia de una falla previa, – para las condiciones de este experimento en particular –, disminuye la capacidad de carga estática, contrario a lo observado por Karlsrud y Haugen (1986).

#### 4.2.3. Ensayes de extracción adicionales (pilotes rehincados)

La capacidad de carga en la falla de pico, el desplazamiento requerido para alcanzarla, así como los módulos tangentes iniciales y secante, correspondientes a los ensayos de extracción con rehincado se presentan a continuación.

Capacidad de carga

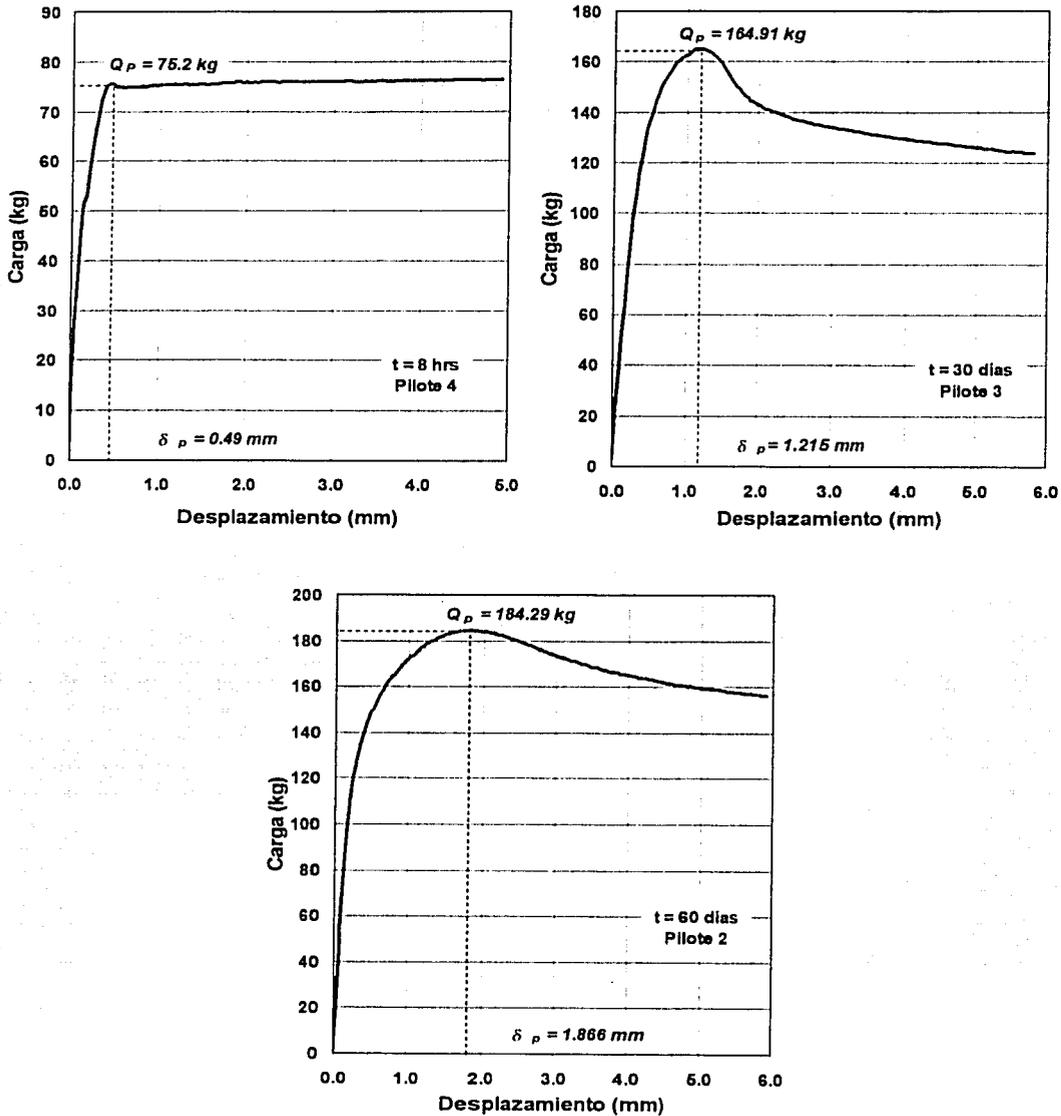


Figura 4.15. Determinación de la capacidad de carga en la falla de pico y desplazamiento a la falla en ensayos de extracción con rehincado

Módulo tangente inicial

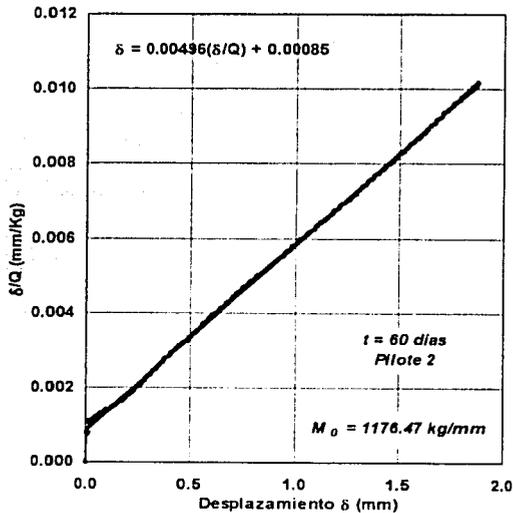
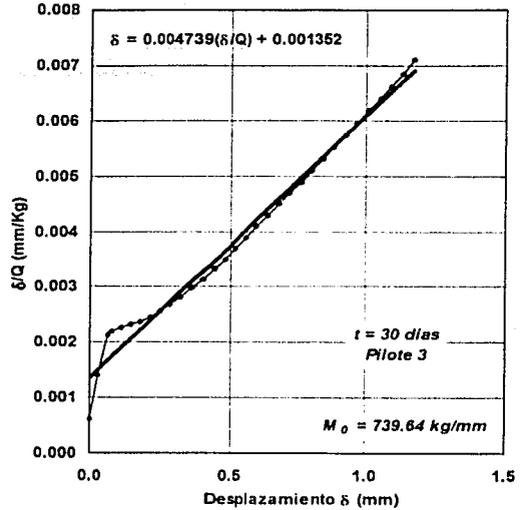
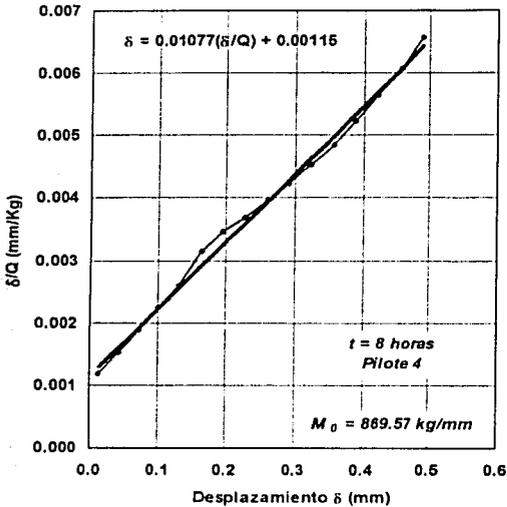
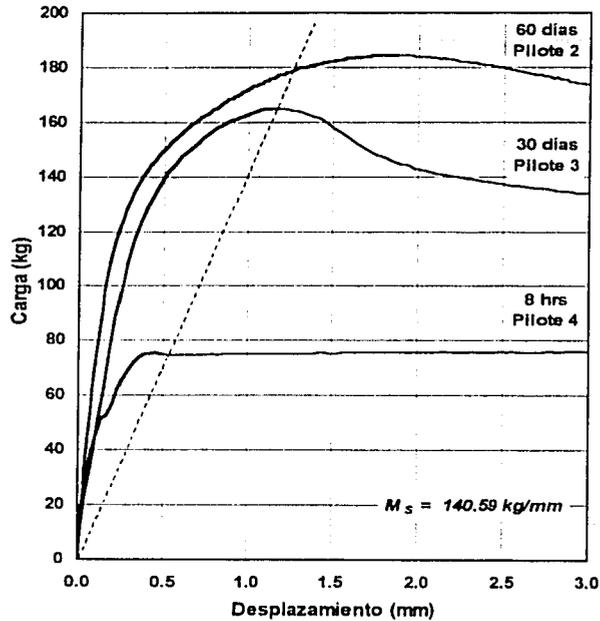


Figura 4.16. Determinación del módulo tangente inicial en ensayos de extracción con rehincado

**Módulo secante en la falla de pico**



**Figura 4.17. Determinación del módulo secante en la falla de pico en ensayos de extracción con rehincado**

**Efecto del envejecimiento en la capacidad de carga y rigidez**

La figura 4.18 presenta el efecto del tiempo en las curvas carga–desplazamiento obtenidas en los tres ensayos con rehincado, tanto en su fase de extracción como en compresión. En las figuras 4.19 y 4.20 se observa la evolución de la capacidad de falla de pico y del módulo tangente inicial, respectivamente.

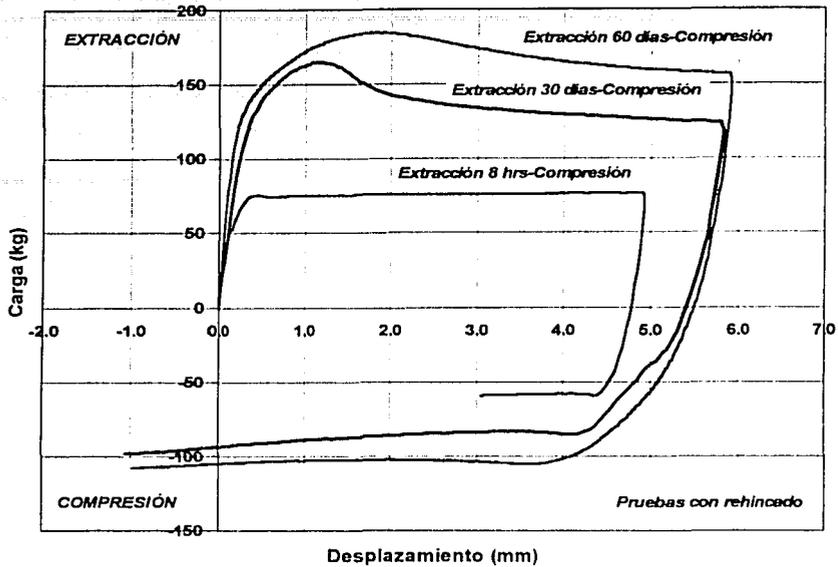


Figura 4.18. Efecto del envejecimiento en las curvas carga-desplazamiento en ensayos adicionales (con rehincado)

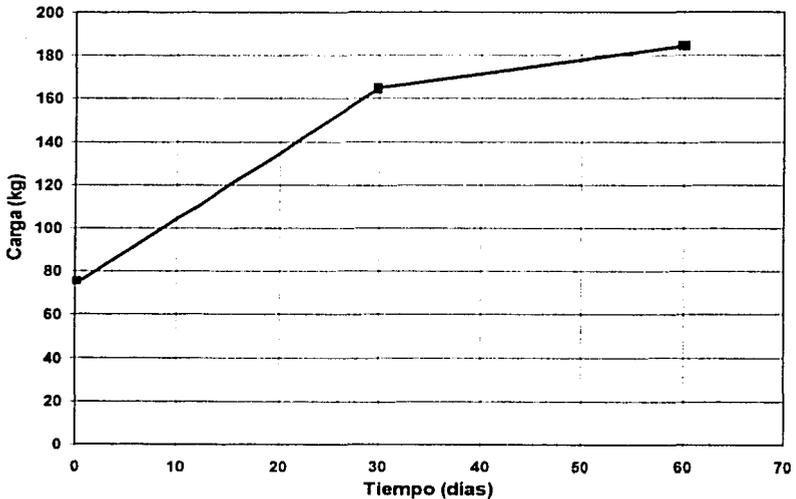
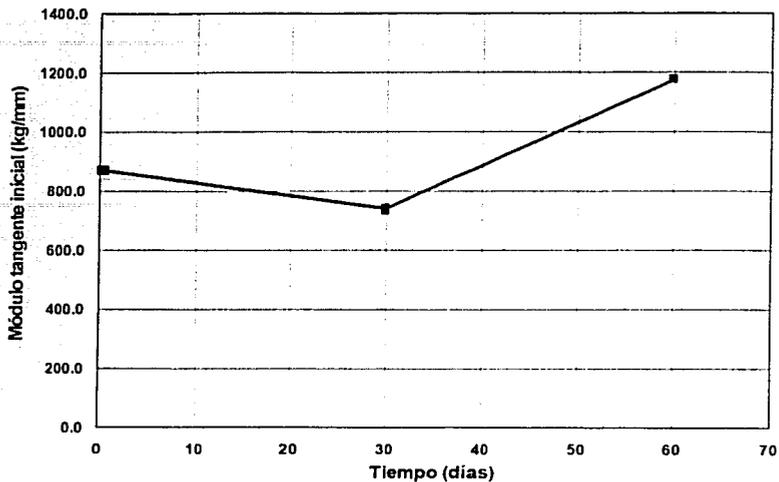


Figura 4.19. Efecto del envejecimiento en la capacidad de carga en la falla de pico en extracciones de ensayos adicionales (con rehincado)



**Figura 4.20. Efecto del envejecimiento en el módulo tangente inicial en ensayos de extracción adicionales (con rehincado)**

Como puede apreciarse en la figuras 4.18 y 4.19, existe un aumento en la capacidad de carga en la falla de pico por efecto del tiempo. Así mismo, la resistencia residual presenta la misma tendencia, al igual que la descarga y regreso de cada modelo de pilote en el sentido de la compresión. La rigidez inicial prácticamente se incrementa con una ligera disminución para el ensayo de 30 días. Lo anterior puede atribuirse a una variación en la instalación del equipo. Se puede trazar un módulo secante común a todas las pruebas, Fig. 4.17, en el lugar o zona aproximada donde se determinó la capacidad de carga en la falla de pico. Dicho módulo refleja el aumento progresivo del desplazamiento necesario para alcanzar esta falla de pico en función del tiempo.

En términos generales, la capacidad de carga y rigidez aumenta con el tiempo, con observaciones análogas para los ensayos preliminares y definitivos y con las mismas razones para explicar esta evolución: proceso de consolidación local y factores de envejecimiento.

#### **4.2.4. Resultados conjuntos: ensayos de extracción preliminares, definitivos y adicionales (con rehincado)**

En las figura 4.21 se presenta una comparación de los resultados obtenidos en la capacidad de carga de pico para los ensayos de extracción preliminares, definitivos y adicionales. De la misma forma, la figura 4.22 muestra la comparación para el módulo tangente inicial.

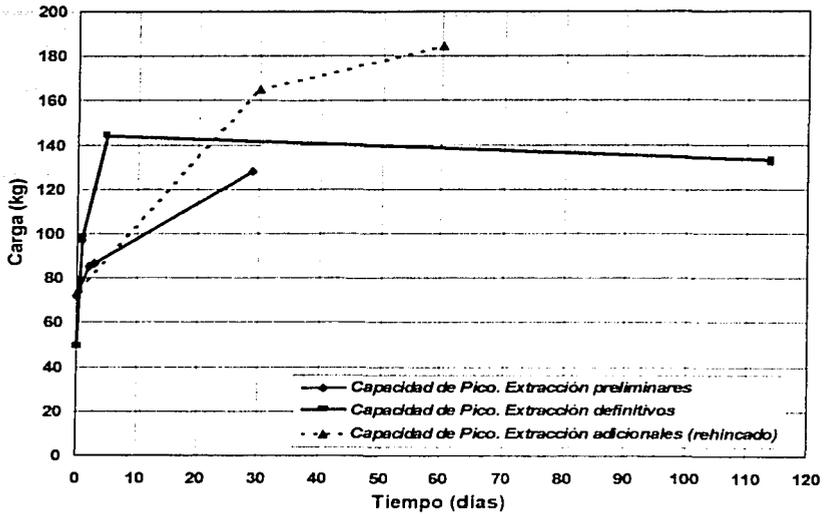


Figura 4.21. Efecto del envejecimiento en la capacidad de carga en la falla de pico: ensayos de extracción preliminar, definitiva y adicionales (rehincado)

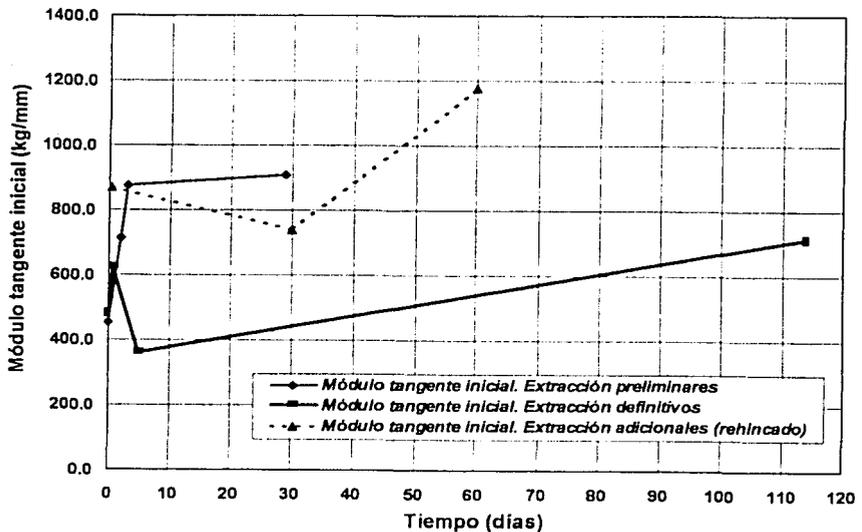


Figura 4.22. Efecto del envejecimiento en el módulo tangente inicial: ensayos de extracción preliminar, definitiva y adicionales (rehincado)

En la figura 4.21 se observa que cada tipo de ensaye (preliminar, definitivo y con rehincado) presenta su propia tendencia, lo cual es reflejo de su historia de fallas previas y la consecuente alteración de la interfaz en términos de la presión de poro generada y los cambios microestructurales. Ambos constituyen el punto de partida para definir el ritmo de evolución de la capacidad de carga por efecto del tiempo. En ese sentido, el mayor ritmo de evolución corresponde a los ensayes con rehincado, seguido de los ensayes preliminares y finalmente los definitivos, cuya gráfica tiende a la estabilización a un tiempo observable de 114 días.

Refiriéndose a la rigidez inicial, en términos generales, es mayor para los ensayes de extracción con rehincado, seguidos de los ensayes preliminares y finalmente los definitivos, Fig. 4.22. Al parecer, realizar un proceso de hincado resulta benéfico para mejorar la capacidad de carga y rigidez.

Aún cuando se ha realizado un gran esfuerzo por varios investigadores (Karlsrud y Haugen, 1985, Bogard y Matlock, 1990, Schmertmann, 1991) para conceptualizar y obtener un mejor discernimiento de las variables involucradas en este fenómeno, la compleja interacción de éstas produce relaciones todavía difíciles de cuantificar, aunque en lo que respecta a la consolidación local se han tenido ciertos avances en su entendimiento.

Cabe destacar que se omitió la estimación de la capacidad de carga utilizando métodos semiempíricos o de la práctica, debido a que éstas estimaciones ya fueron presentadas en la tesis de Luna (2001). Lo que cabe destacar es que, —con base en las propiedades del suelo marino determinadas en el laboratorio—, se obtuvo una sobrestimación de la capacidad de carga a corto plazo con estos métodos. Posiblemente, los parámetros del suelo deben ser revisados en nuevas pruebas de laboratorio.

*"Lo que sabemos es una gota de agua;  
lo que ignoramos es el océano."  
Isaac Newton.*

## **5. CONCLUSIONES**

---

En este estudio experimental se pudo comprobar que existe una evolución en la capacidad de carga y rigidez en modelos de pilotes embebidos en la arcilla marina reconstituida de la Sonda de Campeche, cuyo incremento es función directa de la naturaleza del suelo y de la influencia de la historia de fallas previas (hincado inicial, remoldeo por cargas estáticas y cíclicas o rehincado). Esto último determina el ritmo de recuperación de la interfaz suelo-pilote a través del tiempo mediante procesos de consolidación local y mecanismos de envejecimiento.

Con respecto al modelo de pilote hincado con interrupciones programadas, esta acción provoca un aumento en la resistencia del suelo a la penetración, similar a la observada durante la instalación de pilotes de escala real (Ravi, 1980). Además, por el resultado de la capacidad de carga en extracción medido, surge la siguiente hipótesis: la forma en cómo se realiza un hincado, es decir, la energía de impacto utilizada, el ritmo empleado (continuo o con interrupción), puede influir en la capacidad de carga a largo plazo.

Para las características particulares de este suelo, el efecto de falla previa, —entendiendo por esta sólo la inducida por cargas estáticas o cíclicas, sin incluir la falla por rehincado—, no se presentó. De acuerdo con Karlsrud y Haugen, 1986, este efecto proporciona un incremento adicional al inherente por envejecimiento, el cual sí observaron en su investigación.

Actualmente, el Criterio Transitorio para Evaluación y Diseño de Plataformas Marinas Fijas en la Sonda de Campeche, IMP, 1997, contempla un incremento del 20% en la resistencia al corte del suelo, cuando se realicen análisis de resistencia última para plataformas con más de 10 años de haber sido instaladas. Por los resultados obtenidos en esta investigación, se considera que el porcentaje de aumento propuesto por el Criterio Transitorio del IMP se encuentra *subestimado*. La razón de lo anterior puede ser justificada en las mediciones de capacidad de carga observadas en los ensayos de extracción definitivos, ya que éstos fueron los únicos ensayos *limpios*: es decir, se ejecutaron en pilotes distintos y sin ningún antecedente de falla previa, lo cual establece las mejores condiciones para apreciar el incremento de resistencia con el tiempo. Para observar el incremento atribuible principalmente al envejecimiento, al cual se refieren el Criterio Transitorio, —sin considerar el componente de “ganancia” por la consolidación local, entendiéndose que ello forma parte de las implicaciones del hincado de pilotes—, se descartan los ensayos correspondientes a los tiempos de 2 y 19 horas. Con referencia en la función grado de consolidación propuesta por Soderberg, se puede estimar que el 80% de la consolidación local puede ocurrir aproximadamente en dos días. —aunque el autor advierte una estimación menos precisa para ese grado de consolidación—. No obstante, se puede considerar que la prueba de 5 días efectuó la mayor parte de este proceso. De esta forma, el incremento de resistencia por factores de envejecimiento se aprecia comparando las pruebas de 5 y 114 días, y es evidente en sus resistencias residuales en el sentido de la compresión, cuya evolución es del orden del 40%. Lo anterior puede proporcionar elementos de juicio preliminar para sustentar algún factor que incremente la resistencia del suelo por efecto del envejecimiento, acorde con la experiencia observada en pilotes reales y otras consideraciones teóricas y prácticas. Si este fenómeno puede llegar a ser adecuadamente entendido, permitirá, además, una manera racional de optimizar el diseño de pilotes, como lo han señalado ya varios investigadores.

## 6. REFERENCIAS

- Bjerrum, L. (1972). "Embankments on Soft Ground". *Performance of Earth and Earth Supported Structures*. ASCE, Vol. II, Purdue University, Lafayette, Ind.
- Bogard, J. D y Matlock, H. (1990). "Application of Model Pile Test to Axial Pile Design". *OTC 6376*, Houston Texas, EUA.
- Bullock, P. J. (1999). "Pile Friction Freeze: A Field and Laboratory Study". Tesis de Maestría en Ciencias, University of Florida, EUA.
- Eide, O., y Holmberg, S. (1972). "Test Fills to Failure on the Soft Bangkok Clay". *Performance of Earth and Earth Supported Structures*. ASCE, Purdue University, Lafayette, Ind., 1.
- Fellenius, B. H., Riker, R. E., O'Brien, A. J., y Tracy, G. R. (1989). "Dynamic and Static Testing in Soil Exhibiting Set-Up". *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 7.
- Fugro-McClelland (1996). Investigación Geotécnica, Sondeo Kutz, Bahía de Campeche, México. *PEMEX Exploración y Producción. Reporte Núm. 0201-2927-22. Vol 1*. Ciudad del Carmen, Campeche, México.
- GCTS. (1999). Electro-pneumatic System for the Application of Biaxial Loads on Scaled Piles: Operating Instructions. *Geotechnical Consulting and Testing Systems*, Tempe, Arizona, USA.
- Gerwick, B. C. (2000). Construction of Marine and Offshore Structures. *CRC Press*, 2da. Edición. EUA.
- Ibarra, E. (2002). Reconstitución de un Suelo Arcilloso Marino en un Odómetro para Ensayes con Modelos de Pilotes. Tesis de Maestría en Ingeniería (Mecánica de Suelos), DEPMI, UNAM, México, D. F.

- IMP. (1997). Criterio Transitorio para la Evaluación y el Diseño de Plataformas Marinas Fijas en la Sonda de Campeche. *PEMEX Exploración y Producción, Instituto Mexicano del Petróleo Sudirección de Ingeniería*, México, D.F.
- Jaime, A., Rojas, E., y Legorreta, H. (1991). Pilotes de Fricción Hincados en arcilla blanda. Respuesta bajo carga estática. *Series del Instituto de Ingeniería, UNAM*, No. 543, México.
- Karlrsrud, K., y Haugen, T. (1985). "Axial Static Capacity of Steel Model Piles in Overconsolidated Clay". *Publicación No. 16*, Norwegian Geotechnical Institute, Noruega, Oslo.
- Kehoe, S. P. (1989). "An Analysis of Time Effects on the Bearing Capacity of Driven Piles". *Report*, Department of Civil Engineering, University of Florida, Gainesville, Florida, EUA.
- Kondner, R. L. (1963). "Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils". *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 89, No. SM1.
- Lambe, T. W. (1953). "The Structure of Inorganic Soil". *Proc.*, ASCE, Vol. 79, No.315.
- Leonards, G. A. (1972). General Discussion of Session III, ASCE Performance of Earth and Earth-Supported Structures, Purdue University, Lafayette, Ind., III.
- Lessard, G., y Mitchell, J. K. (1985). "The Causes and Effects of Aging in Quick Clays". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22.
- Long, L. G. (1980). "Comparison of Field and Laboratory Dynamic Soil Properties". Tesis de Maestría en Ciencias, University of Texas, Austin, Texas, EUA.
- Luna, O. J. (2002). Diseño, Construcción y Puesta en Operación de Modelos de Pilotes de Fricción bajo Cargas Axiales Estáticas y Cíclicas. Tesis de Maestría en Ingeniería (Mecánica de Suelos), DEPMI, UNAM, México, D. F.
- Mendoza, M. J. (1982). Características Esfuerzo-Deformación de Suelos Cohesivos Compactados: Efectos Estructurales. Tesis de Maestría en Ingeniería (Mecánica de Suelos), DEPMI, UNAM, México, D. F.

Mendoza, M. J., Luna, O. J., Sánchez J., Ibarra, E., Díaz, G. (1998). "Respuesta de la Cimentación de una Plataforma Marina Fija bajo el Efecto de Cargas Cíclicas y Dinámicas en la Sonda de Campeche, 1ª. Etapa". Quinto y Sexto Informe de Avance, Proyecto FIES IMP – IIUNAM, México.

Mendoza, M. J., Romo, M. P., Barrera, P., Olivares, A., Rojas, E., Sánchez, J., Luna, O., y Valle, C. (1998). "Acerca de la Experimentación con Modelos a Escala de Pilotes de Fricción para Plataformas Marinas". *Memorias de la XIX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Puebla, México. Vol. 1.

Mendoza, M. J., Ibarra, E., Sánchez J., Luna, O. J., Orozco, M. (2000). "Características Geotécnicas de Suelos Arcillosos Reconstituidos, Sustitutos de los Naturales: Dos Usos". *Memorias de la XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Oaxaca, México, Vol. 1.

Mendoza, M. J., Ibarra, E., Luna, Cruz, E. (2002). "Respuesta de la Cimentación de una Plataforma Marina Fija bajo el Efecto de Cargas Cíclicas y Dinámicas en la Sonda de Campeche, 2ª. Etapa". Segundo Informe de Avance, Proyecto FIES IMP – IIUNAM, México.

Mesri, G., Feng, T. W., y Benak, J. M. (1990). "Postdensification Penetration Resistance of Clean Sands". *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 7.

Meymand, P. J. (1998). Shaking Table Scale Model Test of Nonlinear Soil-Pile-Structure Interaction in Soft Clay. Tesis doctoral, University of California, Berkeley, EUA.

Mitchell, J. K. (1960). "Fundamental Aspects of Thixotropy in Soils". *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 86, No. 3.

Mitchell, J. K. (1976). Fundamentals of Soil Behavior. *John Wiley & Sons*, Nueva York, EUA.

Mitchell, J. K. (1986). "Practical Problems from Surprising Soil Behavior". *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 3.

Murff, D. (2001). Foundation Engineering for Offshore Structures. *Offshore Engineering Conference*, Texas A&M University, College Station Texas, EUA.

- Osterman, J. (1960). "Notes on the Shearing Resistance of Soft Clays". *Acta Polytechnica Scandinavica*, Estocolmo, Suecia.
- Ravi, P. (1980). "Case Studies of Pile Set-Up in the Gulf of Mexico". *OTC 3824*, Houston Texas, EUA.
- Sánchez, J. (2000). *Sedimentación y Consolidación con Deformaciones Grandes de Suelos Arcillosos Marinos*. Tesis de Maestría en Ingeniería (Mecánica de Suelos), DEPMI, UNAM, México, D. F.
- Schmertmann, J. H. (1991). "The Mechanical Aging of Soils". *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 9.
- Tavenas, F., y Audy, R. (1972). "Limitations of the Driving Formulas for Predicting the Bearing Capacities of Piles in Sand". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 9.
- Tavenas F. A., Roy M., y La Rochelle P. (1973). "An Artificial Material for Simulating Champlain Clays". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 10.
- Terzaghi, K. (1941). "Undisturbed clay samples and undisturbed clays". *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 3.
- Terzaghi, K., y Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, 2da. Edición, Nueva York, EUA.
- Thorburn, S. (1980). "A Practical Study of Pile Behavior". *OTC 3825*, Houston Texas, EUA.
- Valle, C. (1997). *Modelado del Comportamiento de Pilotes de Fricción bajo carga axial estática y cíclica*. Tesis de Maestría en Ingeniería (Mecánica de Suelos), DEPMI, UNAM, México, D.F.
- Yasuhara, K., y Ue, S. (1983). "Increase in Undrained Shear Strength due to Secondary Compression". *Soils and Foundation*, Vol. 23, No. 3, Japón.
- Zeevaert, L. (1983). *Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions*. Van Nostrand Reinhold Company, 2a. Edición.