

# Pruebas de carga axial y lateral para control y aseguramiento de calidad en pilas de la Terminal de Gas Licuado en Manzanillo, Colima

Walter Paniagua Z. y, Asael Elvira M.  
Pilotec, México  
Enrique Ibarra  
inGeum, México



## RESUMEN:

Se presentan las pruebas de carga en pilas de cimentación, a compresión y carga lateral en dos etapas, en dos tanques de almacenamiento de gas licuado, en la terminal de Manzanillo, Colima; primero, en la etapa de diseño (Control de Calidad, QC) y después en la etapa de construcción (Aseguramiento de Calidad, QA). Además se hace una comparativa entre los resultados de las dos etapas.

## ABSTRACT:

Results from axial and lateral load tests in drilled shafts are presented, for the foundation of two liquid natural gas tanks in Manzanillo, Colima Terminal; first, in the design stage (QC) and after during construction (QA). Besides, a comparison between results of the two stages is presented.

## 1 INTRODUCCIÓN

Desde el 2008 y hasta el año 2012, se lleva a cabo la construcción de la Terminal de Gas Licuado (LNG) en Manzanillo, estado de Colima. Dada la importancia de la obra, se consideró la pertinencia de verificar experimentalmente en una primera etapa las estimaciones teóricas de capacidad de carga realizadas para el cálculo de la cimentación, así como el procedimiento constructivo de las pilas de dos tanques pertenecientes al proyecto, por lo que se realizó el diseño y ejecución de 5 pruebas de carga axial a compresión sobre pilas de prueba construidas ex profeso, hasta 1500 t.

La segunda etapa de pruebas, se realizó en las pilas de cimentación que formarán parte de los apoyos definitivos de los tanques de almacenamiento. Las pruebas fueron de dos tipos: 6 pruebas de carga a compresión con capacidad de 950 t, y 6 pruebas de carga lateral con capacidad de 114 t.

Se comparan los resultados de ambas etapas, comentándose el impacto que tuvieron las pruebas de carga en el control de calidad (QC) y en el aseguramiento de calidad (QA) de la cimentación de los tanques.

### 1.1 Control de Calidad (QC) y Aseguramiento de la Calidad (QA).

El Control de la Calidad es el conjunto de propiedades y características de un producto o servicio que le dan la aptitud de satisfacer los requisitos expresados o tácitos (SMMS, 2001).

El Aseguramiento de la Calidad consiste en la puesta en marcha de los controles formalizados y la adaptación

de los controles independientes de supervisión para lograr el objetivo de la calidad (SMMS, 2001).

## 2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Dentro de las estructuras más importantes de esta obra de infraestructura, se contempla la construcción de dos tanques de almacenamiento de 92 m de diámetro (201 y 202), cuya cimentación se resolvió mediante pilas coladas *in situ*, de 120cm de diámetro y 18m de profundidad aproximadamente. En la Figura 1, se presenta una vista general del sitio; en la Figura 2, la planta tipo de los dos tanques, (WHESSOE 2008).



Figura 1. Localización general del sitio, cortesía Samsung Manzanillo

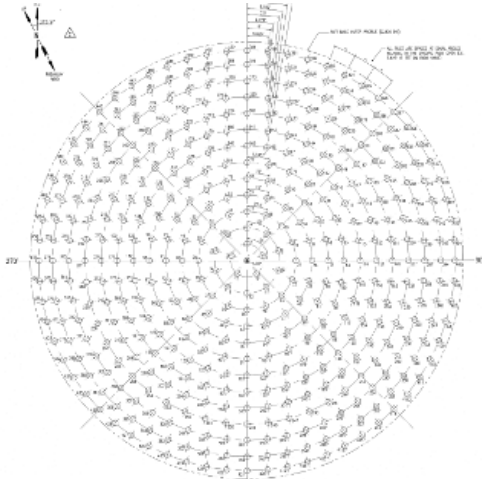


Figura 2. Planta tipo de tanques

### 2.1 Información Geotécnica del Sitio

La Comisión Federal de Electricidad realizó una campaña de exploración mediante sondeos de penetración estándar con recuperación de muestras, cuya planta de localización se muestra en la Figura 3. En general, las profundidades de estos sondeos oscilan entre 40m y 120m de profundidad, (CFE 2006).

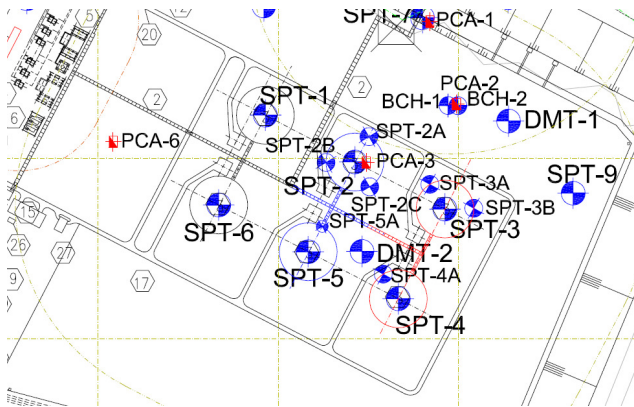


Figura 3. Localización de sondeos (CFE)

Para describir la estratigrafía del sitio, en la Figura 4, se muestran los primeros 19 m de uno de los sondeos SPT realizado al centro de uno de los tanques. De manera general, se observa que existen arenas finas sueltas hasta 1.8 m de profundidad, con número de golpes a la penetración estándar entre 2 y 6. Subyaciendo a la arena fina suelta, se encuentra una unidad de arena fina de color gris oscuro, de compacidad mediana, con número de golpes de la penetración estándar entre 23 y 30, que alcanza hasta 7m de profundidad. Finalmente, bajo la arena gris se encuentra una arena densa con más de 50 golpes de la penetración estándar que se extiende hasta la

profundidad máxima del sondeo, el NAF se localizó a 2.1 m en época de estiaje.

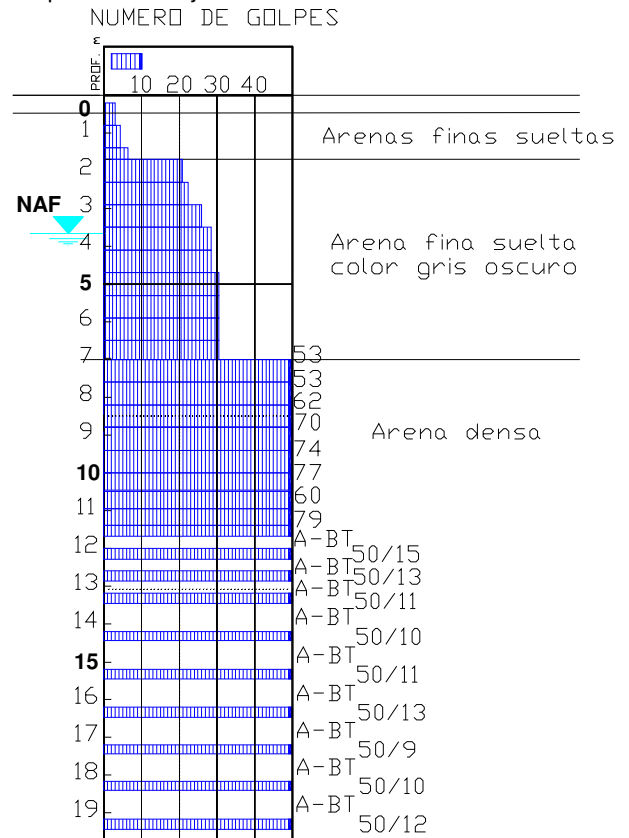


Figura 4. Sondeo SPT-2

### 2.2 Descripción de las pruebas

Se realizaron las pruebas de carga axial en compresión PLT-1 a PLT-5, en general se aplicaron cuatro ciclos de carga y descarga manteniendo la carga máxima para cada ciclo durante un intervalo variable entre una y seis horas. En las pruebas PLT-1 a PLT-3, para aplicar los incrementos de carga se siguió el criterio de alcanzar una velocidad de deformación igual o menor que 0.25mm/hr, de acuerdo con los lineamientos indicados en la norma ASTM D-1143, ASTM (1994). En las pruebas PLT-4 y PLT-5 se siguió el criterio indicado en las normas británicas ICE (ICE 1988).

La aplicación de cargas sobre las pilas exigió la construcción de un sistema de reacción con capacidad de 1500t, consistente en un arreglo de cuatro pilas de reacción adyacentes a la pila de prueba y dos vigas de reacción secundarias que se apoyaron sobre una viga de reacción principal, todas de acero estructural. La unión de las pilas de reacción a las vigas secundarias se realizó por medio de barras roscadas de alta resistencia (Dywidag) reaccionando contra un cubo de concreto colado y unido a las barras del armado principal de las pilas de reacción. Las pilas de reacción fueron de 120cm diámetro y 20m de longitud aproximada en las pruebas

PLT-1 y 2, y de 24m de longitud en las pruebas PLT-3 a 5, para contar con la resistencia suficiente por adherencia-fricción para anclar al sistema al aplicar la carga.

La aplicación de cargas sobre las pilas exigió la construcción de un sistema de reacción con capacidad de 1500t, consistente en un arreglo de cuatro pilas de reacción adyacentes a la pila de prueba y dos vigas de reacción secundarias que se apoyaron sobre una viga de reacción principal, todas de acero estructural en la Figura 5, se presenta el arreglo de pruebas. La unión de las pilas de reacción a las vigas secundarias se realizó por medio de barras roscadas de alta resistencia (Dywidag) reaccionando contra un cubo de concreto colado y unido a las barras del armado principal de las pilas de reacción.



Figura 5. Arreglo de pruebas de carga a compresión

### 2.3 Construcción de pilas de prueba y de reacción

En general, se inició con la ubicación y trazo referenciado del arreglo geométrico de las cuatro pilas de reacción y de la pila de prueba. La perforación se realizó con perforadora rotatoria. Las pilas de reacción tuvieron dimensiones nominales de 1.2 m de diámetro y 20 y 24 m de profundidad, mientras que las pilas de prueba se perforaron con diámetro de 1.2 m y profundidad de 20 m. En la Figura 6 se muestra la construcción de las pilas.

Una vez alcanzada la profundidad máxima de perforación de cada pila, el fondo se limpió con bote o bien utilizando un *air-lift*. Posteriormente, se colocó dentro de la perforación el armado.

El colado de todas las pilas se realizó con tubería tremie de conexión rápida, retirando tramos de tubería conforme el colado avanzó en la perforación. Con esta maniobra se evitó el agitado o movimientos ascendentes-descendentes bruscos, que usualmente se realizan en colados convencionales, con posibles daños al armado, o defectos en durante el colado. El concreto

que se empleó tanto para las pilas de reacción como para la pila de prueba fue de  $f'c=350$  kg/cm<sup>2</sup>.

Además se les realizaron pruebas de integridad a las pilas de prueba, con la finalidad de verificar la integridad del concreto en cada uno de los elementos. Las pruebas fueron realizadas con el equipo PIT (Paniagua et al, 2010).



Figura 6. Construcción de pilas

## 3 PRUEBAS DE CARGA PARA CONTROL DE CALIDAD

### 3.1 Pruebas de carga en la primera etapa

Previo al inicio de la construcción de los tanques se hicieron cinco pruebas que reconocemos aquí como pruebas PLT-1, PLT-2, PLT-3, PLT-4 y PLT-5 con el objeto de definir los parámetros de diseño y procedimiento constructivo óptimos para la construcción de las cimentaciones; en la Figura 7, se muestra la localización de las pruebas para los dos tanques.

### 3.2 Comparación de las pruebas PLT-1 a PLT-5

En la Figura 8 se muestran los resultados conjuntos carga-desplazamiento de las cinco pruebas de carga PLT-1, PLT-2, PLT-3, PLT-4 y PLT-5, PILOTEC (2008).

Además en esta etapa, también se le realizaron pruebas de integridad a las pilas de prueba, con la finalidad de verificar la integridad del concreto en cada uno de los elementos. Las pruebas fueron realizadas con el equipo PIT.

De la comparación de los resultados se puede afirmar que, en general, las curvas PLT-2 a PLT-5 son similares, mostrando el mismo desplazamiento total aproximadamente, al final de los cuatro ciclos de carga.

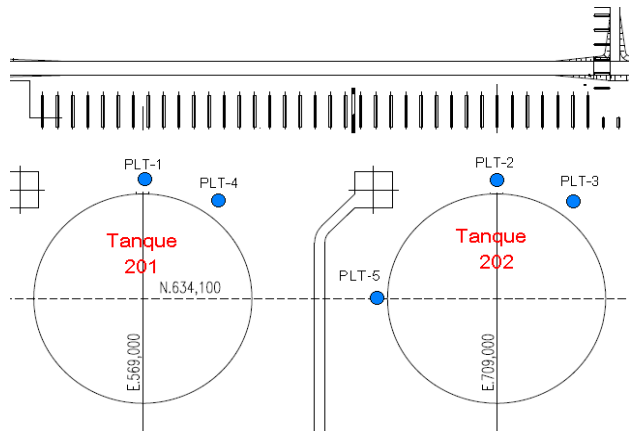


Figura 7. Localización de las pruebas en pilas Ex-Profeso

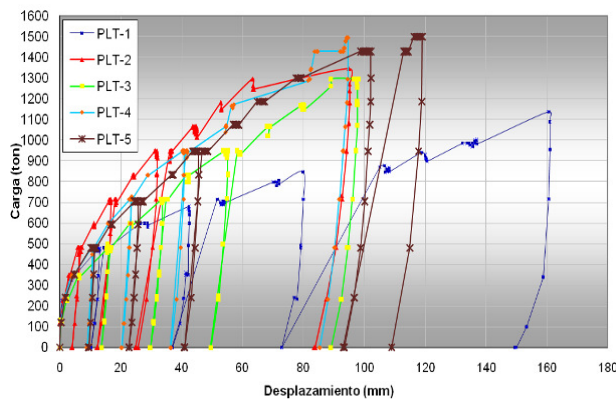


Figura 8. Curvas carga-desplazamiento pruebas PLT-1 a 5

La curva PLT-1 muestra un comportamiento diferente, con mayores desplazamientos en cada ciclo.

Se hace notar que durante la construcción de esta pila se observaron problemas en la colocación del concreto; después de efectuar una prueba de integridad, se evidenció la presencia de azolve y concreto contaminado en la punta de la pila, lo cual se reflejó en los grandes desplazamientos mencionados.

La capacidad por fuste es similar en los cinco casos (del orden de 300 a 500t), pero la punta trabaja con condiciones diferentes, sobre todo para la LTP1, debido a lo indicado anteriormente, Tabla 1.

Las rigideces iniciales en las ramas de carga y descarga son similares en todos los ciclos de las pruebas PLT-2, PLT-4 y PLT-3, aunque la prueba PLT-5 tiene valores mayores a las otras pruebas, Tabla 2.

Tabla 1, Capacidad de carga estimada por fricción y por punta

Prueba	Fricción (t)	Punta (t)	Total (t)
PLT-1	360	770	1130
PLT-2	500	846	1346
PLT-3	300	1000	1300
PLT-4	380	1116	1496

PLT-5	420	1080	1500
-------	-----	------	------

Tabla 2. Resultados de las 5 pruebas

Prueba	Carga Máx, (t)	Desplazamiento o en el 4° ciclo, (mm)	Desplazamiento o máximo Acumulado, (mm)	K en carga, en 4° Ciclo, (t/cm)
PLT-1	1129	114.31	150.36	258
PLT-2	1346	60.2	84.6	864
PLT-3	1301	43.2	91.7	948
PLT-4	1496	49.7	85.3	968
PLT-5	1428	59.65	100.65	1415

#### 4 PRUEBAS DE CARGA PARA ASEGURAMIENTO DE CALIDAD

##### 4.1 Pruebas de carga a compresión en la segunda etapa (construcción)

Se realizaron seis pruebas de carga axial a compresión y seis laterales, en la Tabla 3, se presentan las pruebas realizadas.

Tabla 3. Pruebas en tanques 201 y 202

Tanque	Prueba a Compresión	Prueba Lateral
201	Comp-A-201	Lat-A-201
	Comp-B-201	Lat-B-201
	Comp-C-201	Lat-C-201
202	Comp-A-202	Lat-A-202
	Comp-B-202	Lat-B-202
	Comp-C-202	Lat-C-202

La carga máxima de las pruebas a compresión fue de 950 ton; la carga máxima para las pruebas laterales fue de 114 ton, en la Figura 9, se muestran las localizaciones de las pruebas para los dos tanques.

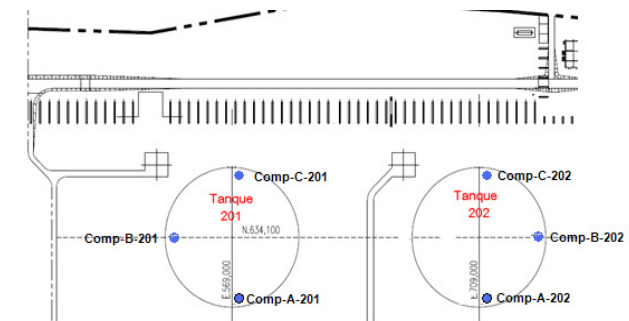


Figura 9. Localización de pruebas en pilas de producción

##### 4.2 Descripción de las pruebas



Una vez definidos los parámetros de diseño y que se inició la construcción de la cimentación a base de pilas de los tanques, se realizaron las pruebas de carga axial en compresión y lateral en el tanque 201 y 202 en los sitios denominados Comp-A, Comp-B y Comp-C para los dos tipos de pruebas; en compresión axial hasta 950 ton y en carga lateral hasta 114 ton en los mismos sitios.

En general se aplicaron dos ciclos de carga y descarga manteniendo la carga máxima para cada ciclo durante seis horas.

En las pruebas a compresión, para aplicar los incrementos de carga se siguió el criterio indicado en las normas británicas del ICE (ICE 1988).

La aplicación de cargas sobre las pilas de las pruebas a compresión exigió la construcción de un sistema de reacción con capacidad de 1500t, consistente en un arreglo de seis pilas de reacción adyacentes a la pila de prueba y tres vigas de reacción secundarias, fabricadas de concreto y en algunos casos de acero, y apoyadas sobre una viga principal también fabricada de concreto (Fig. 10).

La unión de las pilas de reacción a las vigas secundarias se realizó por medio de barras roscadas de alta resistencia (Dywidag) reaccionando contra un cubo de concreto colado y unido a las barras del armado principal de las pilas de reacción. Las pilas de reacción fueron de 120cm diámetro y 20 m de longitud.

#### 4.3 Comparación de las pruebas PLT-1 a PLT-5.

En la Figura 11, se presentan las gráficas carga-desplazamientos de las pruebas para los tanques 201 y 202.



Figura 10. Sistema de reacción para las pruebas de compresión axial

En la Tabla 4 se muestra la capacidad de carga por fuste, que es similar en los seis casos (del orden de 250 a 400t), pero la punta trabaja con condiciones diferentes.

Por su parte, en la Tabla 5, se presenta la comparación de resultados para el segundo ciclo de carga de todas las pruebas, (PILOTEC 2009).

Tabla 4. Capacidad de carga estimada por fricción y por punta

Prueba	Fricción (t)	Punta (t)	Total (t)
Comp-A-201	290	660	950
Comp-B-201	400	550	950
Comp-C-201	250	700	950
Comp-A-202	300	650	950
Comp-B-202	330	620	950
Comp-C-202	280	670	950

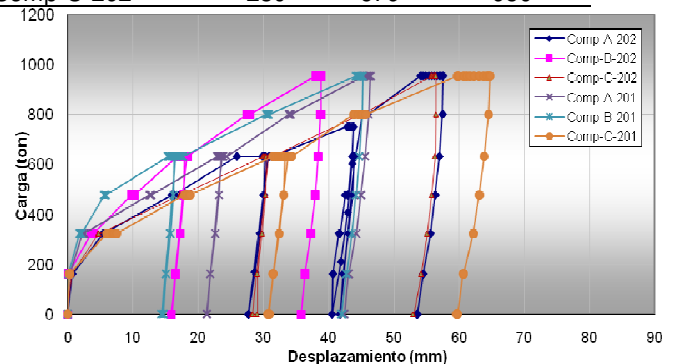


Figura 11. Gráficas carga-desplazamiento de pruebas a compresión en tanques 201 y 202.

Tabla 5. Comparación de resultados de las 6 pruebas.

Prueba	Carga máx. (t)	Despl. en el 2° ciclo, (mm)	Despl. máximo acumulado, (mm)	K en carga, en el 2° ciclo, (t/cm)
Comp-A-201	955	22.61	46.43	909
Comp-B-201	955	28.56	45.24	1015
Comp-C-201	955	34.44	64.74	737
Comp-A-202	955	11.90	55.09	840
Comp-B-202	955	20.65	39.00	871
Comp-C-202	955	25.25	56.45	1200

#### 4.4 Pruebas de carga laterales en la etapa de construcción

En los mismos sitios de las pruebas a compresión de los dos tanques, se realizaron las pruebas de carga laterales hasta 114 ton. En general se aplicaron dos ciclos de carga y descarga manteniendo la carga máxima para cada ciclo durante seis horas. En las pruebas, para aplicar los incrementos de carga se siguió el criterio indicado en las normas británicas del ICE (ICE 1988).

El sistema fue formado por dos pilas definitivas adyacentes, que trabajaron lateralmente, para proporcionar la capacidad de reacción apropiada; la carga fue aplicada con un gato hidráulico y una vigueta de acero que hizo reacción entre la pila de prueba y una viga de acero colocada de tal manera que transmitió la fuerza necesaria hacia las pilas adyacentes que soportaron la carga. En la Figura 12, se muestra el arreglo general de prueba. En la Figura 13, se presentan las gráficas carga-desplazamientos de las pruebas laterales para los tanques 201 y 202.

Por su parte, en la Tabla 6, se presenta la comparación de resultados para el segundo ciclo de carga de todas las pruebas, (PILOTEC 2009).



Figura 12. Arreglo general de prueba lateral

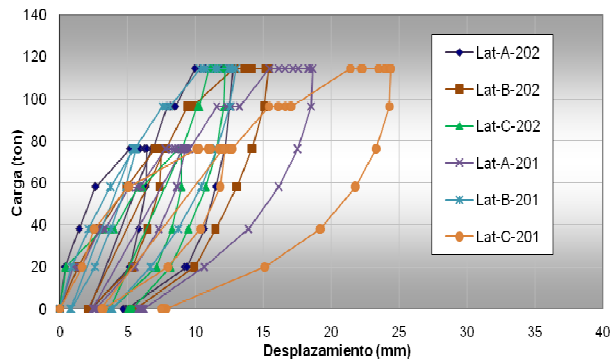


Figura 13. Gráficas carga-desplazamiento de pruebas laterales en tanque 201 y 202

Tabla 6. Comparación de resultados de las 6 pruebas

Prueba	Carga máx., (t)	Desplazamiento en el 2° Ciclo, (mm)	Desplazamiento máximo acumulado, (mm)	K en carga en el 2° ciclo, (t/cm)
Lat-A-201	114	8.00	17.56	42.00
Lat-B-201	114	7.00	12.53	50.00
Lat-C-201	114	12.29	24.35	30.00
Lat-A-202	114	6.38	12.66	35.00
Lat-B-202	114	7.77	15.29	26.00
Lat-C-202	114	3.18	12.14	76.00

## 5 COMENTARIOS FINALES

Se realizaron cinco pruebas de carga a compresión para definir los parámetros de diseño y el procedimiento constructivo de la cimentación de los tanques, mediante los resultados obtenidos de las mismas.

Posteriormente, en la etapa de construcción, se realizaron seis pruebas en cada tanque (tres a compresión y tres laterales), con la finalidad de comparar resultados, con los obtenidos con las pruebas en la primera etapa, previamente ejecutadas.



Figura 14. Avance de los trabajos en Mayo de 2010, cortesía Samsung.Manzanillo.

Comparando los resultados de las pruebas a compresión, se puede observar que los desplazamientos de las pilas de producción sometidas a una carga de 955 ton, fueron del orden de 50 mm promedio, mientras que los resultados obtenidos en las pruebas de carga realizadas en la etapa de diseño, a una carga de 950 ton, presentaron desplazamientos del orden de 58 mm promedio.

Se concluye que las pruebas de carga en pilas son de gran utilidad para el control y aseguramiento de la calidad, ya que permite determinar un diseño y procedimiento constructivo óptimos, lo cual deriva en el uso eficiente de los recursos del proyecto, en tiempo de ejecución, calidad de los trabajos y seguridad. En la fig. 14, se muestra el avance de los trabajos en mayo de 2010.

#### RECONOCIMIENTO

Los ingenieros Juan Carlos Moreno Juárez y José Luis González Herrera participaron en la ejecución de las pruebas de carga. Las pilas de prueba y reacción fueron construidas por Ingeomex y Cimentaciones Integrales, en la primera etapa; en la segunda, por Rivera Construcciones. El ingeniero Diego Orozco proporcionó las fotografías actualizadas del proyecto.

#### REFERENCIAS

- ASTM (1994) "Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load". American Standards for Testing and Materials, D-1143.
- CFE (2006) "Estudio Geotécnico para la Terminal de Gas Natural Licuado". CFE, Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, Subgerencia de Geotecnia y Materiales.
- ICE (1988) "Static Load Testing of Piles". Institution of Civil Engineers, Specification for piling, TTL, London.
- Paniagua W., Ibarra E., Elvira A., Rangel J.L., González J.L. (2010) "Discontinuidades e irregularidades en pilas de cimentación, detectadas con pruebas de integridad". XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Acapulco, México.
- PILOTEC (2008) "Pruebas de carga axial en pilas de prueba PLT-1, PLT-2, PLT-3, PLT-4 y PLT-5". Informe preparado para Samsung Manzanillo.
- PILOTEC (2009) "Pruebas de carga axial y lateral en pilas de producción en tanques 201 y 202". Informe preparado para Samsung Manzanillo.
- SMMS (2001). "Manual de Cimentaciones Profundas". Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C. Capítulo 8 "Control de Calidad", p. 352-353.
- WHESSOE (2008) "Manzanillo LNG Terminal Project,