

01163

5

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPFI



**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN OPERACIÓN DE MODELOS  
DE PILOTES DE FRICCIÓN BAJO CARGAS AXIALES ESTÁTICAS Y CÍCLICAS**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA  
(MECÁNICA DE SUELOS)**

**P R E S E N T A :**

**OSCAR JESÚS LUNA GONZÁLEZ**

Director de tesis: M. en I. Manuel J. Mendoza López

MÉXICO, D.F.  
septiembre, 2002

**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.

ESTA TESIS NO BALA  
EN LA BIBLIOTECA

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la  
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el  
contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Oscar Jesús Luna  
González

FECHA: 19/09/03/

FIRMA: [Firma]

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Resumen

Se describe en esta tesis el diseño, construcción, calibración y puesta en operación de un modelo físico de pilote de fricción para el estudio de las cimentaciones de plataformas marinas fijas tipo *Jacket*. El modelo de pilote está formado por un tubo de duraluminio de 2.64 cm de diámetro exterior y 90 cm de longitud, con punta del mismo material y ápice de 60°, el cual se hincará en un suelo arcilloso marino. El modelo cuenta con 21 sensores agrupados de la siguiente manera: 4 sensores de carga, 4 de presión total, 4 de presión de poro y 9 de flexión, todos ellos basados en deformímetros eléctricos (*strain gages*). Los sensores están distribuidos a lo largo del fuste del pilote y miden las variables geotécnicas más significativas asociadas al mecanismo de transferencia de carga por fricción del pilote al suelo circundante. La medición de estas variables permitirá evaluar la conveniencia de analizar la fricción desarrollada en el fuste en términos de esfuerzos efectivos. Se describe el sistema de aplicación de cargas y el sistema de adquisición automática de datos necesarios para los ensayos con el modelo de pilote instrumentado. Se muestran los registros de los sensores del modelo ensayándolo de manera preliminar en un suelo artificial; mostrando los resultados de carga, presión total, presión de poro y flexión en el hincado, bajo carga axial estática monótonicamente creciente y desplazamiento axial cíclico, comentando los resultados obtenidos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN OPERACIÓN DE MODELOS DE PILOTES DE FRICCIÓN BAJO CARGAS AXIALES ESTÁTICAS Y CÍCLICAS

## Índice

	Página
<b>Introducción</b> .....	i
<i>1.1. Antecedentes</i> .....	i
<i>1.1.1. Proyecto de investigación</i> .....	i
<i>1.1.2. Etapas del proyecto</i> .....	ii
<i>1.2. Objetivo y alcances</i> .....	iii
<i>1.3. Organización de la tesis</i> .....	iv
<b>Capítulo 1</b> Consideraciones acerca del diseño de pilotes de fricción, bajo cargas axiales estáticas y cíclicas.....	1
<i>1.1. Cimentaciones resueltas con pilotes</i> .....	1
<i>1.2. Sobre las soluciones teóricas con pilotes de fricción bajo carga axial estática</i> .....	3
<i>1.2.1. Resistencia por punta del pilote</i> .....	5
<i>1.2.2. Resistencia por fricción del pilote</i> .....	7
<i>1.3. Sobre las soluciones teóricas con pilotes de fricción bajo carga axial cíclica</i> .....	9
<b>Capítulo 2</b> Antecedentes de diseño de experimentos con modelos físicos de pilotes de fricción.....	13
<i>2.1. Análisis dimensional, similitud y sus implicaciones</i> .....	13
<i>2.1.1. Análisis dimensional</i> .....	14
<i>2.1.1.1. Teorema <math>\pi</math> de Buckingham</i> .....	14
<i>2.1.2. Similitud</i> .....	17
<i>2.1.3. Implicaciones en el modelado de experimentos</i> .....	18
<i>2.2. Estudios previos de experimentos con modelos físicos de pilotes de fricción</i> .....	19
<b>Capítulo 3</b> Instrumentación de un modelo físico de pilote de fricción.....	27
<i>3.1. Descripción del experimento realizado con modelos de pilotes de fricción</i> .....	27
<i>3.2. Diseño del modelo de pilote</i> .....	31
<i>3.2.1. Determinación de la geometría y el material del modelo de pilote</i> .....	31
<i>3.2.2. Sensores en el modelo de pilote y su distribución</i> .....	32
<i>3.2.3. Variables de medición</i> .....	33

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

3.3.	<i>Diseño de los sensores del modelo de pilote</i> .....	34
3.3.1.	<i>Estimación de la capacidad de carga del modelo de pilote</i>	34
3.3.2.	<i>Celdas de carga axial</i>	36
3.3.3.	<i>Celdas de flexión</i>	39
3.3.4.	<i>Celdas de presión total</i>	40
3.3.5.	<i>Transductores de presión de poro</i>	43
3.4.	<i>Construcción del modelo de pilote</i> .....	44
3.4.1.	<i>Maquinado</i>	44
3.4.2.	<i>Pegado de strain gages y conectores</i>	47
3.4.3.	<i>Montaje</i>	48
3.5.	<i>Calibración de los sensores</i> .....	49
3.5.1.	<i>Sensores PT y PP</i>	50
3.5.2.	<i>Sensores CC</i>	52
3.5.3.	<i>Sensores CF</i>	54
3.5.4.	<i>Posición final de los sensores</i>	55
<b>Capítulo 4</b>	<b>Sistemas auxiliares para el ensaye con el modelo de pilote de fricción</b> ... 57	
4.1.	<i>Descripción del sistema electroneumático de aplicación de cargas estáticas y cíclicas</i> .....	57
4.2.	<i>Puesta en marcha del sistema de aplicación de cargas</i> .....	60
4.2.1.	<i>Marco de carga</i>	60
4.2.2.	<i>Calibración de transductores</i>	61
4.2.3.	<i>Selección de parámetros PID</i>	62
4.2.4.	<i>Ajuste de servoválvulas</i>	63
4.3.	<i>Descripción del sistema de adquisición automática de datos</i> .....	64
4.4.	<i>Puesta en marcha del sistema de adquisición de datos</i> .....	65
4.4.1.	<i>Manejo físico de señales</i>	65
4.4.2.	<i>Programación</i>	67
4.5.	<i>Sistema de instalación del pilote</i> .....	70
4.5.1.	<i>Marco guía y placas guía</i>	70
4.5.2.	<i>Sistema de hincado</i>	71


  
 TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

<b>Capítulo 5</b>	<b>Comportamiento del modelo de pilote instrumentado a partir de ensayos preliminares estáticos y cíclicos</b>	<b>73</b>
5.1.	<i>Suelo artificial para el ensaye preliminar del modelo</i>	73
5.2.	<i>Hincado del modelo de pilote</i>	74
	5.2.1. <i>Cargas axiales</i>	76
	5.2.2. <i>Presión de poro</i>	79
	5.2.3. <i>Presión total</i>	81
	5.2.4. <i>Flexión</i>	82
5.3.	<i>Ensaye bajo carga axial estática</i>	83
	5.3.1. <i>Cargas axiales</i>	84
	5.3.2. <i>Presión de poro</i>	86
	5.3.3. <i>Presión total</i>	87
	5.3.4. <i>Flexión</i>	87
5.4.	<i>Ensaye bajo desplazamiento axial cíclico</i>	89
	5.4.1. <i>Cargas axiales</i>	89
	5.4.2. <i>Presión de poro</i>	91
	5.4.3. <i>Presión total</i>	91
	5.4.4. <i>Flexión</i>	92
5.5.	<i>Comentarios sobre los ensayos preliminares</i>	94
	5.5.1. <i>Hincado</i>	94
	5.5.2. <i>Ensaye bajo carga estática</i>	94
	5.5.3. <i>Ensaye bajo desplazamiento cíclico</i>	95
<b>Conclusiones y recomendaciones</b>		<b>97</b>
<b>Referencias</b>		<b>99</b>


  
**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

- Fig. I.1      Plataforma marina fija tipo "Jacket", ubicada en la Sonda de Campeche*
- Figura 1.1    Esquema de transferencia de carga de un pilote de fricción*
- Figura 2.1    Esquema del equipo utilizado por Holmquist y Matlock, 1976*
- Figura 2.2    Esquema del equipo utilizado por Procter y Khaffaf, 1987*
- Figura 2.3    Modelo de pilote utilizado por Coop y Wroth, 1989*
- Figura 2.4    Modelo de pilote utilizado por Bond, Jardine y Dalton, 1991*
- Figura 3.1    Esquema general del experimento con el modelo de pilote en suelo marino reconstituido*
- Figura 3.2    Vista del odómetro O-97-5 conteniendo al suelo reconstituido y sometido a presión con un gato hidráulico*
- Figura 3.3    Distribución de los sensores colocados en el modelo de pilote*
- Figura 3.4    Celda de carga axial junto con el esquema de puente completo*
- Figura 3.5    Celda de flexión junto con el arreglo de un cuarto de puente para cada SG*
- Figura 3.6    Esquema de las deformaciones del diafragma circular*
- Figura 3.7    Celda de presión total tipo diafragma junto con su arreglo en puente completo*
- Figura 3.8    Esquema de la colocación de los transductores de presión de poro*
- Figura 3.9    Dimensiones del maquinado de las secciones reducidas para las celdas de carga (CC) y celdas de flexión (CF)*
- Figura 3.10   Dimensiones del maquinado de las preparaciones para las celdas de presión total (PT) y transductores de presión de poro (PP)*
- Figura 3.11   Distribución de las preparaciones en el modelo de pilote*
- Figura 3.12   Dimensiones del maquinado de la punta del pilote*
- Figura 3.13   Maquinado del diafragma circular plano*
- Figura 3.14   Maquinado de la pieza de soporte para el PP*
- Figura 3.15   Implementación del PT*
- Figura 3.16   Implementación del PP*
- Figura 3.17   Esquema del dispositivo utilizado para calibrar los sensores PT y PP.*
- Figura 3.18   Gráficas de calibración de los sensores PP 1 y PT 1*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- Figura 3.19* Arreglo del modelo de pilote junto con el actuador neumático para la calibración de las celdas de carga
- Figura 3.20* Gráfica de calibración del sensor CC 1
- Figura 3.21* Esquema de ubicación de los sensores de flexión
- Figura 3.22* Posición de calibración del modelo de pilote
- Figura 3.23* Gráfica de calibración del sensor CF 1-1
- Figura 3.25* Niveles de los sensores con respecto a la cabeza del pilote, para cada CC, PT, PP y CF.
- Figura 4.1* Esquema de funcionamiento del Sistema de Aplicación de Cargas (SAC)
- Figura 4.2* Esquema del marco de carga
- Figura 4.3* Gráficas de comando vs. respuesta en el SAC con PID bajos
- Figura 4.4* Gráficas de comando vs. respuesta en el SAC con PID altos
- Figura 4.5* Esquema del Sistema de Adquisición de Datos (SAD)
- Figura 4.6* Ventana inicial de calibración de sensores.
- Figura 4.7* Selección del sensor por calibrar y su constante de calibración
- Figura 4.8.* Pantalla de módulo de adquisición de datos
- Figura 4.9* Marco guía y placas guía para la instalación del pilote
- Figura 4.10* Posición del marco guía en el odómetro O-97-5
- Figura 4.11* Elementos del sistema a percusión
- Figura 5.1* Características geométricas y dosificación de la probeta de suelo artificial para los ensayos preliminares con el modelo de pilote
- Figura 5.2* Preparativos para el hincado del modelo de pilote
- Figura 5.3* Marcas en el modelo de pilote y procedimiento de hincado
- Figura 5.4* Registro de cargas y penetración del modelo de pilote en la colocación del sistema de hincado
- Figura 5.5* Registro de cargas y penetración del modelo de pilote en los primeros impactos
- Figura 5.6* Registro de cargas y penetración del modelo de pilote en la última etapa del hincado
- Figura 5.7* Registro de presión de poro en el proceso de hincado
- Figura 5.8* Registro de presión de poro en el sensor PP 4 durante el hincado

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- Figura 5.9 Registro de presión total en el proceso de hincado*
- Figura 5.10 Registro de la flexión en los tres niveles de medición del modelo de pilote instrumentado*
- Figura 5.11 Flexión en el tercer nivel del modelo de pilote en la última etapa del hincado*
- Figura 5.12 Carga axial externa inducida en el modelo de pilote instrumentado*
- Figura 5.13 Cargas axiales internas en el modelo de pilote instrumentado*
- Figura 5.14 Distribución de cargas axiales internas en el modelo de pilote*
- Figura 5.15 Presión de poro en el modelo de pilote bajo carga estática*
- Figura 5.16 Presión total en el modelo de pilote bajo carga estática*
- Figura 5.17 Flexión en los tres niveles del modelo de pilote bajo carga estática*
- Figura 5.18 Desplazamiento cíclico inducido en el modelo de pilote*
- Figura 5.19 Carga externa contra desplazamiento axial en ensaye bajo desplazamiento axial cíclico*
- Figura 5.20 Cargas en el modelo de pilote en ensaye bajo desplazamiento axial cíclico*
- Figura 5.21 Presión de poro en el modelo de pilote en ensaye bajo desplazamiento cíclico*
- Figura 5.22 Presión total en el modelo de en ensaye bajo desplazamiento cíclico*
- Figura 5.23 Flexión en los tres niveles del modelo de pilote en ensaye bajo desplazamiento cíclico*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- Tabla 1.1*      *Expresiones para estimar la resistencia del suelo en la punta del pilote con base en las propiedades del suelo.*
- Tabla 1.2*      *Expresiones para estimar la resistencia del suelo en la punta del pilote, con base en pruebas de campo.*
- Tabla 1.3*      *Expresiones para estimar la resistencia por fricción del pilote con base en las propiedades del suelo.*
- Tabla 1.4*      *Expresiones para estimar la resistencia por fricción en el fuste del pilote con base en pruebas in-situ.*
- Tabla 2.1*      *Variables del sistema pilote-suelo bajo carga lateral, Kana, 1986*
- Tabla 3.1*      *Pendientes de calibración para los sensores PP y PT dispuestos en el modelo de pilote*
- Tabla 3.2*      *Pendientes de calibración para los sensores CC dispuestos en el modelo de pilote*
- Tabla 3.3*      *Pendientes de calibración para los sensores CF dispuestos en el modelo de pilote Fig. 3.24 Distribución de los sensores y dimensiones*
- Tabla 4.1*      *Pendientes de calibración para las celdas de carga del SAC*
- Tabla 4.2*      *Pendientes de calibración de los LVDT del SAC*
- Tabla 4.3*      *Sensores que componen la instrumentación del experimento*
- Tabla 4.4*      *Direccionamiento de los sensores a los multiplexores*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# Introducción

## ***1.1. Antecedentes***

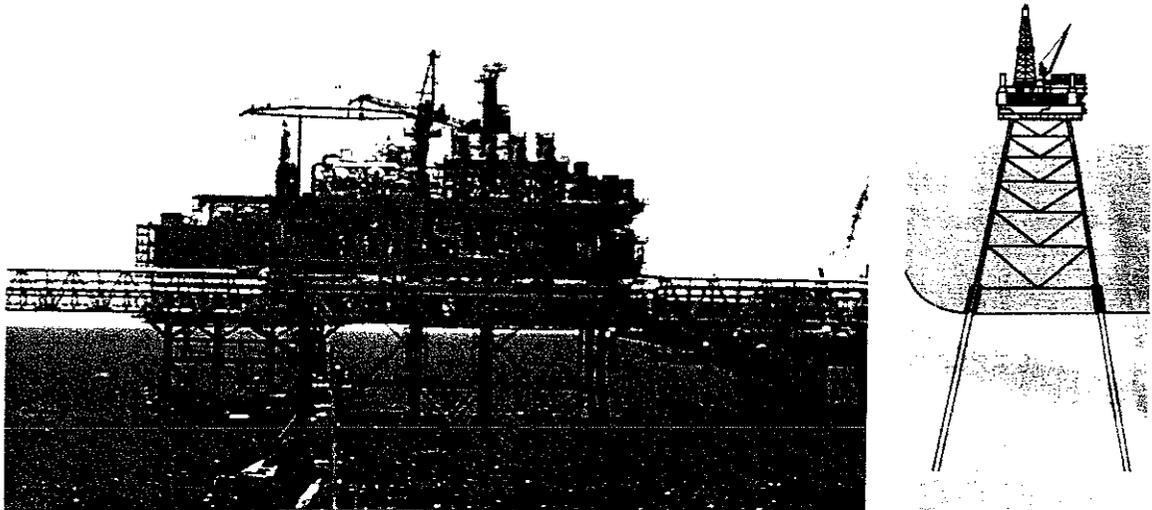
### ***1.1.1. Proyecto de investigación***

El Instituto de Ingeniería (II), en colaboración con el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), desarrollan un proyecto de investigación titulado: "Respuesta de la cimentación de una plataforma marina fija bajo el efecto de cargas cíclicas y dinámicas en la Sonda de Campeche". Este proyecto tiene como objetivo general, estudiar el comportamiento cíclico y dinámico de pilotes de fricción en arcillas para plataformas marinas fijas tipo "*Jacket*", realizando ensayos con modelos que tomen en cuenta las características de los suelos de la Sonda de Campeche y las dimensiones y forma de hincado de los pilotes. Asimismo, se pretende establecer metodologías de análisis y diseño para evaluar el comportamiento no lineal del sistema suelo-pilote en condiciones estáticas, cíclicas y dinámicas, validándolas con los resultados de la experimentación con modelos.

La mayoría de las plataformas marinas ubicadas en la Sonda de Campeche son fijas del tipo "*Jacket*", Fig. I.1, con cimentación de pilotes de fricción. El *Jacket* es una estructura metálica tipo armadura que sobresale del nivel medio del mar algunos metros y cubre el tirante de agua del sitio llegando hasta la línea de lodos o fondo marino. Las patas que forman el *jacket* son tubos metálicos y dentro de ellas se guían los pilotes de fricción durante su hincado.



Los pilotes de fricción son tubos de acero, de punta abierta, con diámetros que varían de 106 a 152 cm (42" a 60"), hincados en el suelo marino a profundidades de 80 hasta 110 m de acuerdo con el tipo de plataforma. Estos pilotes son hincados a percusión con martillos de vapor de gran capacidad. La cabeza del pilote es soldada a las patas del *jacket* y posteriormente, reciben unos carretes de transición donde se coloca el piso de la plataforma, finalizando así la instalación de la plataforma.



*Fig. I.1 Plataforma marina fija tipo "Jacket", ubicada en la Sonda de Campeche*

La cimentación de este tipo de obras debe resistir las acciones de operación, oleaje, viento y sismos que afectan a la plataforma y a su cimentación durante su vida útil; es decir, los pilotes deben ser diseñados para resistir las cargas axiales y laterales estáticas, cíclicas y dinámicas a las que están sometidos por las condiciones de carga imperantes en el sitio.

Generalmente, el diseño de pilotes para estas plataformas se basa en normas que proponen expresiones en términos de esfuerzos totales, ignorando la variación de la presión de poro y su afectación en la resistencia por fricción del pilote desde el hincado hasta las condiciones de operación; por lo que en este proyecto, se busca proponer soluciones teórico-numéricas en términos de esfuerzos efectivos, calibradas con los resultados de la experimentación con modelos de pilotes instrumentados, capaces de medir las variables geotécnicas asociadas al mecanismo de transferencia de carga pilote-suelo. La medición de estas variables permitirá discutir acerca de la conveniencia de analizar la fricción desarrollada en el fuste en términos de esfuerzos efectivos.

### ***1.1.2. Etapas del proyecto***

A continuación se describen brevemente las etapas del proyecto de investigación:

- Reconstitución de un suelo arcilloso marino. Se reconstituyó una gran muestra de suelo marino traído de la Sonda de Campeche, en el cual se realizarán 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 y consolidación; éste por peso muerto, luego por presión neumática y finalmente por presión hidráulica. El seguimiento de tal reconstitución, así como sus resultados fueron motivo de otra tesis de maestría (Ibarra, 2002).
- Sistemas auxiliares. Para la experimentación con modelos de pilotes instrumentados fue necesario contar un sistema de aplicación de cargas, un sistema de adquisición automática de datos y un sistema de instalación del pilote.
- Modelo de pilote instrumentado. La experimentación con modelos se realiza con un modelo de pilote de fricción instrumentado, el cual cuenta con 21 sensores agrupados de la siguiente manera: 4 sensores de carga, 4 de presión total, 4 de presión de poro y 9 de flexión. En esta etapa se realizó el diseño, construcción y calibración del modelo.
- Ensayos preliminares. Con el fin de verificar la instrumentación del modelo y el funcionamiento de los sistemas auxiliares, se realizaron ensayos preliminares con el modelo hincándolo en un suelo artificial, bajo carga estática monotónicamente creciente y bajo desplazamiento controlado.
- Ensayos definitivos. Después de la verificación de los sistemas, 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.
- 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 abarca fundamentalmente el desarrollo del modelo de pilote instrumentado y los ensayos preliminares

## 1.2. Objetivo y alcances

El objetivo de esta tesis es el desarrollo de un modelo físico de pilote de fricción instrumentado, capaz de medir las variables geotécnicas relacionadas con el mecanismo de transferencia de carga pilote-suelo, a través de sensores eléctricos dispuestos en el modelo. La medición de estas variables permitirá discutir acerca de la conveniencia de analizar la fricción desarrollada en el fuste en términos de esfuerzos efectivos.



Los alcances de esta tesis son:

- Diseño y construcción del modelo de pilote
- Diseño y calibración de los sensores dispuestos en el modelo de pilote de fricción.
- Puesta en operación de los sistemas auxiliares para el ensaye con el modelo de pilote.
- Verificación del funcionamiento de los sensores y de los sistemas auxiliares, a partir de ensayes preliminares bajo carga estática y desplazamiento axial cíclico.

### **1.3. Organización de la tesis**

En el capítulo 1 se revisan algunas expresiones comúnmente utilizadas en el diseño de pilotes de plataformas marinas; con el fin de estimar la capacidad de carga estática del modelo, así como su comportamiento ante cargas cíclicas.

En el capítulo 2 se comenta sobre la experimentación con modelos y las características que se deben cumplir para extrapolar los resultados del modelo hacia el prototipo. Adicionalmente se muestran los aspectos relevantes en diseños de modelos de pilotes a pequeña escala realizados por diferentes autores, con el fin de orientar el diseño del modelo de pilote desarrollado en el Instituto de Ingeniería.

El diseño, construcción, puesta en operación y calibración del modelo de pilote instrumentado se comentan en el capítulo 3, mostrando detalles de diseño de sensores basados en *strain gages*, material, tipo de sensores, así como su posición final.

Para poder ensayar el modelo bajo cargas axiales y laterales estáticas, cíclicas y dinámicas, fue necesario poner en operación varios sistemas, tales como el sistema electroneumático de aplicación de cargas, el sistema de adquisición automática de datos y el sistema de instalación del modelo, los cuales son descritos en el capítulo 4.

Finalmente, en el capítulo 5 se muestran los registros de los sensores del modelo al ensayarlo en un suelo artificial, para la verificación de los sistemas y de la instrumentación del modelo. Así pues, en las conclusiones y recomendaciones se comentan las bondades y limitaciones del modelo de pilote de fricción instrumentado.



# Capítulo 1

## Consideraciones acerca del diseño de pilotes de fricción, bajo cargas axiales estáticas y cíclicas

En este capítulo se revisan algunas expresiones comúnmente utilizadas en el diseño de pilotes de plataformas marinas; con el fin de estimar la capacidad de carga estática del modelo de pilote instrumentado, así como su comportamiento ante cargas cíclicas.

### **1.1. Cimentaciones resueltas con pilotes**

Todo objeto que descansa sobre la superficie terrestre se sustenta en el suelo transfiriéndole su peso; las formas de transmisión de cargas de la edificación al suelo son muchas y muy variadas, dependiendo del tipo de cimentación seleccionada.

Para definir la cimentación de una obra civil, es necesario tomar en cuenta varios aspectos, entre los más importantes está el tipo de estructura, las cargas que ejerce al suelo y el tipo de suelo donde se pretende desplantar la obra. El utilizar pilotes en una cimentación implica que las cargas de la edificación serán transferidas al suelo a estratos más profundos; esto es, se tendrá una transferencia de cargas que incrementará los esfuerzos en el suelo desde el nivel de desplante hasta profundidades mayores de la longitud de los pilotes.

Los pilotes son elementos prismáticos y esbeltos, de gran rigidez axial con respecto al suelo donde se hincan y se pueden clasificar según la forma en cómo

transmiten la carga de la edificación al subsuelo, teniendo principalmente dos grupos: pilotes de punta y pilotes de fricción. Los pilotes de punta transportan la carga aplicada en ellos directamente de la cabeza hasta la punta, la cual está apoyada en un estrato competente; en cambio, los pilotes de fricción transfieren las cargas de la edificación al suelo que los rodea por medio de fricción en su fuste principalmente. La transferencia de carga del pilote de fricción al suelo depende de la rugosidad del fuste, de las características de suelo circundante, de la geometría del pilote, del proceso de instalación, entre otras características (Vesić 1970).

Generalmente, una cimentación resuelta con pilotes de fricción para una edificación en tierra acompaña a otro sistema de cimentación, ya sean zapatas, losa o cajón de cimentación, obteniéndose un trabajo conjunto, generando presiones de contacto al nivel de desplante de la cimentación superior y fricción a lo largo del fuste de los pilotes. En el caso de cimentaciones fuera de costa, los pilotes son los únicos elementos que soportan todas las cargas de la estructura a las que está sujeta durante su vida útil, tales como las acciones de operación, oleaje, viento, sismo, entre otras.

En el caso de la ciudad de México, es común tener edificios de cuatro o más pisos cimentados con pilotes de fricción en la zona de lago, caracterizada por formaciones de arcilla lacustre de baja resistencia al esfuerzo cortante y gran compresibilidad. El diseño de cimentaciones con pilotes de fricción debe cumplir con dos estados límite: de falla y de servicio. En condiciones estáticas, los pilotes pueden ser diseñados para el control de asentamientos en cimentaciones mixtas de cajón de cimentación con pilotes. En este caso, los pilotes están penetrando constantemente en el suelo, adquiriendo una resistencia correspondiente a la generación de fricción positiva máxima en toda su longitud; no así los pilotes diseñados para soportar todo el peso de la edificación (pilotes por capacidad de carga) ya que en ellos se genera sólo el nivel de fricción positiva necesaria para contrarrestar las cargas aplicadas (Auvinet y Mendoza, 1986).

Las cimentaciones en plataformas marinas tipo *Jacket*, como es el caso particular de las situadas en la Sonda de Campeche, están resueltas con 3, 4, 6 y hasta 8 pilotes de fricción aislados, de aproximadamente 100 m de longitud y 1.5 m de diámetro, dependiendo del uso de la plataforma. Cada pilote trabaja en forma aislada por su gran espaciamiento entre ellos (casi 26 m en la parte más cercana), además de que se hincan en el suelo marino de manera inclinada. Se utilizan pilotes de fricción ya que, entre otras cosas, no se tiene un estrato competente a poca profundidad para apoyarlos en su punta y se tiene incertidumbre sobre las propiedades de estratos arenosos.

Las plataformas marinas fijas tipo *Jacket*, ubicadas en la Sonda de Campeche tienen los siguientes usos:

- Plataformas de perforación
- Plataformas de inyección

- Plataformas de producción
- Plataformas de enlace
- Plataformas habitacionales
- Plataformas de compresión de gas
- Plataformas de rebombeo
- Plataformas de telecomunicaciones
- Plataformas recuperadoras
- Plataformas para quemador
- Plataformas de apoyo intermedio

Actualmente el número de plataformas fuera de costa instaladas en México asciende a 208, de las cuales 187 están instaladas en la Sonda de Campeche (Enríquez, 1999).

Lo anterior muestra la importancia de conocer con mayor precisión la forma en cómo obtienen la capacidad de carga los pilotes de fricción, ya que a la fecha no se cuenta con criterios de diseño propios para las condiciones imperantes en la Sonda de Campeche y se tiene desconocimiento acerca del funcionamiento de los mismos, de cómo transfieren la carga aplicada en ellos al subsuelo y de cómo varía su resistencia con el tiempo.

## **1.2. Sobre las soluciones teóricas con pilotes de fricción bajo carga axial estática**

La capacidad de carga última estática de los pilotes de fricción es la carga máxima aplicable en la cual ocurre un desplazamiento relativo excesivo entre el pilote y el suelo. El trabajo de los pilotes se considera de la manera siguiente: el pilote al ser hincado, genera un desplazamiento de suelo alterándolo en sus propiedades mecánicas iniciales y transfiriéndole la carga del pilote al suelo por medio de fricción en el fuste primordialmente; es decir, la carga que se aplica al pilote en su cabeza, se va transfiriendo al suelo por medio de esfuerzos cortantes alrededor del pilote en toda su longitud de penetración. Lo anterior se esquematiza en la Fig. 1.1, donde a) se tiene un pilote con carga externa en su cabeza y el suelo reacciona en sentido contrario con esfuerzos cortantes, y b) es el diagrama del nivel de carga en el pilote, teniendo toda la carga en la cabeza y se va reduciendo conforme se profundiza.

Existe una gama de posibilidades para definir el diseño de una cimentación con pilotes de fricción, tales como la realización de pruebas de campo (veleta, dilatómetro, presiómetro, entre otras) aplicando expresiones semi-empíricas, la realización de sondeos destructivos (CPT o SPT) aplicando correlaciones del sitio, determinación de las propiedades mecánicas del suelo por medio de ensayos de laboratorio, asumir valores de resistencia proporcionadas por normas o códigos del

país o del lugar que se trate; o diseño basado en pruebas de carga, por mencionar algunos métodos.

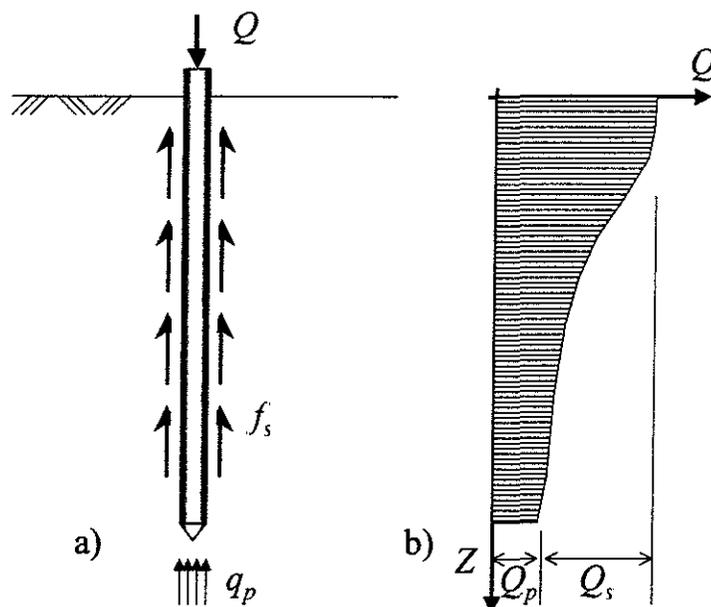


Figura 1.1 Esquema de transferencia de carga de un pilote de fricción

En México, la tendencia en la estimación de capacidad de carga de pilotes de fricción en arcillas saturadas, se inclina hacia las soluciones teóricas utilizando expresiones en función de los parámetros totales de resistencia del suelo. Muchas veces, el especialista en cimentaciones se apoya en pruebas de campo para conocer el orden de magnitud de los parámetros, debido a la dificultad de conocer con precisión las propiedades del suelo donde se hincarán los pilotes. Un caso es la Sonda de Campeche, que se caracteriza por presentar en el subsuelo marino potentes estratos arcillosos, que llegan a profundidades importantes que reducen la certidumbre en los parámetros del suelo.

A continuación se presentan las expresiones sobre las soluciones teóricas para determinar la capacidad de carga estática de los pilotes de fricción, hincados en suelos cohesivos. Estas expresiones se utilizaron para estimar la capacidad de carga del modelo de pilote, considerando que esta capacidad se divide en dos:

$$Q_u = Q_p + Q_s \tag{1.1}$$

donde:

$$Q_p = q_p A_p \tag{1.2}$$

$$\text{y } Q_s = f_s A_s \tag{1.3}$$

siendo:

$Q_u$  la capacidad de carga última estática del pilote



- $Q_p$  la capacidad de carga de la punta del pilote
- $Q_s$  la capacidad de carga del fuste del pilote
- $q_p$  la resistencia por punta del pilote
- $f_s$  la resistencia por fricción generada en la interfaz suelo-fuste
- $A_p$  y  $A_s$  el área de la punta y del fuste, respectivamente

El principal aporte de capacidad de carga es debido a la resistencia generada por fricción en el fuste del pilote, de ahí el nombre, aunque la capacidad por punta puede ser importante (Mendoza y Romo, 1998).

### 1.2.1. Resistencia por punta del pilote

La resistencia por punta del pilote es el esfuerzo del suelo que se opone a la penetración de la punta. Para calcular la capacidad por punta, cada autor propone un mecanismo de falla cinemáticamente admisible, con el cual determinan los parámetros  $N_c$ ,  $N_q$  y  $N_\gamma$ , de la ecuación general de capacidad de carga de Terzaghi. La falla del suelo en la punta del pilote puede ser como cuña penetrante (desde general hasta punzonamiento), como espiral logarítmica con desarrollo hasta el fuste del pilote, como medio círculo, entre otras, todas ellas dependiendo principalmente de las características del suelo.

Para la determinación de la resistencia de la punta del pilote en suelos cohesivos, con base en las propiedades de resistencia del suelo, se tienen diversas expresiones, algunas se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Expresiones para estimar la resistencia del suelo en la punta del pilote con base en las propiedades del suelo.

Referencia	Resistencia de la punta $q_p$ en suelos cohesivos	Ec.
Meyerhof y Das (Trochanis, 1986), Noruega (Lehane, 1999), Inglaterra (Lehane, 1999), American Petroleum Institute, API, (2000)	$c_u N_c$ $N_c = 9$	(1.4)
Swedish Geotechnical Institute (1987)	$c_u N_c + 0.5 \gamma_s D N_\gamma$	(1.5)
Canadian Foundation Engineering Manual (1985)	$c_u N_t$ $N_t = 9$ si $D < 0.5m$ $N_t = 7$ si $0.5 \leq D \leq 1.0m$ $N_t = 6$ si $D > 1.0m$	(1.6)

donde:

- $c_u$  es la resistencia cortante no drenada del suelo al nivel de la punta
- $N_c$  y  $N_\gamma$  son factores de capacidad de carga

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$\gamma_s$  es el peso volumétrico del suelo  
 D es el diámetro del pilote

Para utilizar estas ecuaciones, es necesario realizar pruebas de laboratorio con muestras de suelo inalteradas al nivel de la punta, determinando el valor de  $c_u$  del suelo; además de definir la estratigrafía del sitio.

En arcillas no se conoce mucho acerca de un valor límite en la resistencia por punta, pero se recomienda que sea 5 veces  $c_u$  para arcillas sensitivas normalmente consolidadas y 10 veces  $c_u$  para arcillas preconsolidadas (Trochanis, 1986).

Para la determinación de la resistencia por punta del pilote, con base en pruebas de campo realizadas en el sitio, se tienen diversas expresiones semi-empíricas, algunas se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Expresiones para estimar la resistencia del suelo en la punta del pilote, con base en pruebas de campo.

Referencia	Resistencia de la punta $q_p$	Ec.
Meyerhof y Das (Trochanis, 1986)	$\frac{40NL}{D}$ , en kPa	(1.7)
Swedish Geotechnical Institute (1987)	$K_1 \bar{N}$ o directamente $q_c$ , en kPa $K_1 = 120$ kPa si es arcilla $K_1 = 200$ kPa si es limo arcilloso $K_1 = 250$ kPa si es limo arenoso	(1.8)
Canadian Foundation Engineering Manual (1985)	$mN$ , en kPa $m=400$	(1.9)
Jardine y Chow (1996)	$0.8\bar{q}_c$ para arcillas, en kPa	(1.10)

Siendo:

- $N$  el número de golpes de una prueba de penetración estándar al nivel de la punta del pilote, y  $\bar{N}$  es el valor medio
- $q_c$  la resistencia de punta del ensaye de penetración con cono (CPT)
- $K_1$  y  $m$  los coeficientes de proporcionalidad que dependen del tipo de suelo

En el caso de la ecuación 1.10, Jardine y Chow obtuvieron tales expresiones para el diseño de pilotes fuera de costa, involucrando el valor medio de la resistencia de punta  $\bar{q}_c$  del ensaye de cono, al nivel de la punta del pilote y abajo de la punta 1.5 veces el diámetro del pilote.



### 1.2.2. Resistencia por fricción del pilote

La resistencia por fricción del pilote es el esfuerzo máximo que puede desarrollarse en la interfaz de falla a lo largo del fuste del pilote y el suelo que lo rodea.

Para la determinación de la resistencia por fricción del pilote, con base en las propiedades del suelo, se han desarrollado varias expresiones, algunas se muestran en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Expresiones para estimar la resistencia por fricción del pilote con base en las propiedades del suelo.

Referencia	Resistencia por fricción $f_s$	Ec.
Meyerhof y Das (Trochanis, 1986)	$\beta\sigma = (K_s \tan \phi'_R) \sigma$	(1.11)
Swedish Geotechnical Institute (1987)	$K_s \sigma \tan \phi'_R$	(1.12)
Canadian Foundation Engineering Manual (1985)	$\alpha c_u$ $0.5 < \alpha < 1.0$	(1.13)
Noruega (Lehane, 1999)	$\alpha c_u$ $\alpha=1$ si $c_u/\sigma \leq 0.38$ $L/D=50$ $\alpha=0.5$ si $c_u/\sigma \geq 0.8$ $L/D=50$ $\alpha=0.7$ si $c_u/\sigma \leq 0.35$ $L/D=120$ $\alpha=0.35$ si $c_u/\sigma \geq 0.8$ $L/D=120$	(1.14)
Inglaterra (Lehane, 1999)	$(0.7 \pm 0.1)c_u$	(1.15)
American Petroleum Institute, API, (2000)	$\alpha c_u$ $\alpha = 0.5\psi^{-0.5}$ si $\psi \leq 1$ $\alpha = 0.5\psi^{-0.25}$ si $\psi > 1$ $\psi = c_u/\sigma$	(1.16)

donde:

- $\sigma$  es el esfuerzo efectivo vertical en el nivel analizado
- $K_s$  es el coeficiente de presión lateral de tierras
- $\phi'_R$  es el ángulo de fricción efectivo de la arcilla remoldeada

En suelos cohesivos saturados (arcillas) la resistencia por fricción es función de la resistencia al esfuerzo cortante en condiciones no drenadas  $c_u$  en las ecuaciones 1.13 a 1.16. En este caso, el hincado produce un remoldeo y las propiedades de resistencia serán las determinadas mediante pruebas de compresión representativas del fenómeno.

En las ecuaciones 1.11 y 1.12, para arcillas normalmente consolidadas,  $K_s$  puede determinarse en forma conservadora como  $K_s = 1 - \sin \phi'_R$ . En pruebas con

arcillas blandas,  $\beta$  o  $K_s \tan \phi'_R$  toman valores de 0.3 para longitudes de hincado menores a 45 m y se reduce hasta 0.15 para longitudes mayores a 180 m. Para arcillas preconsolidadas, se obtiene previamente el valor de  $K_{NC}$  y se multiplica por la raíz cuadrada de la relación de preconsolidación (OCR).

Para la determinación de la resistencia por fricción del pilote, con base en pruebas de campo, se tienen varias expresiones semi-empíricas; algunas se muestran en la Tabla 1.4.

*Tabla 1.4 Expresiones para estimar la resistencia por fricción en el fuste del pilote con base en pruebas in-situ.*

Referencia	Resistencia por fricción $f_s$	Ec.
Meyerhof y Das (Trochanis, 1986)	$N$ en kPa para pilotes de bajo desplazamiento $2N$ en kPa para pilotes de alto desplazamiento	(1.20)
Swedish Geotechnical Institute (1987)	$\frac{N}{0.3} + 10$ con SPT en kPa	(1.21)
	$0.005q_c$ si $q_c \approx 10$ MPa con CPT $0.01q_c$ si $q_c \approx 2.5$ Mpa con CPT	(1.22)
Canadian Foundation Engineering Manual (1985)	$nN$ en Pa $n=2 \times 10^3$ para pilotes sin perforación previa $n=1 \times 10^3$ para pilotes con perforación previa	(1.23)

Como se puede observar, las expresiones para determinar la resistencia por punta en función de pruebas de campo (Tabla 1.2) se basan en el mismo tipo de falla: la penetración; no así con la determinación de la resistencia por fricción del pilote.

Podemos observar que el cálculo de la capacidad de carga estática de los pilotes, bajo cargas axiales, se concentra en el desplazamiento relativo entre el pilote-suelo y la penetración de la punta en el suelo. Se ha observado que en arcillas, el suelo se acopla al fuste del pilote moviéndose conjuntamente y la falla se genera a una distancia fuera de la interfaz suelo-fuste, presentándose una superficie de falla entre suelo-suelo; por ello, las expresiones conllevan un margen de seguridad que es difícil de estimar.

En el capítulo 3 se retomarán las expresiones de las Tablas 1.1 y 1.3 para estimar la capacidad de carga del modelo de pilote, la cual interviene en el diseño de su instrumentación.



### **1.3. Sobre las soluciones teóricas con pilotes de fricción bajo carga axial cíclica**

Las acciones cíclicas a las que está sometido un pilote de fricción dependen de la respuesta del sistema suelo-estructura-pilote, en función de las características de la fuente. Las fuentes, como huracanes, tormentas, operación de maquinaria, o sismos, están caracterizados por su amplitud, frecuencia(s) dominante(s) y duración. Los sismos generalmente tienen una duración de hasta algunos minutos, mientras que una tormenta o huracán puede durar varias horas; si a esto le agregamos los cambios en la respuesta debido a la estructura, tendremos entonces una gama de posibles combinaciones de cargas aplicadas a los pilotes.

El análisis de pilotes de fricción bajo carga cíclica tiene diferentes enfoques, dependiendo de la magnitud y duración de éstas. En efecto, en construcciones tierra adentro, los pilotes de fricción son sometidos a incrementos de carga por efectos dinámicos de corta duración; mientras que, en las construcciones fuera de costa, los pilotes deben resistir cargas cíclicas de gran magnitud y duración.

Los pilotes de fricción para plataformas marinas se diseñan, generalmente, con las normas del American Petroleum Institute, API (2000). Estas normas mencionan que dependiendo de la rapidez y magnitud de las cargas cíclicas, se puede presentar una reducción en la capacidad de carga del pilote con respecto a la estática. Tal efecto puede provocar una penetración grande del pilote, que puede evaluarse con base en la generación de curvas carga-desplazamiento ( $t-z$ ) y capacidad por punta-desplazamiento ( $Q-z$ ), como lo indica el API.

Así mismo, Trochanis y Bielak (1986) reconocen, a partir de una revisión de cientos de pruebas de campo hechas por Bea en arcillas blandas, que la repetición de cargas puede causar reducciones significativas en la capacidad de carga del pilote y en su rigidez, las cuales producen asentamientos excesivos. El efecto cíclico en una dirección (compresión) no es muy significativa para altos niveles de carga, reduciéndose a un 75% de la capacidad estática del pilote; además, el desplazamiento cíclico se incrementa proporcionalmente con el número de ciclos de la carga y la magnitud de ésta. Pruebas con modelos de pilotes hechas por Holmquist y Matlock (1976) sugieren una reducción del 33% de la capacidad estática para cargas en una dirección y un 67% para cargas en dos direcciones (compresión y tensión) para pilotes hincados en arcillas blandas.

Por otro lado, Trochanis y Bielak (1986) mencionan que un procedimiento racional para el análisis de la respuesta cíclica de pilotes puede ser desarrollado combinando las curvas de carga-asentamiento ( $t-z$ ) con factores de degradación de Poulos y análisis cíclico. Los factores de degradación son definidos como la relación de cierta propiedad después del ciclado y esta misma en condición estática. Tres factores de degradación son usados por Poulos:  $D_r$  que es el factor de degradación de la fricción en el fuste,  $D_b$  que es el factor de degradación de la resistencia última de

la punta y  $D_G$  que es el factor de degradación del módulo del suelo al cortante  $G$ . El efecto del nivel de carga es tomado en cuenta dentro del factor del nivel de carga  $D_R$ .

Para el diseño de pilotes de plataformas marinas, Jardine y Chow (1996) realizaron ensayos con un modelo de pilote instrumentado denominado ICP (Imperial College Pile). El modelo fue ensayado en arcillas marinas blandas, arcillas glacio-lacustres de blandas a firmes y en arcillas marinas rígidas. Con base en los resultados obtenidos, Jardine y Chow (1996) mencionan siete aspectos importantes relacionados con los efectos de carga cíclica en pilotes hincados en arcillas:

- La respuesta cíclica en pilotes es gobernada por la pérdida potencial del esfuerzo efectivo radial local y la rigidez al cortante durante el ciclado, con tres puntos esenciales: i) la respuesta durante cargas de tormenta es usualmente no drenada; ii) la capacidad del fuste es capaz de recuperarse a través de la disipación de la presión de poro después de la carga cíclica no drenada; iii) si el desplazamiento relativo entre pilote-suelo llega a ser grande en algunos puntos del fuste, entonces el ángulo  $\delta$  (ángulo de fricción en la interfaz suelo-fuste) puede degradarse permanentemente desde el valor máximo hasta valores últimos.
- El comportamiento de los suelos arcillosos es verdaderamente elástico bajo deformaciones pequeñas, además de que muestran un comportamiento histerético recuperable por arriba del límite de deformaciones cortantes  $\gamma_{crit}$ . Las arcillas no se degradan bajo carga cíclica si la deformación cortante total desarrollada dentro del primer ciclo,  $\gamma_{sum}$ , es menor que  $\gamma_{crit}$ .
- Las cargas cíclicas que inducen deformaciones cortantes,  $\gamma_{sum}$ , mucho mayores de  $\gamma_{crit}$ , permiten rápidas reducciones de los esfuerzos efectivos principales  $\sigma'$ . Las arcillas sensitivas con baja relación de preconsolidación y baja plasticidad, muestran los menores valores de  $\gamma_{crit}$  y las más rápidas relaciones de cambio en  $\sigma'$ .
- En los casos donde las cargas cíclicas inducen pequeñas relaciones de  $\gamma_{sum}/\gamma_{crit}$ , o donde los suelos son menos susceptibles al ciclado, puede presentarse una condición estable con una tasa de reducción de  $\sigma'$  tal que, ninguna falla ocurre dentro de un número grande de ciclos.
- Los modelos de segmentos de pilotes pueden ser usados para proyectar, a partir de ensayos elemento-suelo, cómo una sección de un pilote fuera de costa puede comportarse bajo carga cíclica. Tales modelos son mejor desarrollados usando esfuerzos efectivos principales, debiendo incorporar un criterio de falla en la interfaz, considerando el esfuerzo residual de esta zona. Los diagramas de interacción cíclica pueden ser generados para mostrar las relaciones a las cuales los suelos con diferentes composiciones y relaciones de preconsolidación son propensos a degradación. Investigaciones adicionales son requeridas para desarrollar métodos más rigurosos de análisis cíclico.
- Los análisis numéricos realistas no lineales para cargas monotónicas, de pilotes fuera de costa a escala natural, permiten una mayor comprensión de

cómo varían las condiciones locales sobre el fuste por carga cíclica. Por ejemplo, podemos ver que la interfaz suelo-pilote deslizante y plástica se deforma en el medio, dando origen a una condición de carga bidireccional sobre las porciones más altas del pilote, el cual experimenta sólo carga unidireccional en su cabeza. Es claro que el pilote experimenta una falla cíclica progresiva con un “frente de degradación” que se mueve hacia abajo del fuste del pilote mientras el ciclado continua. Los pilotes largos compresibles son más propensos a sufrir una gran pérdida de capacidad a través del ciclado que los pilotes cortos o pilotes rígidos.

- Importantes programas de ensayos de carga cíclica han sido desarrollados en campo por el NGI (Norwegian Geotechnical Institute), así como por el BRE (Building Research Establishment). Adicionalmente, un limitado programa de experimentos con carga cíclica ha sido emprendido con el modelo de pilote instrumentado (ICP). Los datos de las investigaciones de campo confirman muchas de las características esperadas de los ensayos de laboratorio y modelos idealizados. Cincuenta ciclos de carga en una dirección, en condiciones no drenadas, fueron vistos como la causa de una pérdida del 30% de la capacidad de carga axial en suelos sensitivos de baja relación de preconsolidación; el mismo número pero con cargas cíclicas en dos direcciones provocan una reducción del 67% de su capacidad. Suelos menos sensitivos con alta relación de preconsolidación muestran una reducción menor.

Cabe destacar que tanto Holmquist y Mattlock como Jardine y Chow concuerdan en que la capacidad de carga de los pilotes por efecto cíclico disminuye entre 30 y 33% (con respecto a la estática) para cargas en una dirección, y hasta un 67% con cargas en dos direcciones.

Mientras que Trochanis y Bielak mencionan que un método racional de análisis de pilotes en condición cíclica sería combinando las curvas t-z con factores de degradación de Poulos, Jardine y Chow proponen la utilización de modelos segmentados que incluyan análisis de esfuerzos efectivos y criterios de falla residual, reconociendo la necesidad de mayor investigación en el desarrollo de modelos. Un ejemplo de este tipo de investigación es la experimentación con modelos de pilotes de fricción desarrollada en el Instituto de Ingeniería.

Por lo anterior, se puede decir que los métodos de análisis para la respuesta de pilotes bajo carga dinámica y cíclica, se concentran en la obtención de curvas t-z del sistema suelo-pilote analizado por segmentos, verificando que para un cierto nivel de carga (obtenido de la respuesta dinámica y cíclica de la estructura), los pilotes presenten desplazamientos y deformaciones tolerables.

Finalmente, podemos ver que existe una diversidad de métodos para el cálculo de capacidad de carga axial estática y de análisis de respuesta cíclica, en pilotes de fricción para plataformas marinas, las cuales varían según las consideraciones e hipótesis que maneja cada autor; esto trae como consecuencia que el diseñador de cimentaciones de plataformas marinas se enfrente a la difícil tarea de decidir cuál método de cálculo debe utilizar, considerando las condiciones imperantes en el sitio de instalación. Como consecuencia de esta incertidumbre, el diseñador se obliga a proponer cimentaciones más robustas tratando de permanecer siempre del lado de la seguridad. Si logramos comprender mejor el comportamiento de los pilotes de fricción y de los fenómenos físicos asociados a este tipo de cimentación, lograremos en gran medida diseños de cimentación más seguros, confiables y económicos.

## Capítulo 2

### Antecedentes de diseño de experimentos con modelos físicos de pilotes de fricción

Debido a la gran dificultad y el alto costo de realizar pruebas en pilotes de plataformas marinas, se recurre a la experimentación con modelos a escala reducida, que no siempre cumplen con las leyes de similitud necesarias para predecir el comportamiento del prototipo a partir de las observaciones en modelos, siendo necesario plantear las limitaciones y virtudes de la experimentación bajo estas condiciones.

#### **2.1. *Análisis dimensional, similitud y sus implicaciones***

Una forma confiable de comprender y analizar los fenómenos asociados a las obras en ingeniería es realizando experimentos con modelos físicos. En casi todos los casos es necesario recurrir a métodos experimentales para establecer relaciones entre las variables que gobiernan tales fenómenos. Al estudiar cierto problema con modelos, es necesario realizar varios experimentos cambiando cada vez alguna variable o condición. El ir cambiando el valor de alguna variable no debe ser producto de un proceso aleatorio, sino de un proceso sistemático en búsqueda de las variables que gobiernan el fenómeno o que influyen mayormente en los resultados. Imaginemos que nuestro problema está caracterizado por 20 variables, entonces para saber el nivel de afectación de cada variable en el resultado sería necesario cambiar el valor de cada una de ellas de manera independiente, lo cual implicaría realizar muchos más de 20 ensayos. Ahora bien, si las 20 variables de nuestro

problema las podemos agrupar en 8 parámetros o grupos de variables, sin modificar las condiciones de nuestro problema, entonces sólo será necesario cambiar el valor de cada parámetro y así lograríamos identificar cuál parámetro afecta más y reduciríamos significativamente el número de experimentos. Para lograr lo anterior, se emplea una técnica llamada análisis dimensional que se basa en el concepto de homogeneidad dimensional, el cual significa que los términos de cada expresión utilizada deben tener las mismas dimensiones.

### 2.1.1. Análisis dimensional

En la experimentación con modelos de pilotes de fricción, están implicados muchos parámetros, tales como las propiedades mecánicas del suelo, las propiedades geométricas y de deformabilidad del pilote, así como las condiciones y combinaciones de carga; para lo cual conviene utilizar el mínimo posible de combinaciones de parámetros.

Para poder determinar las funciones de combinaciones de los parámetros de un fenómeno dado, es necesario llevar a cabo una metodología para la organización de parámetros dimensionales buscando funciones adimensionales; tal metodología está expresada en el teorema  $\pi$  de Buckingham.

#### 2.1.1.1. Teorema $\pi$ de Buckingham

En cualquier problema físico, la variable dependiente se puede expresar como una función de varias variables independientes de la siguiente forma:

$$x_1 = f(x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2.1)$$

donde  $x_1$  es la variable dependiente relacionada con una función  $f$  en la que intervienen  $n-1$  variables independientes. A su vez, las variables independientes contienen dimensiones básicas, como la masa (M), longitud (L), tiempo (T), entre otras; siendo  $m$  el número de dimensiones básicas que contiene el problema.

El teorema  $\pi$  de Buckingham menciona que existen  $n-m$  parámetros adimensionales que se pueden relacionar de la siguiente manera:

$$\pi_1 = f_1(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) \quad (2.2)$$

donde  $\pi_1$  incluye la variable dependiente y los parámetros  $\pi$  restantes sólo las variables independientes. Un requisito para aplicar con éxito el análisis dimensional es que una dimensión debe aparecer cuando menos dos veces o ninguna vez.

El procedimiento para aplicar el teorema  $\pi$  se puede resumir de la siguiente manera (Potter et al., 1998):

- Escribir la forma funcional de la variable dependiente en función de las  $n-1$  variables independientes.
- Identificar  $m$  variables repetidas, variables que se combinarán con cada una de las variables restantes para formar los parámetros  $\pi$ . Las variables repetidas seleccionadas de entre las variables independientes deben incluir todas las dimensiones básicas, pero no deben formar un parámetro  $\pi$  por sí solas ni entre ellas.
- Formar los parámetros  $\pi$  combinando las variables repetidas con cada una de las variables restantes.
- Escribir la forma funcional de los  $n-m$  parámetros  $\pi$  adimensionales.

Para ejemplificar el procedimiento anterior, se muestra el análisis dimensional hecho por Kana, 1986, para el ensayo de modelos de pilotes bajo carga lateral, determinando la deflexión "x" del pilote en función de las siguientes variables (inciso a, forma funcional):

$$x = f(F, \omega, T_0, y, D, E, I, M, J_c, M_c, E_r, E_l, \rho, g) \quad (2.3)$$

donde las variables junto con sus dimensiones básicas se consignan en la tabla 2.1

Tabla 2.1 Variables del sistema pilote-suelo bajo carga lateral, Kana, 1986

	Variable	Dimensiones	Descripción
Respuesta del sistema	$x$	L	Deflexión lateral al nivel $y$
	$y$	L	Posición vertical de análisis
Carga	$F$	$MLT^{-2}$	Carga lateral aplicada
	$\omega$	$T^{-1}$	Frecuencia de oscilación
	$T_0$	T	Duración del barrido de frecuencia lineal
Modelo de pilote	$D$	L	Diámetro del pilote
	$E$	$ML^{-1}T^{-2}$	Módulo de elasticidad del pilote
	$I$	$L^4$	Momento de inercia del pilote
	$M$	$ML^{-1}$	Masa del pilote por unidad de longitud
	$J_c$	$ML^2$	Momento de inercia de la cabeza del pilote
	$M_c$	M	Masa en la cabeza del pilote
Suelo	$E_r$	$ML^{-1}T^{-2}$	Módulo de elasticidad inicial
	$E_l$	$ML^{-1}T^{-2}$	Módulo de elasticidad final
	$\rho$	$ML^{-3}$	Densidad del suelo
	$g$	$LT^{-2}$	Aceleración de la gravedad

Teniendo  $n=15$  variables incluyendo a la dependiente, con  $m=3$  dimensiones básicas; con lo cual se pueden formar  $n-m=12$  parámetros  $\pi$  adimensionales, excepto

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

en el caso de que un parámetro adimensional esté dentro de otro, reduciéndose el número de parámetros.

Como se menciona en el inciso b), se seleccionan las  $m$  variables repetidas, las cuales deben contener todas las dimensiones básicas, pero no formar un parámetro  $\pi$  por sí solas o entre sí. Como se observa en la Tabla 2.1, las variables repetidas podrían ser  $D$ ,  $\rho$  y  $E$ , dado que contienen todas las dimensiones y cumplen con lo dicho en el inciso b), entonces éstas se combinan con las demás variables para determinar los parámetros  $\pi$ .

Al identificar las dimensiones de las variables, resulta sencillo deducir algunas relaciones adimensionales, por ejemplo:  $y/D$ ,  $x/D$  y  $\omega T_0$ , dado que éstas contienen una sola dimensión, reduciéndose así el número de variables por agrupar.

Para formar un parámetro adimensional se puede utilizar un procedimiento algebraico obteniendo las potencias de cada variable, necesarias para formar el parámetro adimensional (inciso c), por ejemplo, si queremos obtener un parámetro  $\pi$  que contenga a la variable  $M$  (tabla 2.1), las variables repetidas junto con la variable de interés se deben escribir de la siguiente forma:

$$\pi = D^a \cdot \rho^b \cdot E^c \cdot M = M^0 L^0 T^0 \quad (2.4)$$

ahora, sustituyendo las dimensiones básicas de cada variable tenemos:

$$(L)^a \cdot (ML^{-3})^b \cdot (ML^{-1}T^{-2})^c \cdot (ML^{-1}) = M^0 L^0 T^0 \quad (2.5)$$

De la expresión 2.5 se puede formar un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas de la siguiente manera:

$$M: \quad b + c + 1 = 0 \quad (2.6)$$

$$L: \quad a - 3b - c - 1 = 0 \quad (2.7)$$

$$T: \quad -2c = 0 \quad (2.8)$$

Resolviendo el sistema, obtenemos que  $c=0$ ,  $b=-1$  y  $a=-2$ , con lo cual, el parámetro  $\pi$  queda:

$$\pi = \frac{M}{\rho D^2} \quad (2.9)$$

De igual manera se pueden obtener los demás parámetros, llegando a las siguientes relaciones adimensionales dadas por Kana:

$$\frac{x}{D} = f\left(\frac{y}{D}, \frac{M_c}{DM}, \frac{J_c}{D^3M}, \frac{M}{\rho D}, \frac{EI}{E_r D^4}, \frac{EI}{E_l D^4}, \frac{FD^2}{EI}, \frac{MD^4 \omega^2}{EI}, \omega T_0, \frac{\omega^2 D}{g}\right) \quad (2.10)$$

Al contar con los parámetros adimensionales del fenómeno estudiado, se podrán determinar las relaciones de escala entre el prototipo y el modelo (factores de escala), cumpliendo con la similitud entre ellos.

### 2.1.2. Similitud

La similitud es la representatividad del comportamiento en el modelo con el prototipo, pudiendo predecir el comportamiento del prototipo con base en las observaciones del modelo.

Para que exista similitud entre el modelo y el prototipo, es necesario que todos los parámetros adimensionales, deducidos del análisis dimensional, sean iguales entre sí, cumpliendo siempre con  $\pi_p = \pi_m$ . Por ejemplo, si sustituimos los valores de las variables del prototipo y del modelo dadas por Kana, en el parámetro adimensional del ejemplo anterior:

$$\left(\frac{Mc}{DM}\right)_p = \left(\frac{Mc}{DM}\right)_m$$

donde:

Variable	Descripción	Prototipo	Modelo	Unidades
Mc	Masa en la cabeza del pilote	429.3	0.183	$\frac{lb s^2}{ft}$
M	Masa del pilote por unidad de longitud	1.338	0.00615	$\frac{lb s^2}{ft} / ft$
D	Diámetro del pilote	0.896	0.0833	ft

y los subíndices en la expresión indican con  $p$  al prototipo y  $m$  al modelo.

Así tenemos que el valor numérico de la sustitución de las variables es:

$$\frac{Mc_p}{D_p \cdot M_p} = 358\,094 \qquad \frac{Mc_m}{D_m \cdot M_m} = 358\,094$$

con lo cual podemos decir que existe similitud entre el modelo y el prototipo en esas variables o ese parámetro. Cabe señalar que las variables deben tener una relación constante entre sí con respecto a sus valores; esto es, el prototipo debe estar representado por el modelo a una cierta escala, que puede ser geométrica, cinemática o dinámica (Meymand, 1998). En el ejemplo anterior, Kana maneja un factor de escala geométrico  $\lambda$ , el cual es la relación de la dimensión de longitud entre el prototipo y el modelo, que está representado en ese parámetro por la variable D

(diámetro). Así pues, el factor de escala es el cociente entre  $\frac{D_p}{D_m} = \lambda = 10.75$ .

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Al estudiar un fenómeno en especial, los valores de las variables en el prototipo son fijas, siendo necesario que los valores de las variables en el modelo mantengan una relación de escala y además, que exista similitud entre el modelo y el prototipo.

### ***2.1.3. Implicaciones en el modelado de experimentos***

Cuando no se tiene similitud total entre el modelo y prototipo es necesario plantear ciertas hipótesis sobre los resultados obtenidos en la experimentación con modelos físicos. En efecto, cuando se estudian problemas donde los parámetros están gobernados por los esfuerzos en el medio, debido al peso propio de los materiales, es prácticamente imposible cumplir con la similitud en ensayos 1-g (ambiente gravitacional); un ejemplo de lo anterior es la experimentación con modelos de pilotes de fricción, donde la resistencia por fricción depende del esfuerzo normal a la pared del fuste y éste a su vez, depende del peso volumétrico del suelo. Claro está que además de los esfuerzos, se encuentran las propiedades de deformabilidad del suelo y del pilote, las cuales deben cumplir también con la relación de rigidez preestablecida por el prototipo. Por ello, la posibilidad de manejar materiales con características tales que cumplan con los términos adimensionales resulta difícil.

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 el prototipo. Existen diversas desventajas en los ensayos con centrífuga, una de ellas y tal vez la más importante, es el alto costo de realizarlos, más aún si se necesitaran ensayos con varios canales de medición y con modelos de dimensiones grandes.

El modelado de un experimento puede nombrarse como: verdadero, adecuado, o distorsionado (Meymand, 1998). Un modelado es verdadero cuando los valores de todos los parámetros adimensionales entre el modelo y el prototipo son idénticos; esto es, cuando se cumplen completamente los requisitos de la similitud. Se tendrá un modelado adecuado cuando los aspectos fundamentales del problema (agrupados en los parámetros adimensionales) son escalados manteniendo una similitud entre el modelo y el prototipo, pero no se cumple totalmente con la similitud en los demás parámetros; esto implica que la variación en los parámetros no escalados correctamente no afecta significativamente en las expresiones de predicción. Finalmente, un modelado distorsionado es aquel donde los parámetros no escalados correctamente afectan significativamente en las expresiones de predicción, introduciendo factores de compensación.

Los métodos para predecir el comportamiento del prototipo en función de la experimentación en modelos, cuando éstos no cumplen con las leyes de similitud, se basan en el análisis de los resultados del modelo y las observaciones hechas en el prototipo; con base en ello, se puede concluir si los parámetros no escalados afectan o no en el fenómeno analizado, pudiendo ignorar tales efectos (Blayne, 1987), o escalar únicamente los parámetros de interés de manera separada (Roscoe, 1968). Por su parte, Meymand plantea una metodología para la predicción de los parámetros del prototipo con base en los resultados de la experimentación con un modelo, donde los parámetros son escalados por medio de factores que en principio se deducen de las relaciones adimensionales del problema, corrigiéndolos después según los resultados obtenidos en el ensaye, de acuerdo con un intervalo de error.

Es importante comentar que aunque no se escalen los valores de las variables en forma adecuada, la experimentación sigue siendo un medio eficaz y valioso para identificar las variables que gobiernan un problema en específico. Esto es igualmente válido cuando se trata de experimentación con modelos de pilotes de fricción, ya que se pueden observar con claridad los fenómenos de transferencia de carga, aumento y disipación de presión de poro, consolidación local, deformaciones y desplazamientos en el sistema pilote-suelo y de la respuesta dinámica de los pilotes, aún cuando no se puedan predecir con precisión los valores en el prototipo.

Con respecto al proyecto de investigación desarrollado en el Instituto de Ingeniería cabe aclarar que, conscientes de los requerimientos de similitud, nunca se tuvo como objetivo el aplicar directamente los resultados de los experimentos con el modelo a los prototipos, sino más bien observar y medir, bajo condiciones específicas y controladas, aspectos referentes al mecanismo de transferencia de carga del pilote al suelo.

## **2.2. Estudios previos de experimentos con modelos físicos de pilotes de fricción**

Existen varias referencias en la literatura sobre la experimentación con modelos físicos de pilotes de fricción, algunas de ellas tratan sobre el fenómeno de interacción entre el pilote y el suelo, elaborando modelos que divergen entre sí de acuerdo a las etapas estudiadas. En este apartado se comentan algunos experimentos realizados por diferentes autores, enfocándose a la instrumentación del modelo de pilote utilizado y comentando acerca de los criterios o razones que tuvieron los autores para llegar a tal instrumentación.

**Holmquist y Matlock, 1976**, realizaron ensayos con un modelo de pilote con los siguientes propósitos: 1) describir un método alternativo para el desarrollo de relaciones  $t$ - $u$  (donde  $u$  es el desplazamiento axial en un punto a lo largo del pilote respecto al suelo y  $t$  es la relación de carga transferida por unidad de área de la superficie del pilote en ese punto), producto de ensayos en modelos cuidadosamente

controlados; 2) presentar los resultados de algunos ensayos exploratorios y 3) mostrar desarrollos de relaciones t-u sugeridas en ese trabajo, incluyendo estimaciones de desplazamiento requerido del pilote para la fluencia del suelo. Los investigadores realizaron 14 ensayos, 10 de ellos fueron bajo desplazamiento controlado y los 4 restantes fueron bajo carga controlada. Las condiciones de carga en los ensayos fueron: carga estática monótonicamente creciente, carga repetida en una dirección, carga cíclica transitoria y carga cíclica en dos direcciones. El equipo utilizado para los ensayos consistió en un modelo de pilote instrumentado, un cilindro de ensaye que contenía arcilla blanda remoldeada, un sistema de carga, un sistema de desplazamiento-medición y un sistema de amplificación de *strain gages* (SG) y registro de datos, Fig. 2.1.

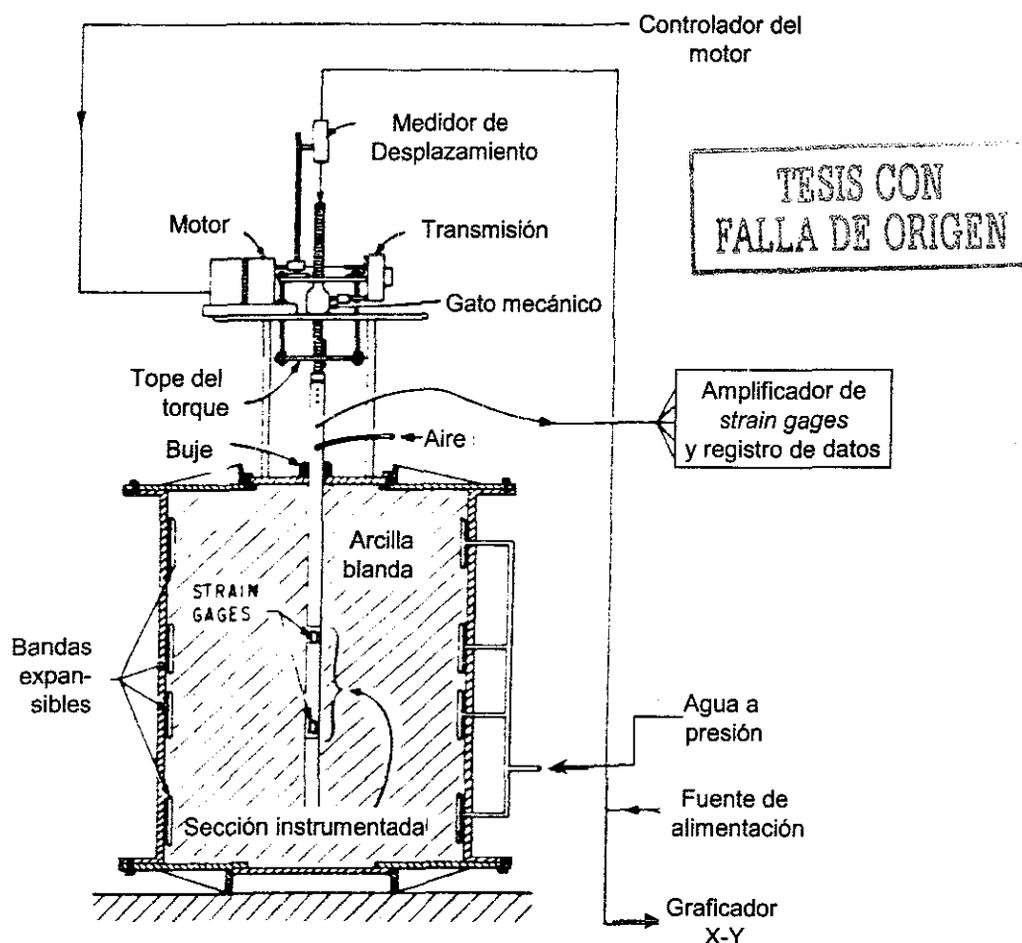


Fig. 2.1 Esquema del equipo utilizado por Holmquist y Matlock, 1976

El modelo de pilote consistió en un tubo de aluminio de una pulgada de diámetro (25.4 mm) y 40 pulgadas de largo (1016 mm). El tubo fue sellado en la parte inferior para simular un pilote de punta cerrada. La instrumentación consistió en 4 SG formando un puente de Wheastone para medir la carga axial en dos niveles, analizando un segmento corto del pilote dado que el arreglo del experimento simula el ensayo de tramos de pilote, aumentando la presión confinante en el pilote, según

la profundidad de hincado simulada. Algunos de los resultados obtenidos en estos ensayos fueron el recalcar la importancia de un análisis en término de esfuerzos efectivos para la capacidad de carga de los pilotes; el efecto de la consolidación local alrededor del fuste, aumentando su capacidad de carga en función del tiempo; la falla en una superficie de deslizamiento suelo-suelo, la fluencia del suelo con un desplazamiento relativo suelo-pilote de 1 a 1.5% del diámetro del pilote, entre otras. Los autores reconocen el hecho de que los resultados y gráficas de comportamiento están afectadas por las limitaciones impuestas en los programas de ensayos, por lo que son útiles para el análisis del comportamiento de pilotes, mas no para diseño.

De esta experimentación puede comentarse que la instrumentación en el modelo de pilote no contó con sensores para medir presión total en el fuste y presión de poro, por ello los autores recomiendan mayores estudios para ver la pertinencia de análisis en términos de esfuerzos efectivos. Otro punto que se observa es que el tanque que aloja a la muestra de suelo no contiene ningún sensor, desconociendo por ejemplo, el aumento y disipación de la presión de poro al aplicar presión externa. Así pues, la interpretación de los resultados se vuelve un tanto subjetiva y se respalda en suposiciones de fenómenos.

**Procter y Khaffaf, 1987**, realizaron ensayos en un modelo de pilote hincado en arcilla, con el objetivo de observar el fenómeno de aumento y disipación de la presión de poro en el suelo y en la interfaz suelo-fuste, bajo los efectos de carga axial cíclica, además de evaluar la adhesión y el ángulo de fricción efectivo entre el pilote y la arcilla. Las variables de medición fueron la presión de poro, el desplazamiento del pilote, la frecuencia de ciclado, la carga aplicada, el esfuerzo horizontal en la cara del pilote y la temperatura. El modelo de pilote utilizado fue un tubo de acero inoxidable de 25 mm de diámetro, embebido 100 mm en el suelo e instrumentado con una celda de carga horizontal (SG), una celda de carga vertical (SG), un termopar y un transductor de presión de poro con piedra porosa tipo anillo. En la arcilla se colocaron tres medidores de presión de poro junto con termopares, midiendo la presión y la temperatura en el mismo punto. El esquema del equipo utilizado se muestra en la Fig. 2.2.

El comportamiento observado en esos ensayos indican que la zona de influencia en el cambio de presión de poro se limita a cuatro veces el diámetro del pilote. Los autores comentan que tanto la medición de presión de poro como la temperatura fue exitosa, pero los resultados obtenidos no pueden ser utilizados directamente en el diseño, ya que las leyes de escala que gobiernan el fenómeno de aumento y disipación de presión de poro son complejas, es decir, no se cumple con las leyes de similitud entre modelo y prototipo. Asimismo, los autores reconocen la valuación imprecisa de la adhesión y la fricción efectiva del suelo y el pilote, debido a que colocaron únicamente una celda de carga y una de presión total, sugiriendo que las mediciones debieron realizarse con al menos dos celdas más.

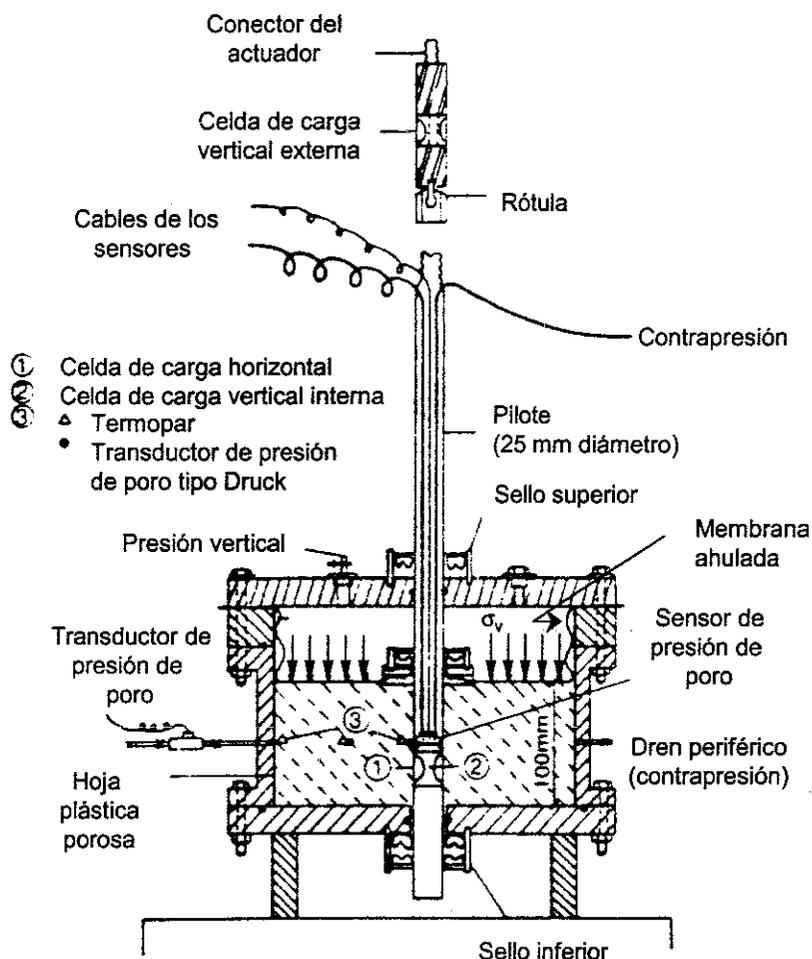


Fig. 2.2 Esquema del equipo utilizado por Procter y Khaffaf, 1987

Como se puede ver, es importante contar con varios sensores en el modelo para evitar que por falta de medición de las variables del fenómeno, se tenga poca certidumbre en el análisis del comportamiento estudiado.

Coop y Wroth, 1989, investigaron el comportamiento de pilotes de fricción por medio de un modelo instrumentado hincado en arcillas, en las etapas de instalación, reconsolidación y carga. El modelo de pilote fue hecho de acero, con 80 mm de diámetro y 1135 mm de longitud, formado por un cilindro central que recibe cilindros externos concéntricos en los cuales se alojaron los sensores. El modelo cuenta con 5 transductores de presión de poro, dos de ellos del tipo Druck PDCR-81 (diafragma de silicón y SG semiconductores) y los restantes son transductores basados en SG normales; la intención de los investigadores fue la de verificar que el tipo de transductor no afectara en las mediciones de presión de poro. Así mismo, se colocaron 4 transductores de esfuerzo radial total basados también en SG, dispuestos en dos niveles en el fuste del pilote, montando dos en cada nivel de manera opuesta, con la finalidad de medir las variaciones de presión alrededor del

fuste. Además, el modelo fue dotado con tres celdas de carga axial basadas en SG, las cuales se usaron para cuantificar la fricción en el fuste en dos tramos, por medio de la pérdida de carga axial en el pilote. Se buscó que la superficie del pilote fuera lo más lisa posible. El modelo de pilote se muestra en la Fig. 2.3.

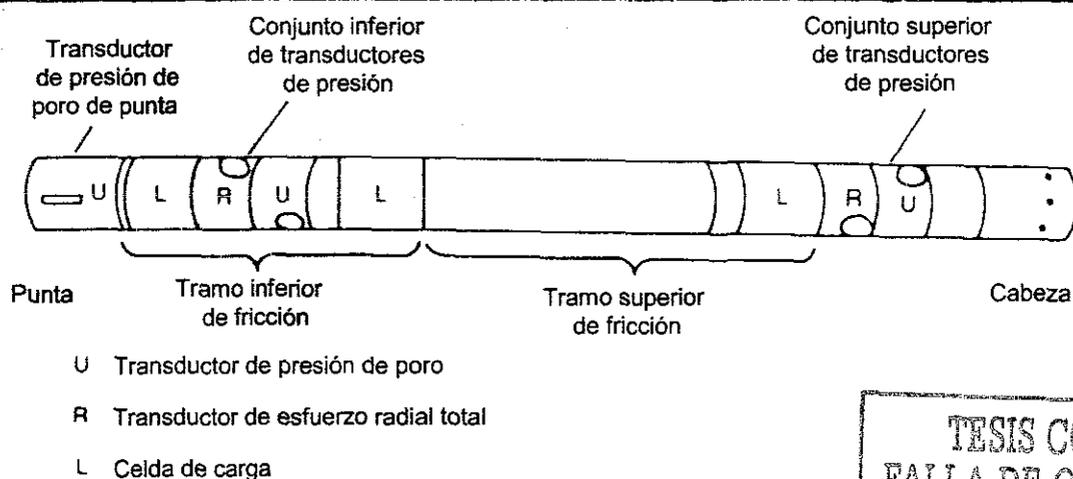
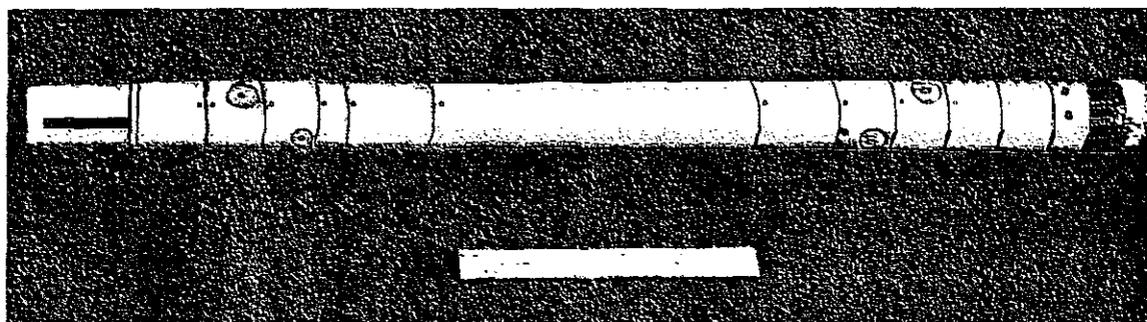


Fig. 2.3 Modelo de pilote utilizado por Coop y Wroth, 1989

En el artículo se comenta acerca de los resultados obtenidos en las tres etapas estudiadas, tales como la formación de una superficie de fricción residual cerca del fuste del modelo, la cobertura de arcilla dura adherida fuertemente al fuste, la semejanza de la fricción en el fuste en los procesos de instalación y carga, entre otros. Es interesante ver que los resultados de los ensayos no tuvieron el objetivo de predecir el comportamiento de un prototipo, sino el de observar cualitativamente el comportamiento de los pilotes de fricción; en otras palabras, entender el fenómeno.

Los autores no comentan sobre los problemas que tuvieron con la instrumentación en el modelo, pero hay algunos aspectos que podrían ser problemáticos, uno de ellos es la alineación de los sensores, dado que éstos se ensamblan a un tubo central y la sujeción con cuerda no asegura una correspondencia aceptable; mas aún, si los sensores son intercambiables en su posición. Además, el tener segmentos unidos con cuerda puede provocar movimientos relativos entre sensores o concentraciones de esfuerzos en las juntas que repercuten en variaciones o cambios en las mediciones de los transductores

basados en SG. Otro aspecto podría ser el bajo número de sensores colocados (que en este caso implicó sólo dos de niveles de medición de la fricción y tres de esfuerzos totales y presión de poro), lo que puede provocar imprecisión en las mediciones.

**Bond, Jardine y Dalton, 1991**, escribieron acerca del diseño y desempeño de un modelo de pilote instrumentado, con el objetivo de investigar sobre el comportamiento de pilotes y su desplazamiento en arcillas y arenas, poniendo especial énfasis en los esfuerzos generados en el fuste. El modelo de pilote está constituido por un tubo de acero de 102 mm de diámetro y 7 m de largo. El modelo cuenta con tres grupos de sensores a tres niveles, separados a un metro entre sí aproximadamente; cada nivel cuenta con una celda de carga axial de gran capacidad, uno o dos transductores de esfuerzo en el fuste, una unidad de presión de poro que contiene dos sensores de presión de poro de rápida respuesta y un sensor de temperatura dentro de cada transductor de esfuerzo, como se observa en la Fig. 2.4.

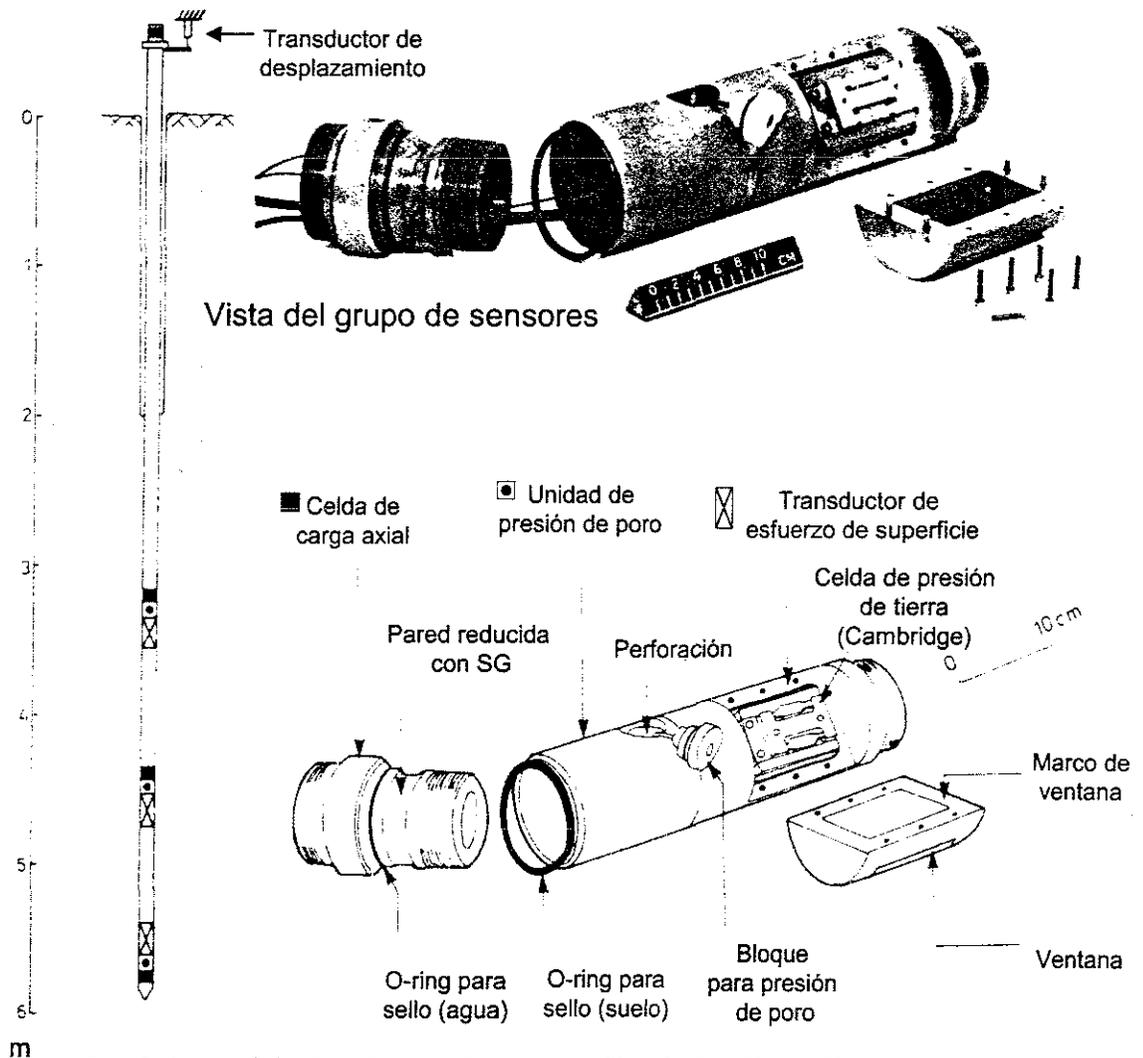


Fig. 2.4 Modelo de pilote utilizado por Bond, Jardine y Dalton, 1991

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Las celdas de carga fueron hechas con 4 SG pegados en el interior de un segmento de tubo, adelgazando la pared en esa posición, formando un arreglo puente del tipo Poisson (4 SG longitudinales de  $120 \Omega$  para medir la deformación axial y 4 SG colocados circunferencialmente para medir la deformación anular, minimizando los efectos de flexión). Los transductores de esfuerzo en el fuste fueron diseñados para medir el esfuerzo normal radial y el esfuerzo cortante en el fuste del pilote por medio de un elemento denominada *dogbone* donde pegaron los SG; este elemento sujeta un segmento curvo que mantiene la forma circular del pilote y forma parte del fuste, el cual transmite el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante que actúa en el fuste. Las unidades de presión de poro están formadas por transductores del tipo Druck PDCR-81, los cuales tienen la conveniencia de ser pequeños y altamente sensibles; éstos fueron montados en el fuste con piedras porosas hechas de acero sinterizado. Los autores comentan que los transductores de esfuerzo en el fuste fueron los elementos más complejos, tanto en su instrumentación como en su diseño, además de que se puso mucha atención en el nivel de respuesta de los transductores de presión de poro.

Llama la atención la instrumentación de este modelo de pilote, debido al registro de los esfuerzos normal y cortante en el fuste durante las etapas de instalación y carga axial. Estos esfuerzos pueden ser comparados con la resistencia por fricción deducida con las celdas de carga para ubicar mejor la posición de la interfaz de falla. Asimismo, al medir el esfuerzo total normal al pilote y la presión de poro, se logra medir el esfuerzo efectivo actuante en las diferentes etapas de ensaye.

En el capítulo 3 de este trabajo se describe el diseño de la instrumentación del modelo físico de pilote utilizado para estudiar el comportamiento de pilotes de fricción para plataformas marinas; esta instrumentación se basa en las experiencias recopiladas de diversos autores, algunos comentados en los párrafos anteriores y los requerimientos y limitaciones dadas por el experimento.

Al realizar experimentos con modelos, es necesario contar con el mayor número de parámetros conocidos y controlados del problema, lo cual implica ensayar los modelos en medios homogéneos con propiedades conocidas. Para ello en este proyecto se realizó la reconstitución de una muestra de suelo arcilloso marino en un odómetro de relativamente grandes dimensiones (casi un metro de diámetro) para contener a la muestra de suelo, buscando representar la mayoría de las características del suelo de la Sonda de Campeche.

Partiendo de una suspensión de agua marina-suelo se formó artificialmente en el laboratorio un suelo inalterado y consistente, primero bajo los procesos de floculación y sedimentación libre, y luego bajo procesos de consolidación con esfuerzos crecientes; de esta manera se buscó reproducir una formación natural, excepto desde luego el tiempo geológico que toma el proceso natural. La formación de esta gran muestra de suelo, fue motivo de la tesis del Ing. Enrique Ibarra (2002), la

cual lleva como título: “Reconstitución de un suelo arcilloso marino para ensayos con modelos de pilotes”.

## Capítulo 3

### Instrumentación de un modelo físico de pilote de fricción

Para estudiar el comportamiento de pilotes de fricción bajo cargas axiales estáticas y cíclicas, se construyó un modelo físico de pilote instrumentado con el cual se miden las variables geotécnicas relevantes asociadas al mecanismo de transferencia de carga por fricción del pilote al suelo circundante.

Los pilotes de fricción adquieren su capacidad portante por medio de la fricción que se genera en la interfaz de falla, la hipótesis de trabajo planteada es que la resistencia a la falla por fricción está gobernada por la ley de deslizamiento de Coulomb, en términos de esfuerzos efectivos. Atendiendo a tal hipótesis, lo que nos interesa conocer es la evolución de las variables geotécnicas involucradas en el problema, como la presión de poro, los esfuerzos totales y la resistencia al esfuerzo cortante generada en la superficie de falla.

#### **3.1. Descripción del experimento realizado con modelos de pilotes de fricción**

La experimentación con modelos de pilote de fricción forma parte de un proyecto de investigación, desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en colaboración con el Instituto Mexicano del Petróleo. En la Fig. 3.1 se muestra un esquema general del experimento, en el que se reconocen: el odómetro O-97-5, el suelo marino reconstituido, el modelo de pilote instrumentado, el sistema de

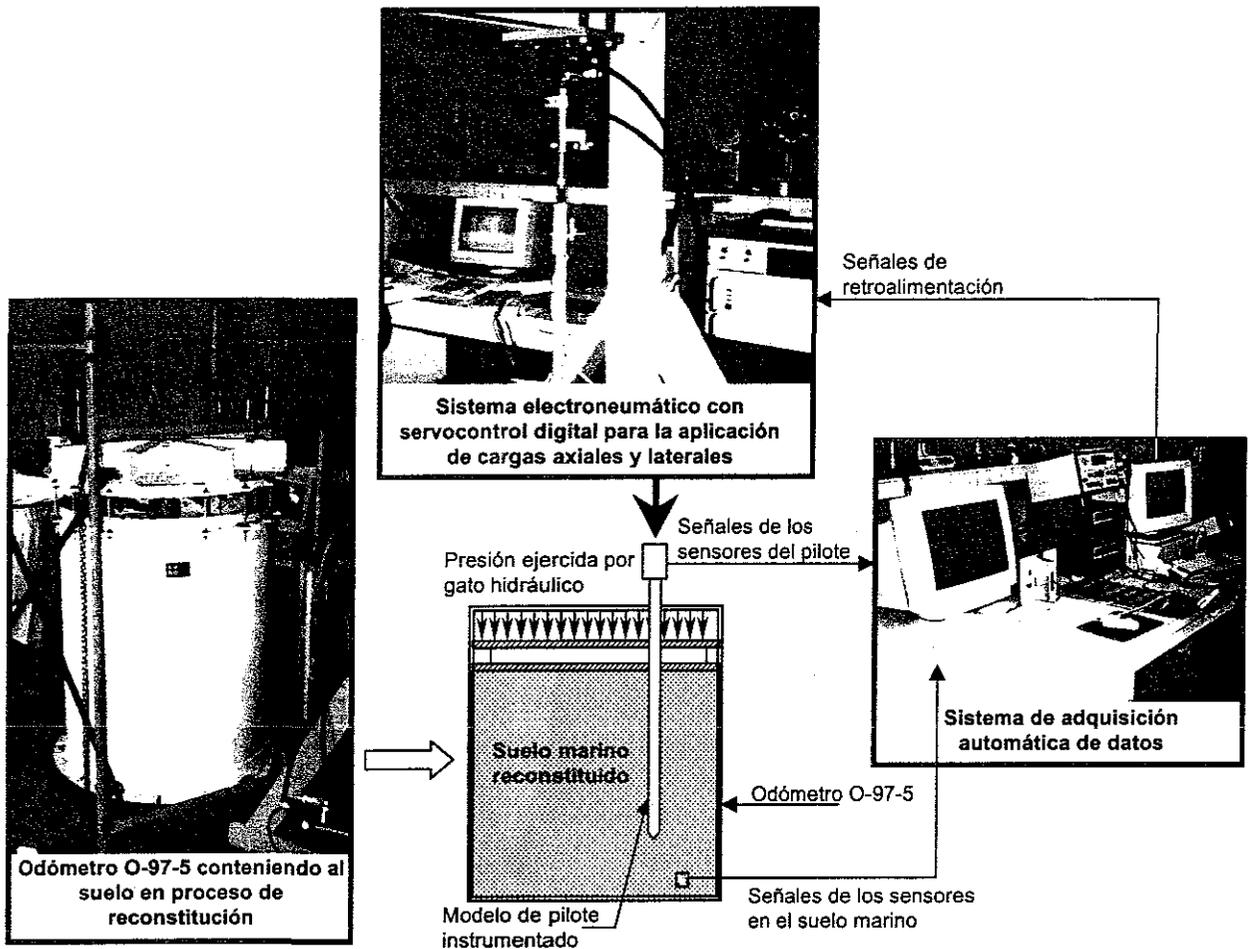


Figura 3.1 Esquema general del experimento con el modelo de pilote en suelo marino reconstituido

adquisición automática de datos y el sistema electroneumático con servocontrol digital para la aplicación de cargas axiales y laterales.

A continuación se describen brevemente los pasos contemplados para los ensayos con el modelo de pilote:

1. *Puesta en operación del sistema de adquisición automática de datos.* Tanto el odómetro como el modelo de pilote están instrumentados, por lo cual es necesario activar el sistema de adquisición para observar y registrar la evolución de las variables geotécnicas de medición, desde el proceso de hincado del pilote hasta la realización de los ensayos. En los apartados 4.3 y 4.4 se describe el sistema de adquisición automática de datos y su implementación.
2. *Alineación del marco de carga.* Antes de hincar el modelo, se ubica el marco de carga en el odómetro para marcar la posición exacta del ensaye en el suelo marino. Este marco fue diseñado para que los actuadores neumáticos

- reaccionen al aplicar las cargas al pilote; este marco puede ajustarse al odómetro en 8 posiciones diametrales, pudiendo realizar 16 ensayos en la periferia. En el apartado 4.2.1 de este trabajo se describe el marco de carga.
3. *Sistema de instalación.* Al ubicar físicamente la posición del modelo de pilote para su ensayo, retiramos el marco de carga y colocamos un marco guía (apartado 4.5.1) formado de tubos de acero empotrados en las orejas de sujeción del odómetro en tres puntos. Estos tubos junto con unas placas guía se ponen a plomo para posteriormente sujetar al modelo de pilote y realizar el hincado en la posición definida con antelación. El hincado es a percusión dejando caer una masa desde una altura fija; para ello se diseñó un sistema de hincado formado por una barra que guía a un cilindro de acero inoxidable que funge como martillo, tal como se describe en el apartado 4.5.2 de este trabajo. En esta etapa el sistema de adquisición de datos captura las señales de los sensores dispuestos en el modelo y en el suelo marino.
  4. *Acoplamiento del sistema de aplicación de cargas.* Después del hincado, reubicamos el marco de carga, y luego colocamos el actuador neumático en la viga superior del marco de carga en el mismo eje del pilote; posteriormente, éste lo conectamos al actuador por medio de una celda de carga y paralelamente se instala un medidor de desplazamiento LVDT entre el pilote y el actuador. Todos estos movimientos se hacen cuidando que el pilote no se mueva.
  5. *Selección del tipo de ensayo.* En esta etapa el sistema de aplicación de cargas es encendido y comienza el registro de las señales de la celda de carga externa y el LVDT, las cuales están compartidas con el sistema de adquisición de datos tomando la lectura inicial. A continuación en la PC del sistema electroneumático se define el tipo de carga, la amplitud, el tiempo, la frecuencia y el canal de retroalimentación del sistema para cada ensayo. En los apartados 4.1 y 4.2 es descrito el sistema de aplicación de cargas y su implementación.
  6. *Inicio de ensayo.* Al compartir las señales de la celda de carga y del medidor de desplazamiento en los dos sistemas, es posible conocer el inicio de la prueba de manera exacta. En esta etapa seleccionamos el tipo de adquisición (estática o dinámica) de acuerdo con el tipo de ensayo a realizar, guardando todos los datos en la PC del sistema de adquisición hasta concluir el ensayo.

Para contener al suelo artificialmente formado fue diseñado y construido el odómetro cilíndrico O-97-5, en cuya denominación se reconoce a su diámetro en centímetros y a la presión máxima axial de diseño en  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . En la tesis de maestría titulada "Reconstitución de un suelo arcilloso marino para ensayos con modelos de pilotes", del Ing. Enrique Ibarra (2002), es descrito con detalle la preparación del suelo para los ensayos con modelos de pilotes; también en un artículo de la XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos (Mendoza y coautores, 2000) se presentan detalles de la muestra marina reconstituida, su instrumentación y resultados preliminares.

Se planean ensayos bajo carga axial monotónicamente creciente y hasta la falla, así como con carga cíclica en los que se involucran las variables más significativas del problema, tales como la amplitud de la carga cíclica, la magnitud de la carga sostenida previa a la transitoria, el número de ciclos y la frecuencia del ciclaje. Así mismo, se llevarán a cabo ensayos cíclicos en los que se aplicarán cargas laterales cíclicas al nivel de la cabeza de los pilotes; para este caso, el o los pilotes instrumentados disponen de sensores para registrar la flexión a la que se les someta. Estos ensayos pueden realizarse controlando el nivel de carga o siguiendo una historia de desplazamientos.

En toda la campaña experimental se miden, bajo condiciones controladas, las variables internas del problema en un modelo de pilote, con el objetivo final de comparar los resultados experimentales con los que arrojen los modelos teórico-numéricos, calculados con las mismas condiciones que las del experimento; ello permitirá afinar o ajustar tales soluciones.

La experimentación realizada no pretendió modelar a escala un pilote de fricción prototipo, ya que para ello se deben satisfacer las leyes de similitud entre el modelo y prototipo, como se comenta en el apartado 2.1 de este trabajo. El poder cumplirlas impone exigencias experimentales difíciles de satisfacer en un ambiente meramente gravitacional, por lo que se recurre a máquinas centrífugas que imponen aceleraciones artificiales de algunas decenas de la gravedad terrestre, generando sobre el modelo estados de esfuerzo escalados con los del prototipo.

A fin de poner en evidencia el efecto del nivel de esfuerzo vertical a que esté sujeto el suelo alrededor de los pilotes, se previó la aplicación de presión externa sobre la superficie de suelo, como se muestra en la Fig. 3.2, empleando un gato hidráulico, al mismo tiempo que se realizan los ensayos con el modelo de pilote instrumentado. Esto es equivalente a ensayar tramos de pilote representativos de diferentes profundidades, correspondientes a cada nivel de esfuerzos.

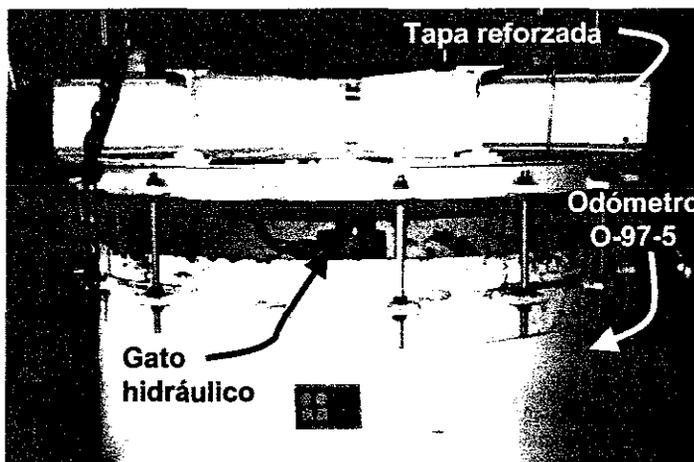


Figura 3.2

Vista del odómetro O-97-5 conteniendo al suelo reconstituido y sometido a presión con un gato hidráulico

### 3.2. *Diseño del modelo de pilote*

Para el diseño del modelo de pilote de fricción, se tomaron en cuenta los antecedentes de experimentos con modelos de pilotes, junto con los siguientes factores:

- a) La altura final del suelo marino reconstituido
- b) El espacio en planta para hincar y ensayar el o los pilotes
- c) El tipo de suelo y sus propiedades
- d) Los niveles de carga a las que estará sujeto el pilote
- e) Las presiones laterales producto de la sobrecarga que se le aplica al suelo y las aplicadas a los pilotes de manera lateral
- f) Los tipos de sensores disponibles en el mercado
- g) La factibilidad constructiva de las celdas, entre otros.

#### 3.2.1. *Determinación de la geometría y el material del modelo de pilote*

Haciendo estimaciones de la altura final de la muestra de suelo (contenida en el odómetro O-97-5), obtuvimos 85 cm de suelo final, por lo que sólo podíamos hincar 80 cm del modelo, construyendo así un pilote de 90 cm, quedando un tramo de 10 cm fuera del suelo. Atendiendo a la relación planteada y el espacio útil para los ensayos, el diámetro comercial del tubo fue de  $\frac{3}{4}$ " nominal, con lo cual aceptamos tener un modelo de pilote de 90 cm de longitud y 2.64 cm de diámetro exterior, pudiendo así ensayar el modelo en 16 posiciones distintas a 13 cm de la pared del odómetro, con un espacio a eje entre pilotes de 5 veces su diámetro.

El modelo es un tubo de aluminio temple 6, cédula 40 (duraluminio); se escogió duraluminio ya que el suelo contiene materia orgánica y sales agresivas a materiales férreos. Las celdas previstas para medir las variables geotécnicas se diseñaron con base en SG, los cuales traducen la deformación del elemento resorte en cambios de resistencia, por lo que también era conveniente tener un material con un módulo de elasticidad casi tres veces menor que el del acero, teniendo mayor deformación del elemento y, por ende, mayor respuesta de la celda.

Se realizaron dos ensayos en compresión simple de un tramo de tubo de duraluminio con el fin de caracterizar el material, obteniendo una gráfica esfuerzo deformación. De los ensayos se determinó que el módulo de elasticidad del material es  $E_{Al} = 6.40 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ , con un esfuerzo de fluencia  $f_{yAl} = 1,800 \text{ kg/cm}^2$ . Se consideró además un esfuerzo de trabajo  $f_{tr} = 1,400 \text{ kg/cm}^2$ , necesario para el diseño de las celdas de carga. Se consideró para el diseño una relación de Poisson del aluminio  $\nu = 0.33$  (Timoshenko, 1986).

### ***3.2.2. Sensores en el modelo de pilote y su distribución***

El tipo de sensores en el modelo de pilote y su distribución atienden al fenómeno físico que se quiere medir; esto es, conocer acerca de cómo los pilotes de fricción adquieren su capacidad portante, de cómo varía la fricción con la profundidad y cómo varían los esfuerzos efectivos en el fuste, con la profundidad y el tiempo.

Para conocer la resistencia generada a lo largo del pilote, se diseñaron celdas de carga axial, las cuales miden la carga interna en el pilote en 4 diferentes profundidades. Estas celdas están basadas en SG dado el buen comportamiento reportado en otros experimentos. Con ellas se puede inferir la resistencia al esfuerzo cortante en tres tramos, obteniendo la diferencia de cargas en las celdas y dividiendo éste valor entre el área de falla considerada en el sistema suelo-pilote (ya sea con el diámetro del pilote o con el que resulte al extraer el modelo con el suelo pegado en el fuste).

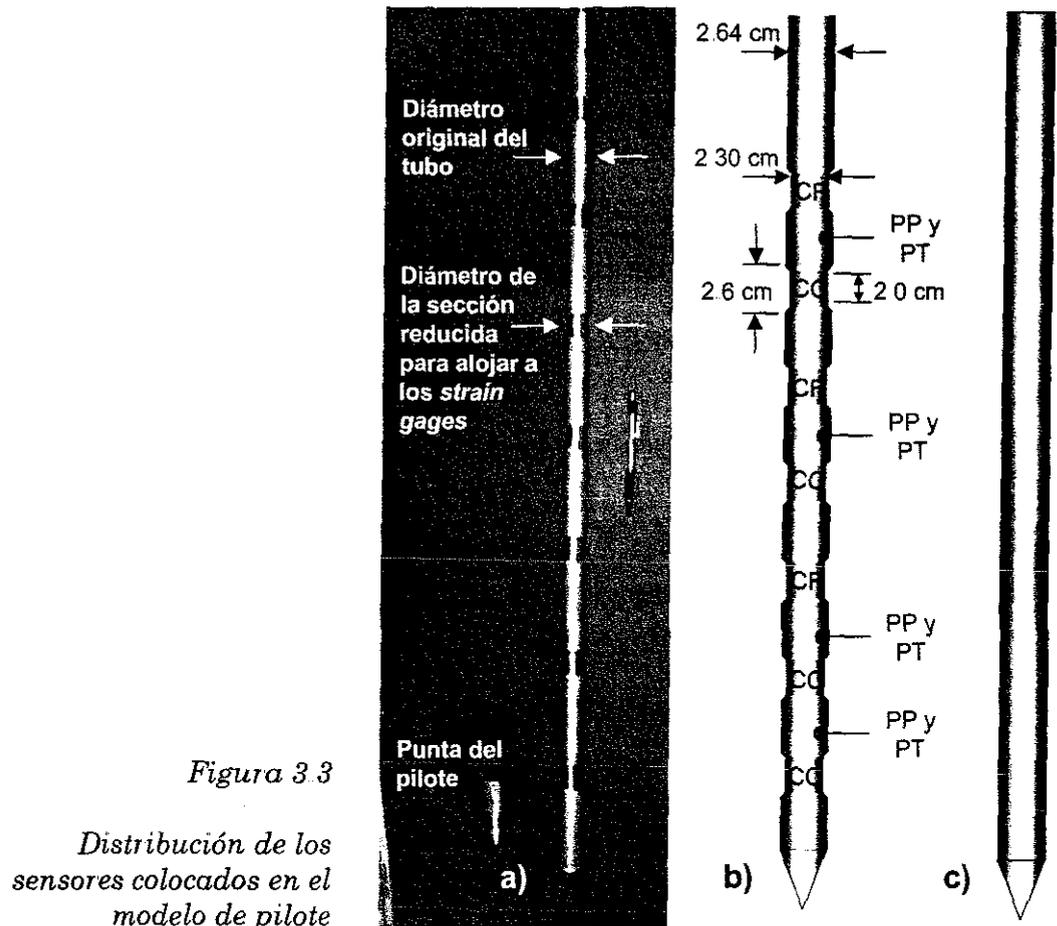
Se diseñaron también celdas de esfuerzo total, que miden la presión total normal a la pared del fuste y se seleccionaron transductores de presión de poro, en el mismo eje en cuatro profundidades, uno seguido del otro, para obtener de la diferencia el esfuerzo normal efectivo actuante. Al tener los valores de estas variables desde el proceso mismo del hincado, podemos conocer acerca de la consolidación local que se presenta en el fuste del pilote. Se pensó en tener dos sensores de presión total y de poro en un mismo nivel, pero por problemas de espacio se desechó esa posibilidad.

Adicionalmente se diseñaron celdas de flexión, a tres profundidades, con el objetivo de determinar la flexión que se presenta en el pilote en ensayos bajo cargas axiales y laterales, estáticas y cíclicas.

En el artículo de la XIX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos (Mendoza y coautores, 1998) se describió el diseño del modelo de pilote instrumentado, donde se pretendían formar celdas construidas de manera independiente y ensambladas en tramos para llegar a la longitud del pilote prevista; este diseño tenía el riesgo de presentar concentraciones de esfuerzo o desplazamiento relativo entre los tramos que reduciría la certidumbre de las mediciones de carga, además de posibles fugas en las uniones que hubiesen dañado las conexiones de los sensores, por lo que se rediseñó la instrumentación.

El diseño definitivo se muestra en la Fig. 3.3; se trata de un elemento monolítico que cuenta con siete secciones reducidas para alojar a los SG, inciso a, los cuales forman cuatro celdas de carga axial (CC) y tres celdas de flexión (CF), además de colocar cuatro transductores de presión de poro (PP) y cuatro celdas de presión total (PT), inciso b. Las secciones reducidas después de la colocación de los SG, se

cubrieron con una pasta epóxica mezclada con limadura de aluminio, teniendo como resultado un diámetro constante en toda la longitud, inciso c. Los detalles del diseño de las celdas se presentan en el apartado 3.3.



### 3.2.3. Variables de medición

Las variables que se miden en el pilote con esta instrumentación son: la carga axial en el pilote, con la cual se infiere la resistencia cortante en el fuste; el esfuerzo total normal a la cara lateral del pilote y la presión de poro en la interfaz suelo-pilote, pudiendo obtener de la diferencia el esfuerzo efectivo actuante en el fuste; y la flexión del pilote bajo cargas laterales y/o axiales definiendo la configuración deformada del pilote.

El odómetro O-97-5 cuenta con dos celdas de presión total ubicadas en el fondo del tanque y tres cánulas a diferentes profundidades, conectadas cada una a un transductor de presión de poro. Así pues, estas variables también serán medidas en cada ensaye con el modelo de pilote.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.3. Diseño de los sensores del modelo de pilote

Los sensores colocados en el modelo de pilote están basados en SG, los cuales se pegan al cuerpo del pilote traduciendo su deformación en un cambio de resistencia eléctrica. La elección del tipo de SG depende del material en donde se desea pegar, del nivel de deformación y del elemento mecánico que se quiere medir (Measurements Group, 1988).

#### 3.3.1. Estimación de la capacidad de carga del modelo de pilote

A continuación se muestra el procedimiento de cálculo para estimar la capacidad de carga axial estática del modelo de pilote, a partir de las expresiones vistas en el capítulo 1.

Datos del pilote:

	Dext:= 2.64	Diámetro exterior del modelo en cm
	Lemb:= 80	Longitud embebida del modelo en cm
$A_p := \frac{\pi \cdot Dext^2}{4}$	$A_p = 5.47$	Área de la punta del modelo de pilote en cm <sup>2</sup>
$A_f := \pi \cdot Dext \cdot Lemb$	$A_f = 663.5$	Área del fuste del modelo de pilote en cm <sup>2</sup>

De pruebas índice y mecánicas con arcilla marina reconstituida en odómetros pequeños (Mendoza y coautores, 5º Informe de avance, 1997), se definieron las propiedades del suelo:

Propiedades del suelo:

$\phi_{cu} := 15.4$	Ángulo de fricción aparente obtenido de ensayos CU, en grados	$\phi_{cu} := \phi_{cu} \frac{\pi}{180}$
$\phi := 30.5$	Ángulo de fricción efectivo obtenido de ensayos CU con medición de presión de poro, en grados	$\phi := \phi \frac{\pi}{180}$
$K_s := 1 - \sin(\phi)$	Coeficiente de presión lateral de tierras en reposo (sección 1.2.2)	
$\gamma_s := 0.0013$	Peso volumétrico del suelo en kg/cm <sup>3</sup>	
$\gamma_w := 0.00103$	Peso volumétrico del agua marina en kg/cm <sup>3</sup>	
$p := 0, 1 \dots 3$	Presión externa que será aplicada a la superficie de suelo en kg/cm <sup>2</sup>	
$\sigma(p) := (\gamma_s - \gamma_w) \frac{Lemb}{2} + p$	Esfuerzo efectivo medio en kg/cm <sup>2</sup>	

$c := 0.23$	Ordenada al origen de la ley de falla en prueba triaxial CU en kg/cm <sup>2</sup>
$K := 0.7$	Relación entre esfuerzo vertical y horizontal utilizada en laboratorio
$\sigma_{oct}(p) := \sigma(p) \cdot \frac{1 + 2K}{3}$	Esfuerzo octaédrico medio en kg/cm <sup>2</sup>
$c_u(p) := c + \sigma_{oct}(p) \cdot \tan(\phi_{cu})$	Resistencia cortante no drenada en kg/cm <sup>2</sup>
$N_c := 5.14$ $N_\gamma := 1$	Factores de capacidad de carga, ec 1.5
$N_t := 9$	Factor considerado en la ec. 1.6, $N=9$ si $D < 0.5$ m
$\alpha_1 := 0.8$	Factor considerado en la ec. 1.16, $0.5 < \alpha < 1.0$
$\alpha_2 := 1$	Factor considerado en la ec. 1.17, $\alpha=1.0$ $L/D < 50$ $c_u/\sigma < 0.38$
$\psi(p) := \frac{c_u(p)}{\sigma(p)}$	Expresión del API para la ec. 1.19
$\alpha(p) := 0.5 \psi(p)^{-0.5}$	Factor $\alpha$ considerado en la ec. 1.19

Como se mencionó en el apartado 3.1, se contempla la aplicación de presión externa en la superficie del suelo reconstituido, por lo que se maneja en las propiedades anteriores una presión externa “p” que toma los valores de 0, 1, 2 y 3 kg/cm<sup>2</sup>, para la evaluación de capacidad de carga en el modelo de pilote.

El esfuerzo vertical efectivo “ $\sigma(p)$ ” se calcula suponiendo que el exceso de presión de poro es nulo al final de cada aplicación de presión externa. Esto se puede verificar gracias a la instrumentación con que fue dotado el odómetro O-97-5.

La resistencia no drenada “ $c_u(p)$ ” de la arcilla, para cada nivel de presión externa, se calculó considerando la ley de resistencia Mohr-Coulomb obtenida con ensayos triaxiales del tipo CU (consolidado-no drenado), con la ordenada al origen “c” y el ángulo de fricción aparente “ $\phi_{cu}$ ”, para cada valor del esfuerzo octaédrico “ $\sigma_{oct}(p)$ ”. Cabe mencionar que las probetas para los ensayos triaxiales se consolidaron con una relación  $K = 0.7$ , la cual se toma en cuenta para la evaluación del esfuerzo octaédrico.

Los coeficientes “ $N_c$ ,  $N_\gamma$ ,  $N_t$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  y  $\alpha$ ” se evaluaron conforme las recomendaciones de cada autor.

Con la información anterior, se obtienen los valores de capacidad de carga estimada para el modelo de pilote, como se muestra a continuación:

Estimación de la capacidad de carga del modelo:

$$MD(p) := A_p (9 c_u(p)) + A_f (K_s \tan(\phi) \sigma(p))$$

$$SGI(p) := A_p (c_u(p) \cdot N_c + 0.5 \gamma_s D_{ext} N_r) + A_f (K_s \tan(\phi) \sigma(p))$$

$$CFEM(p) := A_p (c_u(p) \cdot N_t) + A_f (\alpha_1 c_u(p))$$

$$Nor(p) := A_p (9 c_u(p)) + A_f (\alpha_2 c_u(p))$$

$$Ing(p) := A_p (9 c_u(p)) + A_f (0.7 c_u(p))$$

$$API(p) := A_p (9 c_u(p)) + A_f (\alpha(p) c_u(p))$$

AUTORES:

Meyerhof y Das (MD)

Swedish Geotechnical Institute (SGI)

Canadian Foundations Engineering Manual (CFEM)

Noruega

Inglaterra

American Petroleum Institute

$\sigma(p) =$	MD(p) =	SGI(p) =	CFEM(p) =	Nor(p) =	Ing(p) =	API(p) =	
0.01	13.53	8.63	134.8	165.63	119.38	28.07	kg
1.01	216.85	207.3	262.62	322.7	232.58	246.73	kg
2.01	420.18	405.97	390.44	479.76	345.78	419.11	kg
3.01	623.51	604.64	518.26	636.82	458.98	588.13	kg

Definida la capacidad de carga del pilote para cada sobrepresión “p” y considerando que éstas serán las cargas máximas actuantes, se diseñaron los sensores dispuestos en el modelo de pilote.

### 3.3.2. Celdas de carga axial

Para el diseño de estas celdas, se consideró una carga de diseño igual a  $Q = 1,000 \text{ kg}$ , la cual fue definida cuando todavía no se tenía información precisa de la altura final y de las propiedades mecánicas del suelo; no obstante, comparando ésta con la capacidad de carga estimada con las expresiones anteriores, resulta adecuada tal carga.

En general, los SG alcanzan una deformación unitaria máxima de  $\epsilon_{\max} = 2\%$ ; es decir,  $\epsilon_{\max} = 2000 \mu\epsilon$ , mucho más que la deformación de fluencia del aluminio ( $\epsilon_y = 0.2\%$ ), lo que implica que el SG trabajará en su intervalo elástico siempre y cuando el elemento resorte se encuentre también en su rama de deformaciones elásticas. Por lo anterior, con la carga  $Q$  y el esfuerzo de trabajo del aluminio definido con anterioridad, se calculó el área efectiva de trabajo:

$$A_{ef} = \frac{Q}{f_r} \tag{3.1}$$

Con las propiedades geométricas del tubo y el área efectiva, es determinado el diámetro externo (diámetro reducido) de las celdas de carga. Con el esfuerzo de

trabajo y el módulo de elasticidad del aluminio conocemos el nivel de deformaciones para el esfuerzo de trabajo, que será el esfuerzo correspondiente a la carga Q:

$$\varepsilon_{tr} = \frac{f_{tr}}{E_{Al}} \quad (3.2)$$

Conociendo el nivel de deformación axial del elemento resorte, fue estimado el voltaje de salida a escala total (correspondiente a la carga de diseño del sensor) dependiendo del arreglo de SG seleccionado; en este caso fue elegido un arreglo de puente completo (puente de Wheatstone) formado por cuatro SG longitudinales y cuatro SG perimetrales orientados transversalmente al elemento, dado que así se compensan la deformaciones diferenciales que pudieran tenerse debido a la excentricidad de carga en el elemento. Estos SG miden la deformación axial y tangencial del tubo; por lo que el voltaje de salida estimado es:

$$v_s = \frac{\varepsilon_{tr} \cdot 4(1-\nu)}{2000} \quad (3.3)$$

donde  $v_s$  es el voltaje de salida en mV/V de alimentación y el denominador 2000 es un coeficiente de proporcionalidad entre microdeformaciones y milivolts.

Sustituyendo las características del modelo en las expresiones 3.1, 3.2 y 3.3, tenemos que:

#### Propiedades del tubo de duraluminio:

$E_{Al} := 64010^5$	Módulo de elasticidad en kg/cm <sup>2</sup>
$f_{yAl} := 1800$	Esfuerzo de fluencia en kg/cm <sup>2</sup>
$f_{tr} := 1400$	Esfuerzo de trabajo en kg/cm <sup>2</sup>
$\nu := 0.33$	Relación de Poisson considerada

#### Cálculo del área efectiva:

$Q := 1000$	Carga de diseño en kg
$A_{ef} := \frac{Q}{f_{tr}}$	$A_{ef} = 0.71$ Área efectiva, en cm <sup>2</sup>

**Cálculo del diámetro exterior en la posición del sensor:**

$$D_{ext} := \sqrt{\frac{4 \left( A_{ef} + \frac{\pi \cdot D_{int}^2}{4} \right)}{\pi}}$$

$D_{int} := 2.09$       Diámetro interior del modelo en cm  
 $D_{ext} = 2.3$       Diámetro exterior en el sensor en cm

**Estimación de la señal de salida del sensor:**

$$\epsilon_{tr} := \frac{f_{tr}}{E_{Al}} \cdot 1 \cdot 10^6$$

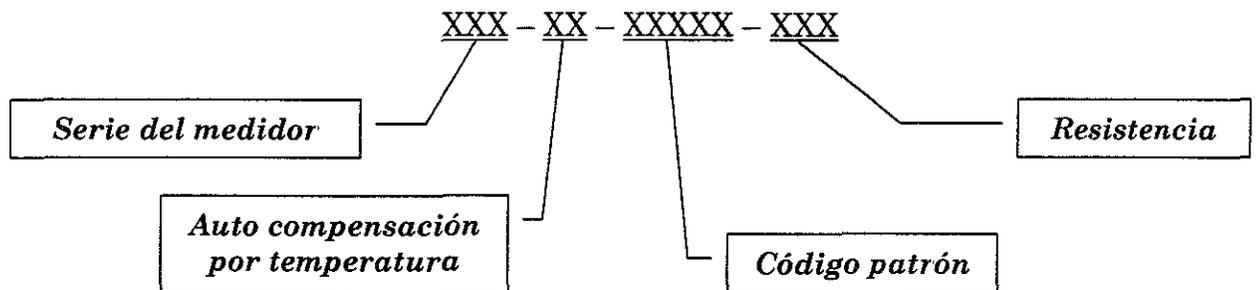
$\epsilon_{tr} = 2187.5$       Deformación unitaria correspondiente al esfuerzo de trabajo, en  $\mu\epsilon$

$$v_s := \frac{\epsilon_{tr} \cdot 4 \cdot (1 - \nu)}{2000}$$

$v_s = 2.93$       Voltaje de salida en mV/V de alimentación

Por los resultados anteriores, la celda de carga debería tener una respuesta de casi 3 mV/V de señal de salida; esto es, si la celda es alimentada con 10 V, la señal sería de 30 mV a escala total (con la carga de 1000 kg), pero al ser recubierta con epóxico y limadura de aluminio, la respuesta es menor a la estimada.

Para seleccionar los SG que conforman la celda de carga, se definieron cuatro parámetros indicados en el catálogo de Measurements Group (1992), el cual cuenta con un sistema de designación del medidor (*Gage Designation System*) que se compone de las siguientes partes:



**Serie del medidor:** Esta serie se define con base en el intervalo de temperaturas y el nivel de ciclos de carga. En el experimento, la temperatura de las pruebas oscila entre 15 y 32° C y el número de ciclos es bajo en comparación de los que se indican en el catálogo; por lo anterior, la serie seleccionada fue la N2A, dado que el intervalo de temperatura es de -75° a 95° C y mantiene linealidad en las mediciones a 3000 ciclos de carga con un nivel de deformación de 1500  $\mu\epsilon$ ; es decir, casi el mismo nivel de deformación media en los ensayos cíclicos. Ello nos asegura que el SG trabajará en la rama elástica en todos los ensayos.

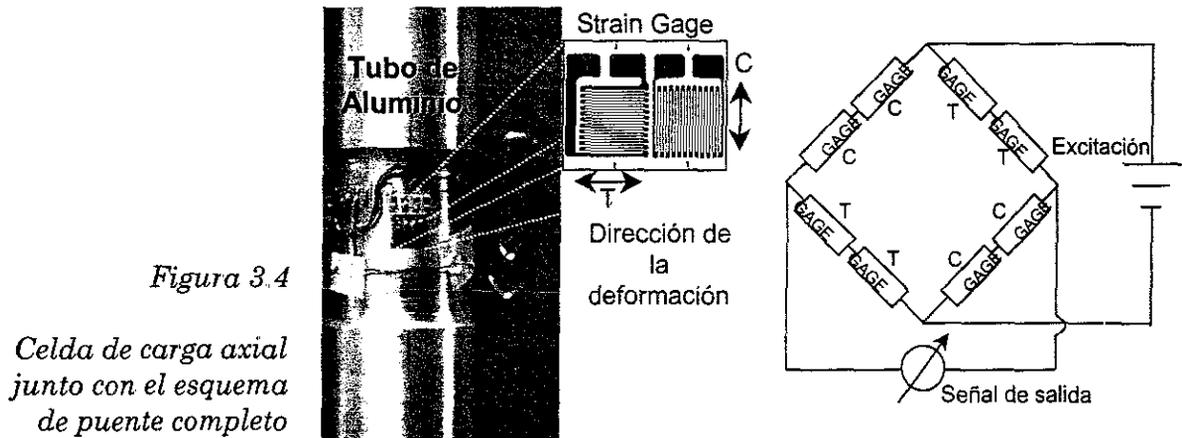
**Auto compensación por temperatura:** Es el coeficiente de expansión térmica del transductor; esto es, el SG seleccionado debe tener la misma deformación por temperatura que el elemento resorte, que para este caso es 13 (Timoshenko, 1986).

**Código patrón:** Este código define el tamaño de la matriz del SG y el arreglo del medidor. Como el espacio en el modelo es reducido, se buscó el SG más pequeño, que tuviera la capacidad de medir la deformación en dos direcciones perpendiculares; así pues, se eligió el tipo S064L.

**Resistencia:** Por último, se elige la resistencia del SG en ohms, la cual debe corresponder al puente de Wheatstone con el que se medirá su respuesta. En nuestro caso, la respuesta se captura con el sistema de adquisición de datos para los ensayos estáticos y cíclicos y en forma puntual con un medidor de deformación para elementos de 350 ohms. Así entonces la resistencia seleccionada fue de 350 ohms.

Finalmente el SG tipo N2A-13-S064L-350 es el adecuado para la celda de carga, utilizando un espesor reducido en el tubo de duraluminio, teniendo buena resolución de medición para los ensayos estáticos y cíclicos con sobrepresión baja.

La instrumentación de la celda de carga se muestra en la Fig. 3.4 junto con el SG seleccionado y el arreglo de puente completo.



Cada celda de carga axial está formada con cuatro SG pegados en el exterior de la sección reducida del tubo, colocados al mismo nivel a  $90^\circ$  entre sí, formando un puente completo; cada uno de ellos podrá medir la deformación longitudinal y transversal del tubo, debido a la aplicación de carga.

### 3.3.3. Celdas de flexión

Las celdas de flexión se resolvieron de manera similar a las celdas de carga, reduciendo la sección del tubo pero utilizando SG unidireccionales en tres puntos equidistantes al mismo nivel, en tres diferentes alturas, como se muestra en la

Fig. 3.5. El objetivo principal de esta celda es determinar la configuración deformada por flexión del modelo ante cargas laterales principalmente.

La selección del SG fue:

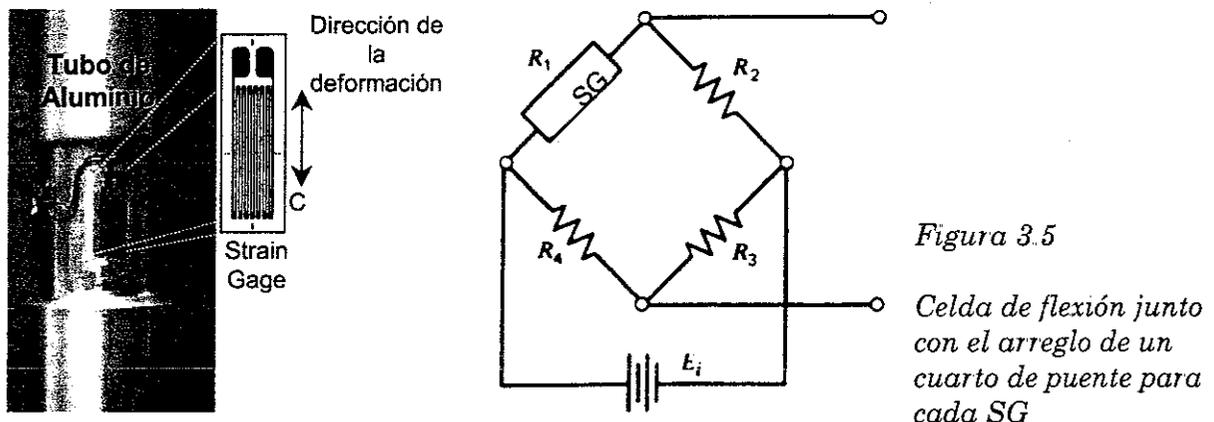
**Serie del medidor:** Se seleccionó la serie CEA ya que tiene las mismas características que el tipo N2A, pero cuenta con mayor variedad en sensores unidimensionales (Catálogo 500, 1993).

**Auto compensación por temperatura:** Al pegarse también en el duraluminio, el número correspondiente es 13.

**Código patrón:** Para este caso, al formar la celda con tres SG, el tamaño podía ser un poco mayor, eligiendo así el tipo 250UN.

**Resistencia:** Al igual que en la celda de carga, se eligió una resistencia de 350 ohms.

Por lo anterior, el SG adecuado es el tipo CEA-13-250UN-350. La celda de flexión se muestra en la Fig. 3.5.



La celda finalmente se formó colocando tres SG al mismo nivel a  $120^\circ$  entre sí; cada uno de estos forma un cuarto de puente (Fig. 3.5), contando así con tres señales independientes de cada ubicación.

### 3.3.4. Celdas de presión total

Las celdas de presión basadas en SG pueden ser de dos tipos: de desplazamiento o de diafragma, dependiendo del nivel de deformaciones debidas a las presiones actuantes en el transductor.

La presión para el diseño de los sensores se consideró igual a la sobrecarga externa que actuará durante los ensayos con los modelos; esto es, la presión máxima

total recibida por la celda de presión total es la suma de la presión horizontal total inicial (condiciones geostáticas) más la sobrecarga, por lo que la presión de diseño fue de  $3 \text{ kg/cm}^2$ .

Las presiones estimadas son relativamente bajas, por lo tanto, conviene utilizar transductores del tipo diafragma (Dally y coautores, 1984). Estos transductores, como su nombre lo indica, utilizan un diafragma circular plano el cual se somete a presión uniforme presentando una deformación tangencial  $\epsilon_{\theta\theta}$  positiva en todo el diámetro, con valor máximo al centro; asimismo, la deformación radial  $\epsilon_{rr}$  es negativa en la zona perimetral (empotramiento), tal y como se muestra en la Fig. 3.6.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

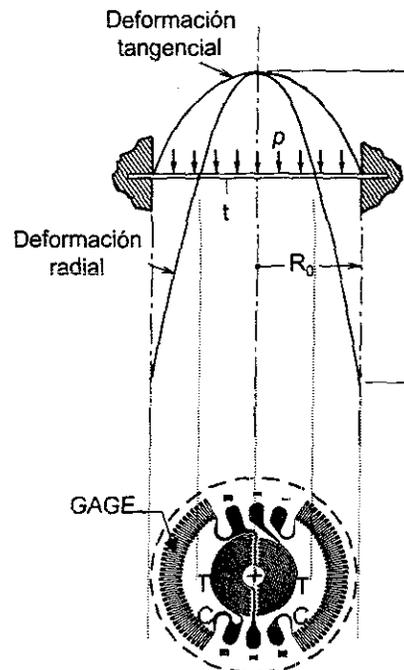


Fig. 3.6  
Esquema de las deformaciones  
del diafragma circular

Aprovechando tal distribución, las compañías que construyen los SG, elaboran deformímetros eléctricos tipo roseta circular, los cuales están divididos en cuatro sectores, dos en el centro que miden la deformación tangencial  $\epsilon_{\theta\theta}$  máxima y dos en la periferia para registrar la deformación radial  $\epsilon_{rr}$  máxima negativa, como se muestra en la Fig. 3.6. Al contar con cuatro elementos, el arreglo que se forma es de puente completo, Fig. 3.7.

Las deformaciones en la celda están íntimamente ligadas a las dimensiones del diafragma, así pues, revisando el catálogo de Measurements Group (1992) se observa que el SG tipo roseta más pequeño es el tipo S067F, con un diámetro mínimo de diafragma de 5.3 mm. Esto implica que el parámetro  $R_0$  quede fijo en 2.65 mm, así como la relación de Poisson y el módulo de elasticidad dado que el diafragma es de aluminio; consecuentemente el parámetro por determinar es el espesor del diafragma, el cual depende de la señal de salida.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Un transductor aceptable debe tener una respuesta de al menos 2 mV/V a escala total; con los parámetros del material y con la expresión dada en el Tech Note TN-510-1 (1992) de Measurements Group, se puede estimar el espesor de la celda de presión total con la siguiente expresión:

$$t = \sqrt{\frac{0.75 p R_0^2 (1 - \nu^2)}{e_0 \cdot E_{Al}}} \quad (3.4)$$

Donde:

- $t$  es el espesor del diafragma
- $p$  es la presión actuante
- $R_0$  es el radio del diafragma
- $\nu$  es la relación de Poisson
- $e_0$  es la señal de salida deseada de la celda
- $E_{Al}$  es el módulo de elasticidad del aluminio

Sustituyendo valores en la expresión 3.4, se tiene que el espesor del diafragma es:

**Características del diafragma:**

$D_0 := 0.53$	Diámetro del diafragma en cm
$R_0 := \frac{D_0}{2}$	Radio del diafragma en cm
$\nu := 0.3$	Relación de Poisson del aluminio
$E_{Al} := 6.40 \cdot 10^5$	Módulo de elasticidad del aluminio en kg/cm <sup>2</sup>
$e_0 := 2$	Señal de salida deseada en la celda en mV/V
$p := 3$	Presión de diseño en kg/cm <sup>2</sup>

**Espesor del diafragma:**

$$t := \sqrt{\frac{0.75 p R_0^2 (1 - \nu^2)}{e_0 \cdot E_{Al}}} \quad t = 0.00034 \quad \text{Espesor del diafragma en cm}$$

Como se observa, el espesor del diafragma para que tenga una señal de 2 mV/V, debió de ser de 0.00034 cm, el cual es imposible de maquinar; por ello, se decidió tener un espesor de 0.02 cm con lo cual sacrificamos la señal de salida, teniendo señales por debajo de 0.2 mV/V.

Buscando aumentar el nivel de deformación se pensó en dos opciones: aumentar el tamaño de la celda o cambiar el material por uno de módulo de elasticidad menor. La limitación principal en cambiar tales parámetros fue la factibilidad constructiva y de montaje en el modelo; en efecto, el aumentar el diámetro de la celda hace imposible su colocación en el fuste; así mismo, el cambiar

el material por cobre o latón hubiera sido complicado el maquinar un espesor pequeño, que aún teniendo un módulo de elasticidad bajo, el espesor no rebasaba 0.01 mm. Por lo anterior se aceptó que la celda tuviera un espesor de 0.2 mm hecho de aluminio.

La selección del SG para esta celda fue (Measurements Group, 1992):

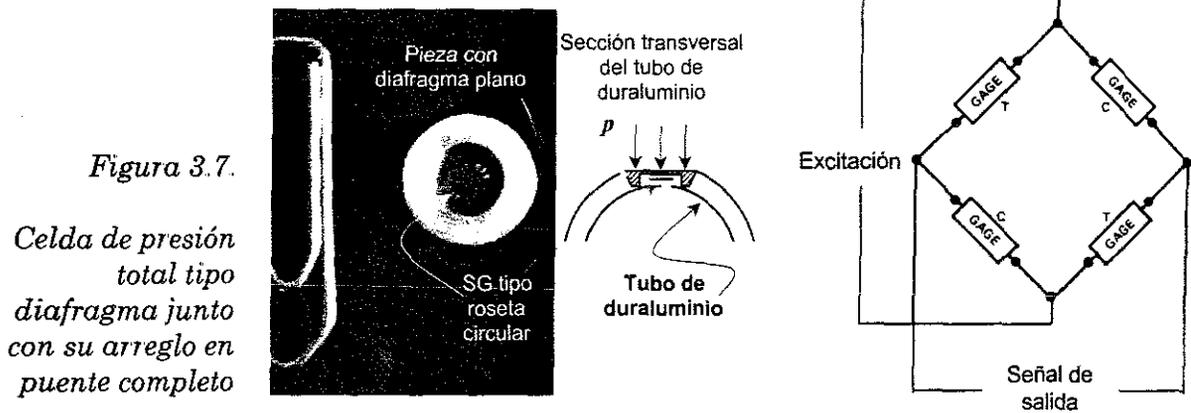
**Serie del medidor:** Se seleccionó la serie N2A, ya que cuenta con SG tipo roseta circular.

**Auto compensación por temperatura:** Al igual que con las celdas anteriores, el número correspondiente es 13.

**Código patrón:** Como se comentó, las limitaciones de espacio nos llevó a seleccionar el SG más pequeño, el cual tiene el código S067F.

**Resistencia:** Al igual que las celdas anteriores, se eligió una resistencia de 350 ohms.

Así pues, el SG adecuado es el tipo N2A-13-S067F-350 en arreglo de puente completo, Fig. 3.7.



El cuerpo de las celdas de esfuerzo total para nuestro modelo se maquinó independientemente del tubo, con una pieza plana reducida en su interior para formar el diafragma circular en donde se aloja el SG tipo roseta. Este lugar es el área sensible de la celda y queda en contacto directo con el suelo. La pieza es también de duraluminio y se fija al pilote con pegamento epóxico; el esquema de colocación de la celda y la ubicación del SG también se incluyen en la Fig. 3.7.

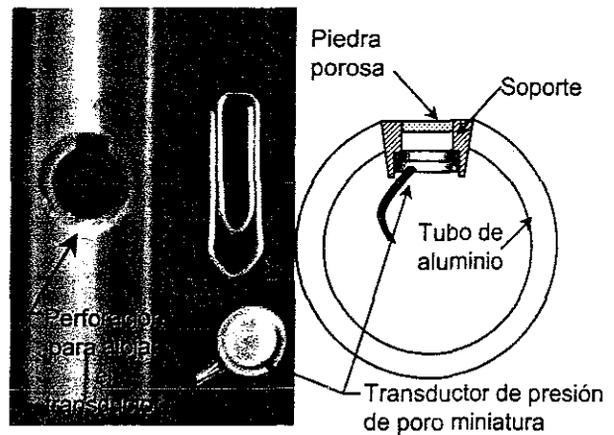
### 3.3.5. Transductores de presión de poro

A diferencia de las demás celdas, el transductor de presión de poro fue adquirido a la compañía Entram Devices, ya que cuentan con modelos de reducido

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

tamaño, adecuados para el espacio disponible en el modelo de pilote, además de que utilizan SG semiconductores en sus sensores, teniendo una mayor señal de salida. Por ello la selección consistió en definir el tipo, tamaño y capacidad del transductor con base en el catálogo Entran Sensor and Electronics (1996). Fue seleccionado el modelo EPN-B01-1.5B ya que es pequeño, de acero inoxidable y está construido para una presión de diseño de 1.0 kg/cm<sup>2</sup>. La presión seleccionada en el sensor obedece a que el pilote se hincará después de que se haya disipado el exceso de presión de poro producto de la sobrecarga aplicada en el suelo, teniendo presiones prácticamente hidrostáticas. Claro está que la presión seleccionada es mayor a la que se registrará en los ensayos previendo el aumento de presión de poro producto del hincado.

Los transductores de presión de poro se colocaron de manera semejante a como se procedió con las celdas de esfuerzo total, maquinando una pieza de apoyo que se adapta a la forma de fabrica del transductor y pegándolo con resina epóxica al cuerpo del pilote; entre el transductor y el suelo se colocó un elemento poroso cortado de una piedra de esmeril, el cual permite la entrada de agua al diafragma sensible y evita el contacto del suelo. El esquema se presenta en la Fig. 3.8, mostrando el transductor de presión de poro miniatura.



*Figura 3.8*  
Esquema de la colocación de los transductores de presión de poro

El transductor miniatura está separado de la piedra porosa dejando una pequeña cámara de presión.

### 3.4. Construcción del modelo de pilote

La manufactura del modelo se divide en tres etapas: maquinado, pegado e implementación.

#### 3.4.1. Maquinado

Una vez definidas las celdas de carga, flexión, presión total y presión de poro, necesarias para el ensaye con los modelos, se maquinó el tubo de duraluminio

ajustándose a las dimensiones mostradas en la Fig. 3.9, reduciendo cuatro secciones para alojar a los SG de las celdas de carga y tres para las celdas de flexión. Además, se realizaron las perforaciones y preparaciones para las celdas de esfuerzo total y transductores de presión de poro, Fig. 3.10, intercaladas entre cada sección reducida. La distribución de las preparaciones se muestra en la Fig. 3.11.

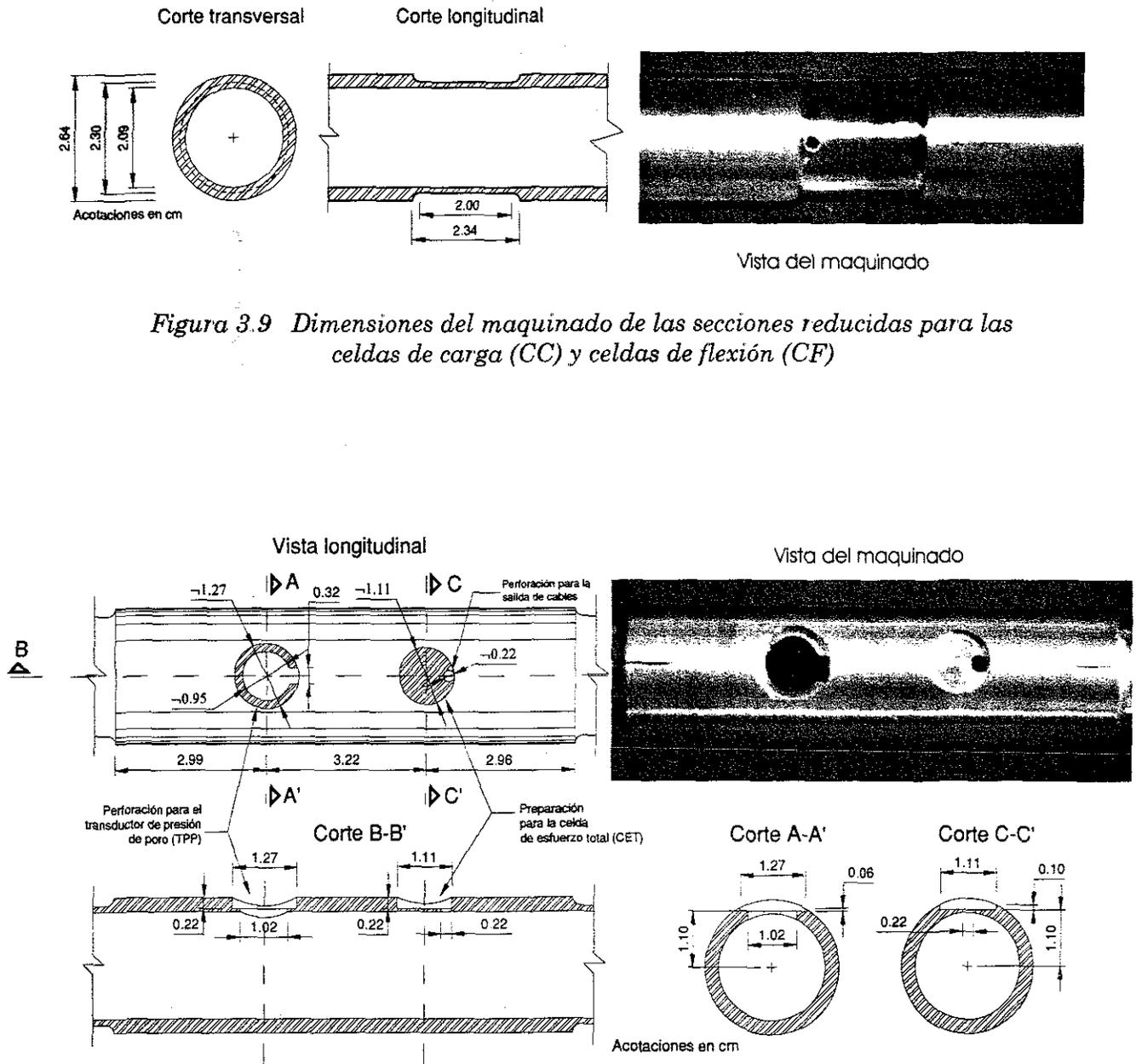


Figura 3.10 Dimensiones del maquinado de las preparaciones para las celdas de presión total (PT) y transductores de presión de poro (PP)

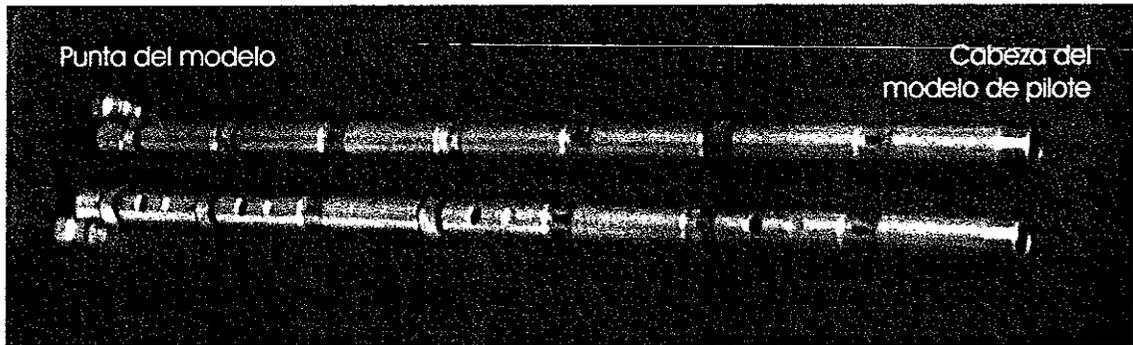


Figura 3.11 Distribución de las preparaciones en el modelo de pilote

La punta del pilote se maquinó con un ápice de 60° y con las dimensiones mostradas en la Fig. 3.12.

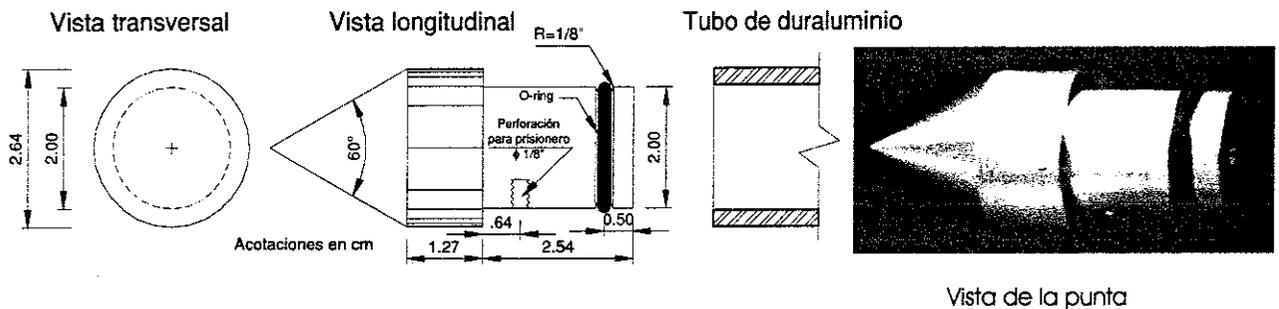


Figura 3.12 Dimensiones del maquinado de la punta del pilote

Como se observa, la punta se conectará al pilote por la parte interna, sellando la conexión con un O-ring y fijando los elementos por medio de un tornillo que aprisiona a la punta.

Las piezas que conforman los PT y PP se maquinaron fuera del pilote. Las dimensiones constructivas del sensor PT y su diafragma se muestran en la Fig. 3.13. Asimismo, en la Fig. 3.14 se muestran las dimensiones de la pieza de soporte del sensor PP.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

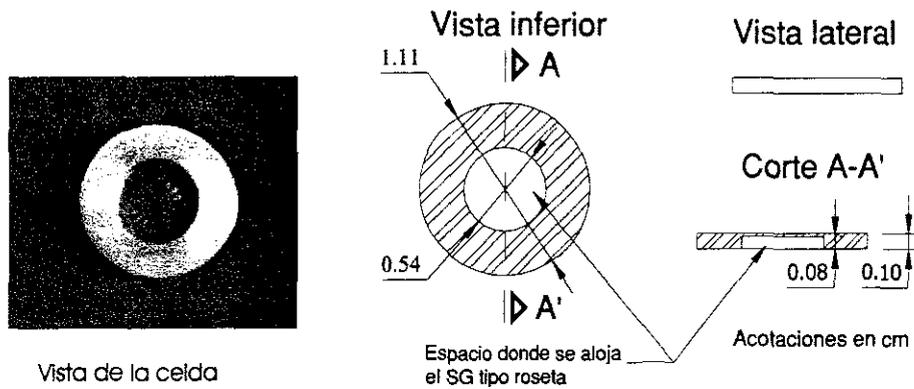


Figura 3.13 Maquinado del diafragma circular plano

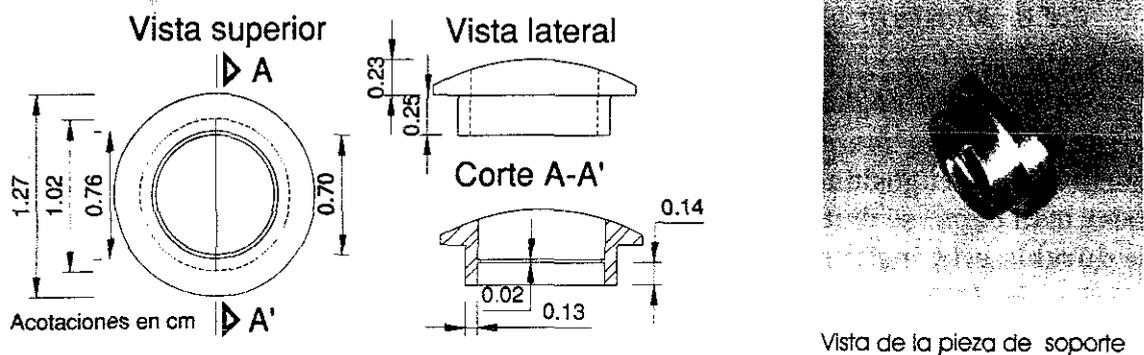


Figura 3.14 Maquinado de la pieza de soporte para el PP

Posteriormente al maquinado, se realizó el pegado de los SG correspondientes en cada celda.

### 3.4.2. Pegado de strain gages y conectores

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

A continuación se describen brevemente los pasos realizados para el pegado de los *strain gages* en el modelo de pilote:

1. *Limpieza de la superficie y trazo de ejes.* Como primer paso, se debe eliminar cualquier irregularidad en la superficie para que el SG se pegue en toda su área, posteriormente se aplica solvente con el fin de quitar residuos grasos que pudiera tener. Después se trazan los ejes longitudinal y transversal (sólo para el caso de las CC y CF), los cuales servirán de referencia en el montaje del SG y ubicarlo en la posición final.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

2. *Montaje del SG.* En la superficie de pegado, se aplica una capa de pegamento epóxico, inmediatamente después, en una cinta de teflón se coloca el SG y se lleva a la superficie de pegado. Allí con la cinta se alinean las flechas del SG junto con los ejes marcados previamente, se coloca y se le somete a presión uniforme.
3. *Curado del SG.* El SG se mantiene con presión uniforme y se lleva junto con la pieza al horno de convección a una temperatura constante. Posteriormente se aplica otra capa de pegamento para proteger al SG y se deja secar a temperatura ambiente.

De la misma manera se pegaron los conectores de los SG, los cuales tienen el objetivo de reducir la cantidad de calor a la que se expone un SG producto de la soldadura con los cables.

### 3.4.3. Montaje

Al final del pegado y cableado de los SG, las celdas de carga y de flexión se cubrieron con una mezcla epóxica y limadura de aluminio, buscando obtener una superficie con rugosidad semejante al del cuerpo del modelo no maquinado; al colocar esta capa, se evita el contacto de los SG con el suelo y el agua marina, siendo más durable esta instrumentación.

La celda PT se unió al modelo con pegamento epóxico, como se muestra en la Fig. 3.15.

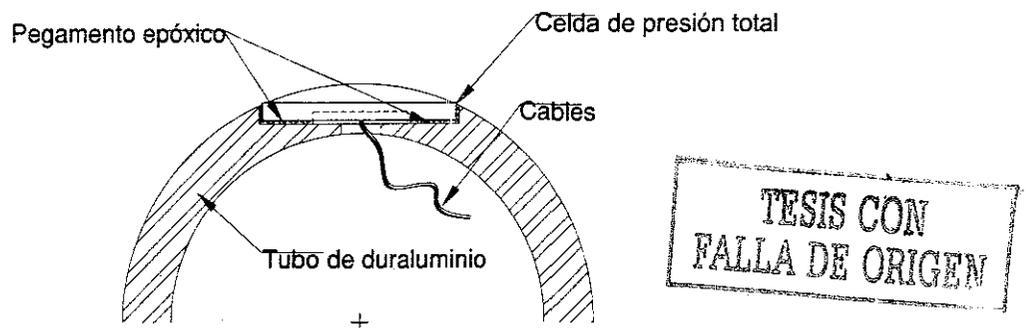
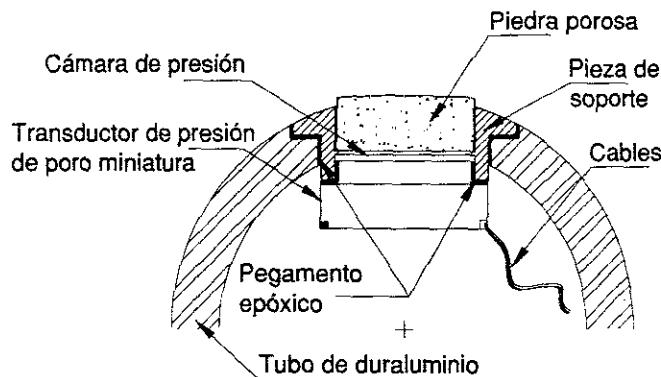


Figura 3.15 Montaje del PT

Desafortunadamente el diafragma circular no permite una superficie curva en su exterior, ya que la distribución de deformaciones cambiaría y no se tiene un SG acorde a esa distribución, por lo que en la posición de las celdas PT se presenta un cambio de sección en el fuste, Fig. 3.15, el cual se considera poco significativo en la medición del esfuerzo total normal al pilote.

En la Fig. 3.16 se observa el montaje del transductor de presión de poro miniatura junto con la pieza de soporte y la piedra porosa; cabe destacar que el ensamble del transductor y de la pieza de soporte se hizo fuera del pilote, uniendo el transductor a la pieza con pegamento epóxico. El conjunto se unió al modelo con pegamento epóxico verificando el sello del ensamble. Se procuró que la piedra porosa fuera removible insertándola al conjunto con poca presión al inicio de cada ensaye, dejando que sobresalga lo suficiente para ser removida fácilmente.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.16 Montaje del PP

La piedra porosa es removible con el fin de saturarla por fuera, sumergiéndola en agua desaerada caliente y así, eliminar cualquier burbuja de aire atrapada en la piedra; esto es, dadas las dimensiones del transductor, el que la piedra hubiera tenido burbujas de aire, por pequeñas que fueran, la respuesta en el sensor no sería inmediata. Este aspecto fue uno de las más importantes en el experimento, ya que si no se hubiera logrado una buena respuesta del PP en los ensayos estáticos y dinámicos, no se tendría certidumbre acerca de la evolución de los esfuerzos efectivos normales a la pared del tubo.

A continuación se detalla el proceso de calibración de los sensores dispuestos en el modelo de pilote.

### 3.5. Calibración de los sensores

Los sensores dispuestos en el modelo de pilote fueron calibrados con los siguientes equipos: Sistema de Adquisición de Datos (SAD), registrando el voltaje de salida con respecto a la presión, momento flexionante o carga aplicada, y con un voltímetro registrando la señal de salida correspondiente a cada acción. Las unidades para cada sensor son: CC en kg, CF en kg-cm, y los PP y PT en kg/cm<sup>2</sup>.

Cabe mencionar que se maquinaron dos modelos de pilotes idénticos en su instrumentación denominados MP1 y MP2; desafortunadamente el MP1 tuvo un defecto en la colocación de la resina epóxica que cubre las celdas de carga y flexión,

por lo que a la fecha de este escrito, se calibró completamente el Modelo de Pilote 2 (MP2).

### 3.5.1. Sensores PT y PP

Para la calibración de los sensores PT y PP, se utilizó un tubo de lucita de 3" de diámetro y 85 cm de alto, acondicionado para alojar al modelo de pilote en su interior, como se muestra en la Fig. 3.17. El arreglo permite someter al modelo a diferentes presiones de agua.

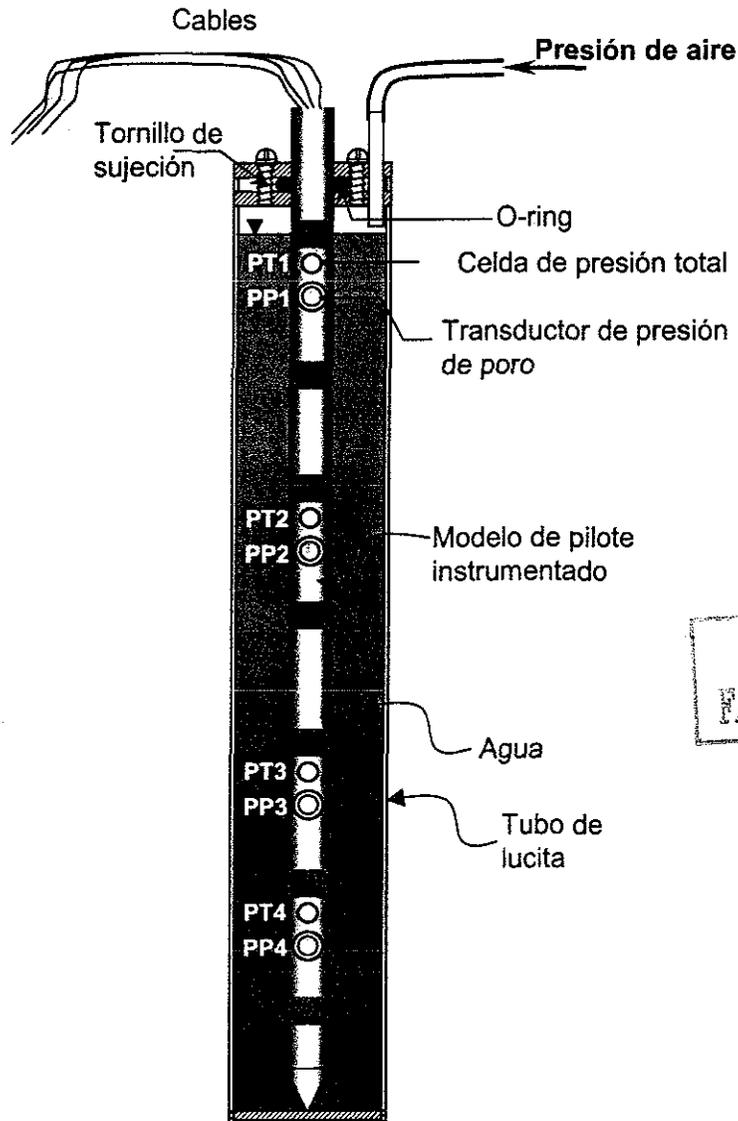


Figura 3.17 Esquema del dispositivo utilizado para calibrar los sensores PT y PP.

Los cables de los sensores se conectaron a las tarjetas acondicionadoras de señal del SAD, utilizando el módulo de calibración con que cuenta el sistema

(apartado 4.4), registrando la señal de salida en Volts contra la presión aplicada. El valor de la presión se determinó con la lectura de una columna de mercurio que estuvo conectada a la línea de presión de aire; la altura de la columna multiplicada por el peso volumétrico del mercurio es la presión real aplicada a cada sensor. La presión máxima aplicada fue de  $1 \text{ kg/cm}^2$  (100 kPa).

Los sensores PP fueron alimentados con 15 V, como lo recomienda el fabricante, registrando en el sistema una señal de hasta 0.23 V a escala total; estos sensores son estables y de gran sensibilidad.

Los sensores PT fueron alimentados con 10 V, dado que tienden a calentarse con voltajes mayores, registrando una señal de salida de casi 0.0015 V a escala total. Esta señal tan baja se debe al espesor de 0.2 mm con que fue construido el diafragma circular plano, ya que no se pudo reducir tal espesor como se comenta en el apartado 3.3.4; así entonces, al tener poca deformación en el diafragma, la señal de salida es baja y por ello éstos fueron conectados al multiplexor de mayor ganancia (apartado 4.3).

Tanto los PP como los PT tuvieron una respuesta lineal, como se observa en las gráficas de calibración de los sensores PP 1 y PT1 de la Fig. 3.18; en la Tabla 3.1 se presentan los valores de la pendiente de calibración de cada sensor.

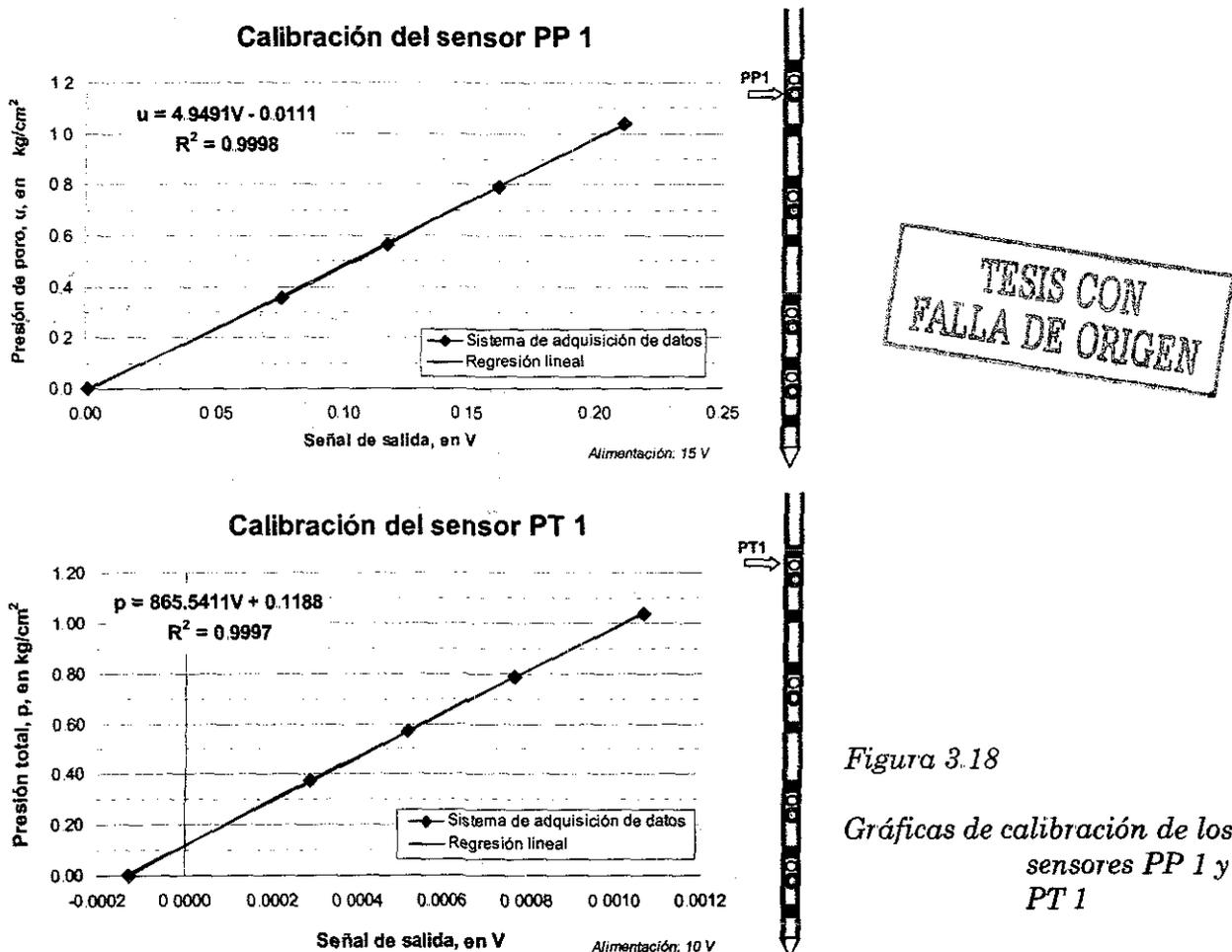


Figura 3.18

Gráficas de calibración de los sensores PP 1 y PT 1

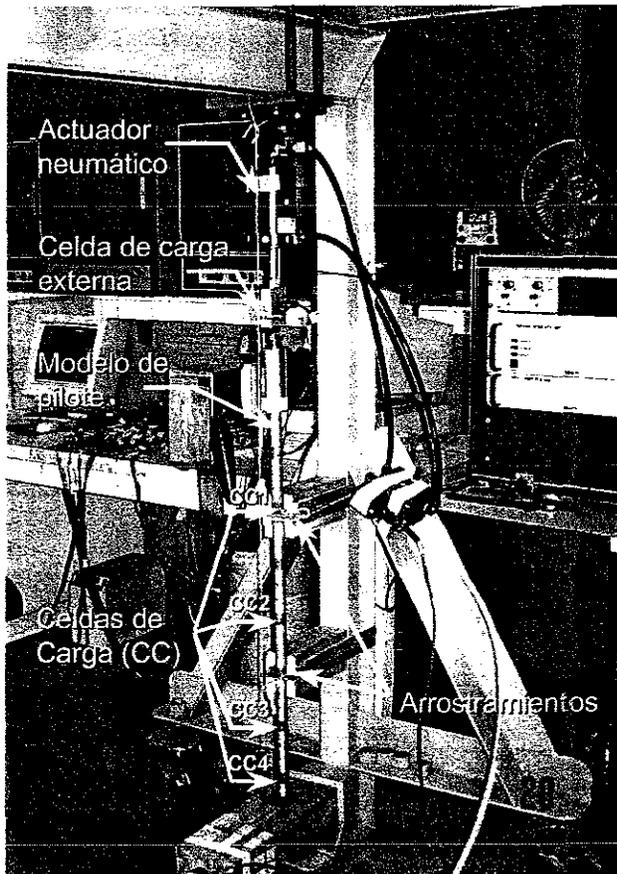
*Tabla 3.1 Pendientes de calibración para los sensores PP y PT dispuestos en el modelo de pilote*

Sensores PP	Pendiente	Sensores PT	Pendiente
PP 1	0.49 MPa/V 4.95(kg/cm <sup>2</sup> )/V	PT 1	8.7 MPa/V 865.54 (kg/cm <sup>2</sup> )/V
PP 2	0.65 MPa/V 6.51 (kg/cm <sup>2</sup> )/V	PT 2	7.2 MPa/V 721.90 (kg/cm <sup>2</sup> )/V
PP 3	11.7 MPa/V 117.05(kg/cm <sup>2</sup> )/V	PT 3	9.3 MPa/V 927.65 (kg/cm <sup>2</sup> )/V
PP 4	0.52 MPa/V 5.17 (kg/cm <sup>2</sup> )/V	PT 4	7.0 MPa/V 697.09 (kg/cm <sup>2</sup> )/V

Como se puede ver, entre mayor sea el valor de la pendiente, implica que la señal de salida del sensor es baja; esto produce un mayor ruido aun cuando se amplifique la señal. Todos los sensores PP tienen una pendiente pequeña, excepto el PP 3, el cual presenta una pendiente mayor a los de su tipo; sin embargo, responde de manera rápida y lineal. Los sensores PT son razonablemente iguales en respuesta y en comportamiento.

### 3.5.2. Sensores CC

Para la calibración de las celdas de carga se utilizó el Sistema de Aplicación de Cargas (SAC), conectando el modelo junto con la celda de carga externa al actuador neumático, como se observa en la Fig. 3.19.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

*Figura 3.19*

*Arreglo del modelo de pilote junto con el actuador neumático para la calibración de las celdas de carga*

Para evitar el pandeo del modelo bajo carga axial, se colocaron dos arrostros hechos de madera, a uno y dos tercios de la altura del pilote, como se observa en la figura. Asimismo, se verificó la verticalidad del conjunto actuador-celda de carga externa-modelo, por medio de una plomada colocada a un costado. La punta del pilote fue retirada para evitar que se dañara y en su lugar se pusieron discos de neopreno para que el tubo se asentara perfectamente sin lesionarlo.

La calibración se realizó aplicando carga a todo el pilote desde su cabeza, teniendo en cada incremento la lectura de la señal en Volts, junto con la carga real aplicada dada por la celda de carga externa, previamente calibrada. En la Fig. 3.20, se muestra la gráfica de calibración del sensor CC 1 y en la Tabla 3.2, se consigna la pendiente de calibración de cada celda.

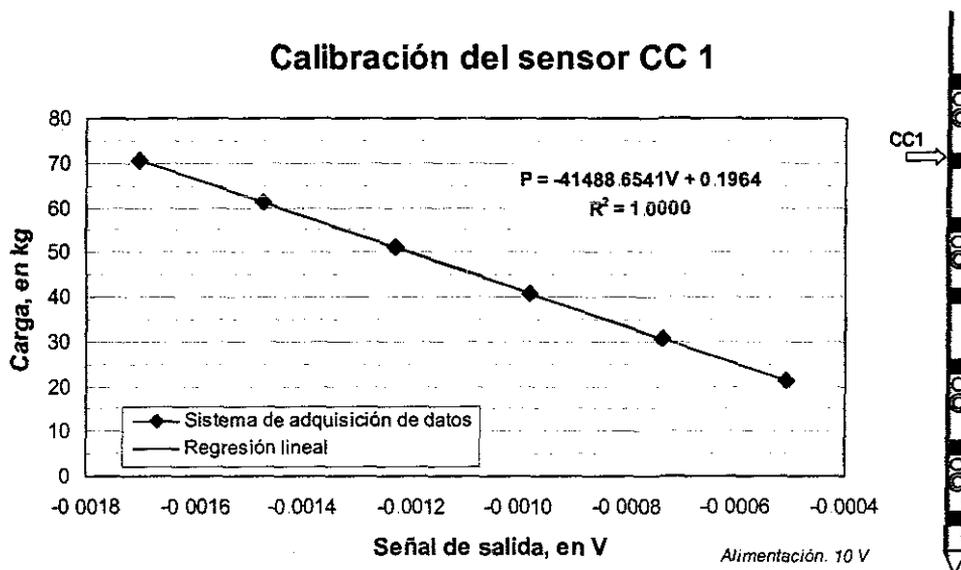


Figura 3.20 Gráfica de calibración del sensor CC 1

Tabla 3.2 Pendientes de calibración para los sensores CC dispuestos en el modelo de pilote

Sensores CC	Pendientes
CC 1	-0.41 MN -41488.65 kg/V
CC 2	-0.36 MN -36074.76 kg/V
CC 3	-0.41 MN -40977.09 kg/V
CC 4	-0.40 MN -39503.93 kg/V

Como se observa en la tabla, los valores de las pendientes son altos resultado de la baja señal que tienen los transductores; cabe señalar que la carga de diseño fue de 1000 kg (10 kN) y la carga máxima de calibración fue de 120 kg (1.2 kN). Asimismo, aun y cuando se amplificó la señal de los CC, la respuesta presenta ruido pero mantiene una tendencia lineal.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.5.3. Sensores CF

Estas celdas están calibradas para medir el momento flexionante en tres diferentes alturas y tres puntos en cada altura, de acuerdo al siguiente esquema, Fig. 3.21:

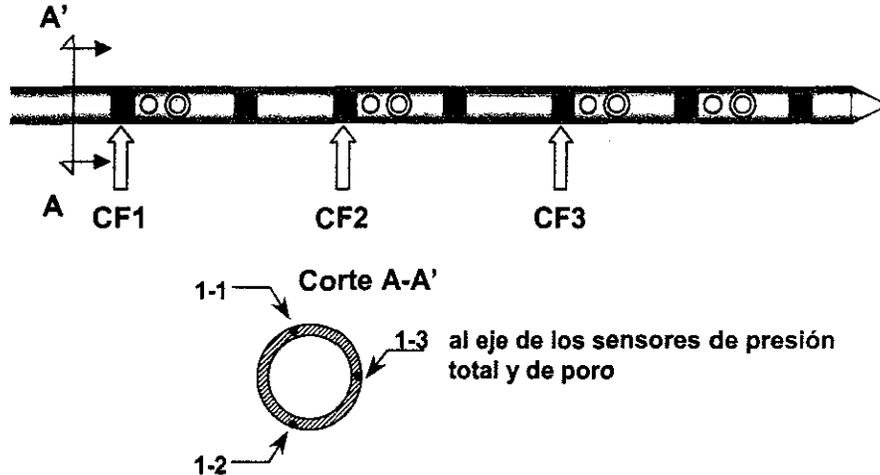


Figura 3.21 Esquema de ubicación de los sensores de flexión

Para la calibración, se colocó el modelo de pilote sobre dos apoyos simples en sus extremos, girándolo con respecto a su eje longitudinal hasta tener dentro del plano X-Y los sensores 1, 2 ó 3; posteriormente se colocó un portapesas en la parte central del modelo que aplica una carga puntual, que va aumentando para tener diferentes valores de flexión. El esquema del modelo en el proceso de calibración se muestra en la Fig. 3.22.

Teniendo esta configuración, se utilizó el módulo de calibración del SAD para cada sensor con su correspondiente coeficiente de calibración, resultado de la posición del sensor a calibrar, posición de los apoyos y de la carga.

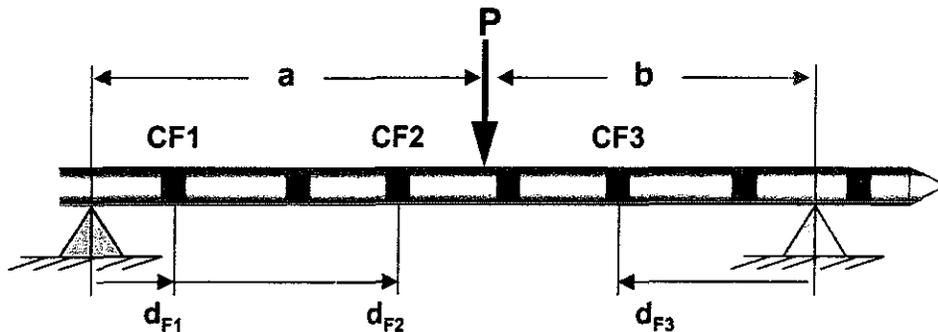


Figura 3.22 Posición de calibración del modelo de pilote

La calibración se realizó aplicando carga en la posición mostrada, teniendo en cada incremento la lectura de la señal en Volts, junto con el momento flexionante real aplicado en cada sensor. En la Fig. 3.23 se muestra la gráfica de calibración del

sensor CF 1-1 (nivel 1, eje 1) y en la Tabla 3.3, se consigna la pendiente de calibración de cada celda.

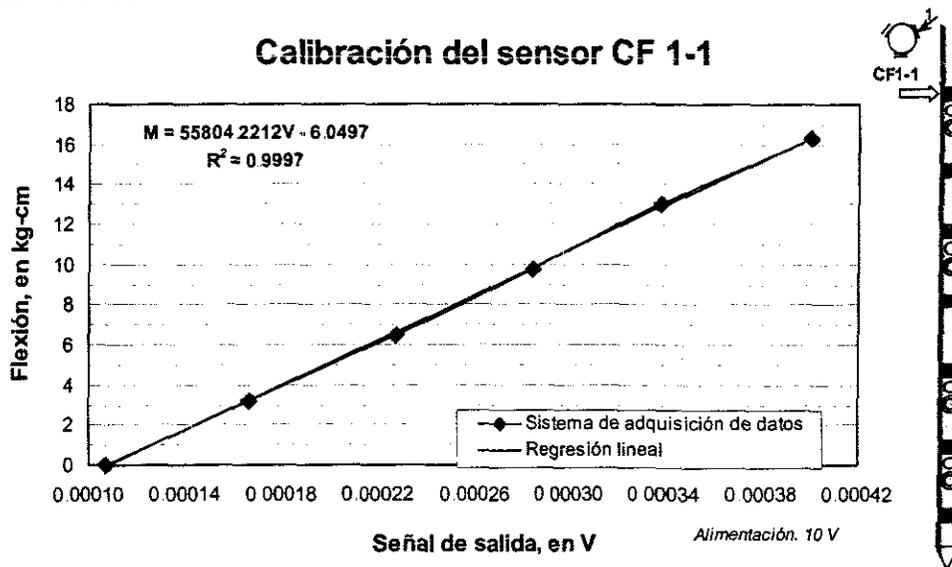


Figura 3.23 Gráfica de calibración del sensor CF 1-1

Tabla 3.3 Pendientes de calibración para los sensores CF dispuestos en el modelo de pilote

Sensores CF		Pendiente (kg-cm)/V	Pendiente (kN-m)/V
CF 1	1-1	55804.22	5.58
	1-2	56031.07	5.60
	1-3	68942.88	6.89
CF-2	2-1	51311.34	5.13
	2-2	46933.06	4.69
	2-3	55508.48	5.55
CF-3	3-1	46608.73	4.66
	3-2	45978.10	4.60
	3-3	58311.57	5.83

Como se observa en la tabla, los valores de las pendientes son altos resultado de la baja señal que tienen las celdas. Otra consecuencia es el ruido de los sensores, generando variaciones aleatorias de la señal de salida. Al repetir el proceso de calibración de estas celdas, se observó que la pendiente tuvo pequeñas oscilaciones, alrededor del 0.2% con respecto al valor total, con lo que se despreció el efecto del ruido.

### 3.5.4. Posición final de los sensores

El modelo de pilote cuenta con: cuatro celdas de carga denominadas CC 1, CC 2, CC 3 y CC 4; cuatro sensores de presión total PT 1, PT 2, PT 3 y PT 4; cuatro transductores de presión de poro PP 1, PP 2, PP 3 y PP 4; y nueve celdas de flexión, tres sensores en tres niveles, definidos como CF 1-1, CF 1-2, CF 1-3, CF 2-1, CF 2-2, CF 2-3, CF 3-1, CF 3-2 y CF 3-3. Las posiciones entre sí de los sensores se muestran en la Fig. 3.24.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Para facilidad de ubicación e interpretación de los datos, se dibujó el modelo de pilote junto con sus distancias con respecto a la cabeza del pilote para cada sensor, al final de la cuerda. La Fig. 3.25 muestra las distancias entre sensores clasificados como CC, PT, PP y CF.

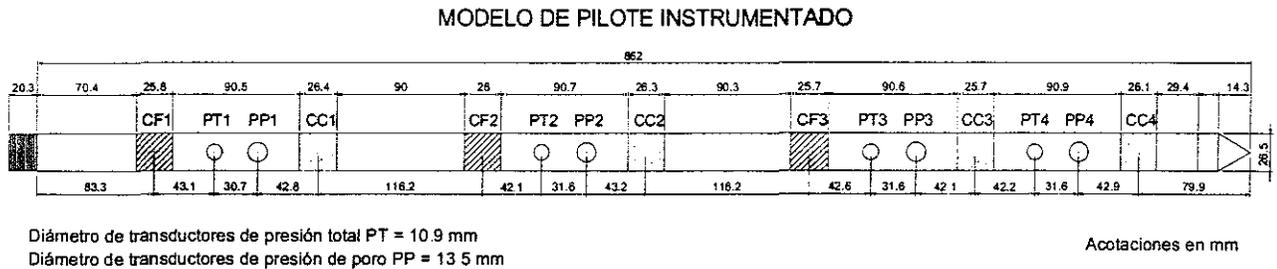


Fig. 3.24 Distribución de los sensores y dimensiones

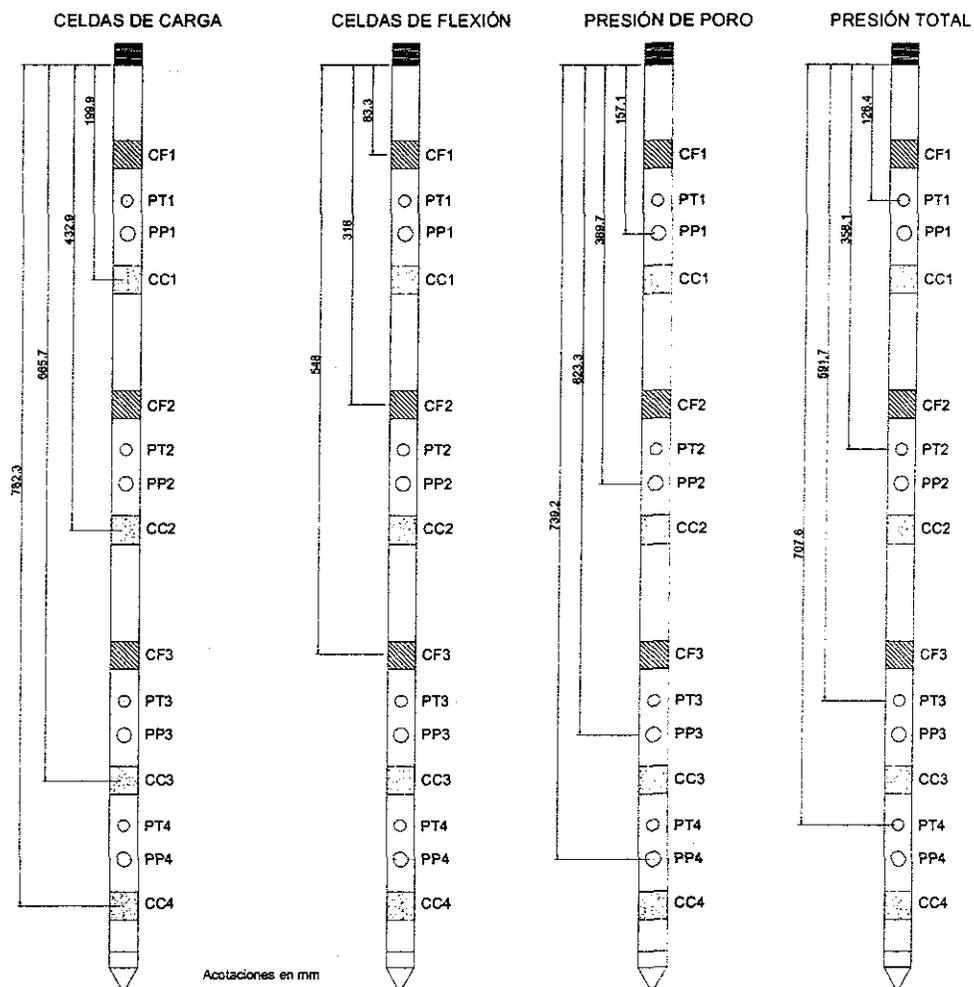


Fig. 3.25 Niveles de los sensores con respecto a la cabeza del pilote, para cada CC, PT, PP y CF.



## Capítulo 4

### Sistemas auxiliares para el ensaye con el modelo de pilote de fricción

Para llevar a cabo la experimentación con modelos de pilotes de fricción, es necesario contar con un sistema que aplique cargas al modelo, así como un sistema que capture las señales de los sensores dispuestos en el mismo.

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

El Sistema electroneumático de Aplicación biaxial de Cargas (SAC) fue adquirido con 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; es de llamar la atención su capacidad de reproducir registros sísmicos o de oleaje.

En forma simplificada, el funcionamiento del SAC se muestra en la Fig. 4.1. distinguiendo dos fases: la fase mecánica y la fase electrónica. En la fase 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 de la eficiencia de las servoválvulas.

La fase 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. 4.1), 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.

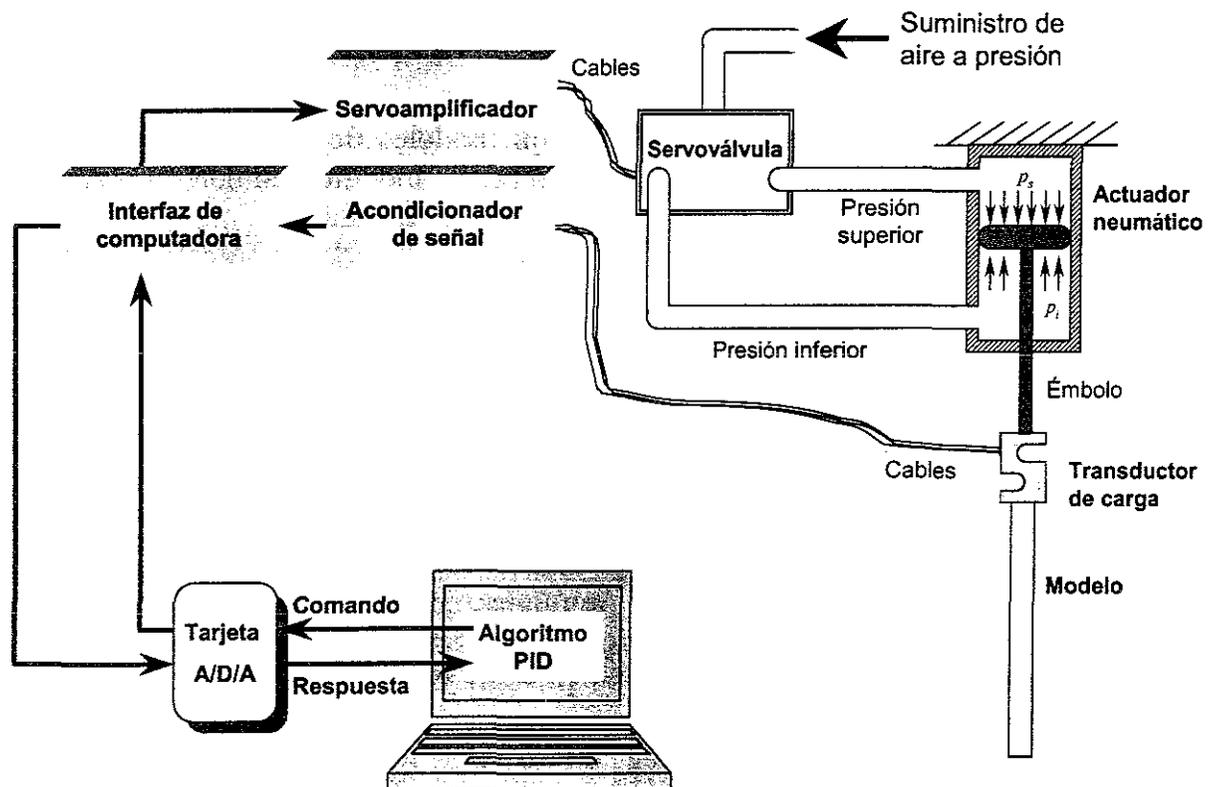


Figura 4.1 Esquema de funcionamiento del Sistema de Aplicación de Cargas (SAC)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

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 el actuador.

Una de las ventajas del SAC con respecto a sistemas de ciclo abierto es el control del ensaye; en efecto, los sistemas de ciclo abierto no son de control y los cerrados tienen la capacidad de corregir, en tiempo real, la aplicación de la carga o desplazamiento de acuerdo con una función preestablecida. Asimismo, al recibir la señal del transductor de carga y de desplazamiento en un ensaye 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 aplicar una carga mucho mayor a la capacidad de carga del modelo, obligando a un desplazamiento súbito del mismo a tal grado que el modelo penetre rápidamente en el suelo, choque con la placa base del odómetro y se dañe. 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 ensayes se pueden programar desde la computadora hasta con tres fases, por ejemplo: uno de los ensayes contemplados es la condición de carga muerta más carga viva accidental más oleaje; entonces podemos programar un ensaye que en su primera fase aplique una carga estática inicial (carga muerta más carga viva accidental), en la siguiente fase se puede aplicar una carga cíclica con amplitud, periodo y tiempo predefinidos (oleaje), y como tercera fase, mantener la carga estática inicial, todo ello con el registro de carga y desplazamiento inducido en el modelo de pilote.

La servoválvula es una de las partes más importantes del sistema. En ella entra aire a presión y se genera un diferencial de presión entre sus dos salidas, gracias a que cuenta con una válvula de dos vías que se mueve de acuerdo al diferencial que se quiera aplicar. El movimiento de la válvula es controlado desde el servoamplificador y se mantiene en movimiento (vibración) antes y después de generar el diferencial.

El equipo funciona adecuadamente cuando se realizan ensayes con frecuencias bajas de aplicación de cargas (menores a 1 Hz), pero en frecuencias altas (arriba de 10 Hz) se presentan oscilaciones de carga o desplazamiento; esto se debe a que es un equipo neumático y el aire se comprime con la presión aplicada. Por ello,

la servoválvula debe de mantenerse en funcionamiento continuo para tratar de mantener constante el diferencial de presión entre las recámaras del actuador.

Dado el tipo y las bajas frecuencias de aplicación de cargas previstos en los ensayos a realizar, el SAC funciona aceptablemente.

#### 4.2. Puesta en marcha del sistema de aplicación de cargas

La primera actividad dentro de la puesta en marcha del sistema fue la de asegurar una alimentación continua de corriente a todo el sistema electroneumático, porque si la alimentación se interrumpe en el proceso de ensaye, la respuesta del actuador es impredecible y puede provocar daños en el modelo de pilote o al menos, echar a perder una prueba.

La puesta en operación del equipo agrupa distintos aspectos, los cuales se comentan enseguida.

##### 4.2.1. 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 carga altas. El marco se muestra esquemáticamente en la Fig. 4.2, donde se distinguen las columnas, la trabe superior, la trabe inferior, los apoyos y el arreglo de los actuadores axial y lateral.

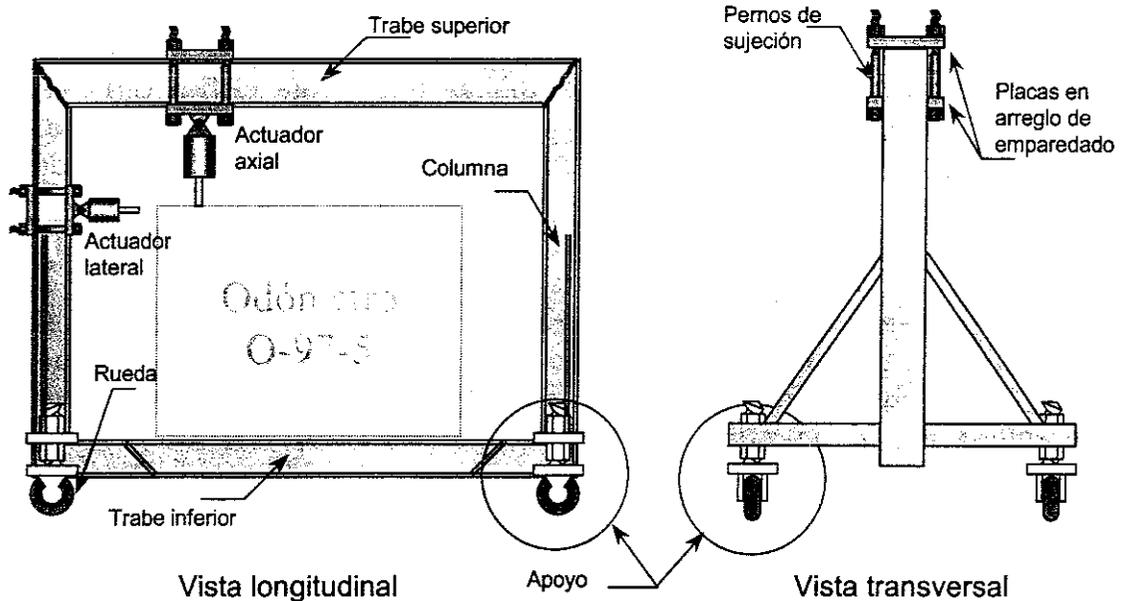


Figura 4.2 Esquema del marco de carga

Este marco se fija al odómetro por medio de tornillos que unen la trabe inferior con la placa base del odómetro O-97-5, evitando el movimiento relativo entre el marco y el odómetro al momento de los ensayos. Asimismo, al marco 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.

#### 4.2.2. Calibración de transductores

El sistema cuenta con celdas de carga tipo "S" y medidores de desplazamiento del tipo LVDT, siendo los transductores que envían la señal de respuesta o retroalimentación a la computadora.

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 4.1, teniendo una respuesta lineal.

Tabla 4.1 Pendientes de calibración para las celdas de carga del SAC

Transductor	Pendiente	Cancha	Carga máxima
Celda de carga axial N/S: D50664	-0.47 kN/V (-47.285 kg/V)	1	+/- 4.0 kN (+/- 400 kg)
Celda de carga lateral N/S: D47080	-0.22 kN/V (-22.941 kg/V)	3	+/- 2.0 kN (+/- 200 kg)

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 4.2. Estos transductores mostraron también una respuesta lineal.

Tabla 4.2 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

**4.2.3. 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.

Para la selección de los parámetros PID, se realizaron ensayos de desplazamiento controlado con valores de  $P=50$ ,  $I=0$  y  $D=0$  (relativamente bajos), observando gráficamente el comando y la respuesta para funciones seno y escalón; un ejemplo de las gráficas observadas se tiene en la Fig.4.3.

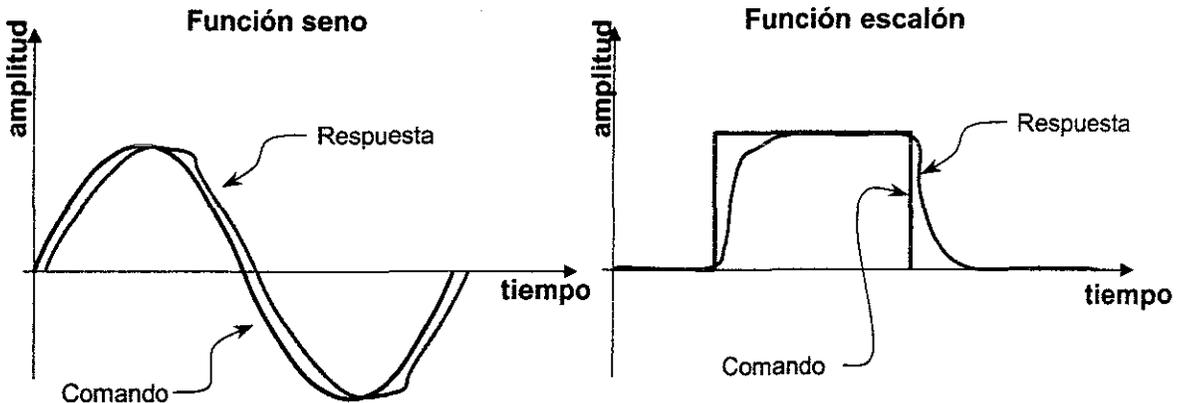


Figura 4.3 Gráficas de comando vs. respuesta en el SAC con PID bajos

Cuando los PID son bajos, se observa que existe un desfase entre el comando y la respuesta, además de la dependencia de la respuesta de acuerdo a la función. Se puede observar que con la función seno, la respuesta es errónea en los máximos y mínimos, pero mantiene adecuadamente la forma; en cambio, en la función escalón existe un corrimiento notable en el inicio y fin del escalón, perdiendo la forma.



Aumentando los parámetros PID ( $P=200$ ,  $I=10$  y  $D=10$ ) y repitiendo los ensayos anteriores, se observan gráficas semejantes a la Fig. 4.4.

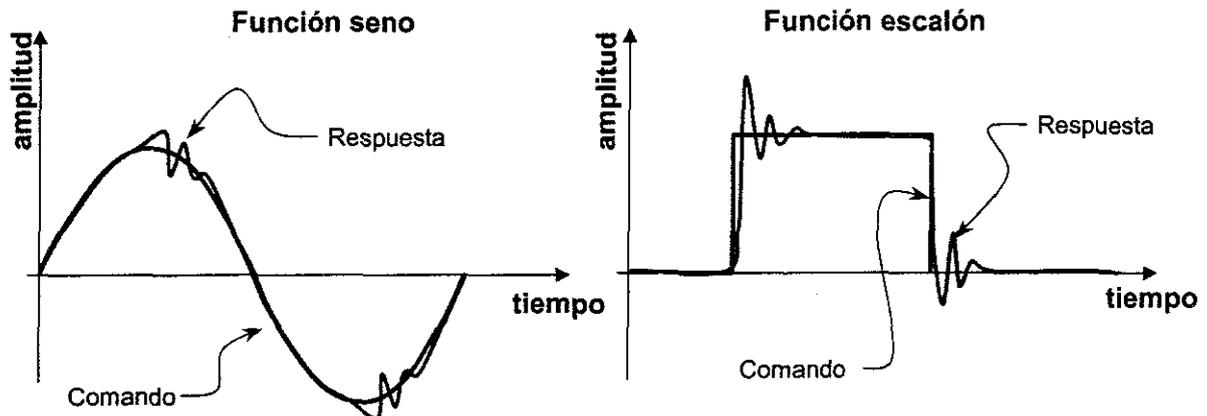


Figura 4.4 Gráficas de comando vs. respuesta en el SAC con PID altos

Se puede apreciar que al seleccionar valores de PID altos, la respuesta con la función seno se empalma con el comando en gran parte del recorrido, pero en los máximos y mínimos se tiene una oscilación fuerte, ya que el algoritmo se vuelve muy cerrado en su rango de error y busca un rápido ajuste con el comando, además del problema de la compresión del aire. En el caso de la función escalón, el comportamiento de la respuesta se vuelve peligroso, porque la oscilación que se presenta en el principio y fin del escalón se traduce en golpes aplicados al modelo.

Otro efecto observado fue que al incrementar la frecuencia de la función comando, el efecto de desfase es más notorio y más difícil de corregir con los PID. Además de que la respuesta cambia de acuerdo al transductor seleccionado (carga o desplazamiento)

Finalmente, se decidió que los parámetros fueran  $P=100$ ,  $I=0$  y  $D=0$ , para ensayos de carga controlada y  $P=150$ ,  $I=1$  y  $D=1$  para desplazamiento controlado. La razón de tal selección fue que estos parámetros permiten aplicar las cargas con poco desfase entre el comando y la respuesta, sin presentarse el efecto de oscilación o golpes; además que las funciones contempladas para la aplicación de cargas son seno y rampa principalmente, las cuales no generan cambios abruptos en la carga.

#### 4.2.4. Ajuste de servoválvulas

Las servoválvulas están ajustadas a una vibración con cierta frecuencia 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 de la válvula de dos vías de la servoválvula (GCTS Operating Instructions, 1999).

En nuestro caso, se aumentó la vibración de la servoválvula para tener una mejor respuesta del sistema, sin provocar oscilación en el actuador. En el caso de que se requiera modificar la vibración, sólo se requiere girar un potenciómetro ubicado en la parte trasera del servoamplificador denominado *dither*.

Una de las cosas que se observaron durante el proceso de ajuste, fue la vibración del actuador transmitida por la servoválvula, que se minimizó al reducir la frecuencia de oscilación de la válvula de dos vías con el ajuste del *dither*.

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

Se ha seleccionado 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.

El bloque terminal de conexiones seleccionado es el SCXI-1300 que es la interfaz física entre los cables de los sensores y el módulo SCXI-1100 (SCXI= Signal Conditioning eXtensions for Instrumentation); este último es un multiplexor de 32 canales diferenciales, de alta velocidad de muestreo y que envía señales con ganancias hasta de 1000 a la tarjeta A/D. Se ha escogido un chasis que soporta hasta cuatro de estos módulos, con lo que al integrarlo se tendrá una capacidad de acondicionamiento de hasta 128 canales. La tarjeta A/D seleccionada es la PCI-MIO-16XE-50 de 16 bits de resolución y velocidad máxima de muestreo de 20,000 muestras por segundo, que cumple ampliamente con las necesidades de monitoreo de los transductores dispuestos en el modelo de pilote, en el odómetro O-97-5 y en el sistema de aplicación de cargas.

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, los componentes del SAD se muestran en la Fig. 4.5, distinguiendo los elementos arriba descritos.

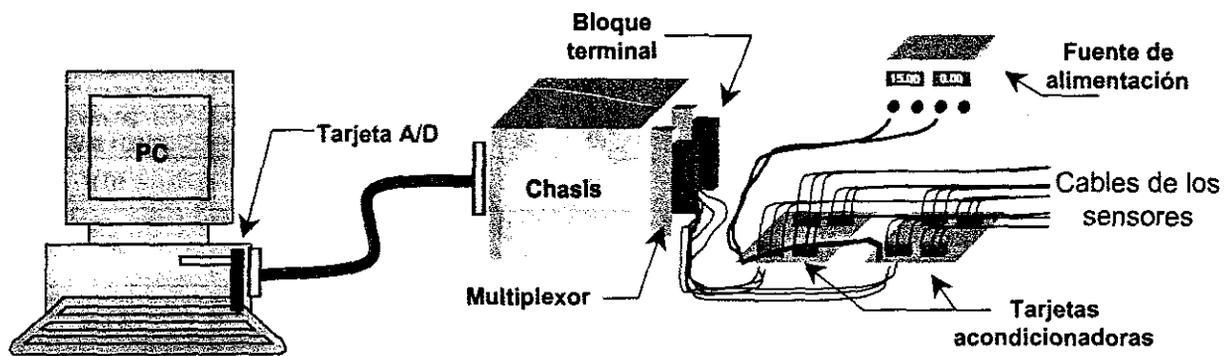


Figura 4.5 Esquema del Sistema de Adquisición de Datos (SAD)

#### 4.4. Puesta en marcha del sistema de adquisición de datos

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El SAD acondiciona, muestrea y convierte en registros digitales las señales analógicas emitidas por los transductores colocados en el odómetro O-97-5, por los sensores dispuestos en el modelo de pilote, y por los sensores compartidos del sistema electroneumático de aplicación de cargas (SAC). Estos transductores, que en total suman 30, son de naturaleza y funcionamiento diverso con señales de salida desde las décimas de milivolts hasta varias unidades de Volt (Tabla 4.3), alimentados todos con 10 V, excepto los transductores de presión de poro, los cuales se alimentan con 15 V por recomendación del fabricante.

El manejo de señales se modificó de acuerdo con los órdenes de magnitud de las señales de salida para contar con un funcionamiento óptimo del sistema, lo cual repercute directamente en una mayor resolución de las señales. En los siguientes incisos se describe la condición actual del sistema de adquisición de datos.

##### 4.4.1. Manejo físico de señales

Durante los ensayos con los modelos de pilotes, el sistema de adquisición de datos debe tomar y registrar con cierta frecuencia las 30 señales analógicas de los sensores dispuestos tanto en el odómetro O-97-5 como en el propio pilote; cada señal analógica se transforma entonces en una señal digital y mediante una secuencia lógica de pasos ejecutados a través del algoritmo de programación, las señales digitales se reducen finalmente a valores en unidades ingenieriles. Todo este proceso ocurre en centésimas de segundo por lo que se dice que las variables medidas se pueden observar en "tiempo real".

*Tabla 4.3. Sensores que componen la instrumentación del experimento*

Descripción	Tipo	N.º de sensores	Alimentación	Escala (o rangos)	Salida
Celdas de presión total en 0-97-5	Puente completo	2	10 V	350 kPa (3.5 kg/cm <sup>2</sup> )	100 mV (9.96 mV/V)
Presión de poro en odómetro	Puente completo	3	10 V	350 kPa (3.5 kg/cm <sup>2</sup> )	30 mV (3.001 mV/V)
Celdas de carga externa	Puente completo	2	10 V	2.5 kN (250 kg) 4.5 kN (450 kg)	10 V
LVDT externo	Transductor diferencial	2	10 V	De + 2.54 a - 2.54 cm De + 1.27 a - 1.27 cm De + 0.63 a - 0.63 cm	10 V
Presión total pilote	Puente completo <i>strain gages</i> rosetas	4	10 V	100 kPa (1 kg/cm <sup>2</sup> )	4 mV
Presión de poro pilote	Transductor puente completo	4	15 V	100 kPa (1 kg/cm <sup>2</sup> ) 150 kPa (1.5 kg/cm <sup>2</sup> )	230 mV
Celdas de carga pilote	Puente completo	4	10 V	3 kN (300 kg)	5 mV
Celdas de flexión pilote	Cuarto de puente 350 Ω	9	10 V	20 N-m (200 kg-cm)	4 mV
TOTAL		30			

En el proceso de adquisición descrito, los componentes de *hardware* cumplen con funciones específicas. Las fuentes de poder proporcionan un voltaje o potencial único y estable de corriente directa a través del cual se alimentan los 30 sensores electrónicos para poder responder con señales de la misma naturaleza ante cualquier acción mecánica, es decir, voltajes. Dado que la fuente sólo puede mandar un valor único de voltaje y cada tipo de sensor requiere un nivel de alimentación adecuado y diferente (Tabla 4.3), se diseñaron y construyeron cuatro tabletas de circuitos integrados con una capacidad de 8 canales por tableta, para regular individualmente el voltaje de alimentación adecuado al transductor conectado en cada canal. Así mismo, a través de estas tabletas la señal de salida de cada transductor puede “meterse a cero”; es decir, se puede ajustar la señal de salida para obligarla a cierto valor deseado sin modificar su pendiente de calibración por medio de potenciómetros. Lo anterior resulta muy conveniente cuando se calibran los transductores o cuando se inicia un ensaye ya que se controlan las *lecturas iniciales*. Cabe señalar que la capacidad de “meter a cero” cada transductor depende de la magnitud de la señal de salida; esto es, cuando se tienen sensores de señal baja, no se puede lograr un cero, aunque sí muy cercano.

Las señales de los sensores así operadas se toman de las cuatro tabletas y se dirigen mediante cables blindados a los cuatro multiplexores; cada uno de ellos tiene asignada una ganancia específica. Así, el multiplexor 0 tiene ganancia 1, el multiplexor 1 tiene ganancia 10, el multiplexor 2 tiene ganancia 100 y finalmente el multiplexor 3 tiene ganancia 1000. Las señales más pobres se envían al multiplexor de mayor ganancia, las señales intermedias a las ganancias intermedias y las señales más altas se dirigen al multiplexor de ganancia 1. En la Tabla 4.4 se muestra el direccionamiento de cada tipo de sensor al multiplexor correspondiente. Este arreglo resultó el óptimo para tener la mayor resolución posible por canal.



Durante la adquisición de datos la tarjeta analógica-digital, A/D hace un barrido de las señales conectadas al multiplexor 0 y secuencialmente las conectadas al multiplexor 1, 2 y 3; en cada barrido efectúa la conversión de señales analógico-digital que entonces se procesan mediante el algoritmo de programación para observar en “tiempo real” las variables medidas o se graban en un registro digital. Debe decirse que este arreglo permite adquirir señales o “muestrear” todos los canales con una velocidad real de 20 muestras por segundo.

*Tabla 4.4 Direccionamiento de los sensores a los multiplexores*

Multiplexor	Tipo de sensores	Nº de sensores	Nº de canales
Módulo 0 x 1	Celdas de carga externa (CCExt)	2	2
	LVDT externos	2	2
Módulo 1 x 10	Celdas de presión total odómetro (PTO)	2	2
	Transductores de presión de poro Pilote (PP)	4	4
Módulo 2 x 100	Transductores de presión de poro odómetro (PPO)	3	3
Módulo 3 x 1000	Celdas de presión total pilote (PT)	4	4
	Celdas de carga pilote (CC)	4	4
	Celdas de flexión pilote (CF)	9	3

#### 4.4.2. Programación

El algoritmo de adquisición se programó en lenguaje *LabView*, que es una poderosa plataforma de programación gráfica e instrumentación virtual, creada por la compañía *National Instruments*, proveedora de todo el *hardware*, por lo que se tiene un complejo *hardware-software* perfectamente compatible. La programación la realizó el Ing. Enrique Gómez de la coordinación de Instrumentación del Instituto de Ingeniería, con base en el diseño y necesidades del experimento comentadas previamente, siendo responsable directo el Ing. Enrique Ibarra R. El programa permite al usuario manejar la adquisición de datos por medio de interfaces gráficas o pantallas que resultan muy “amigables” y de fácil entendimiento. Cuenta con dos módulos principales: *calibración de transductores* y *adquisición de datos*.

El primer módulo es el programa que se ha utilizado para la calibración de los sensores dispuestos en el modelo de pilote con resultados satisfactorios. La pantalla inicial que el usuario observa al correr el módulo de calibración se muestra en la Fig. 4.6, entonces se pueden elegir una de las siguientes opciones:

- Calibrar transductores. En esta opción se elige el transductor que se quiere calibrar (Fig. 4.7); automáticamente el sistema reconoce la ganancia previamente fijada para el nivel de señal de ese transductor y así se efectúa la calibración.
- Cambiar constantes de calibración. Si por alguna circunstancia se requieren cambiar las constantes de calibración sin efectuarla

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

directamente con el módulo de calibración, en esta opción se puede cambiar la pendiente y la ordenada del sensor o sensores elegidos.

- Probar transductores. Una vez que los transductores cuentan con su pendiente y ordenada de calibración, se puede observar en tiempo real su respuesta ante acciones mecánicas en unidades ingenieriles al elegir esta opción. El sistema está programado para ver la respuesta de hasta ocho canales a la vez, en tiempo real.
- Terminar. Para salir del módulo de calibración.

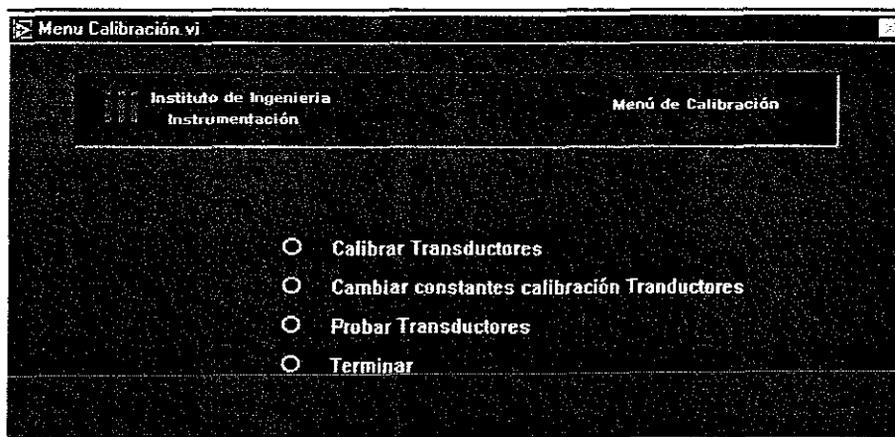


Figura 4.6 Ventana inicial de calibración de sensores.

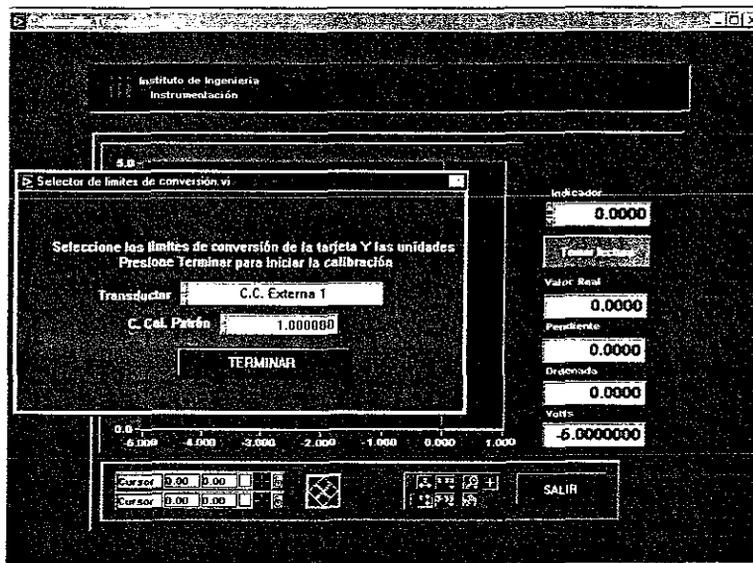


Figura 4.7 Selección del sensor por calibrar y su constante de calibración

El segundo módulo es de adquisición de datos, y la pantalla principal se muestra en la Fig. 4.8; el usuario indica entonces el archivo donde se guardaran los

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

registros y elige los canales que desea observar en tiempo real en unidades ingenieriles.

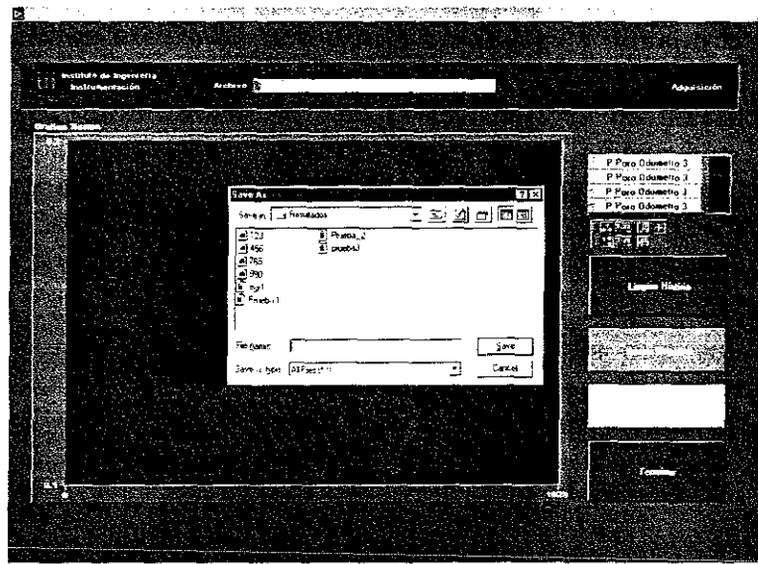


Figura 4.8. Pantalla de módulo de adquisición de datos

Existen dos tipos de adquisición de datos: Estático y Dinámico. El primer tipo sirve para adquirir la lectura de todos los sensores en forma promediada, capturando 10 lecturas y registrando el promedio de éstas, obteniendo una lectura en cada segundo. Esto resulta muy benéfico ya que el número de datos se reduce y la oscilación de la variable es menor, sin perder precisión en el registro. Este tipo de adquisición se utiliza en ensayos donde la acción mecánica actúa lentamente, como en los ensayos bajo carga sostenida o en carga monotónicamente creciente y con incrementos constantes.

Al realizar ensayos dinámicos o cíclicos, se utiliza la adquisición dinámica, que registra las lecturas de todos los sensores cada 0.05 segundos, observando en tiempo real las variaciones de cada transductor sin perder de vista los máximos y mínimos que se presentan en el ensayo de este tipo.

Debe decirse que este módulo cumple con las funciones básicas, es decir, monitorear y grabar las señales de todos los sensores contra el tiempo; sin embargo, para ensayos posteriores se definirá la programación en lo referente al post-proceso de las señales, para así poder ver las variables contra la altura del pilote, carga contra desplazamiento, presión total contra presión de poro, etc.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 4.5. Sistema de instalación del pilote

### 4.5.1. Marco guía y placas guía

Para guiar al modelo de pilote en el hincado, se utilizó un marco guía formado por tubos de acero de 2.54 cm (1 pulg.) cédula 80 y conexiones del mismo material. El marco guía consiste en tres postes (tubos de acero), 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 al mismo. El cuadro tubular permite el paso del modelo y los postes principales tienen conexiones para alojar travesaños en seis elevaciones diferentes. Además, se utilizaron unas placas guía, hechas de soleras de acero de 0.64 cm (1/4 pulg.) de espesor, con baleros que sirven para el deslizamiento y apoyo del pilote en el momento de su hincado. En la Fig. 4.9 se muestra el marco guía y las placas.

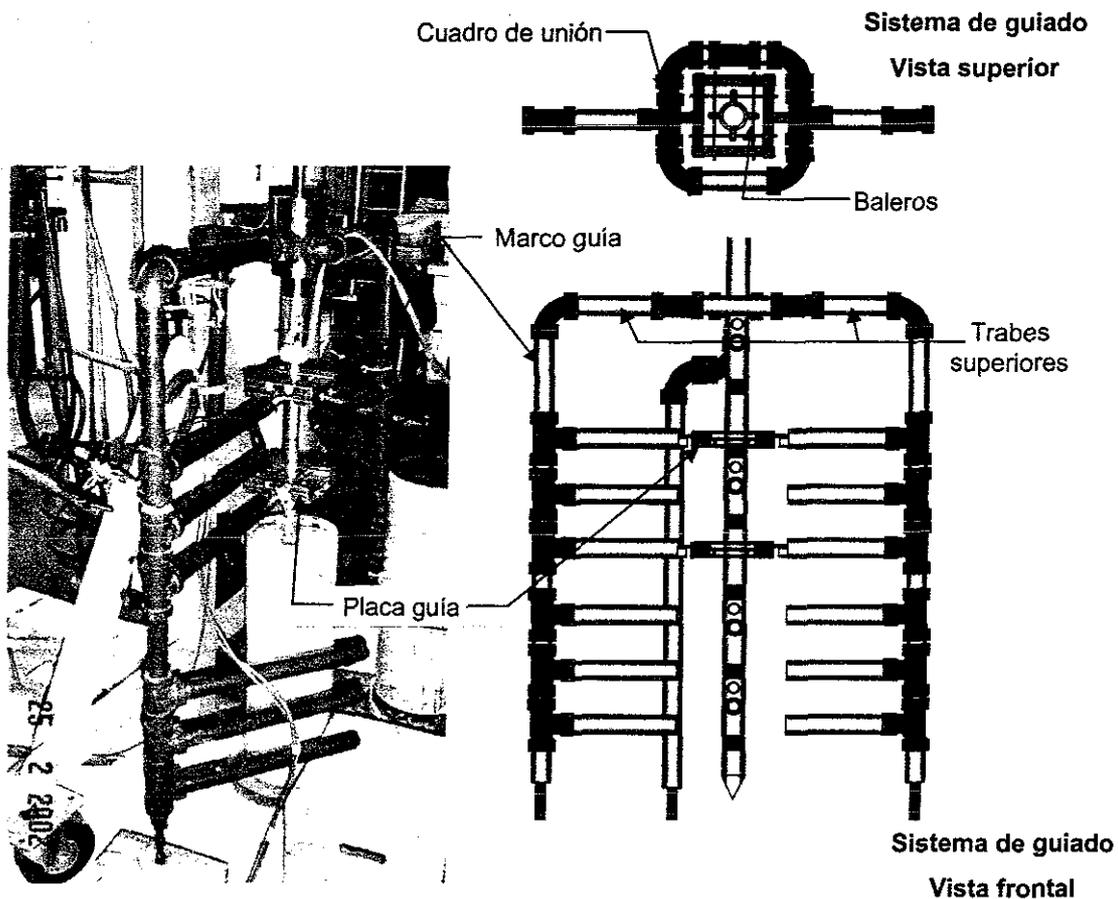
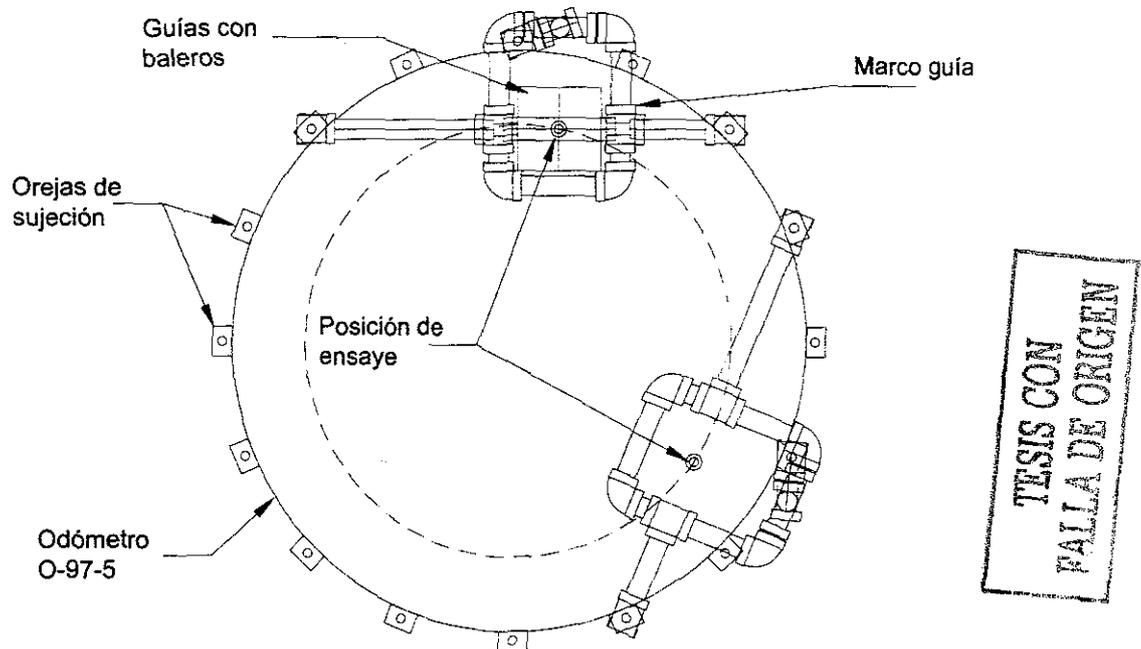


Figura 4.9 Marco guía y placas guía para la instalación del pilote

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.

Este marco está diseñado para sujetarse en tres puntos perimetrales del odómetro, precisamente en las orejas de sujeción, como se observa en la Fig. 4.10.



*Figura 4.10 Posición del marco guía en el odómetro O-97-5*

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 las dimensiones de las travesas superiores (Fig. 4.9) eran adecuadas 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.

#### **4.5.2. 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 1.27 cm de diámetro (1/2 pulg.), la cual sirve como guía para una masa cilíndrica de acero, de 10.16 cm de diámetro externo (4 pulg.), 1.43 cm de diámetro interno (9/16 pulg.) y 14 cm de altura, que puede correr a lo largo de la barra. Esta barra se conecta a la cabeza del modelo de pilote con un soporte cilíndrico de 5.08 cm de

diámetro (2 pulg.), donde se coloca un disco de neopreno y recibe el golpe de la caída de la masa. Esquemáticamente, el sistema se muestra en la Fig. 4.11, distinguiéndose los elementos anteriores.

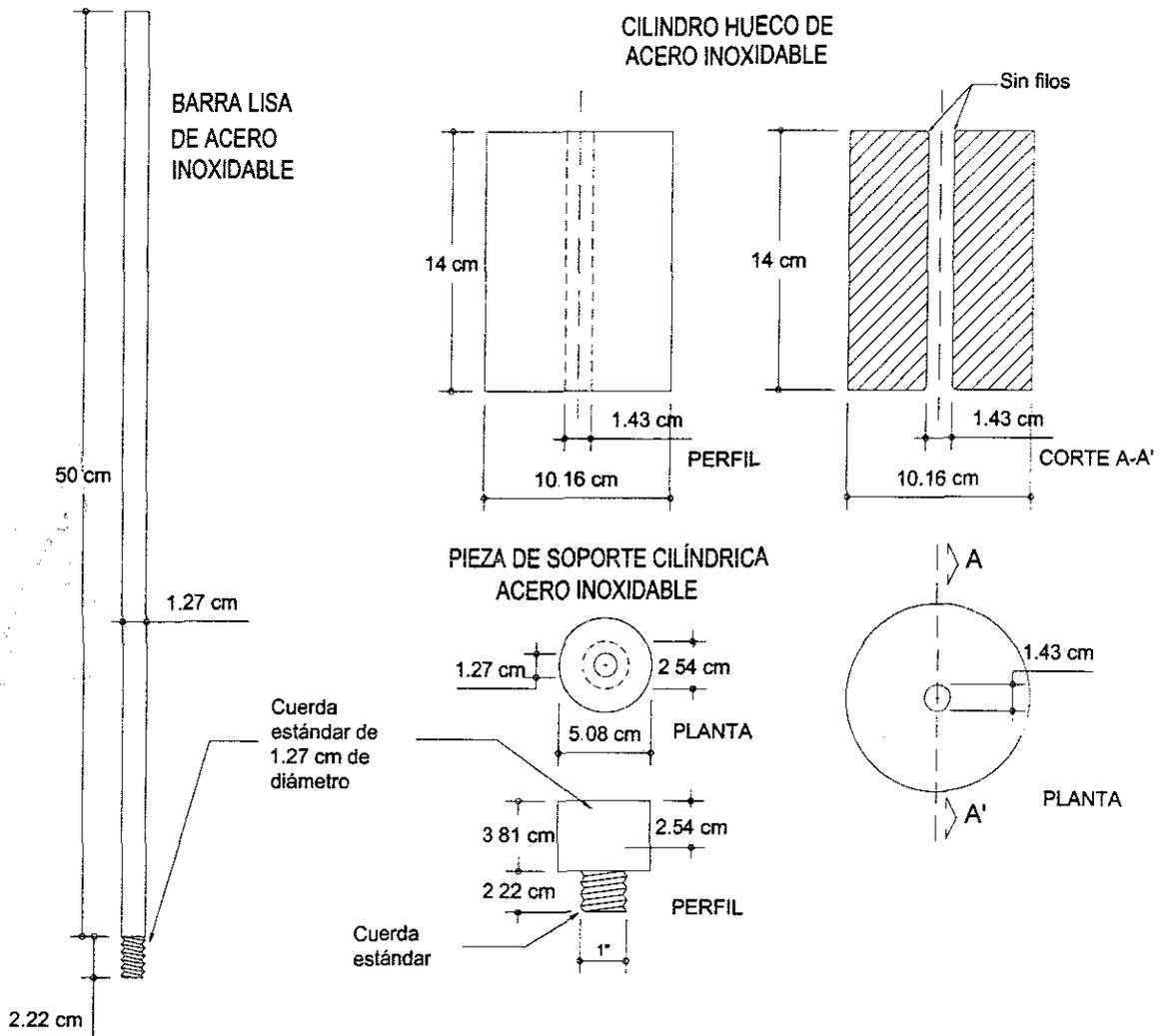


Figura 4.11 Elementos del sistema a percusión

El peso de la barra y el soporte cilíndrico es de 11.8 N (1.20 kg), mientras que el peso del martinete es de 86.3 N (8.80 kg), teniendo un peso total del sistema de 98.1 N (10 kg).

El funcionamiento es simple, se conecta el soporte 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 la masa 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 aplicación de los golpes es manual levantando y dejando caer la masa con un cierto ritmo.

## Capítulo 5

### Comportamiento del modelo de pilote instrumentado a partir de ensayos preliminares estáticos y cíclicos

Con el fin de verificar el funcionamiento del modelo de pilote instrumentado y de los sistemas auxiliares, se realizaron ensayos preliminares con el modelo en un suelo artificial, registrando las señales de los sensores de carga axial, presión de poro, presión total y flexión, desde su hincado hasta los ensayos de carga axial estática y desplazamiento axial cíclico.

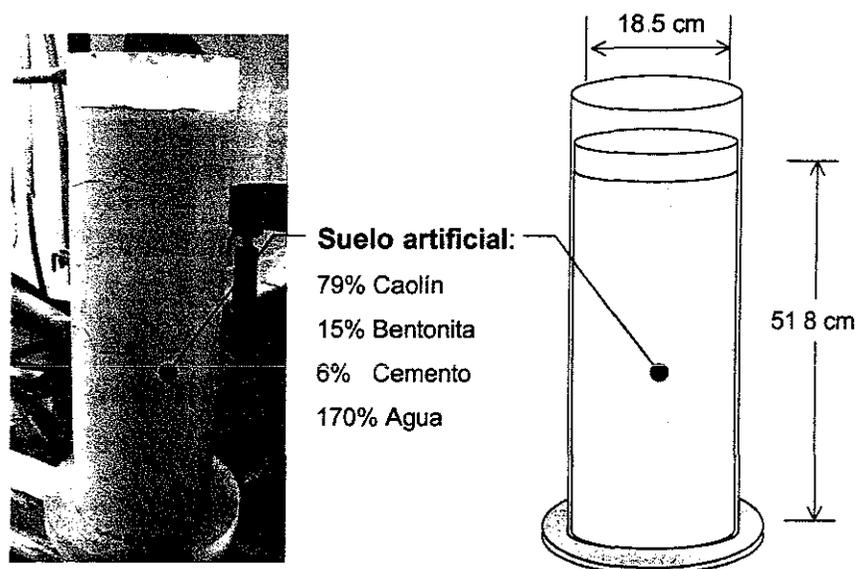
#### **5.1. Suelo artificial para el ensaye preliminar del modelo**

Para la ejecución de estos ensayos, se fabricó un suelo artificial con propiedades mecánicas e hidráulicas similares a las del suelo marino reconstituido, donde se realizarán los ensayos definitivos con el modelo de pilote. El suelo artificial tiene como objetivo final, rellenar el hueco que dejará el modelo en la muestra de suelo marino al extraerlo al final de cada ensaye.

Los materiales con los que fue fabricado este suelo artificial son cemento, caolín, bentonita y agua, que al ser mezclados forman en principio una suspensión fluida y viscosa que se vierte con facilidad en el hueco, y al paso de poco tiempo, el cemento provoca el fraguado de la mezcla, adquiriendo propiedades similares a las del suelo marino. La determinación de la dosificación de esta mezcla junto con sus propiedades mecánicas e hidráulicas se describen en la tesis de Ibarra (2002).

La mezcla que producía una rigidez, resistencia al esfuerzo cortante y permeabilidad semejantes a la esperada en el suelo marino fue hecha con cemento-caolín-bentonita-agua, con una dosificación en peso de 79% caolín, 15% bentonita, 6% cemento y 170% de agua.

Con esa dosificación se formaron dos probetas de suelo artificial en odómetros de lucita de 18.5 cm de diámetro interior y 51.8 cm de altura de material. La probeta tipo se muestra en la Fig. 5.1.



*Figura 5.1 Características geométricas y dosificación de la probeta de suelo artificial para los ensayos preliminares con el modelo de pilote*

A continuación se muestran los resultados obtenidos con el modelo de pilote en las siguientes etapas: hincado, ensaye bajo carga axial estática y ensaye bajo desplazamiento axial cíclico.

## **5.2. Hincado del modelo de pilote**

Con el fin de verificar el funcionamiento de todos los sistemas, se realizaron pruebas con el modelo de pilote hincándolo en la probeta de suelo artificial antes descrito.

Primero se armó el marco guía fijando las placas en dos niveles, verificando que el pilote pudiera pasar a través de los baleros sin presionarlo. Para ello, el marco guía se colocó en el piso del laboratorio y se sujetó al marco de reacción, como se muestra en la Fig. 5.2; posteriormente se colocó el odómetro que contenía al suelo artificial en medio de los travesaños y ajustándolo para que el paso de las placas guía quedara aproximadamente al centro del odómetro. Enseguida se presentó el

modelo de pilote dentro de las placas guías y se puso a plomo, con ayuda de una plomada y el ajuste de tuercas externas a las placas (Fig. 5.2).

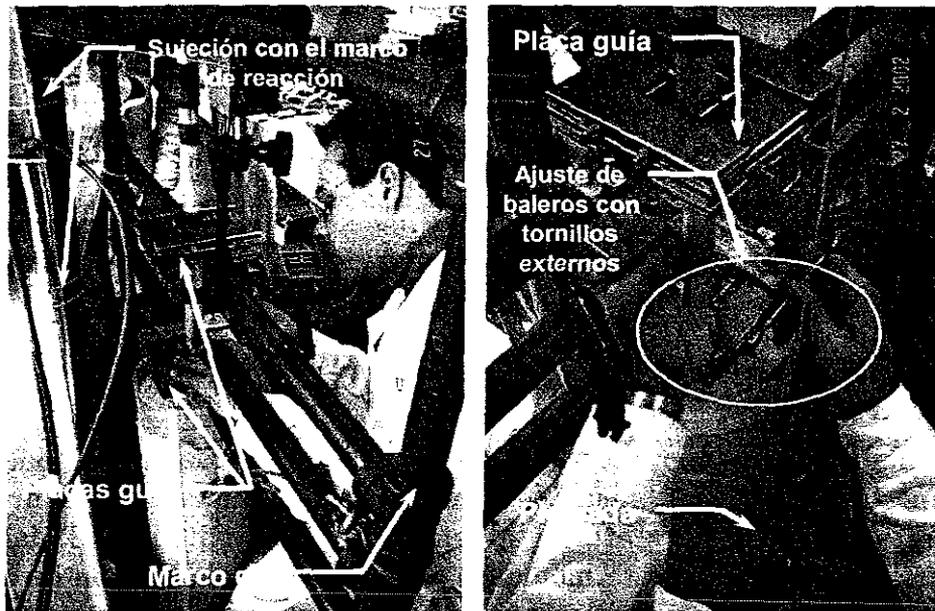


Figura 5.2 Preparativos para el hincado del modelo de pilote

Por otro parte, el modelo de pilote fue marcado con plumón indeleble a cada centímetro para poder llevar un registro manual del hincado: número de golpes vs penetración en centímetros. En la Fig. 5.3, se observan las marcas en el pilote y el procedimiento de hincado.

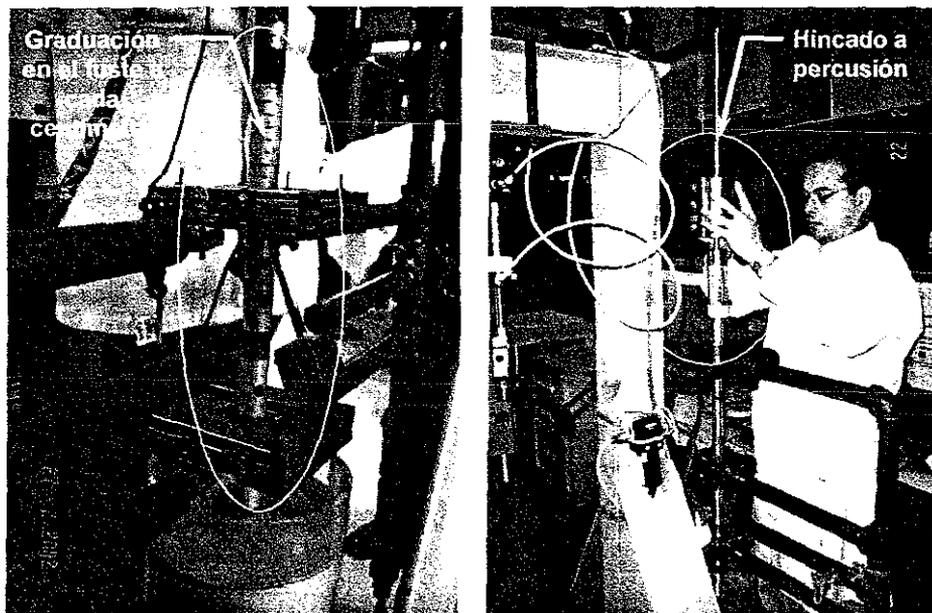


Figura 5.3 Marcas en el modelo de pilote y procedimiento de hincado

Al tener 51.8 cm de altura de suelo, se propuso que el pilote penetrara 48 cm para dejar un espacio desde el fondo hasta la punta del modelo de poco más de una vez su diámetro (2.65 cm).

Como se comentó en el apartado 3.3.5, a los sensores de presión de poro se les coloca una piedra porosa que evita el contacto del suelo con el diafragma y así registran sólo la presión en el agua. Estas piedras fueron colocadas en un recipiente con agua destilada y calentadas para saturarlas; posteriormente se saturaron las recámaras de presión de cada sensor y se colocaron las piedras porosas, presentándose inmediatamente la conductividad hidráulica.

### ***5.2.1. Cargas axiales***

El modelo fue colocado dentro de las placas guías y se deslizó hasta tocar su punta la superficie del suelo, la cual tenía un tirante de agua de 1.0 cm. Al poner el pilote, la punta penetró en el material 26 mm (desplazamiento inicial) debido al peso propio del pilote (1.2 kg). En este momento el sistema de adquisición de datos (SAD) fue encendido, registrando los valores iniciales de todos los sensores. Asimismo, el sistema de aplicación de cargas (SAC) fue encendido para poder alimentar los canales de los medidores de desplazamiento conocidos como LVDT.

Enseguida se colocaron los LVDT externos, uno de ellos (LVDT penetración) registró la penetración del pilote, y el segundo (LVDT suelo) registró el abudamiento del suelo por efecto de la penetración a un centímetro del modelo.

Segundos después, se conectó el soporte cilíndrico y la barra de acero, el disco de neopreno y el martinete. En la Fig. 5.4 se muestra el registro inicial de las celdas de carga contra el tiempo y la penetración del modelo por efecto del peso del martinete, indicando la etapa registrada.

Al principio, los valores iniciales son cero resultado de la resta de los valores registrados con sus respectivos valores adquiridos segundos antes del ensaye. Como se observa, los sensores registran adecuadamente el cambio de carga debido al soporte, barra y cilindro de acero, así como de la penetración del modelo al colocar la masa, teniendo un registro de 20 N (2 kg) al colocar la barra y soporte y 100 N (10 kg) al adicionar el martillo. Asimismo, la penetración del modelo debida al peso de la barra y soporte fue de 1.8 mm y al final de la colocación del martillo de 11.9 mm. Estos registros nos indican que la resolución del sistema es adecuada aun cuando los valores son bajos.

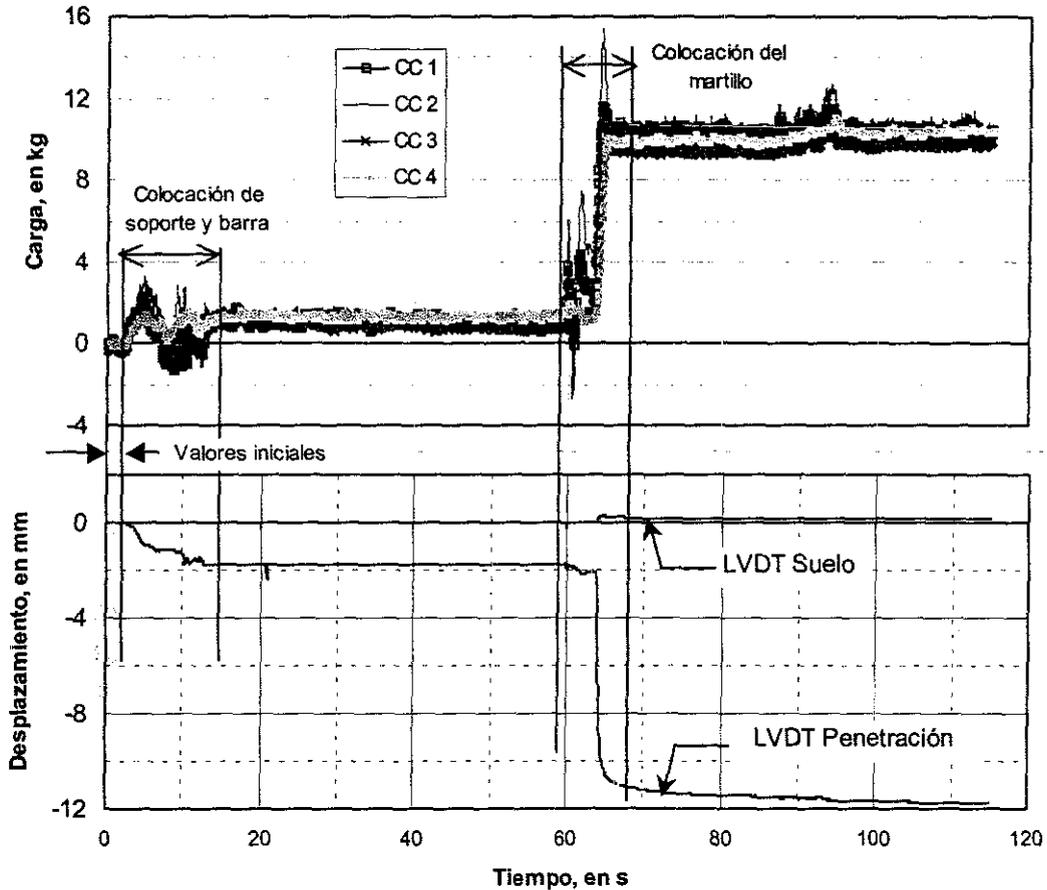


Figura 5.4 Registro inicial de cargas y penetración del modelo de pilote debido a la colocación del sistema de hincado

El siguiente paso fue colocar un seguro de mariposa con el que se fija la altura de caída del martillo, que en este caso fue de 3 cm. Al verificar que el SAD y SAC estuvieran registrando el proceso, se comenzó con el hincado del modelo. El registro de carga y desplazamiento durante los primeros golpes se presenta en la Fig. 5.5, distinguiéndose claramente el proceso de hincado.

Con el primer impacto se tuvo una penetración de 36 mm, y a los 9 golpes el pilote penetró 105 mm. Al desplazarse el suelo producto del hincado, el abudamiento en los primeros 9 golpes fue de 7 mm, permaneciendo casi constante para los demás impactos. Los picos de carga positiva (compresión) se deben al impacto del martillo con el modelo; mientras que los valores negativos (tensión) se deben a que al levantar y sostener el martillo en la posición más alta, éste pega con el prisionero superior generando tensiones en el modelo. Estas tensiones son distintas dado que los baleros ejercieron mayor restricción de la prevista.

En este proceso, se debe tener cuidado al levantar la masa para no golpearla contra el prisionero, evitando así una acción bidireccional de impactos que no son representativos del hincado a percusión.

YESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

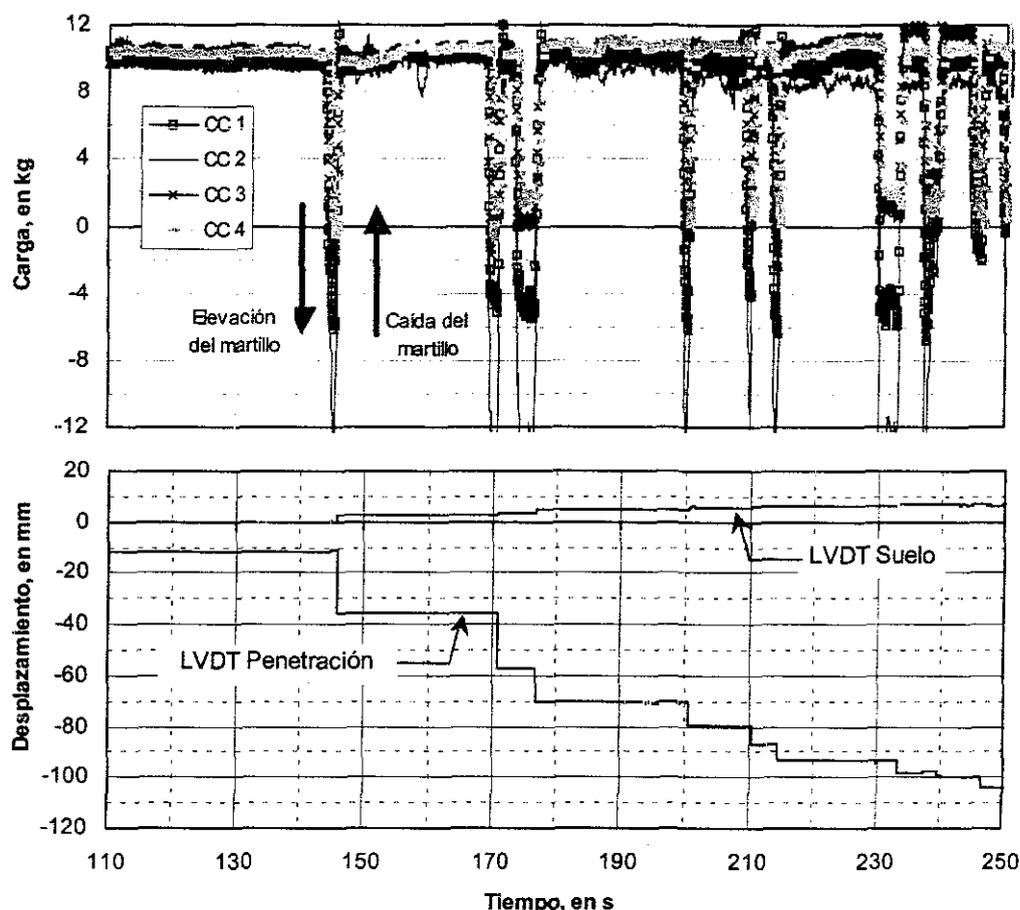
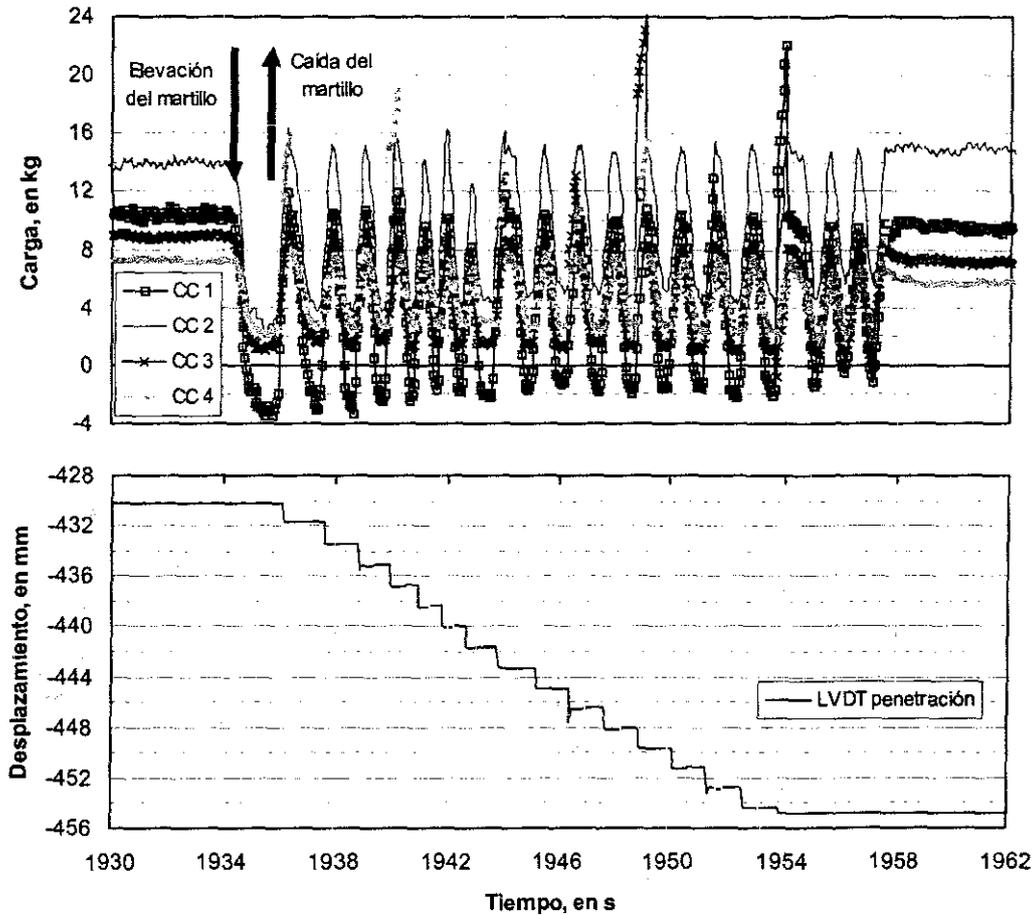


Figura 5.5 Registro de cargas y penetración del modelo de pilote en los primeros impactos

El proceso de hincado se detuvo cuando la penetración llegó a 454 mm, que sumando la penetración inicial de 26 mm nos da un total de 480 mm, valor propuesto para el hincado, requiriéndose un total de 231 golpes. El sensor CC 1 fue el único que quedó fuera del suelo, el cual funciona como sensor redundante con la celda de carga externa del SAC. El registro de la última etapa del hincado se muestra en la Fig. 5.6.

La penetración es casi constante en los últimos impactos, alrededor de 2 mm por golpe. Comparando la Fig. 5.5 con la Fig. 5.6 observamos que los niveles de carga son distintos entre las celdas de carga, mostrando que la celda más profunda (CC 4) registra menor carga con respecto a las otras tres, producto de la transferencia de carga del pilote al suelo.

Los picos de carga en la Fig. 5.6 se interpretan como cargas debidas al impacto del martillo con el modelo; el mayor valor registrado en todo el proceso de hincado fue de 60 kg (600 N), aunque no se puede decir si esa fue la carga real máxima provocada por los impactos, dado que ésta dura unas milésimas de segundo y el SAD no tiene esa velocidad de muestreo. El SAD está ajustado a 20 muestras por segundo (mps) y tiene una capacidad máxima de 156 mps.



TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Figura 5.6 Registro de cargas y penetración del modelo de pilote en la última etapa del hincado

Al final del hincado se mantuvo la carga del sistema por unos minutos, observando que las celdas CC muestran una ligera transferencia de carga del pilote al suelo, ya que en la CC 1 se registraron los 10 kg del sistema y en la CC 4 sólo se registraron 6 kg. Es necesario destacar que la CC 2 registró mayor carga porque quedó entre las dos placas guía, ejerciendo sobre ella una compresión adicional. Lo anterior se evita reduciendo la fricción que existe entre los baleros y el modelo.

### 5.2.2. Presión de poro

La presión de poro en el proceso de hincado se muestra en la Fig. 5.7, graficándola contra el desplazamiento del pilote. El sensor PP 4 es el primero que registra presión dada su ubicación (cercana a la punta). Se observa que el registro comienza desde el contacto de los sensores con el tirante de agua, aumentando con la penetración.

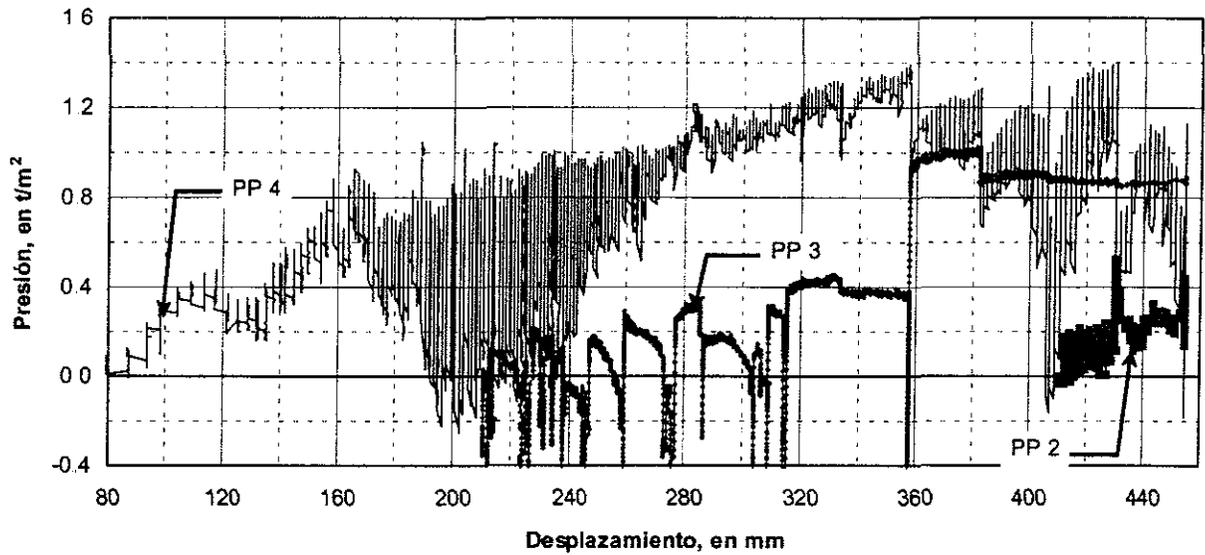


Figura 5.7 Registro de presión de poro en el proceso de hincado

Se observa que la presión de poro presenta oscilaciones en todo el proceso de hincado; en algunas etapas de poco más de 1.0  $t/m^2$  además de valores de presión de poro negativa (succión) en algunos instantes. En la Fig. 5.8, se muestra con mayor detalle la variación de presión de poro registrada por el sensor PP 4 en una etapa intermedia, lo cual habla de la buena respuesta de estos sensores inclusive en condiciones dinámicas.

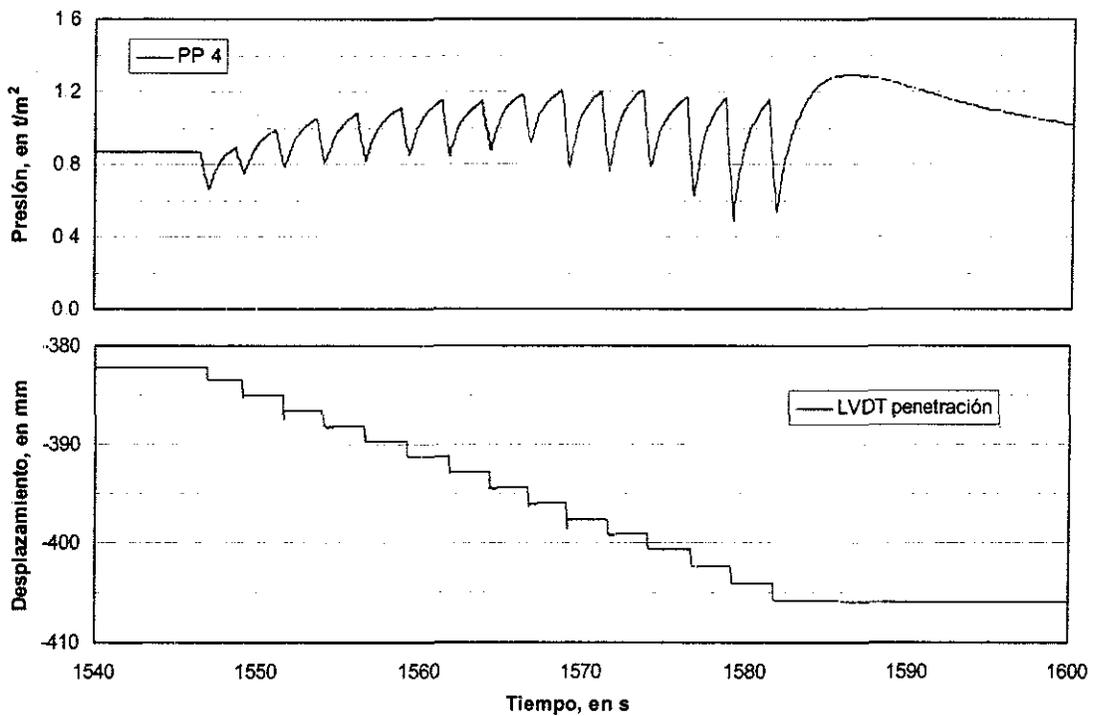


Figura 5.8 Registro de presión de poro en el sensor PP 4 en una etapa del hincado

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cabe señalar que las fuertes variaciones del sensor PP 3 se pueden deber al agrietamiento que presentó el suelo artificial al momento de hincar el modelo.

Al final de la instalación, los sensores PP 4 y PP 3 quedaron dentro de la masa de suelo, a una profundidad de 34 y 22 cm respectivamente. El PP 2 quedó en la superficie de suelo y el PP 1 quedó fuera del suelo, por lo que el registro en éste fue cero.

### 5.2.3. Presión total

La presión total se muestra en la Fig. 5.9, graficando la presión contra la penetración del pilote. Al igual que los sensores PP, los PT registraron aumento de la presión total desde el contacto con el tirante de agua, esta presión aumenta ligeramente hasta la posición final de cada sensor.

En este caso, los sensores PT 3 y 4 quedan dentro del suelo al final de la instalación, y los PT 1 y 2 quedan fuera del suelo, teniendo un registro igual a cero en éstos. Tanto los PP como PT registran una disminución de presión poco antes de llegar a la penetración de 360 mm, la cual puede deberse a una irregularidad del material o al agrietamiento presentado en la probeta de suelo.

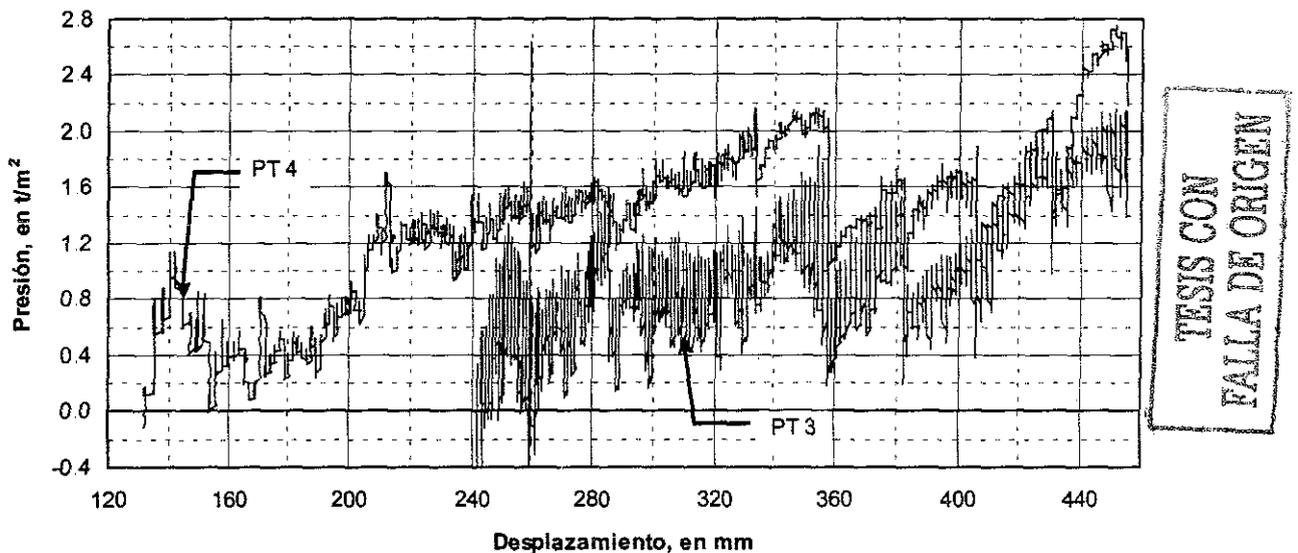


Figura 5.9 Registro de presión total en el proceso de hincado

Después del hincado, se registraron los valores de presión de poro y total por varios minutos, teniéndose disminución de presión; en los sensores PP se registró una presión prácticamente hidrostática, pero en los PT la presión es poco más de cuatro veces la presión hidrostática correspondiente a su posición. Después de

retirar el sistema de hincado, se tomó lectura de cada sensor para conocer los valores iniciales del siguiente ensaye.

### 5.2.4. Flexión

La flexión en el modelo fue registrada en los tres niveles prescritos, como se muestra en la Fig. 5.10 para la primera etapa del hincado.

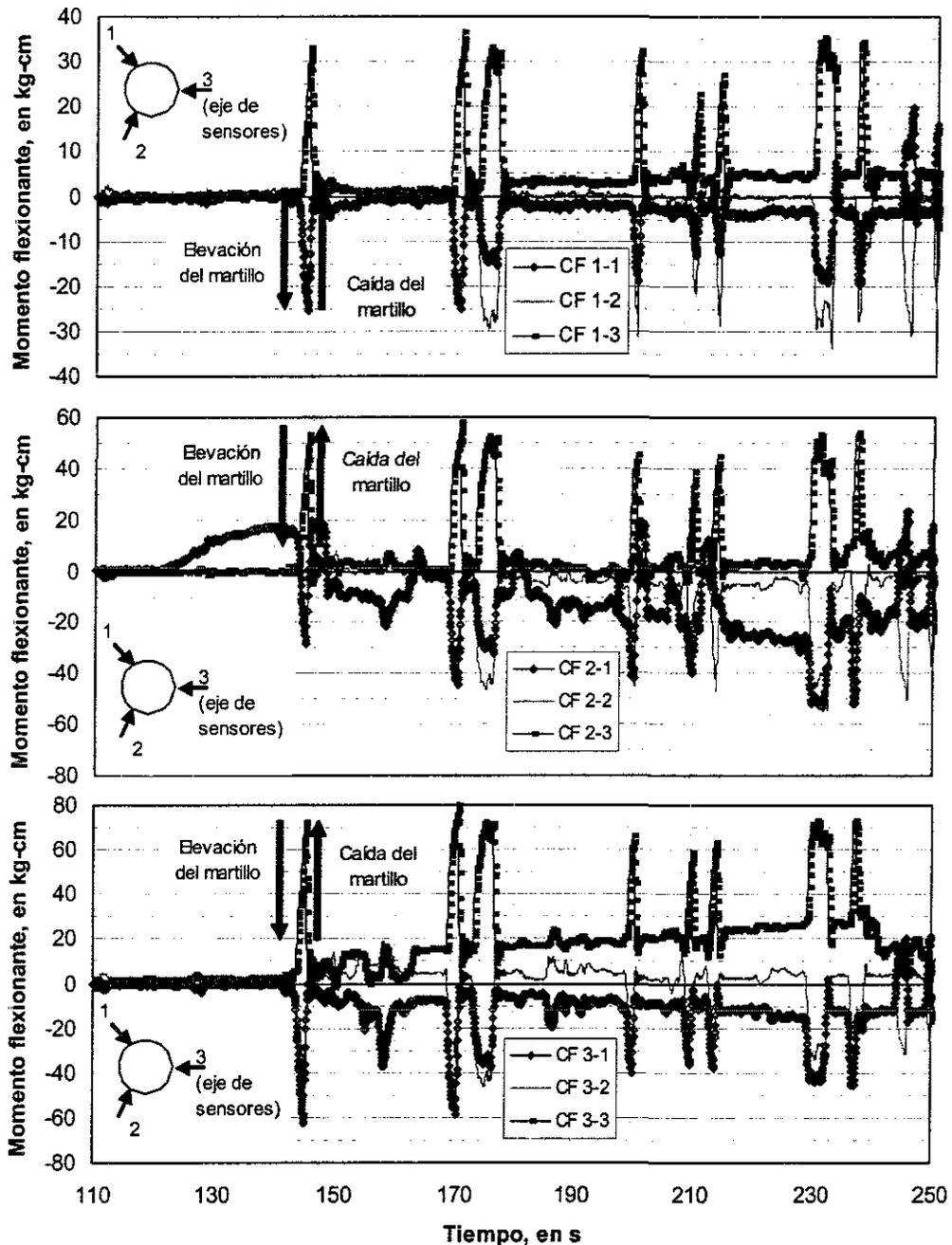
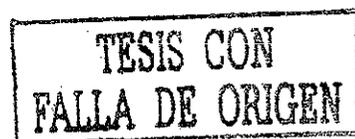


Figura 5.10 Registro de la flexión en los tres niveles de medición del modelo de pilote instrumentado



La denominación de los sensores CF atienden al nivel y al eje de medición, como se muestra en la Fig. 3.21. Estos registros muestran una separación de valores en los impactos, mostrando que existe una deformación del modelo en dirección del sensor de mayor valor positivo; en esta primera etapa, la flexión del pilote se presenta preferentemente hacia el eje 3, el mismo eje de los sensores PP y PT.

En estas gráficas se observa que al final de cada impacto, existe una oscilación de los valores, lo cual se debe a que en el proceso el martillo pegaba en el soporte y provocaba un desplazamiento horizontal de la cabeza del modelo, como el de un péndulo invertido. Lo anterior habla de la respuesta aceptable de estos sensores en un proceso dinámico.

A medida que el modelo fue penetrando en el suelo, la oscilación se redujo, pero como se observa en la Fig. 5.11 del tercer nivel, el pilote entró un poco flexionado en el suelo, con preferencia hacia la posición intermedia de los ejes 1 y 2.

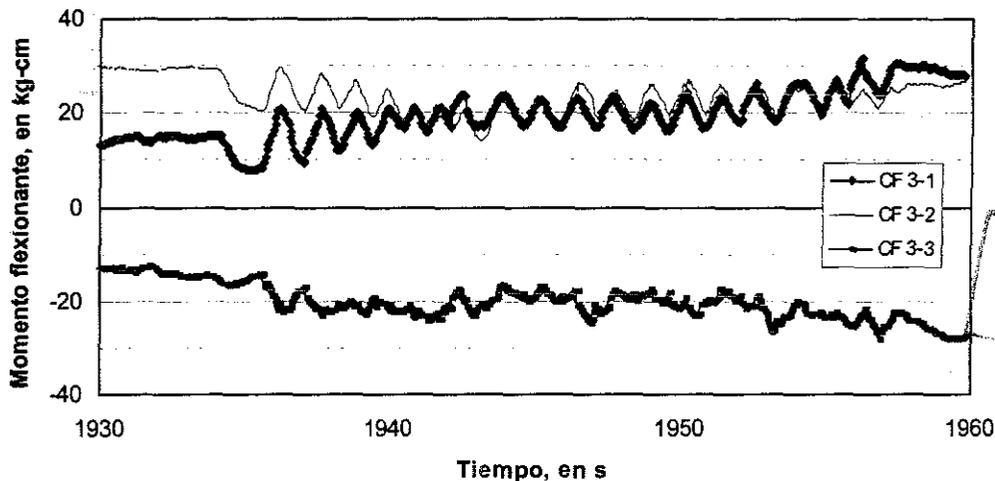


Figura 5.11 Flexión en el tercer nivel del modelo de pilote en la última etapa del hincado

Posteriormente se retiró el sistema de hincado y se colocó el modelo y la probeta de suelo en el marco de reacción para la realización de los ensayos bajo carga y desplazamiento controlado. Los registros de los sensores en el modelo al retirar el sistema de hincado son los valores iniciales de la siguiente etapa.

### 5.3. Ensaye bajo carga axial estática

Se realizó un ensaye bajo carga estática monotónicamente creciente con incrementos constantes de carga; para ello, se programó en la PC del SAC una función rampa, con control de carga, que comenzara de cero y llegara a 100 kg, en un tiempo de 10 min (rapidez de carga de 0.167 kg/s). La función comando del ensaye se muestra en la Fig. 5.12.

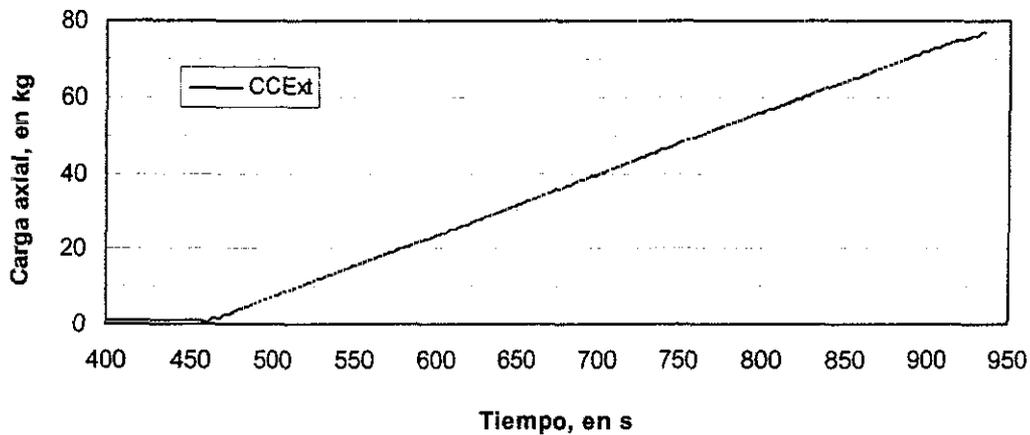


Figura 5.12 Carga axial externa aplicada al modelo de pilote instrumentado

Con los datos de la resistencia del suelo artificial y la geometría del pilote, se estimó una carga de falla de 125 kg, considerando un factor de adherencia igual a 1. La adquisición de las señales se hizo con el SAD con la opción de registro estático, el cual graba un valor cada segundo y reduce así el número de valores a procesar.

### 5.3.1. Cargas axiales

En la Fig. 5.13, se muestra una gráfica de carga contra desplazamiento de los sensores CC, donde se observa que la carga de falla resultó ser de 63 kg (CC 1), a un desplazamiento de 1.3 mm. Esta carga es menor que la estimada y pudo deberse al agrietamiento del suelo y a que la adherencia del suelo con el pilote fue menor a la supuesta. Al observar que no se iba a llegar a 100 kg, el ensaye fue detenido a los 7.6 minutos de ensaye, bajando la carga hasta detener el desplazamiento del modelo.

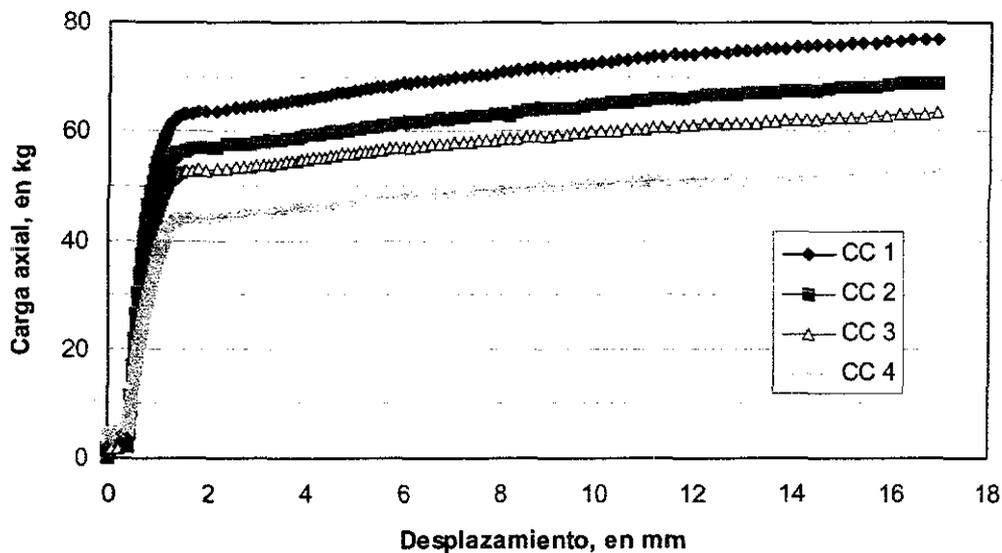


Figura 5.13 Cargas axiales en el modelo de pilote instrumentado

Después de la falla, la carga interna en el pilote sigue aumentando, tal vez porque al penetrar, la longitud embebida del pilote crece. En el caso del CC 4 (cerca de la punta), después del punto de quiebre o falla, la carga aumenta 7 kg; esta ganancia se puede deber al efecto de las fronteras cercanas a la punta, tal como la cercanía de la base (a 38 mm de ésta) y de las paredes del cilindro de lucita.

En la Fig. 5.14, se grafican los valores de los sensores CC para diferentes niveles de carga externa aplicada con sus correspondientes desplazamientos; se puede ver que al inicio del ensaye, el pilote presenta una ligera tensión efecto del hincado y retiro del martillo. A medida que la carga aumenta, se refleja una disminución de carga con respecto a la profundidad; esta pérdida de carga interna la gana el suelo por medio de fricción, reflejándose una clara transferencia de carga del pilote al suelo.

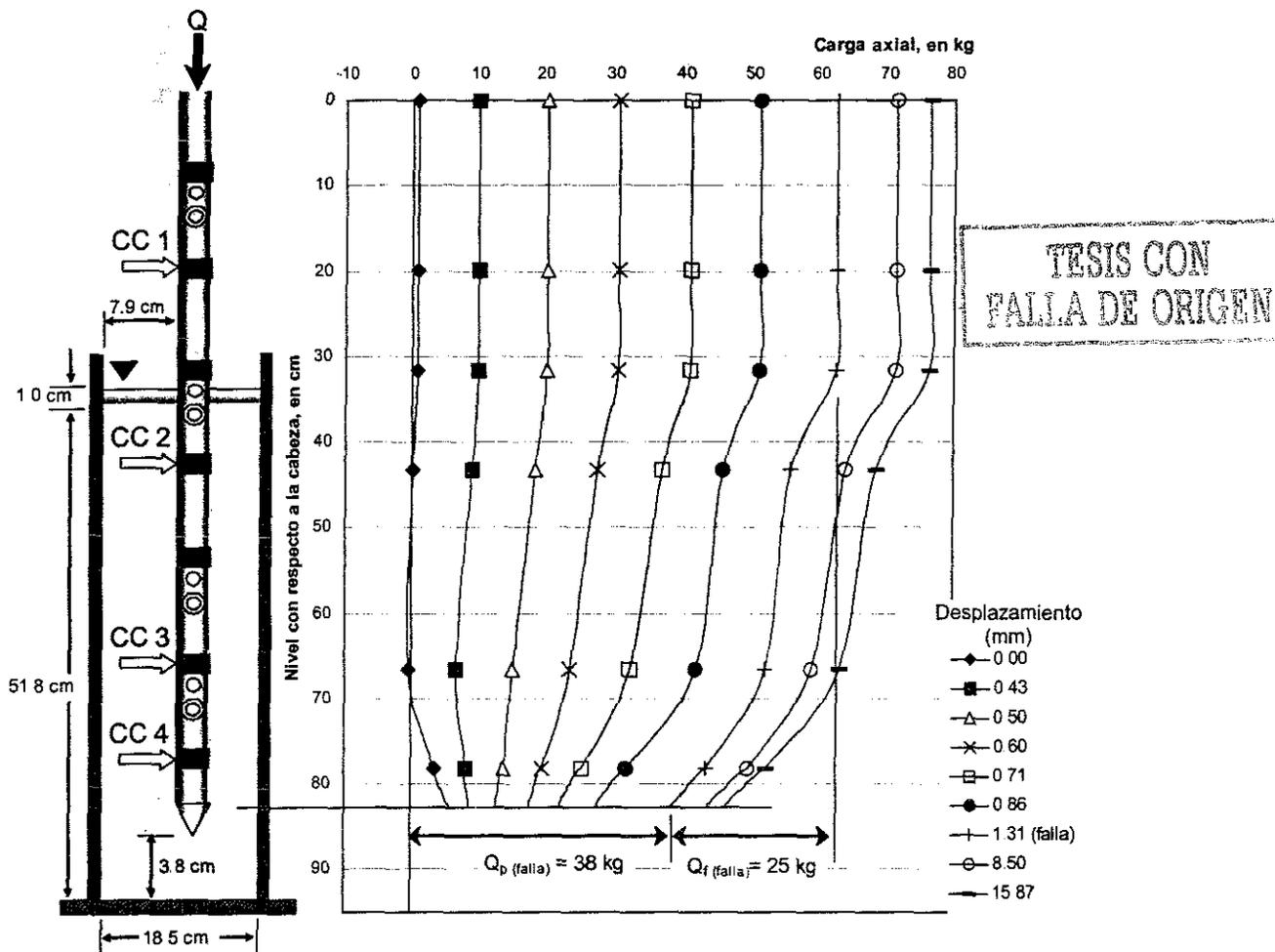


Figura 5.14 Distribución de cargas axiales internas en el modelo de pilote

Con base en esas mediciones, se puede estimar con facilidad la aportación de la punta y de la fricción en la capacidad última del pilote de fricción, tal como se muestra en la Fig. 5.14. En este ensaye se obtuvo una capacidad por punta de 38 kg

y una capacidad por fricción de 25 kg, esto habla de la gran aportación de la punta por el efecto de las fronteras cercanas a ésta.

### 5.3.2. Presión de poro

La Fig. 5.15 muestra el registro de presión con respecto al desplazamiento del pilote; debajo de ésta se coloca la curva carga externa-desplazamiento, observando que el PP 4 presenta una disminución de presión (succión) y los PP 2 y 3 un aumento de presión desde el comienzo del ensaye, haciéndose más notorio al momento de la falla del modelo.

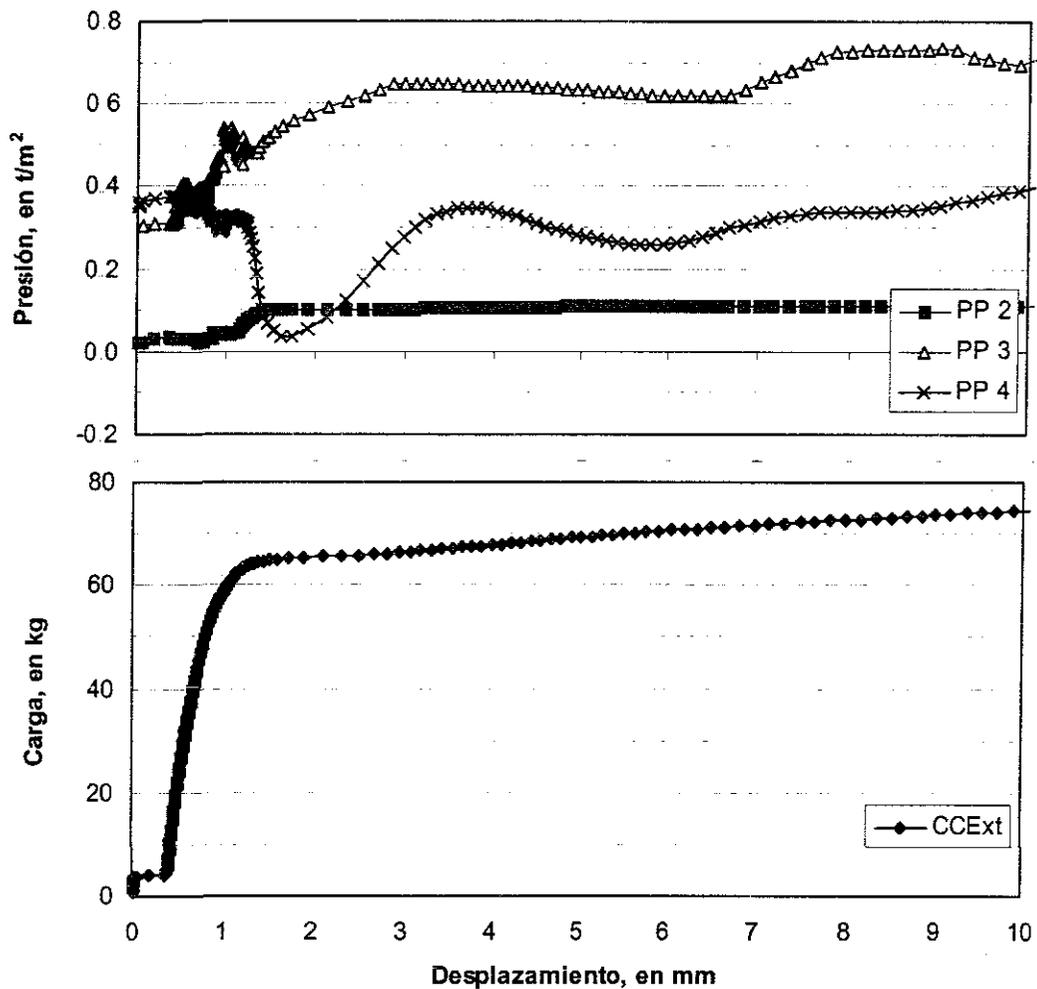


Figura 5.15 Presión de poro en el modelo de pilote bajo carga estática

Al final del ensaye, las presiones regresan a sus correspondientes valores iniciales al mismo ritmo de la reducción de la carga axial, siendo estables después de pocos minutos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 5.3.3. Presión total

A diferencia de los PP, los sensores PT 3 y PT 4 presentan una reducción de presión total negativa desde el inicio del ensaye, estabilizándose poco después de la falla del pilote, Fig. 5.16.

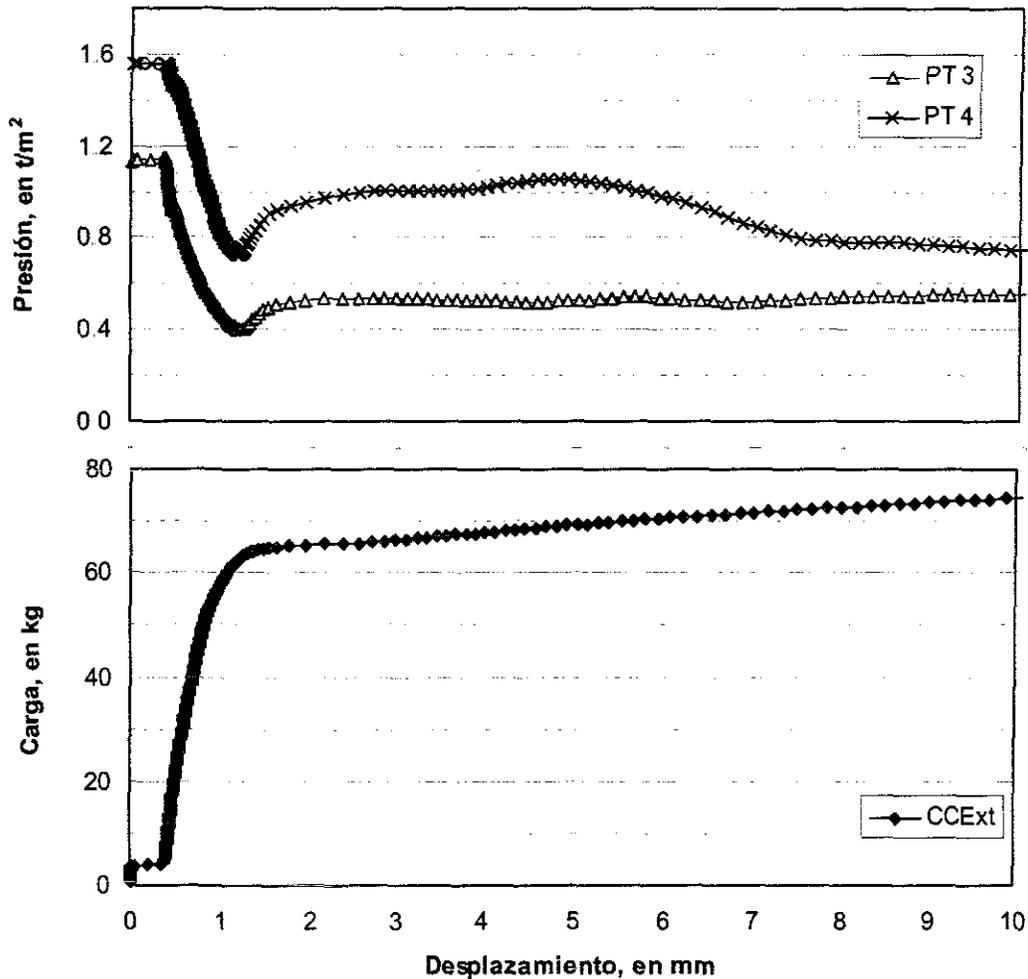


Figura 5.16 Presión total en el modelo de pilote bajo carga estática

Al detener el desplazamiento del pilote, los valores se estabilizan regresando a un 75% con respecto al valor que tenían al principio del ensaye de carga.

### 5.3.4. Flexión

En la Fig. 5.17 se presentan las gráficas de los sensores CF para los tres niveles de medición, donde se ve que la deformación del pilote es predominante hacia el eje 1 en la parte superior (fuera del suelo) y hacia el eje 3 en los tramos sumergidos en el suelo artificial.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

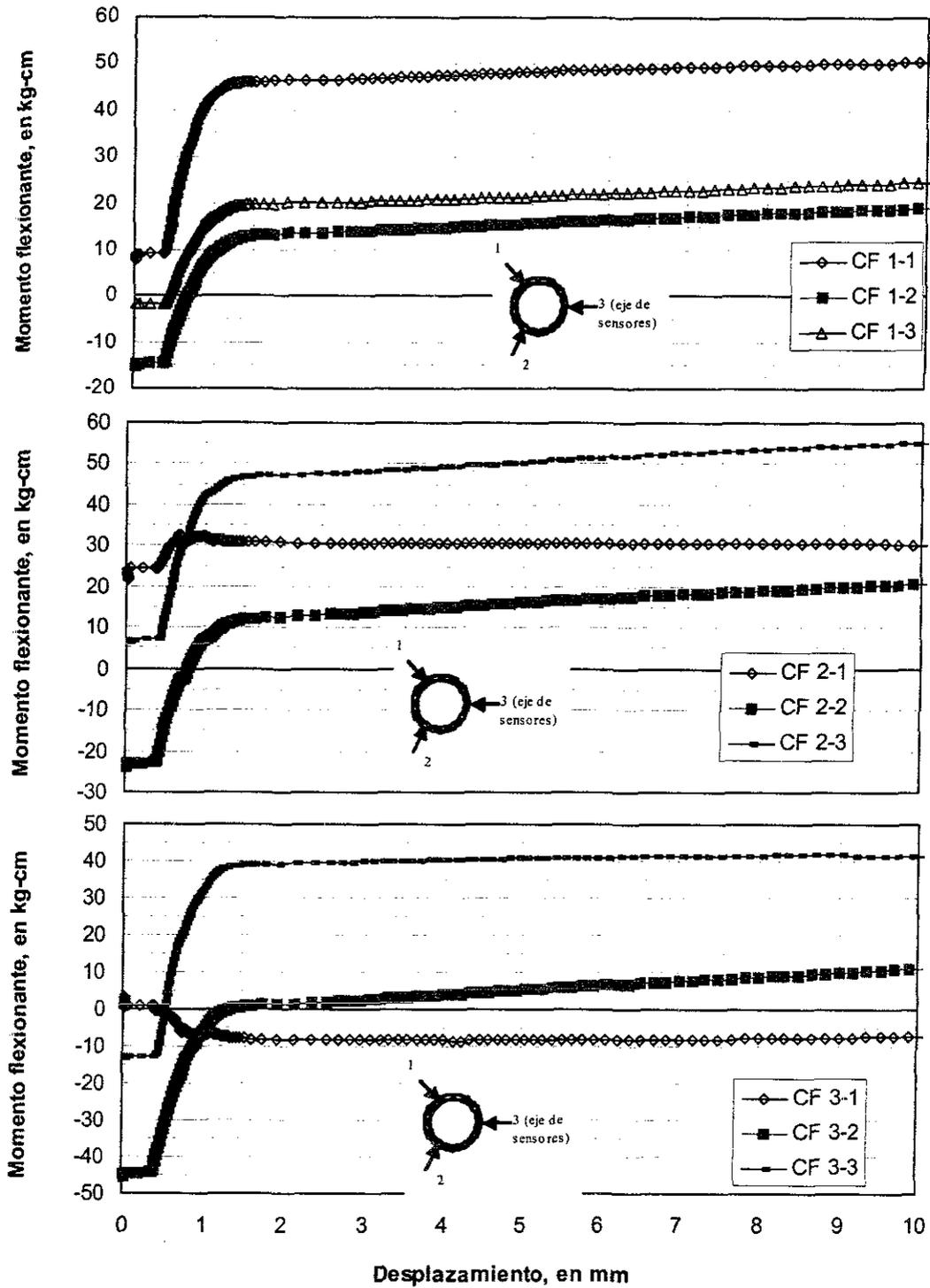


Figura 5.17 Flexión en los tres niveles del modelo de pilote bajo carga estática

Al igual que los demás sensores, la flexión disminuye al mismo ritmo de la carga axial, mostrando que la flexión permanece en las mismas direcciones pero con magnitud menor.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Concluido el ensaye de carga, extrajimos el pilote 10 mm para observar si la capacidad por fricción era igual que en compresión; en efecto, dadas las propiedades del suelo artificial y el ensaye realizado, la tensión necesaria para desplazar el pilote fue de 25 kg al igual que el valor de capacidad por fricción en compresión. Esto nos corrobora que la capacidad por punta fue mayor que la de fricción, debido a los efectos de frontera ya comentados.

Realizado lo anterior, se programó un ensaye bajo desplazamiento axial cíclico, 20 minutos después de la extracción del pilote. Ese tiempo fue el necesario para que los valores de carga, presión y flexión fueran estables y se tuvieran los valores iniciales para el siguiente ensaye.

#### 5.4. Ensaye bajo desplazamiento axial cíclico

Se programó un ensaye con el modelo bajo desplazamiento axial cíclico controlado para verificar el control del SAC, siguiendo una función seno de amplitud 1.0 mm (+/- 0.5 mm) y 0.2 Hz de frecuencia (5 s en cada ciclo).

Se aplicaron 20 ciclos y los valores fueron adquiridos con el SAD con el registro dinámico, el cual graba valores cada 0.05 segundos, suficientes para definir adecuadamente las acciones cíclicas. La función comando de desplazamiento se muestra en la Fig. 5.18.

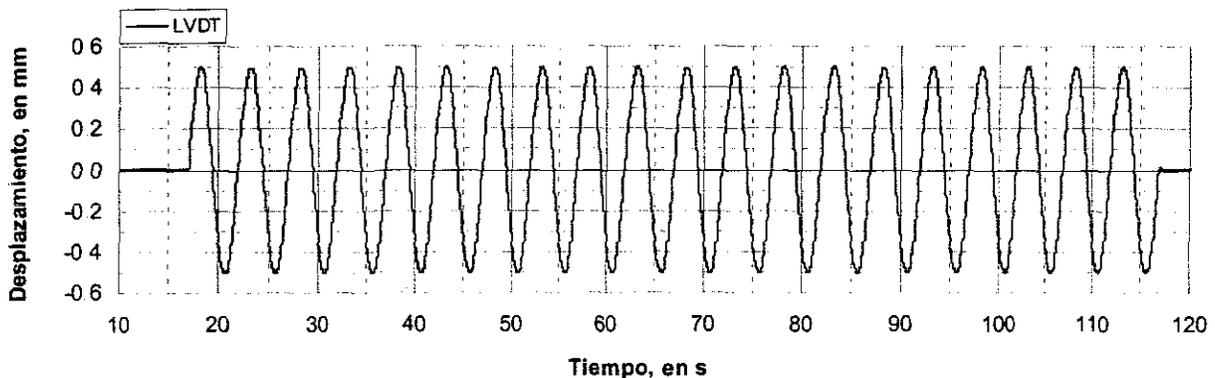


Figura 5.18 Desplazamiento cíclico inducido en el modelo de pilote

Los valores positivos de desplazamiento indican penetración del modelo en el suelo y los valores negativos indican extracción. Los resultados de carga, presión y flexión bajo esta acción se describen en los puntos siguientes.

##### 5.4.1. Cargas axiales

A continuación se muestran las curvas histeréticas con los 20 ciclos aplicados, diferenciando el primer y último ciclo; la diferencia de magnitudes de carga entre

estos dos ciclos muestra la degradación del sistema pilote-suelo por efecto cíclico (Fig. 5.19).

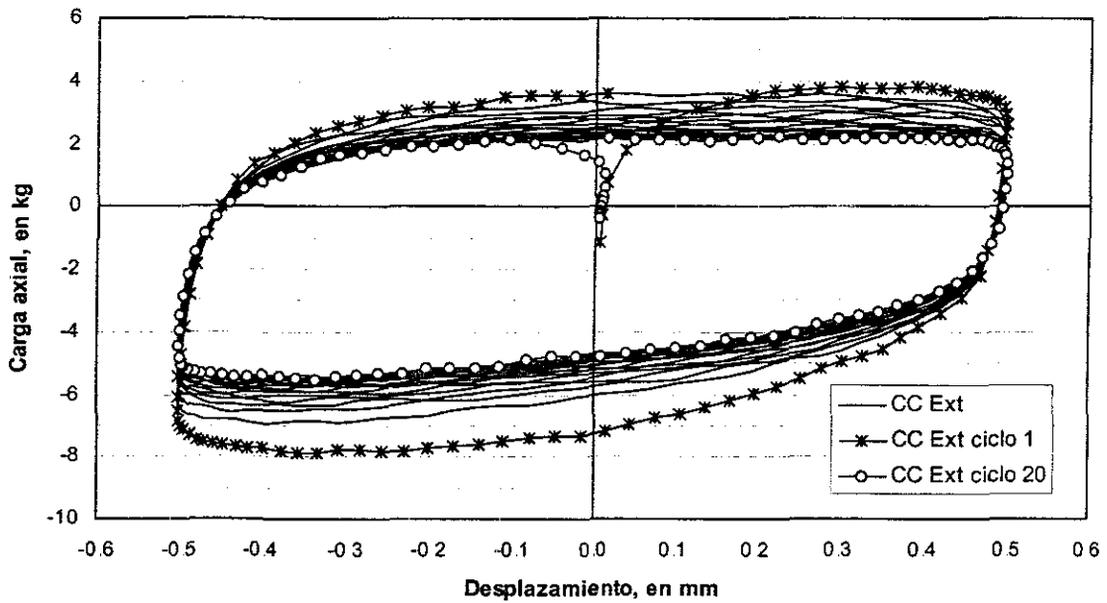


Figura 5.19 Carga externa contra desplazamiento axial en ensaye bajo desplazamiento axial cíclico

En el inicio del ensaye, la carga registrada en la celda externa es negativa, porque extrajimos el modelo 10 mm antes de este ensaye. La carga oscila de acuerdo con el desplazamiento provocado, mostrando disminución en las magnitudes de carga después del primer ciclo. Las cargas en el modelo de pilote se muestran en la Fig. 5.20, siendo negativas en el inicio del ensaye y mostrando cierta transferencia de carga durante el ensaye; esto es, el sensor CC 1 registra mayor carga en comparación con los demás sensores.

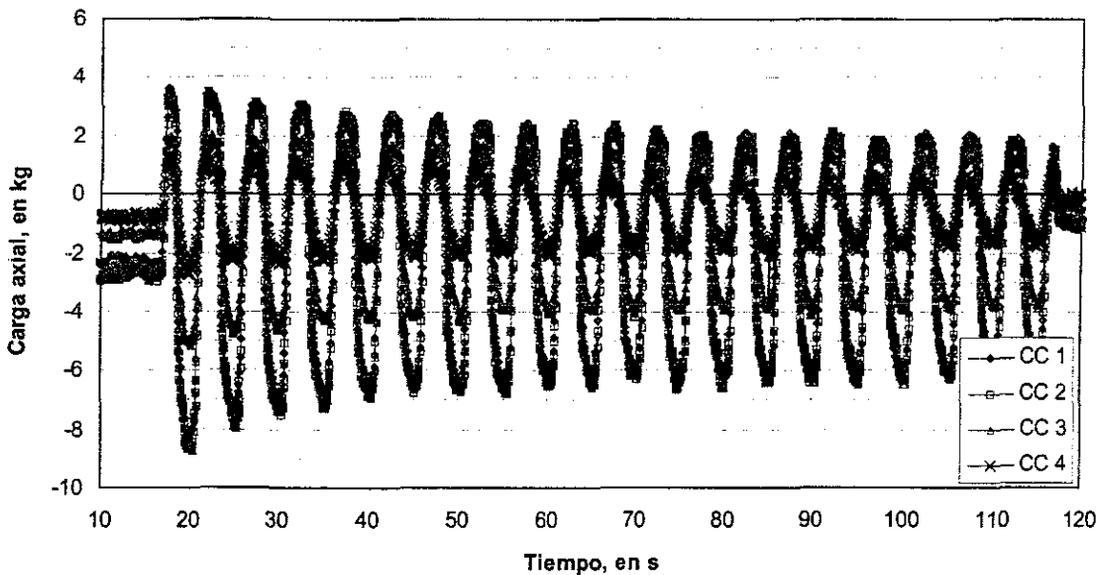


Figura 5.20 Cargas en el modelo de pilote en ensaye bajo desplazamiento axial cíclico

En los primeros 10 ciclos se observa una clara disminución en la carga interna del pilote, como resultado de la reducción de la oposición del suelo por el ciclaje inducido al pilote; en los últimos ciclos, la carga en los sensores permanece prácticamente constante. El sensor CC 2 registra prácticamente los mismos niveles de carga que el CC 1, esto se entiende dado que el espesor de material que está por arriba de aquella celda es pequeño y no genera ninguna oposición al movimiento.

#### 5.4.2. Presión de poro

La presión de poro registrada durante el ensaye se observa en la Fig. 5.21, siendo el PP 4 el que registra todos los ciclos del ensaye.

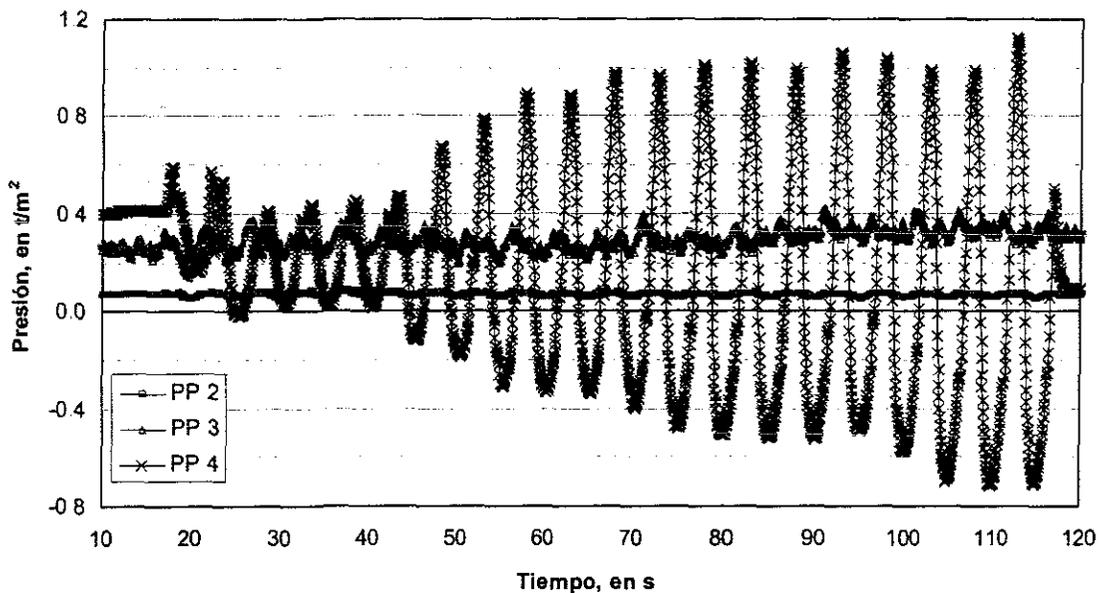


Figura 5.21 Presión de poro en el modelo de pilote en ensaye bajo desplazamiento cíclico

El PP 2 registra poca variación dado que se encuentra en la superficie del suelo; el PP 3 registra mayor variación con respecto al sensor anterior, pero es del orden de  $0.2 \text{ t/m}^2$  (20 cm de columna de agua). A diferencia de la carga, la presión de poro registrada en el PP 4 oscila casi constante en los primeros 5 ciclos, después registra un aumento en los siguientes 5 ciclos para mantenerse variando hasta el final del ensaye. La variación registrada fue de  $-0.6$  a  $1.3 \text{ t/m}^2$  estabilizándose rápidamente al finalizar el ensaye. Esto nos indica la buena respuesta de los sensores de presión ante acciones cíclicas.

#### 5.4.3. Presión total

En la Fig. 5.22 se muestra el registro de los sensores PT 3 y PT 4, que fueron los sensores que quedaron embebidos en el suelo artificial.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

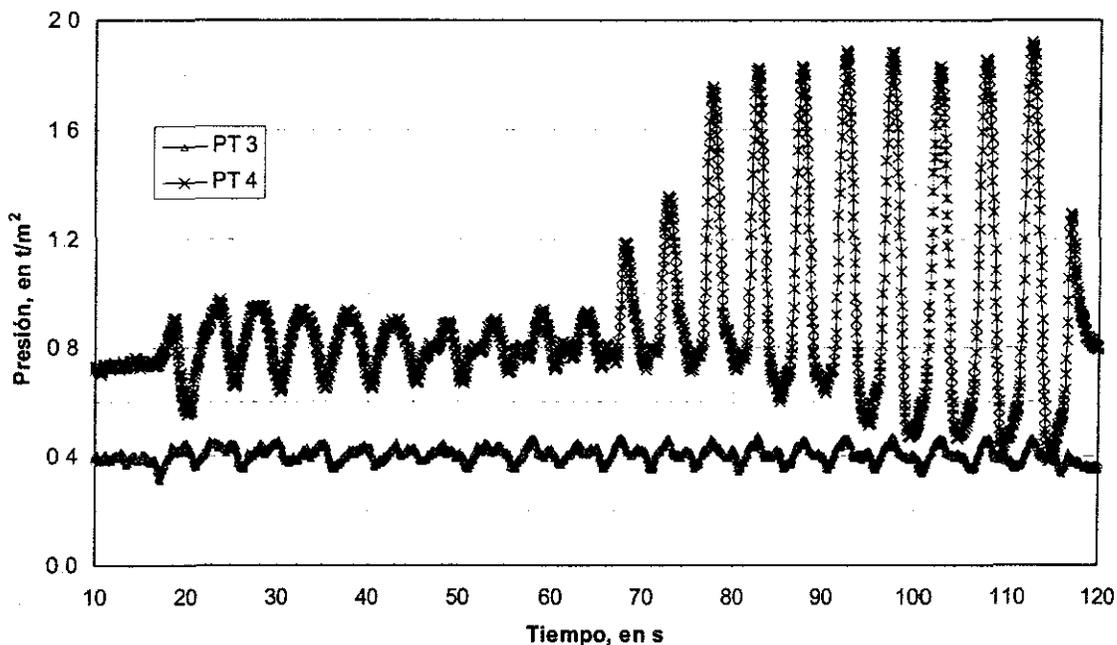


Figura 5.22 Presión total en el modelo de pilote en ensaye bajo desplazamiento cíclico

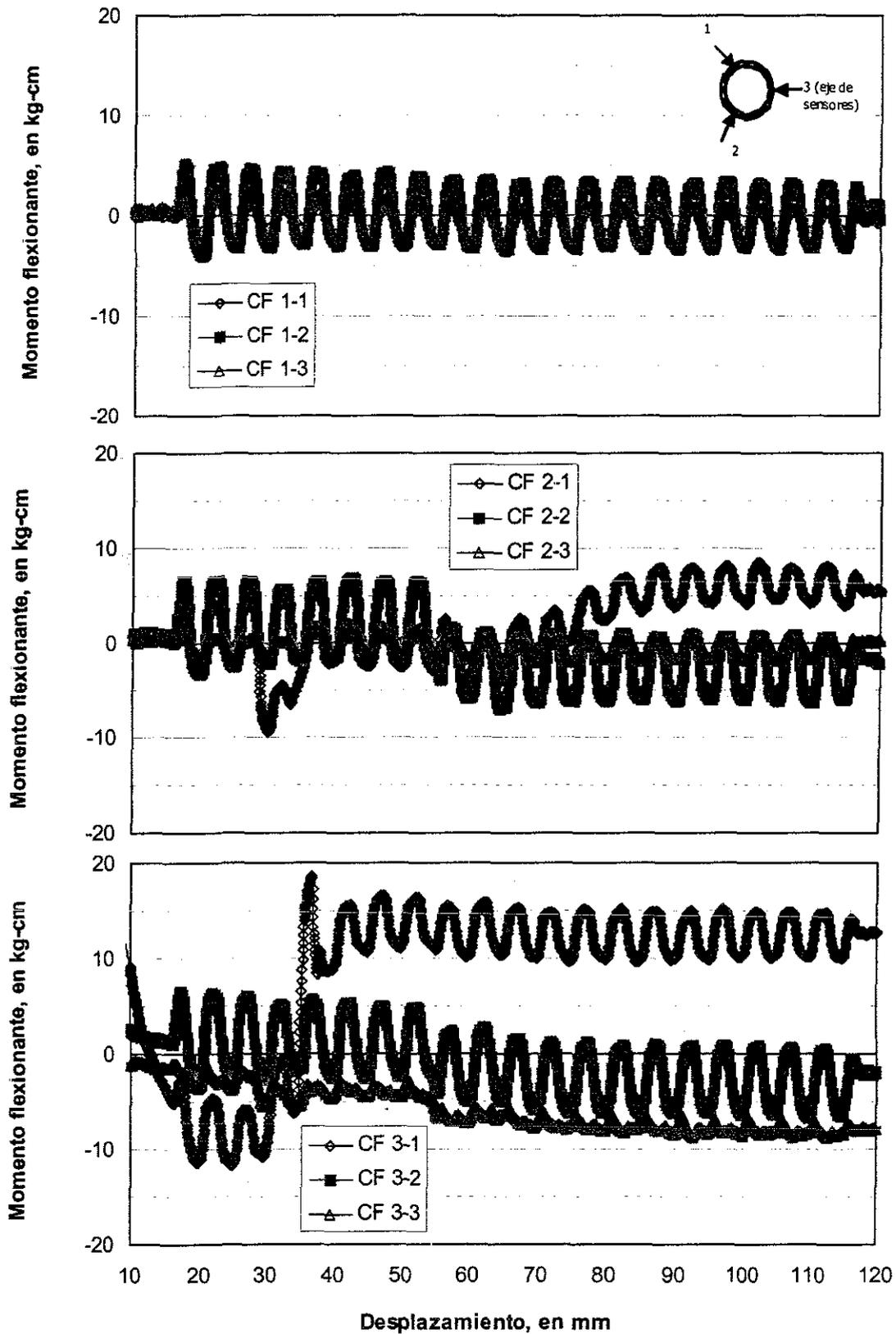
La variación en el PT 3 es poco significativa con respecto al PT 4, donde se observa que la presión total varía en todo el ensaye, teniendo una amplitud de poco menos de 1 t/m<sup>2</sup>, reduciéndose al pasar 6 ciclos y aumentando drásticamente después de los 10 ciclos. En este caso, el aumento del PT 4 en los últimos 10 ciclos coincide con la tendencia constante de los niveles de carga registrados, teniendo una variación en el PT 4 de 0.3 a 1.8 t/m<sup>2</sup>, mayor que la presión de poro en el PP4.

#### 5.4.4. Flexión

Los registros de los sensores CF nos muestran que la deformación preferencial del pilote se invierte durante el ensaye, pasando del eje 2 al 1 de acuerdo con la Fig. 5.23.

El nivel de los sensores y el eje de registro se muestran claramente en la Fig. 3.21, teniendo que en los sensores del nivel dos (CF 2) registran una deformación preferencial hacia el eje 2, cambiando hacia en eje 1 después de 10 ciclos. En los sensores del nivel tres (CF 3) se registra algo similar, pero después del cuarto ciclo. Los sensores del nivel uno (CF 1) indican que no cambia la dirección de la deformación del pilote en todo el ensaye, manteniéndose hacia el eje 2.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 5.23 Flexión en los tres niveles del modelo de pilote en ensaye bajo desplazamiento cíclico

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## **5.5. Comentarios sobre los ensayos preliminares**

El objetivo de los ensayos preliminares con el modelo fue el de verificar el funcionamiento de los sensores dispuestos en el modelo de pilote, así como también el funcionamiento y posibles adecuaciones a los sistemas auxiliares (SAC, SAD y el sistema de instalación). Con estos ensayos no se pretendió seguir u observar algún fenómeno en particular; para ello se planean ensayos específicos con el modelo de pilote instrumentado, hincándolo en el suelo marino reconstituido, buscando observar y medir los fenómenos involucrados en la capacidad de carga de pilotes de fricción, bajo carga axial y lateral, estática y cíclica.

Siguiendo tal objetivo, se hacen comentarios acerca de los registros de los sensores para las etapas realizadas en estos ensayos preliminares.

### **5.5.1. Hincado**

Dentro del sistema de guiado, el marco guía resultó ser aceptable, dada su flexibilidad para la colocación de las placas guía en seis niveles. Las placas guía tienen el defecto de que los baleros aprietan al modelo y provocan compresión o tensión en los sensores de carga, además que el tiempo para retirar estas placas es tardado porque se deben desarmar para poder retirarlas. Por tales motivos se planea la modificación de los baleros, de tal forma que abracen al modelo sin tanto apriete e irlos revisando durante el hincado; asimismo, la forma de las placas se planea que tengan la forma de una U para retirarlas con mayor facilidad.

El registro de los sensores en el proceso dinámico del hincado requirió de un filtrado de señal, esto es, un promedio móvil de los valores para reducir los picos debidos al ruido de las señales. Los resultados obtenidos muestran el comportamiento global del fenómeno dinámico en forma aceptable, pero no se pueden registrar los valores en el impacto de la masa con el pilote, debido principalmente a la capacidad real de muestreo del Sistema de Adquisición de Datos (SAD) de 20 muestras por segundo por cada sensor, además del ruido que presentan los sensores. Cabe aclarar que el SAD no fue contemplado para registrar con precisión el proceso de hincado.

### **5.5.2. Ensaye bajo carga estática**

El funcionamiento del Sistema de Aplicación de Cargas (SAC) resultó adecuado, aplicando las cargas de manera constante sin presentar variaciones significativas.

Los sensores que resultaron con mayor sensibilidad y estabilidad son los de presión de poro, como era de esperarse, dado que la señal de salida de éstos es bastante alta en función de los SG semiconductores con que son fabricados. Los sensores de presión total, carga y flexión respondieron muy bien y reflejan, en especial los CC, la acción de carga impuesta al modelo de pilote. En este caso, la adquisición se realizó con el módulo estático del SAD, en el cual se aplica un promedio de los primeros veinte valores y graba éste cada segundo. Las señales capturadas de esta forma no necesitaron de filtrado adicional.

### ***5.5.3. Ensaye bajo desplazamiento cíclico***

Al igual que en el ensaye estático, el SAC mostró un buen comportamiento en ensayes bajo desplazamiento cíclico. Cabe destacar que la frecuencia aplicada fue baja (0.2 Hz) y en ensayes previos se observó que a medida que la frecuencia sube, el funcionamiento del SAC deja de ser aceptable, por lo que se deberá tener precaución si se quieren realizar ensayes con mayor frecuencia.

Las señales fueron capturadas con el módulo dinámico del SAD, teniendo una muestra cada 0.05 segundos en cada sensor. Estas señales fueron filtradas de la misma forma que en el ensaye dinámico, pero en este ensaye los sensores mostraron un mejor comportamiento que en hincado, pudiéndose observar de manera particular y global los efectos de carga, presión y flexión durante todo el ensaye.

Finalmente, podemos decir que las mediciones obtenidas muestran el buen funcionamiento que tienen los sensores de carga, presión total, presión de poro y flexión del modelo de pilote instrumentado, registrando de forma estable las acciones mecánicas a que fue sometido. Asimismo, falta la ejecución de los ensayes definitivos con el modelo de pilote para realizar la interpretación de los valores que arrojan tales sensores.



## Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con el trabajo desarrollado, se emiten las siguientes conclusiones:

- Se ha desarrollado un modelo físico de pilote de fricción instrumentado, fabricado con un tubo de duraluminio de 2.64 cm de diámetro exterior y 90 cm de longitud. Cuenta con 4 sensores de carga, 4 de presión total, 4 de presión de poro y 9 de flexión, todos ellos basados en deformímetros eléctricos (strain gages).
- Los sensores dispuestos en el modelo de pilote miden las variables geotécnicas pretendidas en el proyecto, tales como la carga, presión de poro y presión total normal a la pared del fuste en cuatro niveles y la flexión en 9 puntos, de acuerdo con resultados de los ensayos preliminares.
- Dado que no se cumplen con las leyes de similitud entre el modelo y el prototipo, los resultados obtenidos en los ensayos no podrán ser extrapolados al prototipo de manera directa; sin embargo, servirán para calibrar soluciones teórico-numéricas que tomen en cuenta las características particulares de esos ensayos.
- La medición de las cargas en el modelo en ensayos estáticos, permite estimar con facilidad la aportación de la fricción y de la punta en la capacidad de carga última estática del pilote. Asimismo, la medición de los desplazamientos y las cargas en ensayos cíclicos permite calcular la rigidez y el amortiguamiento del sistema suelo-pilote.

- Los registros de presiones totales y de poro permitirán realizar análisis en términos de esfuerzos efectivos, tanto en ensayos estáticos como cíclicos dinámicos.
- En ensayos dinámicos, como es el hincado a percusión, no se pueden registrar las cargas en el pilote producto del impacto, debido a la limitación del sistema de adquisición de datos. Sin embargo, este sistema no pretendía tal objetivo.
- Con respecto a la instrumentación, se observó que los sensores de presión de poro tienen muy buena respuesta en comparación con los sensores de presión total, debido a que los primeros utilizan deformímetros eléctricos semiconductores y el espesor del diafragma es menor, generando mayor señal de salida. Los sensores de flexión son útiles para definir la dirección de la deformación en planta del pilote a diferentes niveles, pudiendo definir la flexión en cada punto de medición. Los sensores de carga registran con buena resolución las cargas aplicadas al pilote en los ensayos preliminares, incluso cuando la carga de diseño es varias veces mayor a las aplicadas.
- Se cuenta con sistemas estables y confiables de aplicación de cargas y de adquisición de datos para la realización de ensayos con el modelo de pilote; el buen control de la aplicación de carga y la adquisición rápida de las señales de los sensores redundan en el éxito de estos ensayos.
- Finalmente se puede decir que el modelo físico de pilote de fricción instrumentado está listo para la etapa de ensayos definitivos programados dentro del proyecto de investigación.

Asimismo, se emiten las recomendaciones y sugerencias siguientes:

- Se considera conveniente instrumentar la punta del modelo de pilote con un sensor de carga, con el fin de conocer con mayor precisión el aporte de la capacidad por punta en pilotes de fricción.
- Dadas las diferencias en respuesta de los sensores de presión total y de poro se recomienda que para nuevas instrumentaciones se utilicen sensores del mismo tipo, convenientemente del tipo utilizado en los de presión de poro.
- Se recomienda cubrir los sensores de presión total con un material de poca rigidez (como silicón), con el fin de mantener la geometría cilíndrica del pilote en toda su longitud y evitar la relajación de esfuerzos en el suelo en esas zonas.
- Se debe cuidar el efecto de temperatura que presentaron los sensores de presión total en este modelo; el cambio de algunos grados provoca diferentes lecturas debido a la señal baja de este tipo de sensores. Lo anterior se reduce conociendo el diferencial de temperatura al momento del hincado y corrigiendo la deriva en el procesado de datos. Sin embargo, este fenómeno no tiene importancia cuando el modelo está sumergido en el suelo.

## REFERENCIAS

- American Petroleum Institute, 2000, Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design, *API Recommended Practice 2A-WSD (RD2A-WSD)* 21<sup>st</sup> edition, pp 55-66
- Auvinet, G. y Mendoza, M. J., 1986, “Comportamiento de diversos tipos de cimentación en la zona lacustre de la ciudad de México durante el sismo de septiembre de 1985”, *Memorias del Simposio: “Los sismos de 1985: Casos de mecánica de suelos”*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.
- Blayne, G. W. y Mallow, W. A., 1987, “Synthetic clay soil for dynamic model pile tests”, *Proceedings: Dynamic Response of Pile Foundations*. pp 127-148.
- Bond, A. J., Jardine, R. J., y Dalton, J. C. P., 1991, “Design and performance of the Imperial College instrumented pile”, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 14, No. 4, pp 413-424.
- Canadian Geotechnical Society, 1985, *Canadian Foundation Engineering Manual*, 2<sup>nd</sup> Edition, Canada, pp 269-305.
- Coop, M. R. y Wroth, C. P., 1989, “Field studies of an instrumented model pile in clay”, *Géotechnique* 39, No. 4, pp 679-696.
- Dally, J. W., Riley, W. F. y McConnell, K. G., 1984, *Instrumentation for Engineering Measurements*, John Wiley & Sons, Inc., pp 262-267.
- Departamento del Distrito Federal, 1995, “Reglamento de Construcciones del Distrito Federal; Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones”, *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Ciudad de México, pp 14-15.
- Enríquez, A., 1999, *Modificaciones estructurales para incrementar la producción en plataformas marinas de perforación existentes*, Tesis de licenciatura, México D. F.
- Entrun Sensors & Electronics, 1996, *Pressure*, (catálogo de sensores de presión), Entrun Devices, Inc., USA.
- GCTS, 1999, *Electro-pneumatic system for the application of biaxial loads on scaled piles: Operating Instructions*, Geotechnical Consulting and Testing Systems, Tempe, Arizona, USA.
- Holmquist, D. V., y Matlock, H., 1976, “Resistance-displacement relationships for axially-loaded piles in soft clay”, *Offshore Technology Conference*, OTC 2474, Houston Texas, pp 553-569.
- Ibarra, E., 2002, *Reconstitución de un suelo arcilloso marino en un odómetro para ensayos con modelos de pilotes*, Tesis de Maestría, DEP-FI, UNAM, 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, No. 543, México D. F.
- Jardine, R. J. and Chow, F. C., 1996, *New Design Methods for Offshore Piles*, The Marine Technology Directorate Ltd (MTD), publication 96/103, London UK, pp 29-36

- Kana, D. D., Boyce, L. y Blaney, G. W., 1986, "Development of a scale model for the dynamic interaction of a pile in clay", *Journal of Energy Resources Technology*, ASME, Vol. 18 No 3, pp 254-261.
- Lehane, B. and De Cock, F., 1999, "Standard European practice: Estimating ultimate pile capacities from laboratory test data", *European Foundations*, pp 24-27
- Measurements Group, 1988, *Strain gage based transducers*, The Technical staff of Measurements Group, Inc., Raleigh, North Carolina, USA. 72 pp
- Measurements Group, 1992, *Transducer class*, Micro-Measurements, catálogo TC116-3, Raleigh, North Carolina, USA.
- Measurements Group, 1993, *Strain gages catalogue 500*, Micro-Measurements, Raleigh, North Carolina, USA.
- Measurements Group, 1992, *Tech Note*, TN-510-1, USA.
- Mendoza, M. J., Ibarra, E., Sánchez, J., Luna, O. J., y 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*, SMMS, Oaxaca, México, Vol. 1, pp. 311-320
- Mendoza, M. J. y Romo, M. P., 1998, "Performance of a friction pile-box foundation in Mexico city clay", *Soils and Foundations* V.38 No. 4, Japanese Geotechnical Society, pp 239-249.
- Mendoza, M. J., Romo, M. P., Barrera, P., Olivares, A., Rojas, E., Sánchez, J., Luna, O. J. 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*, SMMS, Puebla, México, pp. 303-312
- Mendoza, M. J., Sánchez, J. y Luna, O. J., 1997, *5º Informe de avance del proyecto: Respuesta de la cimentación de una plataforma marina fija bajo el efecto de cargas cíclicas y dinámicas en la Sonda de Campeche*, Reporte para el Instituto Mexicano del Petróleo, Instituto de Ingeniería, UNAM
- Meymand, P. J., 1998, *Shaking Table Scale Model Test of Nonlinear Soil-Pile-Structure Interaction in Soft Clay*, Tesis de doctorado, Universidad de California, Berkeley.
- Mayne, W. y Trautmann, C. H., 1995, "Laboratory modeling of laterally-loaded drilled shafts in clay", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.121 No. 12, ASCE, pp 827-835.
- Ortega, R., 1997, Notas de exposición en el Instituto Mexicano del Petróleo, IMP, México D. F., septiembre 1º.
- Potter, M. C., Wiggert, D. C. y Hondzo, M., 1998, *Mecánica de fluidos*, 2ª edición, Prentice Hall, México, pp 225-239.
- Procter, D. C. y Khaffaf, J. H., 1987, "Cyclic axial displacement tests on model piles in clay", *Technical Notes, Géotechnique* 37, No. 4, pp 505-509.
- Roscoe, K., 1968, "Soils and model tests", *Journal of Strain Analysis*, Vol. 3, No. 1, pp 57-64.

- Swedish Geotechnical Institute, 1987, "Dynamic and static behavior of driven piles", Report No. 33, Nguyen Truong Tien, Linköping Sweden, pp 4-13.
- Timoshenko, G., 1986, *Mecánica de materiales*, 2a edición, Iberoamericana, México, pp 793-798.
- Trochanis, A. M. and Bielak, J., 1986, "Tentative Recommendations for static analysis of single and group piles with axial and lateral loads", Civil Engineering Department, Carnegie-Mellon University.
- Vesić, A. S., 1970, *Load transfer in pile-soil systems*, School of Engineering, Duke University, Soil Mechanics Series No. 23, 29 pp.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN