

XIII Congreso Nacional de Geotecnia CONGEO 2018

PRUEBA DE CARGA ESTÁTICA EN COMPRESIÓN A UN PILOTE PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN DEL PASO A DESNIVEL DE LA CIRCUNVALACION NORTE

Ing. Luis Millán Solórzano
Costa Rica, luis.millan@mvmge.com, Socio, MVM Instrumentación

Resumen

El siguiente artículo presenta el Caso de Estudio de una prueba de carga estática en compresión realizada a un pilote provisional de 1000 mm de diámetro y 24 m de longitud en una de las placas de cimentación del Paso a Desnivel en el proyecto de la Circunvalación Norte.

El objetivo de la prueba era verificar si se cumplía con la capacidad de diseño para los pilotes de cimentación de las pilas del paso a desnivel, y su optimización por parte del diseñador. Esto acercamiento es posible porque las normas de diseño usualmente permiten incrementar los factores de reducción (inversamente disminuir el factor de seguridad), cuando se han realizado pruebas de carga estática.

Para la prueba en sí, se usó un sistema "tradicional" con gata hidráulica reaccionando contra un marco de reacción sostenido por pilotes de reacción en tensión. Se contó con instrumentación digital (celda de carga, LVDTs y galga de deformación) y analógica (manómetro de presión de las gatas y micrómetros). La información de los transductores digitales era registrada por medio de un sistema de adquisición de datos en tiempo real.

La prueba al pilote se ejecutó en dos ciclos con incrementos y decrementos de carga preestablecidos, uno a la carga mantenida (de diseño) y otro a 9.810 kN (1.000 Ton), que fue más allá de la carga de aceptación de la prueba (o falla geotécnica esperada). No se dio la falla geotécnica del pilote, si bien por la forma de la curva de carga contra asentamiento, se estima que se estaba cerca de la misma. La no falla del pilote demuestra la aceptabilidad de pilotes similares a los de prueba en las cimentaciones.

Con base en dichos resultados, el diseñador pudo redefinir las cargas para los pilotes del proyecto redundando en un ahorro significativo en el coste de la cimentación, no sólo por usar un factor de reducción mayor, consistente con la prueba, sino porque el pilote logró soportar una carga mayor a la última esperada geotécnicamente.

- a. Capa 1: 8-26 m de limos, limos arcillosos y limos arenosos de color café claro o amarillentos, de consistencia entre muy blanda y compacta y plasticidad media a baja (Clasificación SUCS ML, MH o SM).
- b. Capa 2: Hasta 20-36 m de profundidad, limos y limos arcillosos de color café claro o amarillentos, conteniendo bloques de roca alterada (lahar fino a medio), con consistencia entre muy compacta y rígida, plasticidad media a baja (Clasificación SUCS ML o SM).
- c. Capa 3: Basamento de roca sedimentaria blanda tipo lahar con bloques de roca lávica redondeados inmersos en una matriz arcillosa o arenosa cementada (lahar grueso), grado de cementación entre poco y moderadamente cementado. Roca de muy mala calidad según la clasificación de Deere.
- d. Capa 4: Basamento rocoso de tobas ignimbríticas (Formación Tiribí). Calidad de la roca regular según clasificación de Deere.

En la *Figura N. 2* se muestra el perfil longitudinal con las diferentes perforaciones realizadas a lo largo del estacionamiento del proyecto. La prueba estática se hizo en la pila 11, en el estacionamiento 2+622, siendo la perforación SM-25 la más cercana.

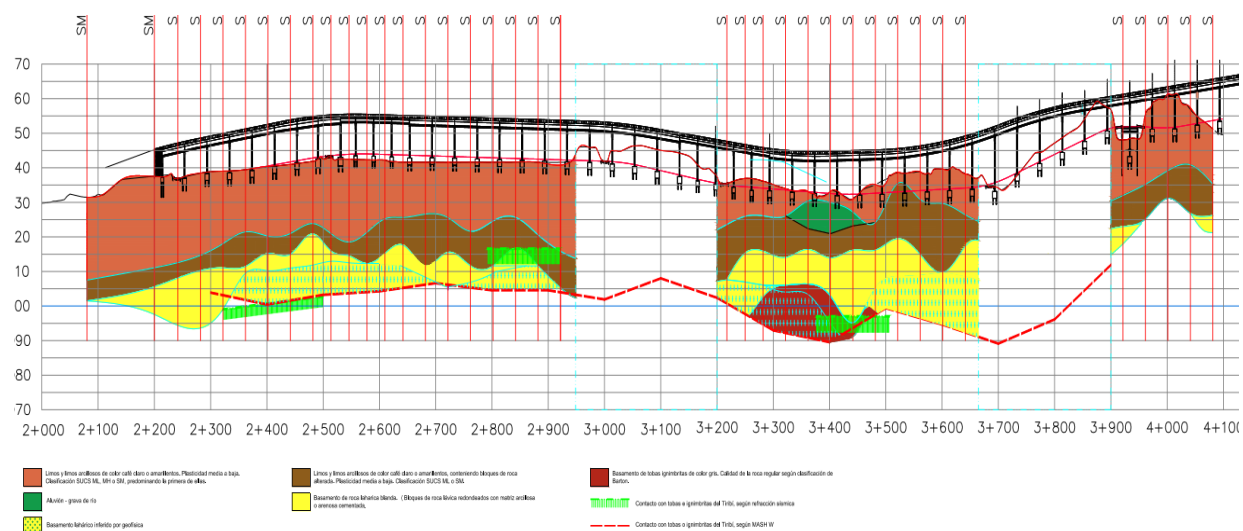


Figura N. 2 Ubicación de pruebas según perfil geotécnico longitudinal del proyecto.

Con base en las investigaciones geotécnicas, el diseñador calculó la carga teórica de falla para los pilotes de la pila P-11, considerando pilotes de 1.000 mm de diámetro, y 24m de longitud, la cual se estimó en 7.690 kN.

Materiales y Métodos

Para la ejecución de las pruebas se siguieron las especificaciones de la norma ASTM D1143-07 (2013) "Method of Testing Piles under Static Axial Compression Load", con un patrón de cargas primero del tipo B "Maintained Test", y luego de completar el ciclo, siguiendo el procedimiento C "Loading in Excess of Maintained Test".

Para determinar la carga de diseño resultante de los cálculos o pruebas de carga, se utilizaron factores de reducción según la norma AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2012), Dicha norma establece los siguientes factores de reducción (ϕ):

- a. Pilotes con calculo estático para capacidad en fuste: 0,45 y pilotes para capacidad en punta: 0,40.
- b. Pilotes con pruebas de carga estática en compresión: 0,70

Por consiguiente, al usar los resultados de pruebas de carga, se pueden aumentar el factor de reducción a 0,7, respecto al cálculo estático, en el cual se usa un factor de reducción de 0,40 ó 0,45. Esto permite la optimización en el dimensionamiento de los pilotes de la subestructura.

Las cargas de prueba se lograron por medio de un gato hidráulico reaccionando contra una estructura compuesta de vigas de carga unidas a cuatro pilotes que funcionan en tracción. La distribución de los pilotes en la placa se hizo para aprovechar 4 de los pilotes definitivos de la placa, como pilotes de reacción, mientras que el pilote de prueba en realidad no forma parte de la estructura como tal. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra un isométrico con la estructura y pilotes de reacción.

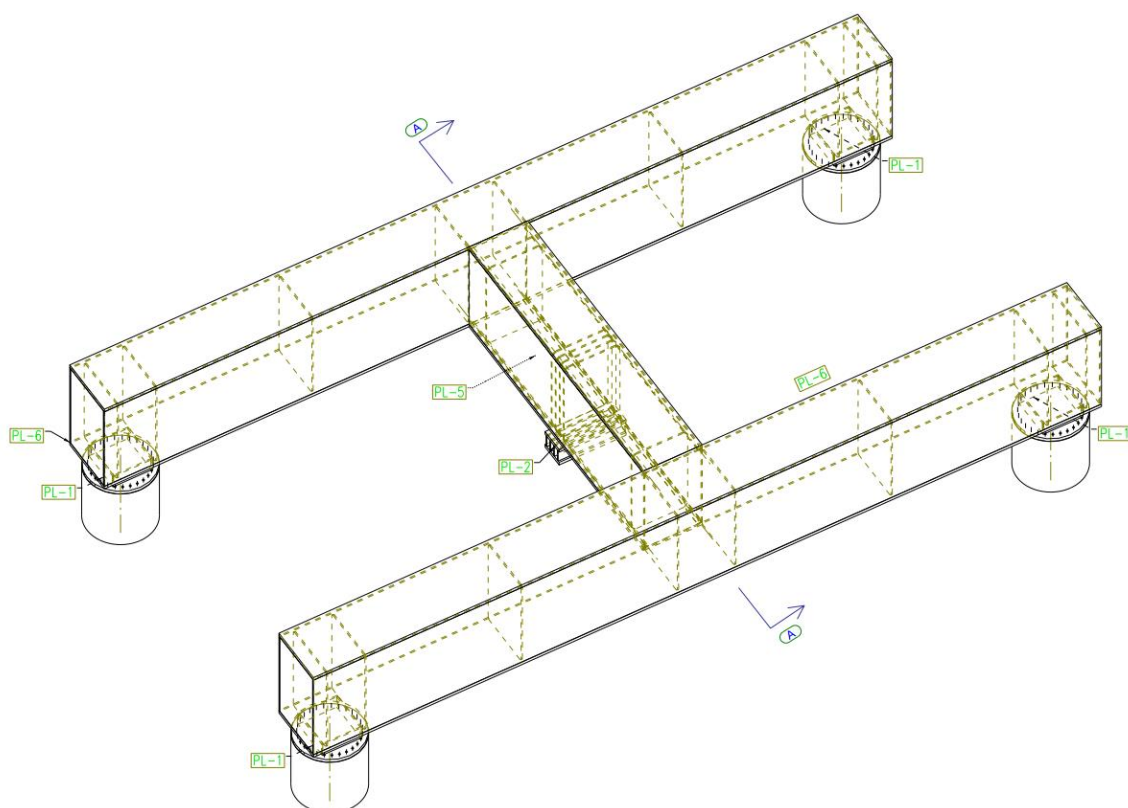


Figura N. 3 Isométrico de estructura de reacción (vigas y pilotes) para la prueba de carga estática.

Se contó con instrumentación digital y analógica, para medir la fuerza aplicada al pilote en cada incremento o decremento, así como las respectivas deformaciones y asentamientos. En la *Figura N. 4* y la *Figura N. 5* se observan respectivamente una vista lateral y una vista en planta del arreglo de la instrumentación.

La instrumentación digital consistió en celda de carga, transductores lineales variables de desplazamiento (LVDT por sus siglas en inglés), y galgas de deformación distribuidas en las alturas, con un equipo de adquisición en tiempo real que permitía obtener los datos de las pruebas en tiempo real. La posición de los diferentes niveles de galgas, tomados estaban a 1, 2, 3, 10, 17, 21 y 22 m de la punta del pilote. Por otra parte, analógicamente se usaron micrómetros como medida alternativa y de comprobación de los LVDTs, en conjunto con la medición de la presión de la gata

hidráulica, que se revisaban en circuito cerrado desde el centro de control de la prueba.

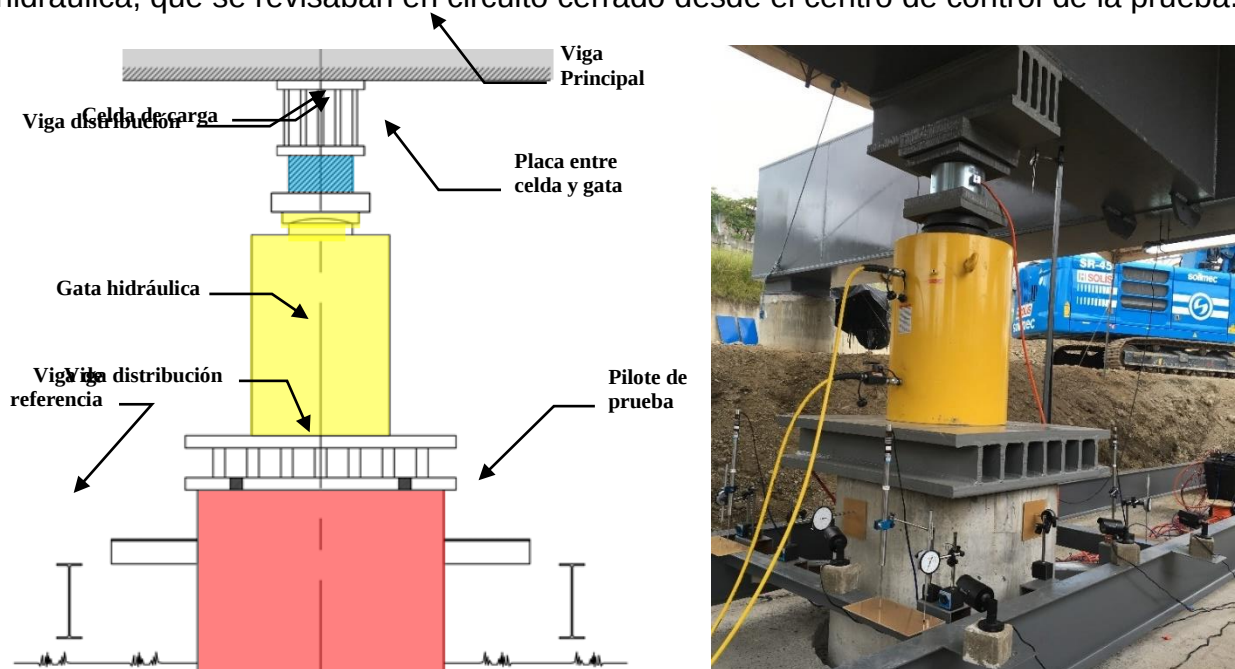


Figura N. 4 Arreglo para el pilote de la prueba (Izq.) Esquema (Der.) Fotografía durante la prueba

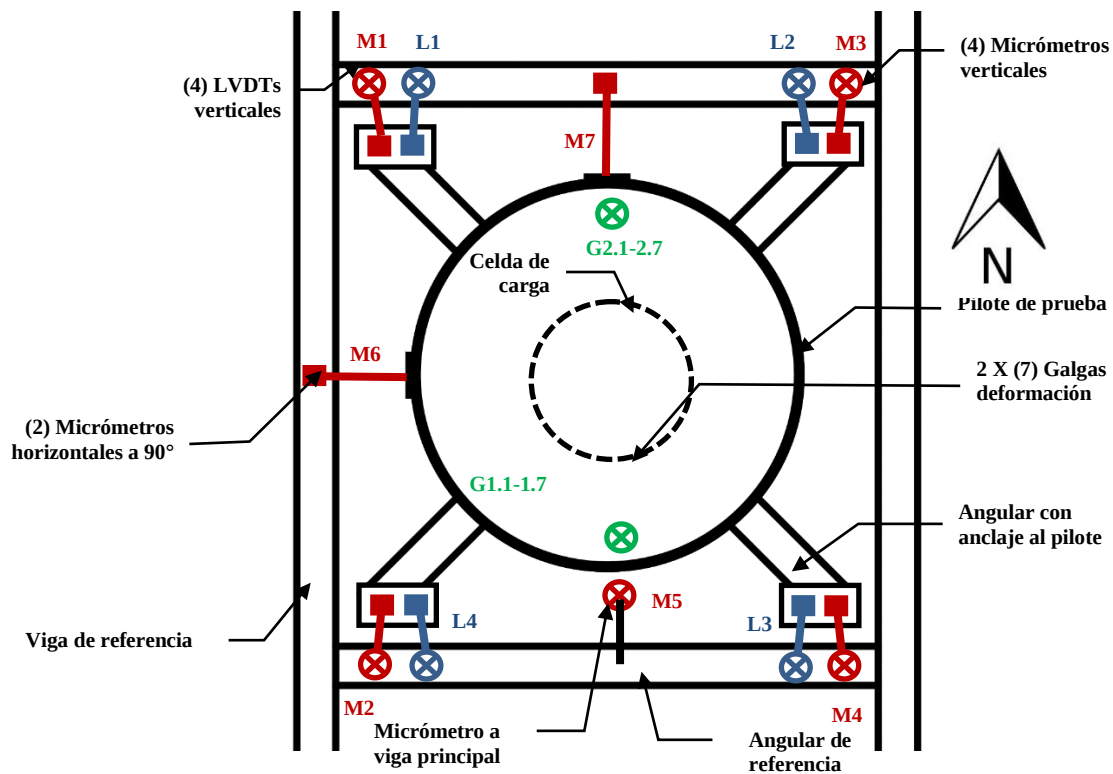


Figura N. 5 Planta de pilote de prueba con instrumentos (Celda de carga, LVDTs, galgas y micrómetros)

El procedimiento usado para efectuar las variaciones de carga es: con los instrumentos en posición, calibrados y tarados (la celda de carga, los LVDTs, galgas y los micrómetros en "cero"), se inicia agregando presión a la gata controlando la fuerza de la celda de carga en la pantalla del programa de adquisición de datos, hasta llegar lo más cerca posible a la fuerza del primer incremento de carga del programa.

Se mantiene la presión por el tiempo determinado, y luego, se continúa según el programa de cargas, ya se incrementos o decrementos por el tiempo mínimo establecidos o mayor, cumpliendo la razón de asentamiento estipulada, o hasta el tiempo de espera máximo del programa. El proceso de continua, hasta que la prueba se completa. Los principales resultados son una serie de gráficas del comportamiento del pilote en asentamiento o deformación contra carga aplicada.

En el caso de los equipos digitales, el registro se hizo en un computador dedicado para la prueba. En cada incremento o decremento de carga, el operador, le indicará al programa el inicio y final del cambio de carga aplicado por el gato. Se contaba con una rutina programada para que además del registro al inicio y final de cada cambio, se registren datos a cada 15-30 segundos durante la aplicación de carga, y con la carga ya aplicada. El esquema de adquisición de datos se ejemplifica en la *Figura N. 6*.

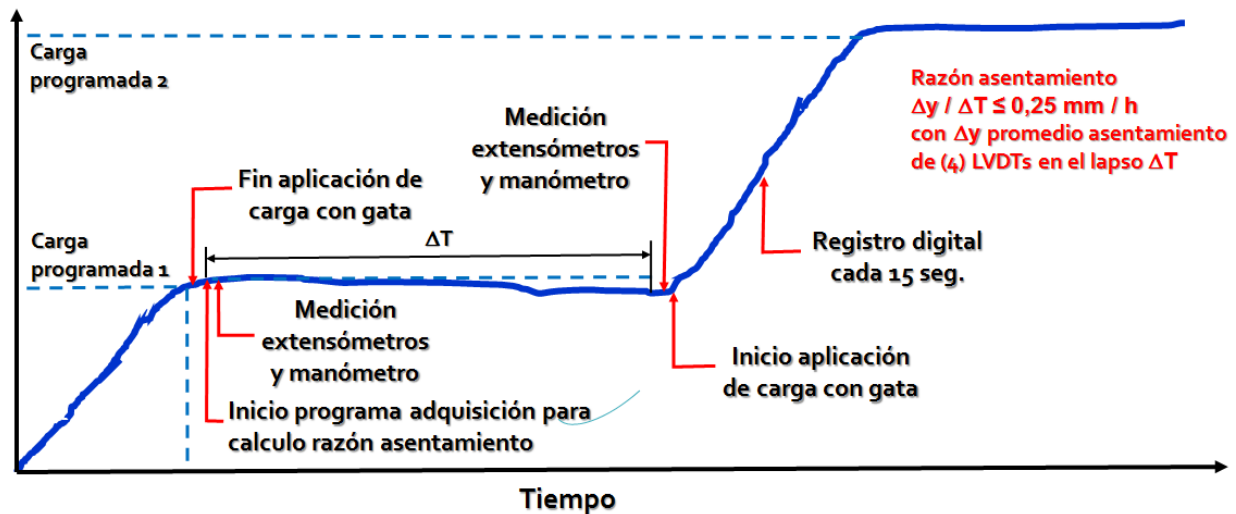


Figura N. 6 Adquisición de datos de las mediciones de los equipos digitales (Fuente: Elaboración propia).

Además, durante la ejecución de la prueba, se hizo un control topográfico, en los diferentes incrementos o decrementos de carga, para verificar que no hubiera movimientos importantes de los pilotes de reacción, y de la estructura de reacción en sí. Como se tenía un micrómetro al centro de la viga principal, también se tuvo una medida comprobatoria para esta deformación. El sistema de reacción se comportó apropiadamente.

Resultados y Discusión

En la *Figura N. 7* se observa el comportamiento de las galgas de deformación instaladas a lo largo del pilote de prueba. La curva de cada galga se asemeja en forma al programa de aplicación de las cargas, si bien los valores no son similares por estar a diferente altura. Además, y como es de esperarse, la deformación es mayor para las galgas colocadas en la parte superior del pilote, respecto a las que se encuentran cercanas a la punta.

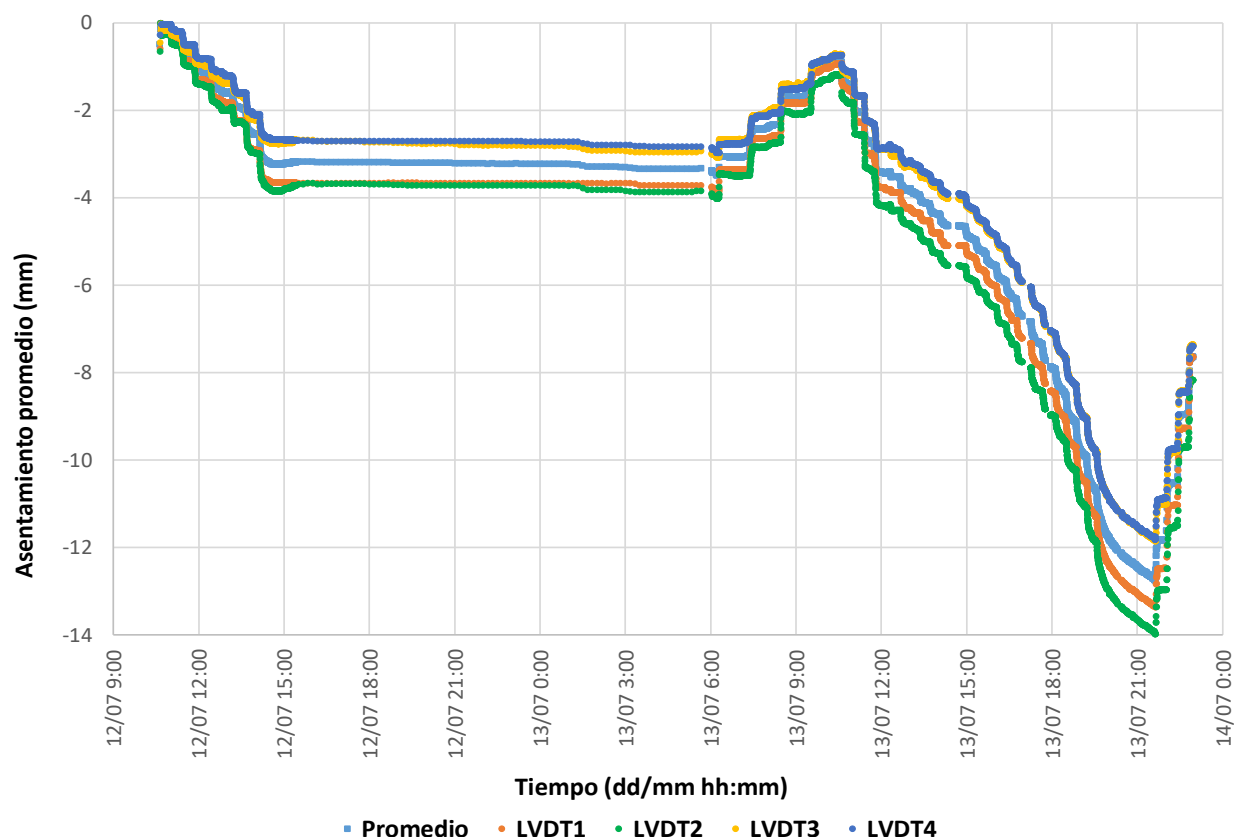


Figura N. 7 Asentamientos de los LVDTs contra tiempo durante la realización de la prueba estática.

En la *Figura N. 8* se observa la curva carga contra asentamiento promedio medido en la cabeza del pilote. El comportamiento es el típico esperado. Por aspectos comparativos, se ha incluido no sólo la información de los LVDTs para cada uno de los dos ciclos considerados, sino también para los micrómetros en los mismos ciclos.

En este gráfico, lo primero a notar es que se da una buena concordancia entre las mediciones digitales de los LVDTs registradas en el equipo de adquisición de datos, y

las realizadas de manera visual con los micrómetros. Las diferencias encontradas entre ambas mediciones no son superiores a 0,3 mm.

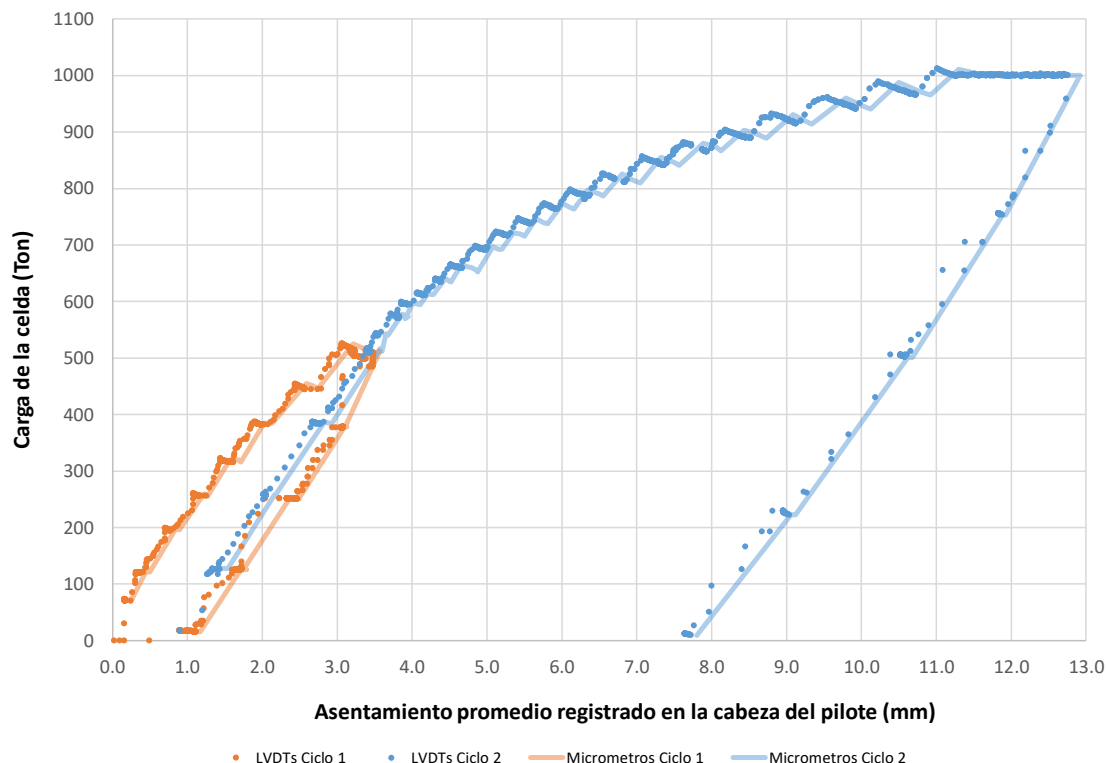


Figura N. 8 Carga de celda contra asentamiento registrado por LVDTs y micrómetros en cabeza del pilote.

La información de los asentamientos, tanto para los LVDTs como para los micrómetros, se resume en el *Cuadro N. 1* adjunto, en el que se reporta los valores de fuerza en kN haciendo en cada caso la conversión (en sitio se midió toneladas).

Cuadro N. 1 Resumen de Cargas y Asentamientos durante la realización de la prueba

Ciclo		Presión (bar)	Carga (kN)	Asentamiento (mm)	
				LVDTs	Micrómetros
Procedimiento B	Inicio	0	0	0	0
	Carga	320	5.150	3,48	3,57
	Descarga	0	147	1,10	1,15
Procedimiento C	Carga	620	9.810	12,75	12,92
	Descarga	0	88	7,64	7,80

Se logró llevar con éxito los dos primeros ciclos propuestos, a la carga mantenida (de diseño) y más allá de la carga de aceptación de la prueba (carga de falla estimada), teniéndose en el primer caso una deformación permanente de 1,1 mm y en el segundo

una deformación permanente de 7,6 mm. El asentamiento máximo de la prueba fue de 12,8 mm, que sucedió ante la carga máxima aplicada de 9.810 kN (1.000 Ton).

A partir de las deformaciones registradas en las galgas, según el nivel desde la cabeza del pilote a la que se encuentran ubicadas, se puede obtener las fuerzas en el pilote contra profundidad (relacionado con la carga de fricción del terreno a cada elevación), para lo cual es necesario multiplicar el valor de deformación unitaria en cada nivel por el módulo de elasticidad del material y el área transversal.

Para esto se puede incluir un módulo de deformación y un área promedio, que pueden ser teórico. Sin embargo, es mejor usar los datos del nivel superior de galgas, donde la carga es similar a la aplicada en la cabeza del pilote. Haciendo esto, se llega a la distribución que se muestra en el *Cuadro N. 2*, para varios niveles de carga en cabeza.

Cuadro N. 2 Cargas estimadas por profundidades del pilote de la distribución de las galgas de deformación

Profundidades (m de cabeza)	Carga en cabeza (Ton)							
	126,7	258,8	387,1	517,1	665,7	747,5	881,6	1012,2
1-3	8,7	10,0	9,1	10,4	16,9	22,1	31,1	42,7
3-7	5,8	23,2	44,6	64,4	88,5	100,1	118,1	136,1
7-14	-19,8	0,0	24,5	51,5	49,9	45,9	37,7	33,9
14-21	95,4	165,7	230,4	294,6	378,2	423,4	507,6	584,9
21-22	5,5	12,2	18,2	24,0	35,3	40,2	49,2	56,4
22-23	12,5	20,7	27,4	33,5	46,6	54,2	60,3	65,4
Punta	18,5	27,0	33,0	38,7	50,2	61,6	77,6	92,9

Se nota que las capas de suelo que aportan más se localizan después de los 14 m de la punta del pilote, que para la carga máxima de prueba aportan en fricción de 60-80 Ton/m. La carga en la punta es un poco menor a un 10% de la carga del pilote.

Conclusiones

La comparación entre los datos digitales de los LVDTs con los analógicos de los micrómetros muestra que los mismos son confiables. El pilote de prueba no tuvo falla geotécnica, en ninguno de los dos ciclos de carga realizados, el último hasta las 9.810 kN. Por consiguiente, el pilote de prueba pasó el criterio o carga de aceptación establecido por el diseñador.

La información de las galgas de deformación permite obtener la distribución de la fricción a lo largo del pilote. Las capas de suelo con el principal aporte a la fricción del pilote son las que se localizan por debajo de los 14 metros desde la cabeza del pilote,



5 y 6 de setiembre, 2018. Hotel Wyndham Herradura

"Retos de la Geotecnia en el desarrollo de la Infraestructura"

con fricciones de 60-80 Ton/m. A la punta llegó al final de la prueba un poco menos del 10% de la carga sobre la cabeza.

Con base a los resultados de esta prueba de carga, el diseñador redefinió las cargas de diseño para los pilotes del proyecto, sobre todo por el comportamiento del pilote de prueba, que no solo soportó la carga de aceptación de la prueba, que se estimaba como la carga de hundimiento de pilote, sino que el mismo no falló a una carga bastante superior a la carga estimada de falla.

Referencias bibliográficas

AASHTO LRFD (2012). *Bridge Design Specifications*.

ASTM D-1143 (2013). *Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load*.

GETINSA (diciembre 2015). *Circunvalación Norte San José, Propuesta de Ejecución de Pruebas de Carga en Pilotes*.

INGEOTEC S.A. (octubre del 2015). *Estudio Geotécnico Proyecto Corredor Vial "Circunvalación Norte" Segunda Etapa, La Uruca - Calle Blancos, San José*.