

# Pruebas de carga estática en pilotes tubulares, para un puente vehicular en la zona costera de Campeche

Walter PANIAGUA<sup>a</sup> Asael ELVIRA<sup>a</sup> Claudia PINEDA<sup>a</sup>  
Erika VALLE<sup>a</sup> Cecilia HERNÁNDEZ<sup>a</sup>  
<sup>a</sup>*Pilotec, S.A. de C.V.*

**Resumen.** Se presentan los resultados de nueve pruebas de carga estática, en ocho pilotes tubulares, distribuidas a lo largo de los tres kilómetros de un puente vehicular en la zona costera de Campeche, en el Golfo de México; el proyecto se caracteriza por las variaciones en la estratigrafía y en la profundidad del lecho marino, con tirantes de agua entre 6 y 16 m aproximadamente. De los pilotes ensayados, siete están desplantados en el lecho marino y uno en la zona de playa. Además de los resultados de las pruebas, se describe el proceso constructivo y la solución para el montaje del equipo para realizar pruebas de carga en el mar.

**Palabras Clave.** Pilotes tubulares, hincado de pilotes, pruebas de carga estática.

## 1. Introducción

Se describen los resultados de las pruebas de carga estática a compresión realizadas en pilotes hincados en el mar, para un puente de más de 3 km de longitud, en las costas del golfo de México. Como parte del programa de control y aseguramiento de calidad, se realizaron 9 pruebas, de las cuales en este artículo se presenta el procedimiento detallado de una prueba, ya que el resto son similares, en esencia. Los resultados de las pruebas se presentan al final del artículo, así como una comparación de los resultados de todas las pruebas.

## 2. Descripción del proyecto

### 2.1. Características generales del proyecto

El puente tiene una longitud entre ejes extremos de 3,284 m aproximadamente, con una rasante que se eleva hasta 15.0 m por encima del nivel de aguas máximas. En sección transversal, tendrá un ancho total de 14.00 m, para alojar dos carriles, acotamientos y banquetas.

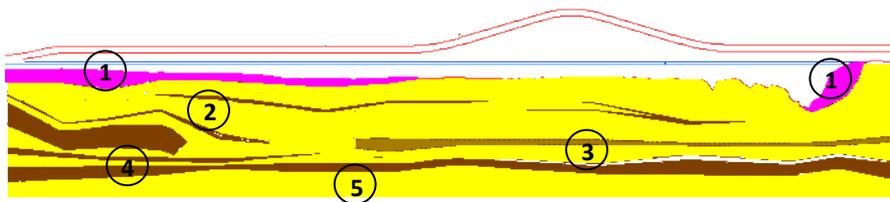
El proyecto cuenta con un total de 74 apoyos, con diferentes arreglos de 7, 8 y 10 pilotes cada uno; 72 apoyos están cimentados en el lecho marino y dos en la zona de playa, uno a cada extremo del puente, denominados caballetes. La distribución de cada uno de los apoyos se describe en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Distribución de pilotes bajo cada apoyo.

Numero de pilotes en cada apoyo	Diámetro de pilotes, m	Apoyo N°
7	1.20	2 al 37, 57 al 64, 68 al 73, caballete 1 y 74
8	1.50	65 al 67
10	1.20	38 al 56

## 2.2. Condiciones geotécnicas del sitio

Se realizaron 3 campañas de exploración [1], la última con 17 sondeos, con profundidades que alcanzaron entre 39.00 m y 43.65 m; las técnicas de exploración utilizadas fueron como eléctrico, penetración estándar y obtención de muestras inalteradas con tubo Shelby. La variación de la estratigrafía en los más de 3 km de longitud del puente se observa en la Figura 1.



**Figura 1.** Variación de la estratigrafía en la longitud del puente.

La estratigrafía se divide en 5 estratos principales que se describen a continuación:

**Tabla 2.** Descripción estratigráfica de la zona del puente

Unidad	Prof., m	Descripción
N/A	0.00-7.20	Plataforma y tirante de agua.
1	7.20-9.00	Arena arcillosa y arcilla arenosa con conchillas, gris claro, en estado suelto a medianamente compacto.
2	9.00-14.40	Arcilla con contenido variable de arena, grumos y conchillas, color gris claro, de consistencia firme a dura.
3	14.40-25.80	Arcilla con arena, grumos y gravillas localmente gris claro y café verdoso, de consistencia firme a dura, con número de golpes SPT entre 11 y más de 50.
4	25.80-39.00	Arcilla con arena, grumos y gravillas, color gris claro y café verdoso, de consistencia firme a dura, con lentes de limo café claro.
5	39.00-42.23	Arena limo-arcillosa con gravillas y grumos aislados, café verdoso y café claro, muy compacta, con número de golpes SPT de más de 50.

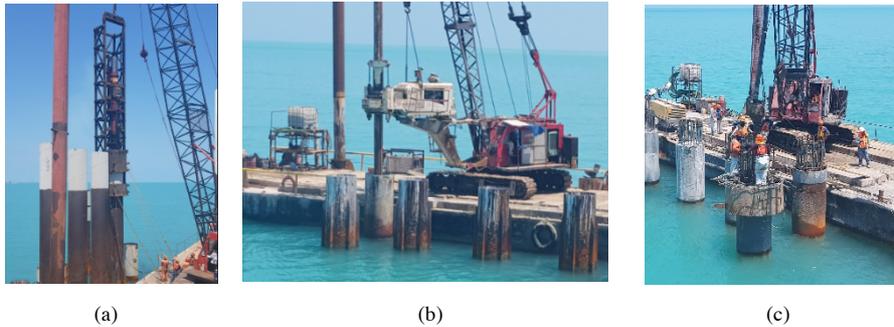
## 2.3. Características de la cimentación

Los pilotes son de tubo de acero de 1.20 y 1.50 m de diámetro, fabricados a partir de placa de acero de  $\frac{3}{4}$ "", rolada y soldada con costura helicoidal; el tubo de acero se hincó a golpes; posteriormente, se perforaron 8 m por debajo del lecho marino y se colocó concreto hidráulico y acero de refuerzo, para su conexión con el cabezal. Todos los apoyos tienen pilotes verticales, a excepción del apoyo 67 que tiene pilotes con una inclinación de 3 grados.

Los pilotes tuvieron longitudes máximas de 35.00 m, en función de la profundidad del lecho marino y del empotramiento en el suelo, el cual varía entre 25.00 m y 33.00 m.

#### 2.4. Procedimiento constructivo de la cimentación

Los tubos de acero fueron colocados en el punto de hincado por peso propio; posteriormente se hincaron en el suelo por medio de un martillo diesel de 225 kJ, esto hasta que se alcanzó la profundidad de proyecto o siguiendo un criterio de suspensión de hincado, de acuerdo al número de golpes necesarios para penetrar una longitud determinada (5 golpes/pulgada). En la Figura 2, se muestra el proceso de construcción de los pilotes, (a) hincado de los tubos de acero, (b) perforación y extracción de suelo en el interior de los tubos y (c) colado con concreto, utilizando bomba. De acuerdo con el proyecto, la profundidad perforada es menor a la longitud total del tubo, debido a que se proyectó conservar una columna de suelo en el interior, la cual aporta fuerza de fricción entre el suelo y las paredes del tubo, aumentando la capacidad portante del pilote.



**Figura 2.** Proceso constructivo de los pilotes

### 3. Descripción de las pruebas de carga estática

Los elementos de las pruebas de carga consistieron en: un sistema de reacción, formado por una estructura metálica; equipo hidráulico para la aplicación de carga de 1000 t; equipo electrónico y mecánico para registrar los movimientos en la cabeza del pilote. Como elementos de reacción, se utilizaron pilotes adyacentes, que trabajaron a tensión, durante el desarrollo de la prueba.

Para transmitir la carga a los pilotes de reacción, en la cabeza de los pilotes se construyeron cubos de concreto, que fueron un elemento intermedio entre el sistema de reacción y los pilotes. Sobre los pilotes de prueba, se construyó un cabezal de concreto, sobre el que se colocaron placas de acero para apoyar los cilindros hidráulicos de doble acción y hacer la correcta distribución de esfuerzos. Los cilindros se conectaron a una bomba hidráulica, el sistema tuvo una capacidad 30% mayor al de la carga de prueba, como parte de las medidas de seguridad para la ejecución del ensaye. Para medir la carga en la cabeza del pilote, se utilizaron celdas de carga, Figura 3.



**Figura 3.** Sistema de cilindros hidráulicos y celdas de carga

El marco de reacción estuvo formado con vigas de acero de sección rectangular de 9 y 5 m de longitud y de 1.70 y 1.90 m de peralte con un ancho de 0.60 m; se colocaron dos o tres vigas, de acuerdo con el tipo de apoyo, teniendo un peso promedio de 30 t, apoyadas sobre el cabezal.

Se utilizaron barras para la transferencia de carga, de acero de alta resistencia, roscadas en toda la longitud, por medio de las cuales se rigidizó el marco de reacción y se sujetó a los cubos de concreto. Una vez que se inició la aplicación de la carga, las barras funcionaron como elemento restrictivo al marco de reacción, provocando que el empuje de los cilindros hidráulicos actuara de forma inversa, haciendo que el pilote se desplazara penetrando en el suelo o deformándose.

Para la medición de desplazamientos en la cabeza del pilote, se utilizaron indicadores de carátula, apoyados en un marco de referencia. Se colocaron 3 indicadores apoyando el vástago en el cabezal de concreto, distribuidos  $120^\circ$  entre sí; la resolución de cada instrumento fue de 0.001 de pulgada, con carrera del vástago de 2 pulgadas. Los indicadores se sujetaron por medio de bases magnéticas a perfiles de acero de sección cuadrada, anclados a pilotes adyacentes a los pilotes de prueba y se colocaron paralelos entre sí a dos flancos del cabezal. La fijación de estos perfiles se realizó en uno de los extremos de cada sección, permitiendo la libre deformación por cambios de temperatura. Las mediciones se realizaron de forma directa, leyendo el desplazamiento en cada instrumento posterior a la aplicación de cada incremento de carga; debido a que el efecto del viento no pudo ser restringido, se estableció un criterio para la medición de los desplazamientos, el cual consistió en tomar como válida la lectura superior que marcaba la aguja en el indicador de caratula en cada de registro, Figura 5.

Además se colocó una escala graduada con resolución de 1 mm, con el fin de contar con redundancia en las mediciones, la cual se leyó por medio de un hilo piano y un espejo, para evitar errores de paralelismo, Figura 6.



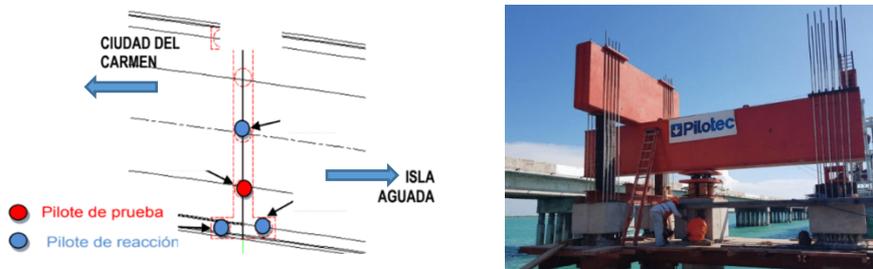
**Figura 5.** Sistema de medición por medio de indicadores de carátula



**Figura 6.** Sistema de medición por medio de escala graduada y espejo

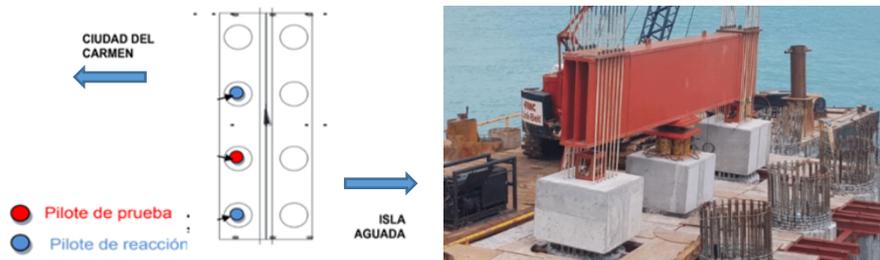
En general, se utilizaron dos arreglos distintos dependiendo del tipo de apoyo:

*Apoyo tipo 1 (7 pilotes);* se utilizaron tres pilotes de reacción, Figura 7.



**Figura 7.** Arreglo de marco de reacción en apoyo tipo 1.

*Apoyo tipo 2 (8 o 10 pilotes);* se utilizaron dos pilotes de reacción, Figura 8.



**Figura 8.** Arreglo de marco de reacción en apoyo tipo 2.

#### 4. Condiciones de montaje de pruebas de carga estática

##### 4.1. Retos para programar el montaje y la ejecución

**Ubicación geográfica y logística de las pruebas.** Dadas las condiciones del sitio donde se construyó el puente, entre la Laguna de Términos y el Golfo de México, el 90% de los trabajos de construcción se realizaron empleando plataformas de trabajo autoelevables y de servicio flotantes, empujadores y botes. Adicionalmente, las actividades de la campaña de pruebas de carga estática se programaron en combinación con la

construcción de los pilotes, por lo que el ciclo de los trabajos iniciaba con la construcción de cubos y terminaba con el retiro de la estructura de reacción.

**Disposición del equipo de montaje.** De acuerdo a la logística y procedimientos de construcción del puente en general, el equipo empleado para trabajos de hincado, perforación y colado de pilotes, fue el mismo que se destinó para el montaje de la estructura de reacción en las diversas pruebas de carga; específicamente, se utilizó una grúa mecánica de 60 t de capacidad, con 18 m de pluma y una plataforma flotante con capacidad total para 600 t; además, se utilizaron un par de empujadores para posicionar la plataforma. La inclusión de los tiempos de ejecución de cada prueba de carga, al programa de trabajo original, postergaron los trabajos de hincado, perforación y colado de pilotes por lo menos una semana después de cada prueba, en total 9 pruebas.

**Condición climática.** Una de las principales complicaciones para el montaje y la ejecución de las pruebas, fueron las horas efectivas de trabajo, ya que al emplear plataformas flotantes, el clima fue un factor determinante. En la actualidad, se cuenta con sistemas de predicción climatológica, que permiten tener una aproximación en tiempo de cuando sucederán eventos como el incremento del oleaje, las rachas de viento y precipitación pluvial, etc.; por tanto, los trabajos se calendarizaron empleando estas herramientas; no obstante, se requirió de autorización al inicio de cada jornada, para que cada actividad se realizara, atendiendo al protocolo de seguridad laboral. La duración de un ciclo de ejecución de prueba fue de entre 5 y 7 días, mientras que el intervalo en ejecución entre una y otra llegó a ser hasta de 40 días.

#### *4.2. Dificultades técnicas para la ejecución de las pruebas*

**Colocación de marco de referencia.** Dado que los apoyos contiguos al sitio de las pruebas tenían una separación entre sí de por lo menos 45.00 m, anclar el marco de referencia a uno de estos no fue viable; por tanto se optó por sujetar el marco por medio de soldadura a pilotes adyacentes al pilote de prueba dentro del mismo apoyo. Se utilizaron tirantes de varilla y soleras para rigidizar en lo posible el elemento, actividad que empleó el mayor tiempo durante el montaje.

**Plataforma de trabajo.** Debido a la condición del área de la obra y la ubicación de los sitios de prueba al interior de la Laguna de Términos, fue necesario construir una plataforma de madera y marcos de acero adosada a los pilotes circundantes al pilote de prueba, a esta plataforma se podía acceder solo por medio de una escalera metálica que hacía las veces de puente entre los pilotes y la plataforma flotante en la que se encontraba la grúa, y donde se colocaban los instrumentos electrónicos de procesamiento de información, así como piezas metálicas auxiliares para el montaje de la estructura de reacción, equipos de generación de energía y de iluminación. Durante el transcurso de cada jornada de trabajo el nivel de la marea cambiaba, por lo cual la escalera – puente, debía ser reubicada varias veces al día.

**Toma de lecturas y mediciones.** La plataforma de madera se construyó dejando un metro de ancho, por lo que, por seguridad solo podía permanecer una persona a la vez en ella. Para hacer la toma de lecturas en intervalos de tiempo en cada incremento de carga, fue necesario acceder a la plataforma fija y regresar a la plataforma flotante tantas veces

como intervalos se registraron, tarea que requirió un mayor esfuerzo por parte del personal técnico de ejecución de prueba de carga.

## 5. Resultados de las pruebas

**Interpretación de pruebas de carga.** En la Tabla 3 se presentan los resultados generales de las nueve pruebas de carga. Se hace notar que la carga útil para cada pilote (667 t) se dedujo a partir del parámetro fijado por el propietario del proyecto, que fue la carga máxima de la prueba (1000 t).

En la Figura 9, se presentan las gráficas carga-desplazamiento de los registros obtenidos, para todas las pruebas realizadas; asimismo, se utilizó el criterio de Davisson para la obtención de la carga última ( $Q_u$ ). Se advierte que la carga última obtenida con el método de Davisson, resulta más conservadora que la carga última obtenida en campo.

Tabla 3. Resultados de pruebas de carga [2]

Prueba	Apoyo	Longitud (m)	Diámetro (m)	Qmax (t)	Dmax (mm)	Qu (t) Davisson
1*	73	32.90	1.50	963	36.96	850
2	28	28.02	1.20	875	64.00	675
3	32	25.02	1.20	828	82.00	625
4	37	25.00	1.20	730	57.70	625
5	67	31.96	1.50	533	65.00	500
6	43	25.00	1.20	702	61.00	613
7	67	31.96	1.50	700	55.00	600
8	67	31.96	1.50	1000	28.00	925
9	58	25.90	1.20	533	56.00	500

\*Prueba realizada en zona de playa

Qmax Carga máxima medida

Dmax Desplazamiento máximo medido

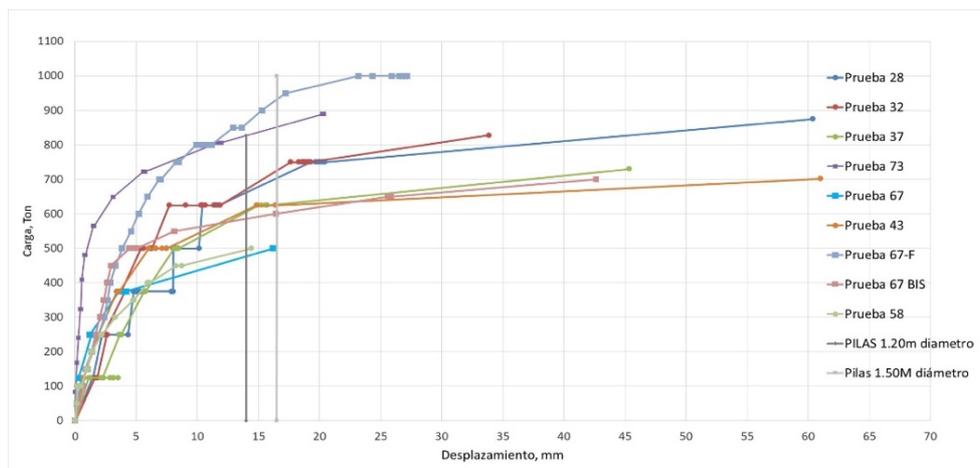
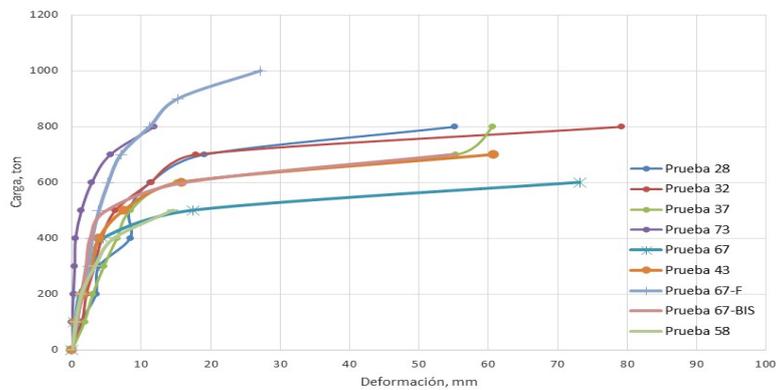


Figura 9. Determinación de la carga última  $Q_u$ , por el método de Davisson.

Se observa que el sistema suelo-pilote, en general, presenta un comportamiento similar para cada una de las pruebas, independientemente de la longitud de hincado del tubo y de su diámetro, lo cual indica que el procedimiento constructivo del pilote con el tapón de suelo y una sección de concreto, tienen un comportamiento similar, sin ser determinante las condiciones geotécnicas del lugar.

**Comparativa de pruebas en diferentes condiciones.** En la Figura 10, se muestra una gráfica con desplazamientos normalizados a cada incremento de 200 t de carga. Las pruebas 28, 32, 37, 43, 67, 67-BIS y 58, presentan un comportamiento similar elasto-plástico, mientras que las pruebas 67-F y 73 (esta última realizada en zona de playa), presentaron una tendencia de comportamiento elástico similar entre sí.



**Figura 10.** Carga normalizada para las diferentes pruebas.

## Conclusiones

Se presentan las características generales para la realización de pruebas de carga estática, en un puente vehicular en el Golfo de México. Se hace énfasis de las dificultades en la logística para las pruebas de los apoyos situados en el mar. Se muestran los resultados generales del comportamiento de las pruebas; se advierte la bondad del procedimiento constructivo realizado, que permitió superar las dificultades presentadas en las variaciones espaciales de las condiciones geotécnicas presentes. Se comprueba que la realización de este tipo de pruebas, son un instrumento muy útil en el aseguramiento y control de calidad, en este tipo de proyectos.

## Referencias

- [1] Pemex, Estudios, Ingeniería y dictamen técnico sobre el estado que guarda la obra y los elementos fabricados de proyecto del nuevo Puente la Unidad en el Estado de Campeche, así como recomendaciones para proseguir la construcción del mismo, 7 MCS-NPU-803-003-X-007. Campeche, Abril 2016.
- [2] Pilotec, Informe de pruebas de carga en pilotes de acero en Apoyos 73, 28, 32, 37, 67, 67-BIS, 67-F, 43, y 58, Puente la Unidad en el estado de Campeche, Mayo 2013, Abril – Noviembre 2018.