

Comportamiento de pilotes centrifugados en la Refinería Madero

PHC pile behaviour at Refineria Madero

W. I. Paniagua Zavala, Pilotec

RESUMEN. Se describe el uso de pilotes precolados, presforzados y centrifugados, que fueron utilizados en la modernización de la Refinería Madero. Se incluye una descripción del sistema de fabricación, sus características estructurales y el hincado de pilotes. Se muestra su comportamiento en pruebas de carga in situ, ante carga de compresión, tensión, lateral y combinando carga de compresión con carga lateral.

1. INTRODUCCION

En 1999 se inició el proceso de remodelación de la Refinería Madero, ubicada en Ciudad Madero, en el estado de Tamaulipas. El trabajo fue asignado a una empresa coreana, con el concepto de llave en mano.

Por este motivo, el contratista llevó a cabo a su vez el proyecto ejecutivo de la obra; la geotecnia realizada en México se limitó a la exploración en campo, trabajos de laboratorio y recomendaciones generales para el diseño geotécnico de las estructuras.

En lo concerniente a los trabajos de fabricación e hincado de pilotes (alrededor de 10,000 piezas), se utilizaron pilotes transportados desde Corea, ejecutando los trabajos una empresa de ese país, que desde ese lugar movilizó el equipo de hincado de pilotes.

Como parte de los trabajos de control y aseguramiento de calidad, en la Planta de Coque se llevó a cabo la ejecución de diversas pruebas de carga en los pilotes, con objeto de verificar la capacidad de carga de diseño, así como mostrar al propietario de la obra el comportamiento de los pilotes, en particular ante cargas laterales.

Las pruebas de carga se realizaron entre octubre de 1999 y septiembre de 2000; se sabe que el diseño original de los pilotes se conservó, tomando como base los resultados de las pruebas.

2. INFORMACION GEOTECNICA DEL SITIO

El sitio se encuentra en la ciudad de Madero, que forma parte de la zona urbana de la ciudad de Tampico, en el estado de Tamaulipas, fig 1.

La Refinería Madero se localiza en la desembocadura del Río Pánuco, sobre el Golfo de México. Los suelos están

constituidos por depósitos aluviales y costeros, con intercalaciones de arenas limosas y arcillas, de compacidad y consistencia variable.

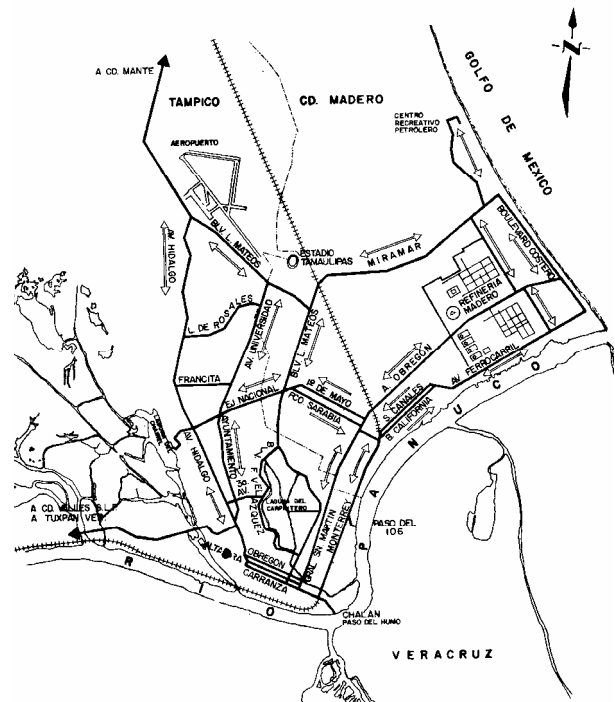


Fig 1. Localización general de la Refinería Madero, Valverde y Aquino (1986)

En la fig 2 se muestra el perfil estratigráfico típico de la Zona Sur, que es donde se encuentra la Planta de Coque, donde se realizaron las pruebas de carga en los pilotes.

Esta zona colinda con la ribera del Río Pánuco, detectándose superficialmente arena fina limosa, compacta a media, de 4 m de espesor, aproximadamente.

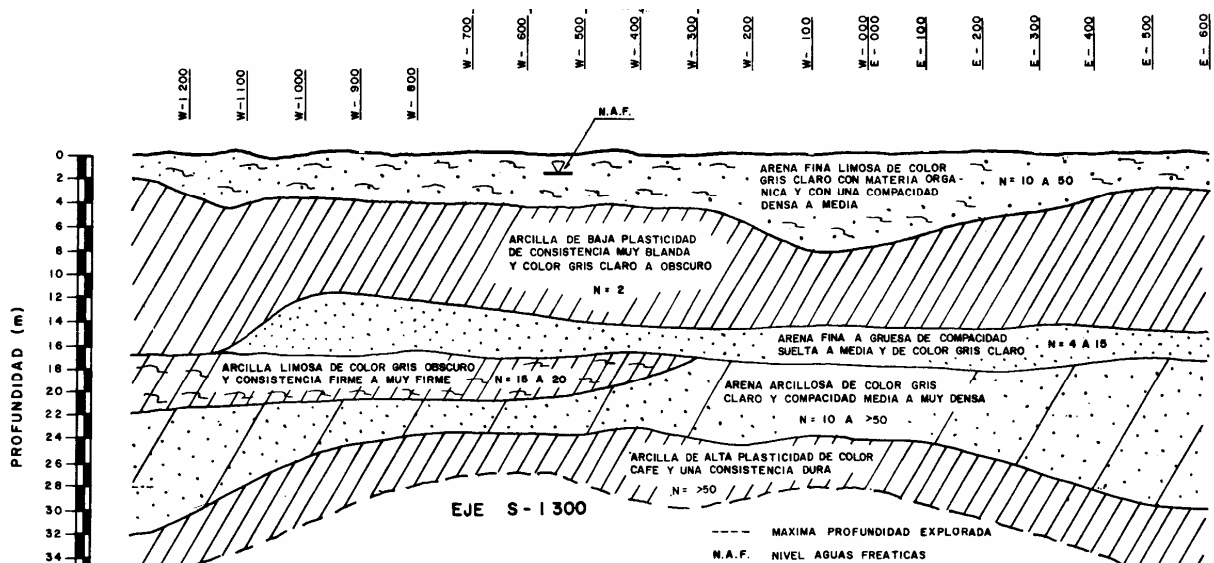


Fig 2. Perfil estratigráfico en la zona de la Planta de Coque, Valverde y Aquino (1986)

Bajo esta, se presenta un estrato de arcilla de baja plasticidad, de consistencia muy blanda, alrededor de 10 m de espesor. En seguida, se localiza una arena fina, con compactación variable entre muy suelta y muy compacta, con espesores variables entre 4 y 10 m, en ocasiones intercalada con lentes de arcilla limosa, de consistencia firme, de hasta 4 m de espesor.

Posteriormente, y hasta la máxima profundidad explorada en esa zona (38 a 40 m), se encuentran arcillas de alta plasticidad y consistencia dura.

Tomando en cuenta los suelos encontrados en el sitio, así como las descargas de algunas estructuras pesadas, el proyectista geotécnico determinó solucionar estas cimentaciones mediante pilotes de concreto, apoyados a una profundidad variable entre 23 y 26 m, dependiendo de las características particulares de cada estructura, así como las variaciones locales de la estratigrafía.

3. CARACTERÍSTICAS DE LOS PILOTES

Los pilotes que el contratista general y proyectista de la obra decidió utilizar son denominados PHC (abreviatura en inglés de *pre-tensioned spun high strength concrete pile*), que son pilotes presforzados y centrifugados, que fueron traídos a la obra desde Corea.

Los pilotes presforzados tienen algunas ventajas respecto de los de concreto reforzado:

- Mayor relación de resistencia : peso, lo cual permite mayores longitudes en secciones más esbeltas
- Cierre de las grietas capilares, causadas durante el manejo e hincado
- Concreto de alta calidad, necesario para el presfuerzo

Las últimas dos condiciones combinadas, incrementan la durabilidad del pilote, especialmente en estructuras marinas y suelos con agentes agresivos.

El proceso general de fabricación se muestra en la fig 3; el proceso de centrifugado se realiza a una velocidad angular constante, entre 500 y 660 rpm, con una ligera pendiente, para eliminar por los extremos el exceso de agua y finos, figs 4, y 5.

Debido a la alta velocidad angular de la cimbra, el concreto en el interior está sometido a una fuerza centrífuga que distribuye uniformemente el concreto a lo largo de la cara interna del molde.

El proceso de centrifugado ordena los agregados de acuerdo con su densidad; de esta manera, la grava y la arena tienden a colocarse en la parte externa del molde, mientras que los finos y el agua, se ubican en la cara interna del molde, fig 6. Por este motivo, en este proceso se debe controlar el tiempo de rotación, para evitar la segregación del concreto.

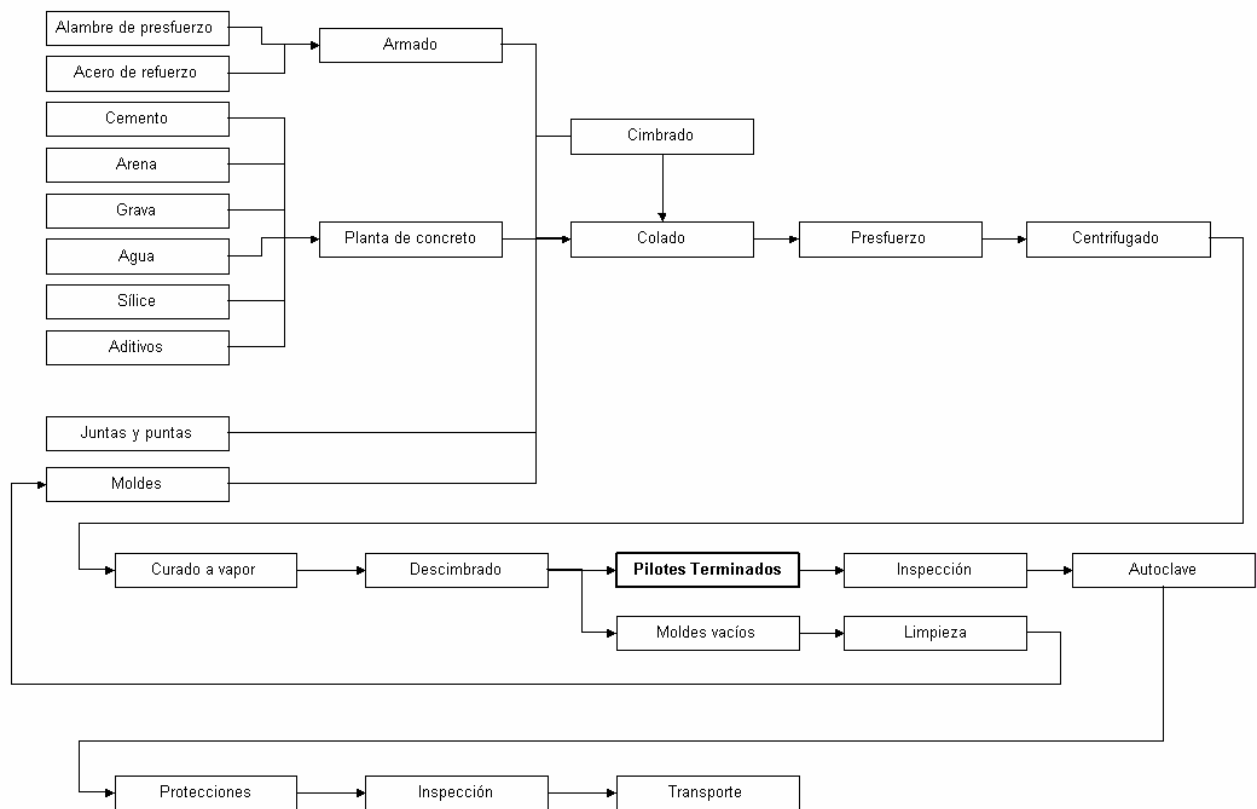


Fig 3. Diagrama esquemático del proceso de fabricación de pilotes centrifugados

En las figs 7 y 8 se muestra un esquema de los pilotes utilizados en la Refinería Madero, con las características señaladas en la tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones y características estructurales de los pilotes centrifugados, Dong Ah (1999)

Diámetro exterior	D	400 mm
Espesor	T	65 mm
Diámetro interior	D	270 mm
Longitud (en 2 tramos)	L_A	23.5 m
Longitud (en 2 tramos)	L_B	26.0 m
Refuerzo longitudinal		8 alambres
	Diam	8.3 mm
Refuerzo espiral		3.2 mm
	L_1	50 mm
	L_2	100 mm
Banda de acero		1.6 x 100 mm
Placa de unión	Espesor	12 mm
	A	9 mm
	B	5.8 mm

Tabla 1 (cont.)

Momento flexionante	admisible	9.0 t-m
	último	18.0 t-m
Area de concreto (1)		684 cm ²
Area transformada (2)		716 cm ²
Momento de inercia	(1)	99,577 cm ⁴
	(2)	104,502 cm ⁴
Módulo de sección		5,225 cm ³
Presfuerzo efectivo		99 kg/cm ²
Carga máxima admisible		110 t
Peso unitario		178 kg/m

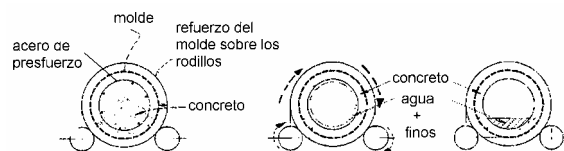


Fig 4. Esquema del proceso de compactación del concreto en pilotes centrifugados (Rodríguez, 1998)



Fig 5. Planta de centrifugado de pilotes (Koami, 1999)



Fig 6. Pilote centrifugado en Refinería Madero

4. HINCADO DE PILOTES

Los pilotes se hincaron utilizando un martillo hidráulico DKHI-7, con las características señaladas en la tabla 2; estos pilotes fueron hincados por una compañía coreana, con equipo de piloteado fabricado en ese país.

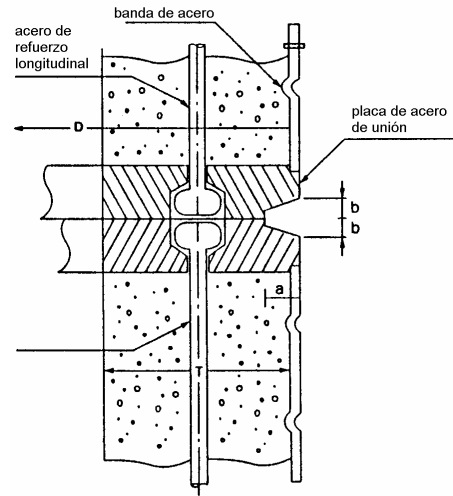


Fig 8. Detalle de unión con soldadura entre tramos

Tabla 2. Datos técnicos del martillo DKHI-7

Energía máxima	8.4 t-m
Altura de caída máxima	1.2 m
Altura de caída mínima	0.2 m
Frecuencia máxima	40 golpes/min
Peso del pistón	7 t
Peso del martillo	11 t
Presión hidráulica de operación	280 bar
Gasto hidráulico requerido	190 l/min

Los martillos hidráulicos son del tipo diferencial (fig 9): al subir la barra del pistón, la fuerza hidráulica YY empuja contra el pistón y al reaccionar contra el fondo del cilindro eleva la masa del martillo. Al bajar, la fuerza hidráulica YY es balanceada para igualar la fuerza ZZ. La fuerza hidráulica A en el área remanente es la fuerza neta que empuja al pistón hacia abajo. El área en donde actúa A es igual al área del vástago del pistón.

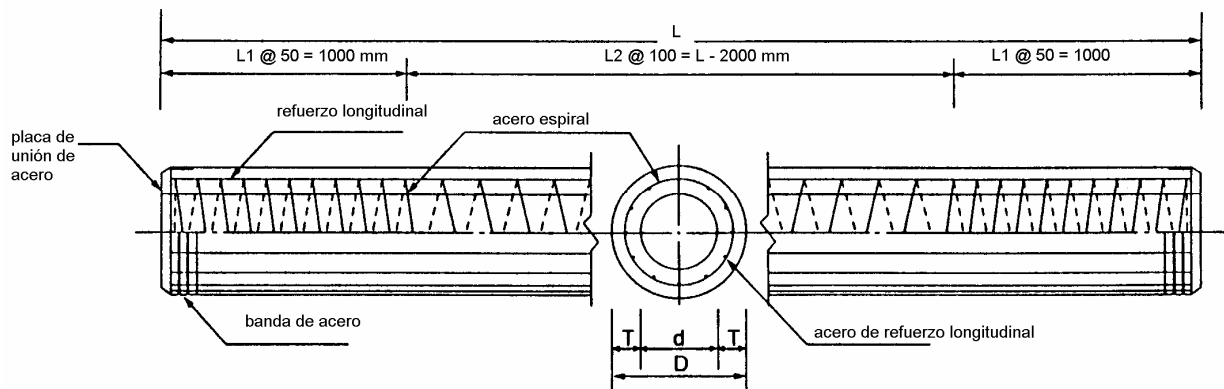


Fig 7. Dimensiones de los pilotes

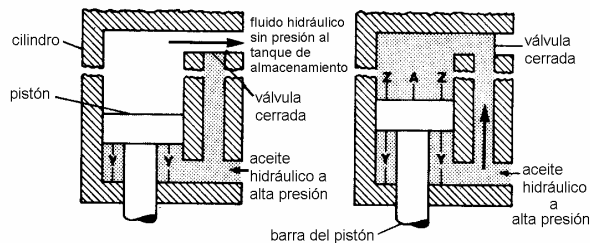


Fig 9. Principio de operación de un martillo hidráulico diferencial, Fuller (1983)

Debido a las características estructurales de los pilotes, se prefirió utilizar martillos hidráulicos, en vez de martillos diesel de acción sencilla (usados comúnmente en México), ya que para una energía equivalente, los equipos hidráulicos utilizan comparativamente mayores masas y menores alturas de caída, que los equipos diesel; de esta manera, se evita dañar la cabeza del pilote. En la fig 11 se muestra un aspecto del hincado de estos pilotes.

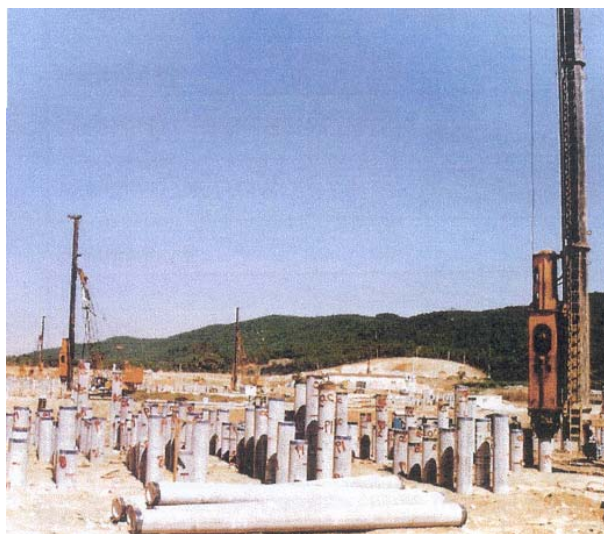


Fig 10. Hincado de pilotes centrifugados con martillo hidráulico

Todos los pilotes fueron hincados sin perforación previa ni chiflones de agua. En la fig 11 se muestran los registros de hincado de algunos. Se hace notar que los tiempos de hincado de pilotes, para las dos secciones, incluyendo soldadura de unión, variaron entre 15 y 20 minutos.

Los registros de hincado reportados corresponden tanto a pilotes de prueba y de reacción.

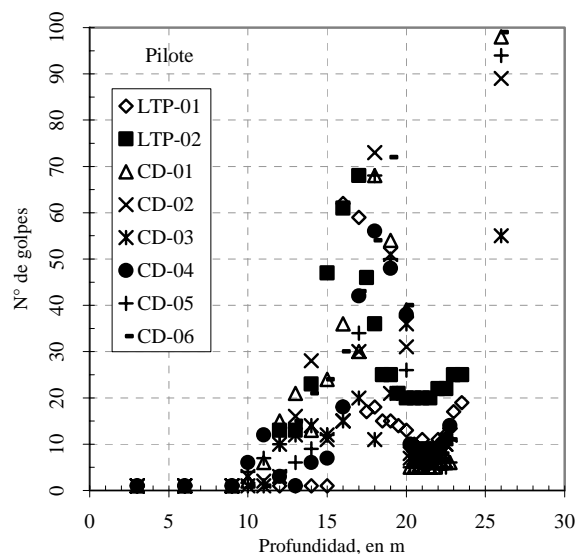


Fig 11. Hincado de pilotes; número de golpes vs. profundidad

5. PRUEBAS DE CARGA

Se realizaron varias pruebas de carga a los pilotes, ante diferentes solicitaciones, con el objeto de verificar la capacidad de carga de diseño, así como mostrar al propietario de la obra el comportamiento de los pilotes. La información detallada de todas las pruebas de carga se muestra en Paniagua (1999, 2000a, 2000b).

Las pruebas se realizaron de acuerdo con las normas mostradas en la tabla 3, con el procedimiento de carga controlada, aplicando incrementos de carga iguales, hasta que se alcanzara una velocidad de deformación mínima establecida (menor a 250 micras/hora) entre cada incremento.

Tabla 3. Normas aplicadas en la ejecución de las pruebas de carga en pilotes

Prueba	Norma ASTM
Compresión	D-1143
Tensión	D-3689
Lateral	D-3966
Compresión + lateral	D-3966

Las cargas a las que se sometieron los pilotes son las mostradas en la tabla 4, de acuerdo con los valores de diseño reportados por el proyectista y el diseñador geotécnico. Con base en estas cargas, se determinaron los incrementos de carga, utilizando 25 % de la carga

admisible, para la aplicación de las cargas y 25 % de la carga última, para la rama de descarga. En la misma tabla se muestran los sondeos cercanos a cada prueba.

Tabla 4. Cargas aplicadas en las pruebas de carga

Condición	Pilote	Sondeo	Carga admisible t	Carga última t
Compresión	LTP-01	6	60	250
	LTP-02	13		
Tensión	LTP-01		25	50
	LTP-02			
Tensión	LTP-03	109	35	70
Lateral	LTP-01		9	18
	LTP-02			
Combinada compresión lateral	LTP-04	3, 4	65	250
			6	18

Las pruebas de carga fueron llevadas a cabo en la zona conocida como *Planta de Coque*, dentro de la Refinería Madero, fig 12. Además, el contratista general llevó a cabo pruebas de hincado, en diversos lugares de esta zona. Todos estos pilotes fueron utilizados específicamente para este propósito.

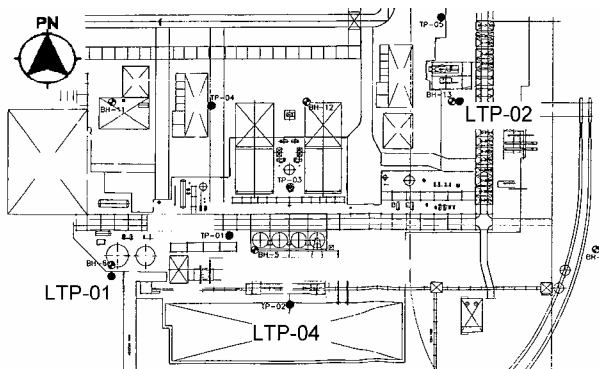


Fig 12. Planta general del Área de Coque y localización de pruebas de carga en pilotes

La configuración de las pruebas consistió en un pilote de prueba entre dos hileras de tres pilotes de reacción cada una, fig 13.

La deformación fue medida con tres procedimientos diferentes:

- Indicadores de carátula (micrómetros) -tres-, colocados a 120° alrededor del pilote, a distancia suficiente para evitar interferencia del sistema de reacción y los pilotes

- Escala graduada, con un alambre a tensión y un espejo
- Lecturas topográficas, en un punto de referencia conectado a la cabeza del pilote

La fuerza fue medida con el manómetro de la bomba del gato hidráulico. Tanto la bomba, el manómetro como el gato, fueron calibrados por la Comisión Federal de Electricidad, para tener lecturas precisas de la carga aplicada.

Asimismo, se colocaron dos manómetros en el sistema de la bomba; uno con un rango de 0-10,000 psi, para las pruebas de compresión. El otro, con un rango de 0-1,400 psi, para las pruebas de tensión y lateral. Ambos manómetros fueron calibrados.



Fig 13. Configuración del pilote de prueba y los de reacción, al inicio de los ensayos

Durante la prueba, el siguiente equipo de medición fue utilizado:

Tabla 5. Equipo de medición utilizado

Equipo	Capacidad / Precisión
Nivel topográfico	1 mm en la escala
Micrómetros	tensión y lateral
	compresión
Gato hidráulico*	300 ton / 6" de carrera
Bomba	10,000 psi / 1.5 %

*De acuerdo con la norma ASTM D-1143, el gato hidráulico cumplió con los requerimientos de la ANSI (American National Standards Institute) B30.1.

En las figs 14 a 17 se muestran las características generales del montaje de las diferentes pruebas.

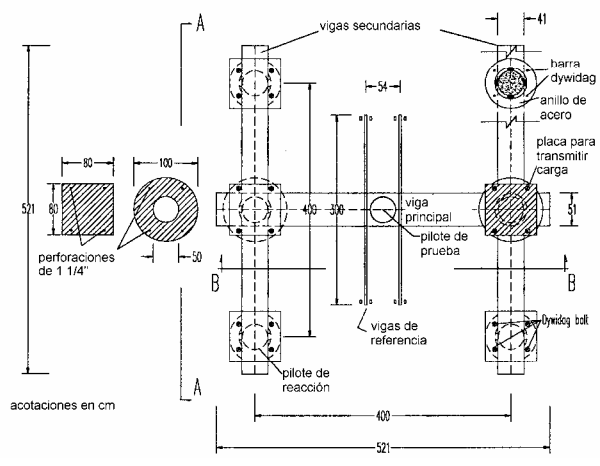


Fig 14. Prueba de carga de compresión

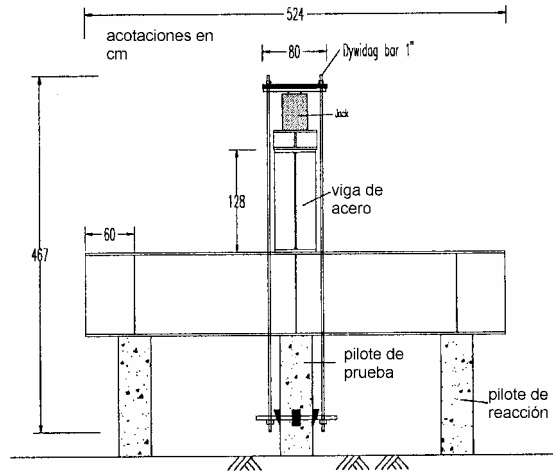


Fig 15. Prueba de carga de tensión



Fig 16. Prueba de carga lateral

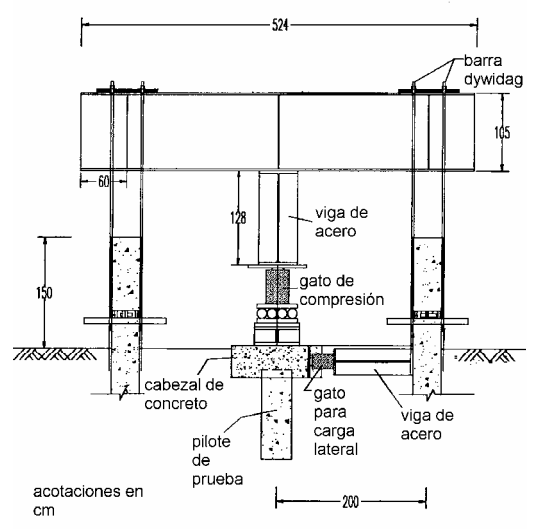


Fig. 17. Prueba de carga de compresión combinada con lateral

Los resultados de las pruebas de carga de compresión y tensión, que se muestran gráficamente en las figs 18 y 19, respectivamente, indicaron un comportamiento aceptable, superior a lo señalado en el informe geotécnico; probablemente el incremento en la carga esperada se deba a las bondades del procedimiento de hincado de pilote, en particular por la ausencia de perforación previa y el tipo de martillo piloteador.

Las pruebas de carga lateral, mostradas gráficamente en la fig 20, presentaron una falla estructural en los pilotes, antes de llegar a deformaciones importantes en el suelo, con un comportamiento de pilote “corto”. Este hecho se preveía, debido al refuerzo estructural del pilote, diseñado para cargas de compresión, principalmente.

La prueba de carga combinada de compresión y lateral, se llevó a cabo embebiendo la cabeza del pilote en un cabezal de concreto, cuadrada de 120 cm de lado y 100 cm de profundidad, simulando la losa que unirá la cabeza de todos los pilotes.

De esta manera, el comportamiento del pilote ante carga lateral llegó a valores satisfactorios para el diseño de las estructuras. Los resultados se consignan en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados de pruebas de carga en pilotes

Prueba		Diseño		Prueba de carga	
		Q _{adm}	Q _u	Q _{adm}	Q _u
compresión	LPT01	60	250	180	> 280
	LPT02				> 220
Tensión	LPT01	15	30	32	67.5
	LPT02 ⁽³⁾				> 43.7
	LPT03 ⁽¹⁾				94.5
lateral	LPT01 ⁽²⁾	9	18	6	15.75
	LPT02 ⁽²⁾				15.75
combinada compresión lateral	LPT04 ⁽⁴⁾	65	250	65	⁽⁵⁾
		6	18	10	25 ⁽²⁾

Notas

Q_u capacidad de carga última, en t
 Q_{adm} capacidad de carga admisible, en t

- (1) Deslizamiento por adherencia del concreto reforzado colocado en el interior
- (2) Falla estructural del pilote
- (3) Falla en la placa superior de acero del pilote
- (4) Con un cabezal de concreto en el pilote
- (5) Carga de compresión sostenida

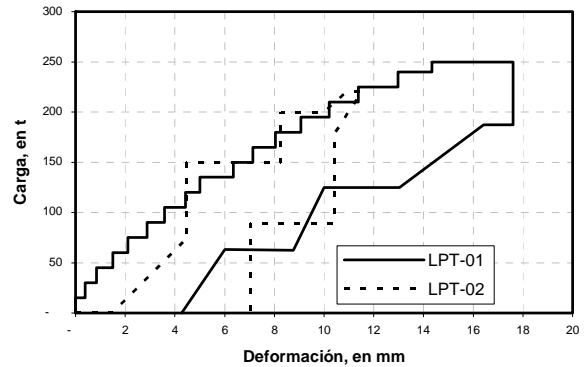


Fig 18. Curva esfuerzo-deformación, para pruebas de compresión

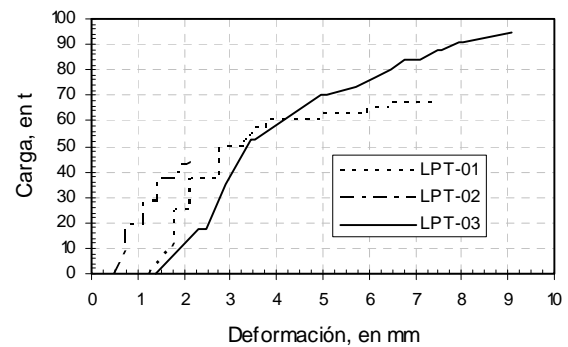


Fig 19. Curva esfuerzo-deformación, para pruebas de tensión

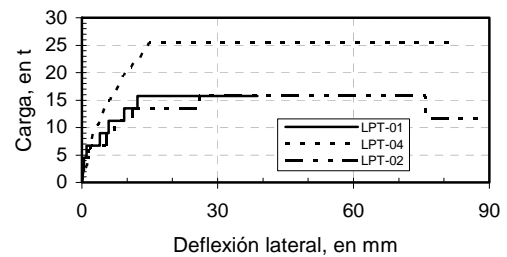


Fig 20. Curva esfuerzo-deflexión, para pruebas de carga lateral

6. CONCLUSIONES

Se muestran las características generales de los pilotes utilizados en la modernización de la Refinería Madero.

Se presenta el proceso de fabricación de los pilotes centrifugados y presforzados que se utilizaron. Este

procedimiento no se utiliza en México para la fabricación de pilotes en cimentaciones.

El hincado de pilotes se realizó utilizando equipos poco comunes en México; se observaron rendimientos de hincado superiores a los esperados con equipo convencional en nuestro país.

Los resultados de las pruebas de carga de compresión fueron superiores a lo esperado por el diseño geotécnico, en más de tres veces su valor.

Los resultados de las pruebas de tensión fueron superiores en casi el doble de lo esperado por el diseño geotécnico.

Los resultados de las pruebas laterales fueron menores a lo esperado, debido a la falla estructural del pilote; se llevó a cabo una prueba adicional, colocando un cabezal de concreto y combinando la prueba con carga de compresión sostenida. De esta manera, los resultados fueron satisfactorios.

Después de experimentar el uso de estos pilotes, es evidente que es necesario incrementar la investigación en la fabricación e hincado de pilotes, para que nuestra industria siga siendo competitiva a nivel internacional.

7. RECONOCIMIENTO

Las pruebas de carga fueron llevadas a cabo bajo la dirección del autor, cuando laboraba en la empresa *Construcción Especializada, S.A. de C.V.* En campo, las pruebas fueron realizadas por los Ings. Antonio Argueta y Jorge Sandoval.

REFERENCIAS

Dong Ah, 1999, PHC Pile Structural Characteristics. Korea.

Fuller F.M., 1983, Engineering of pile installations. McGraw-Hill, New York.

Koami, 1999, PHC Pile/Pole Manufacturing Plant. Small & Medium Plant Proposal. Korea Association of Machinery Industry, Korea.

Paniagua W.I., 1999, Pile load testing at Delayed Coker unit. Prepared for SK Engineering & Construcion Co., Ltd.

Paniagua W.I., 2000a, Pile load testing at Delayed Coker unit. Uplift test N° 3. Prepared for SK Engineering & Construcion Co., Ltd.

Paniagua W.I., 2000b, Pile load testing at Delayed Coker unit. Compression + lateral test N° 4. Prepared for SK Engineering & Construcion Co., Ltd.

Pilemer, 2002, DKH Hydraulic Hammer, Dong Kwang Heavy Industrial Co.

Rodriguez U., 1998, Estacas Premoldadas. Fundações. Teoria e prática, 2a ed. Editora Pini Ltda., Brasil.

Valverde H. y Aquino C., 1986, El subsuelo de la Refinería de Ciudad Madero. Simposio La Geotecnia en las Costas y el Mar, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.