

Diseño de prueba de carga axial en una pila instrumentada colada *in situ* en depósitos interestratificados del oriente del Valle de México

Design for an axial load test for an instrumented cast in place pile in interbedded deposits at the east of Mexico Valley

Paniagua, W. I., PILOTEC, México
Ibarra, E., inGeum, México
González, J.L., inGeum, México

RESUMEN: Se presenta el diseño y construcción de la instrumentación, sistema de reacción y de aplicación de cargas para realizar una prueba de carga axial en una pila colada *in situ*. La prueba se realizó para verificar las estimaciones teóricas de la capacidad de carga de los apoyos de un puente perteneciente a las vialidades rápidas construidas recientemente en el oriente del Valle, donde existen secuencias de arcillas blandas y arenas en forma alternada. La pila de prueba se construyó aledaña a uno de los apoyos del puente, con un diámetro menor, aunque con longitud similar al de las pilas definitivas. El diseño de la instrumentación se orientó a distinguir el aporte de la punta y del fuste a la capacidad de carga total de la pila, aunado al conocimiento de la carga y desplazamiento en la cabeza. Se destaca la conveniencia de una instrumentación como la descrita, eventuales desventajas y propuestas para su mejora.

ABSTRACT: For an axial bored piled test, design and construction of instrumentation, reaction and load application systems are presented. Test was performed to verify theoretical estimates of load bearing capacity of piles for a bridge that forms part of a highway at East of Valley of Mexico, where an alternate series of soft clays and sands is found. Test pile was built beside the bridge, with a scaled diameter, but similar length as working piles. Instrumentation design was focused to distinguish point from shaft friction load, plus the load-settlement behavior. Convenience of instrumentation is highlighted, as well as advantages and drawbacks and proposals for future improvements.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En el último lustro se ha ampliado la red de vialidades de cuota al Noreste del Valle de México, en donde se han construido entronques y distribuidores viales elevados. Entre esas obras se destaca un puente de 850m de longitud ubicado en el cruce de Av. Central y El gran Canal de Desagüe (Figura 1), cuya cimentación está resuelta mediante zapatas rectangulares de concreto reforzado apoyadas sobre pilas coladas *in situ* de 1.5m de diámetro y longitudes aproximadas de 32m. Atendiendo a la importancia de esta obra, se consideró pertinente verificar las estimaciones teóricas de capacidad a través de una prueba de carga axial a la falla.

La pila de prueba consta de una sección circular de 80cm de diámetro y 32m de longitud, cuyo cuerpo y punta se instrumentaron ampliamente. En otro artículo de estas memorias (Ibarra y Paniagua, 2008) se presentan los resultados de la prueba; aquí se describe el diseño de la prueba, destacando la instrumentación.

1.2 Alcances

La intención de este artículo es dar a conocer la

experiencia de los autores en la preparación, diseño y colocación de la instrumentación para obtener información del comportamiento de la pila en una prueba de carga, no sólo midiendo en su cabeza cargas y desplazamientos, sino registrando datos que permiten inferir el trabajo de fuste y de punta por separado.

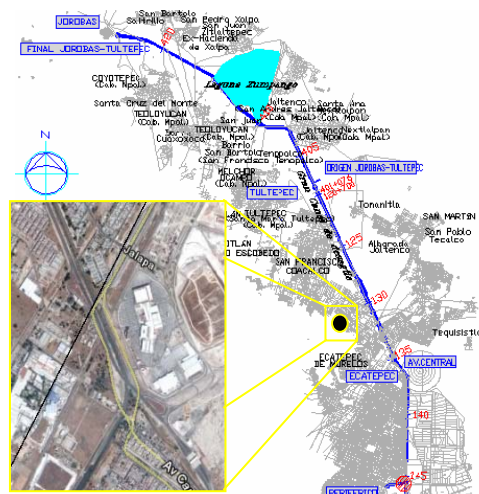


Figura 1 Localización de la prueba de carga

Se destacan la conveniencia de los instrumentos que resultaron eficaces y también se mencionan aquellos que no funcionaron adecuadamente, proponiendo mejoras al respecto.

2. ENFOQUES

Se diseñó la instrumentación para la pila de prueba cuyo siguiendo los lineamientos generales de pruebas de carga precedentes (Mendoza *et al.*, 2003, Ibarra y Mendoza, 2005). El enfoque fue registrar, no únicamente la carga aplicada en la cabeza y el desplazamiento asociado, que se obtienen típicamente en las pruebas de carga convencionales, sino registrar también deformaciones unitarias y carga que se presenta en todo el cuerpo de la pila; esto con el fin de conocer los mecanismos de transferencia de carga de la pila al suelo adyacente y distinguir claramente el aporte que da la capacidad de carga por fricción y por punta.

Especial atención se dio a conocer la carga de la punta de la pila, por lo que se colocó una celda de carga en el extremo inferior del armado principal. Con el mismo fin, se colocaron otros sistemas de medición en secciones cercanas a la punta, que si bien no ofrecen una medición directa de la carga, si permiten inferirla de forma aproximada y, podría decirse, de forma redundante con la medición de las celdas. Este principio de redundancia se aplicó también para el registro de otras variables. En general, la instrumentación contempló sensores para registrar carga, desplazamiento, deformaciones unitarias y compresiones del concreto en diferentes secciones.

La carga aplicada en el cabezal de la pila se midió mediante celdas de carga; un sistema de control y redundante a este fue el de lecturas manométricas de la presión de los gatos conocido el área útil del sistema y la presión de la bomba. Para medir los desplazamientos verticales del cabezal, se emplearon tres sistemas de medición: El primero se realizó por medio de dos transductores de desplazamiento eléctricos, el segundo con tres indicadores de carátula y el tercero con una regla milimétrica graduada con hilo piano y espejo adosado al cabezal. La utilidad de éste último sistema se probó en las etapas de carga que generaron grandes desplazamientos, agotándose las carreras de los indicadores de carátula.

Por su parte, para medir la distribución de la carga dentro del elemento pila se colocaron en cinco secciones, deformímetros eléctricos soldados a las barras de acero del armado principal de la pila y deformímetros ahogados en el concreto, capaces de medir deformaciones unitarias al interior de la pila. En cada una de las cinco secciones de instrumentación se dispusieron cuatro deformímetros: dos de concreto diametralmente opuestos y dos de acero ortogonales a los de concreto, y por ende, diametralmente opuestos entre sí; este arreglo resultó muy conveniente por ser redundante y por permitir obtener la deformación

unitaria media de la sección en el caso de la flexión por excentricidades de carga.

Para la medición de las compresiones del elemento estructural pila, se colocaron indicadores de deformación a profundidad, o *tell tales*, en tres secciones. Los indicadores, se distribuyeron de la siguiente forma: uno, cercano a la punta, otro a la mitad de la longitud y el tercero cercano al cabezal. Esto permitió conocer los desplazamientos relativos de la punta y de otras dos secciones respecto al suelo circundante. Constituye además un sistema que permite inferir las deformaciones unitarias medias entre secciones.

3. ARREGLO GENERAL DEL EXPERIMENTO

El sistema de reacción para la aplicación de la carga axial a la pila de prueba se conformó por dos vigas de acero llamadas secundarias de sección H con peralte total de 1.35m y longitud de 5m, rigidizadas mediante atizadores de $\frac{3}{4}$ " soldados perpendicularmente al alma de la viga. Sobre las vigas secundarias reacciona una viga denominada principal; igualmente que las vigas secundarias, ésta está rigidizada con atizadores y sellada con placas de acero formando una caja; la altura total de la viga Principal es de 1.85m y cuenta con una longitud de 5m. En la Fig.2 se muestra el esquema del arreglo general del sistema de reacción. Debe reconocerse que bajo este arreglo geométrico, no se cumplen las separaciones mínimas centro a centro que establece la norma ASTM (1987), debido principalmente al gran diámetro de las pilas de reacción.

Para lograr la reacción que trasmite la pila al marco de acero, se construyeron cuatro pilas de reacción de 150cm de diámetro y 32m de longitud, las cuales se ubicaron en los cuatro extremos de las vigas secundarias. Para lograr la unión de las pilas al marco, se diseñó una novedosa conexión que elimina los trabajos de soldadura por completo: se construyeron cuatro elementos de concreto reforzado de forma prismática llamados "dados de reacción", uno sobre cada uno de las pilas de reacción, embebiendo el acero principal de la pila en toda la longitud del concreto; la unión entre pilas de reacción dados y marco de carga se logra por medio de barras de acero de alta resistencia (*dywidag*), que atraviesan por ductos de PVC previstos en los dados de reacción y se atornillan abajo del dado y arriba de las vigas secundarias; los dados cuentan con altura total de 2m y sección en planta cuadrada de 1.5m por lado.

Para aplicar las cargas de la prueba se emplearon siete gatos hidráulicos de la marca ENERPAC, colocados sobre el cabezal de la pila de prueba, con capacidad para 200t cada uno, de tal forma que en conjunto se tenía una capacidad de 1400t. Lo anterior se consideró conveniente para trabajar con presiones menores en el sistema hidráulico y así mantener la seguridad de conexiones y equipos. Los gatos hidráulicos se unieron a una bomba hidráulica-eléctrica, que contaba con un manómetro con

resolución mínima de 100psi, así mismo se dispuso un segundo manómetro en la conexión con los gatos.

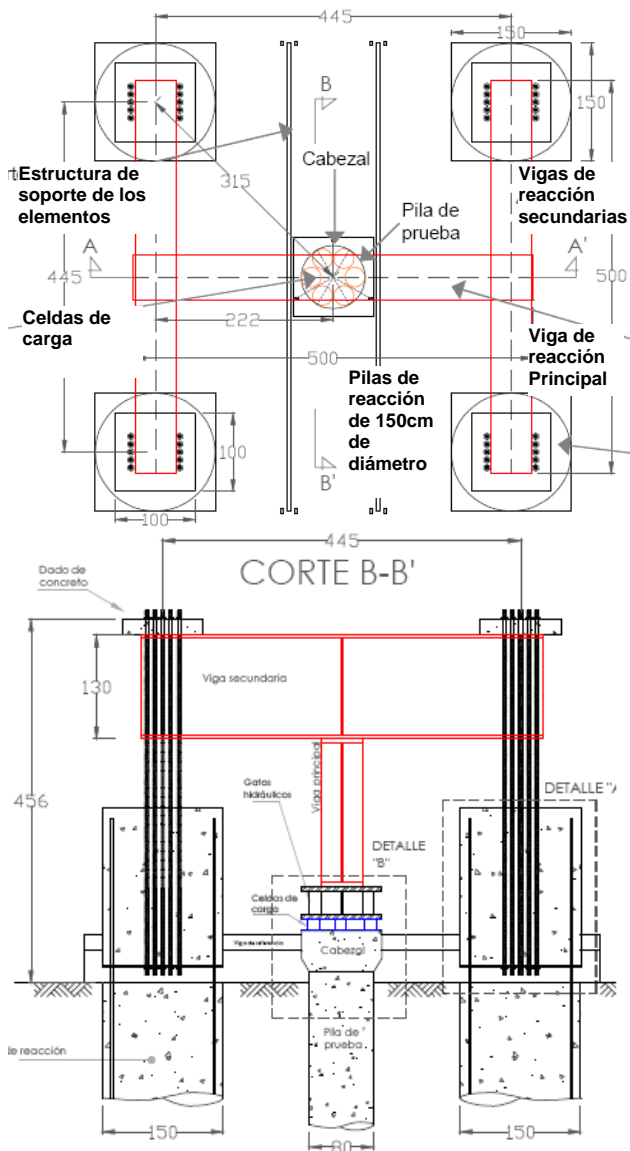


Figura 2 Sistema de reacción en planta, para prueba de carga axial

4. INSTRUMENTACIÓN DE LA PILA DE PRUEBA

4.1 Carga en la punta

Se colocaron cuatro celdas de carga en la punta, cada una formada por cuatro tubos de acero mecánico de alta resistencia, soldados a placas de acero estructural de 3.5cm de espesor, formando una unidad con altura total de 23 cm. El diámetro de las placas fue de 73cm esto pensado para permitir el paso libre de la celda dentro de la perforación de la pila, así evitar el arrastre de material al fondo de la excavación. En la Fig. 3 se muestra un esquema y un corte de la celda de carga en conjunto. El espacio entre los tubos instrumentados se relleno con microparafina para sellar el conjunto y proteger a la

instrumentación, además de ofrecer una protección mecánica a los cilindros. La conexión de la instrumentación de la celda de carga sale de un barreno en la placa superior de la celda y se cubrió con poliflex hasta la superficie.

La capacidad de carga individual de cada cilindro fue de 150t, que en conjunto formarían una celda con capacidad de carga 600t, cabe mencionar que cada uno de los tubos de acero instrumentados que conforman la celda fue calibrado individualmente antes de integrarse a las placas. Este instrumento de registro falló debido principalmente a la rudeza de las maniobras y, probablemente, a la hermeticidad deficiente del conjunto bajo agua; su diseño para otras pruebas deberá revisarse.

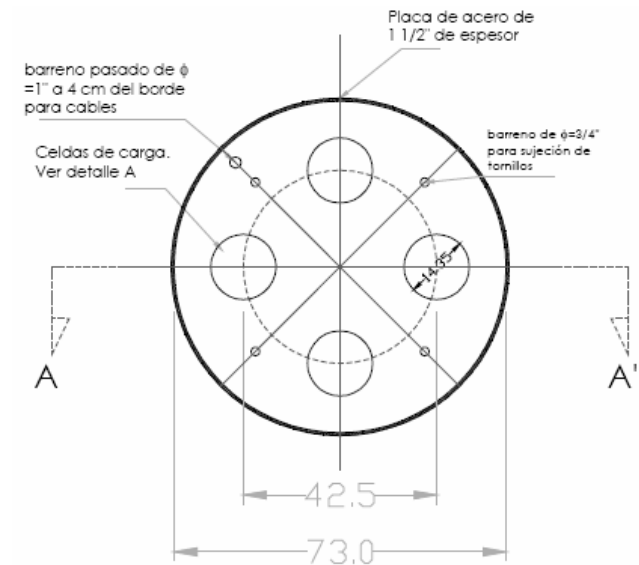


Figura 3 Celda colocada en la punta de la pila, previo a la introducción en la perforación

4.2 Carga en la cabeza

En el cabezal de la pila se colocaron cuatro celdas de carga, con capacidad de 300t individualmente las cuales fueron calibradas en el IMCYC (Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto). Tanto para tomar las mediciones de las celdas de carga en la punta de la pila como para las celdas en el cabezal se empleó un equipo de adquisición de datos conocido como P3.

4.3 Desplazamientos verticales en el cabezal

Los desplazamientos en el cabezal se midieron usando tres indicadores de carátula para lecturas directas y registro manual, así como dos transductores de desplazamiento para el registro automático, conectados al equipo de adquisición de datos P3. Los indicadores de carátula contaron con una carrera de 2" mientras que los transductores de desplazamiento tienen carrera de 10cm. Todos los instrumentos se soportaron mediante bases magnéticas fijas a dos vigas de referencia libremente apoyadas en sus extremos, colocadas de manera paralela al cabezal de la pila de prueba. Tanto el vástago de los transductores como de los indicadores de carátula se apoyaron sobre una ménsula de acero empotrada en los laterales del cabezal, soportando a su vez placas de vidrio para permitir el libre movimiento de los vástagos ante los eventuales desplazamientos laterales. Los indicadores de carátula se colocaron aproximadamente a 120° entre sí, mientras que los transductores de desplazamiento se colocaron sobre en la parte media de la ménsula, en caras opuestas del cabezal. En la Fig. 4 se muestra una vista del arreglo general de estos instrumentos.



Figura 4 Instrumentos de medición de los desplazamientos verticales en el cabezal

Las vigas de referencia que soportan los medidores de desplazamiento, tienen 6m de longitud conformadas por una armadura de dos tubos de acero de sección cuadrada unidos con atiesadotes para agregar rigidez a la sección, para reducir las deformaciones producidas por los cambios de temperatura, los elementos de la armadura se cubrieron con pintura blanca, aunado a las cubiertas con lonas de todo el sistema de reacción.

4.4 Compresión de la pila de prueba bajo carga vertical

Las compresiones que sufre el cuerpo de la pila de prueba bajo carga vertical se midieron por medio de indicadores de deformación a profundidad llamados "tell tales", formados por una varilla roscada de acero de 1/4 de pulgada de diámetro, soldadas a una barra del armado principal en el inferior de la varilla. La varilla se cubrió en toda su longitud con un tubo de PVC hidráulico de 1/2 pulgada de diámetro; el extremo inferior del tubo se selló con plastilina epóxica para evitar la penetración del concreto al interior del tubo durante el colado de la pila

de prueba, de tal forma que las varillas quedaron libres dentro del ademe de PVC (Fig. 5). Estos elementos se ubicaron a tres profundidades dentro del cuerpo de la pila de prueba (Tabla 1). Las puntas superiores de las varillas que salen sobre la superficie del cabezal llevaron una tapa roscada, misma que tensó la varilla a través de un resorte precomprimido. Para evitar fricciones entre las varillas y la pared interna de los tubos de PVC, éstos se llenaron con aceite hidráulico.

Tabla. 1 Profundidad de testigo de deformación a profundidad

Nivel	Profundidad, en m	Barra	Nomenclatura
1	2.3	2	TT12
3	16.8	4	TT34
5	30.4	6	TT56

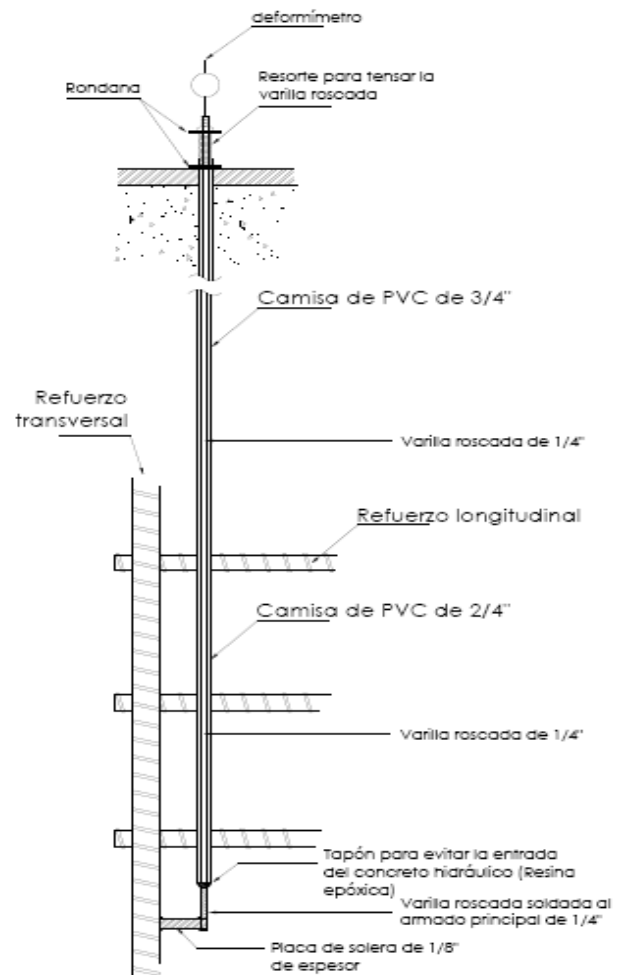


Figura 5 Esquema y vistas de testigos de deformación a profundidad

Sobre las tapas roscadas se colocó un indicador de carátula. El indicador, a diferencia de los que registran el desplazamiento total de la pila de prueba, está soportado mediante bases magnéticas colocadas sobre una placa de acero, justo encima del cabezal de la pila de prueba.

4.5 Microdeformaciones unitarias en el concreto y en el acero estructural

Se colocaron deformímetros eléctricos soldados a las varillas de refuerzo longitudinal y otros más ahogados en el concreto dispuestos en cinco secciones a lo largo de la pila (Tabla 2). Estos deformímetros permitieron conocer las microdeformaciones que ocurrieron en la pila durante el proceso de aplicaciones de carga; conociendo así su variación a diferentes profundidades, de donde es posible inferir las cargas que van transmitiéndose estructuralmente por el cuerpo de la pila y con ello, es posible inferir también las curvas de distribución y de transferencia de carga. Dadas las deflexiones importantes a que se somete el armado durante el izaje, así como a las severas acciones durante el colado aunado a la presencia del agua freática en dos terceras partes de la pila, se consideró conveniente contar con sistemas redundantes de medición en cada sección, por lo que se colocaron dos deformímetros eléctricos soldados al acero principal en barras diametralmente opuestas, y ortogonales a estos, se colocaron dos deformímetros eléctricos para ahogarse en concreto también en puntos diametralmente opuestos.

La profundidad nominal de las secciones de instrumentación se muestra en la Figura 6. Para la designación de los sensores, se empleó la nomenclatura siguiente: el primer dígito corresponde al nivel o sección de instrumentación, siendo el 1 el más somero y el 5 el más profundo; el segundo dígito corresponde a la barra del armado principal donde se colocó el sensor (barras 1, 3, 5 y 7), mientras que la letra mayúscula A y C hacen referencia al tipo de sensor, de acero o de concreto respectivamente. De la tabla, se observa que los deformímetros para acero se colocaron en las barras 1 y 5, mientras que los de concreto se colocaron cerca de las barras 3 y 7.




Tabla 2. Secciones de instrumentación

Nivel	Profundidad, en m	Acero		Concreto	
1	2.3	11A	15A	13C	17C
2	9.1	21A	25A	23C	27C
3	16.8	31A	35A	33C	37C
4	23.6	41A	45A	43C	47C
5	30.4	51A	55A	53C	57C
Punta	32	Celda de carga			

En la Tabla 3 se reúnen las características de los *strain gages* resistivos que se integraron a la pila. Los *strain gages* soldados a las barras longitudinales son sensores prepegados en fábrica a una delgada laminilla metálica de una aleación níquel-cromo. El proceso para la

colocación de los deformímetros a las varillas del armado principal se ilustra en la Figura 7.

- NOMENCLATURA

-  Strain gage modelo Vishay LWK06W250 B-350. Soldado al armado principal cableado con cable Belden blindado hasta el punto de medición
-  Strain gage ahogado en el concreto. Modelo Vishay EGP-5-350, cableado con cable Belden blindado hasta el punto de medición
-  Barra testigo de deformación (tell tale). El extremo inferior va soldado al armado principal

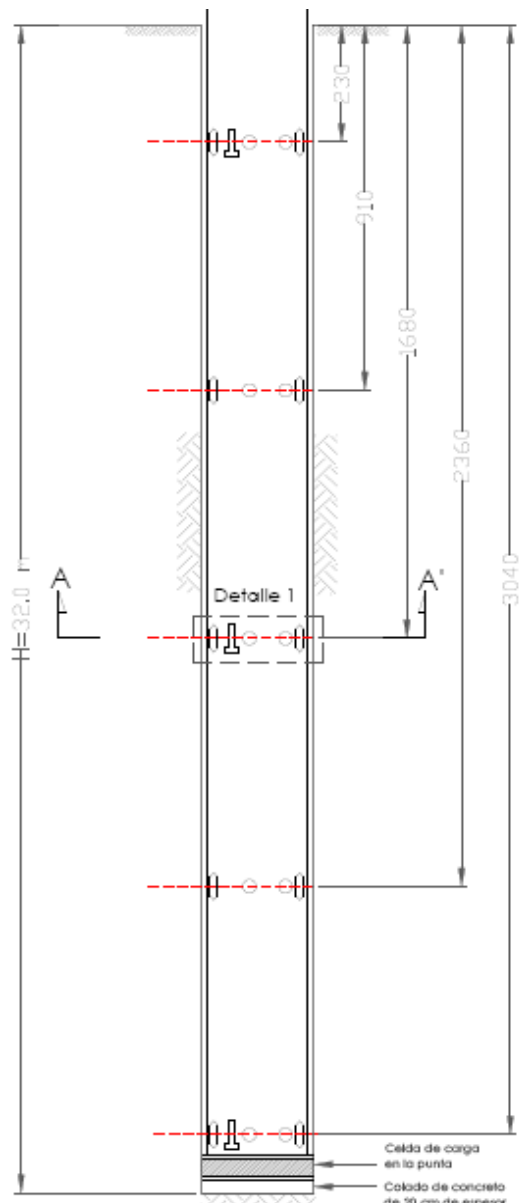


Figura 6 Esquema de instrumentación de sensores de microdeformaciones en acero y concreto



Tabla 3 Descripción de strain gages utilizados en la instrumentación de pilas

DISPOSITIVO	MARCA	MODELO	Gage Factor
Strain gage de acero	Measurements Group	LWK-06-W250B-350	2.03
Strain gage de concreto	Measurements Group	EGP-5-350	2.06

Debido a las maniobras y condiciones a las que se somete el armado de la pila de prueba durante su colocación, se dio una protección mecánica e impermeabilizante a los sensores mediante una plastilina epóxica la cual proporciona una coraza resistente y rígida. A fin de proteger el cableado de los sensores, se condujeron por tubo poliflex hasta la superficie.

Por otra parte se colocaron deformímetros eléctricos ahogados en concreto, que consisten de tabletas con una longitud de 12.5cm aproximadamente unidas a un cable blindado que se conduce hasta la superficie, donde se conectaron al sistema de adquisición de datos. Para su colocación, se amarraron con alambre a los estribos del acero de la pila de prueba, colocándolos de manera paralela al armado longitudinal, en el sentido del eje axial de la pila. Cabe mencionar que la respuesta de los sensores para concreto fue mucho más estable en comparación con los sensores de acero colocados en campo.

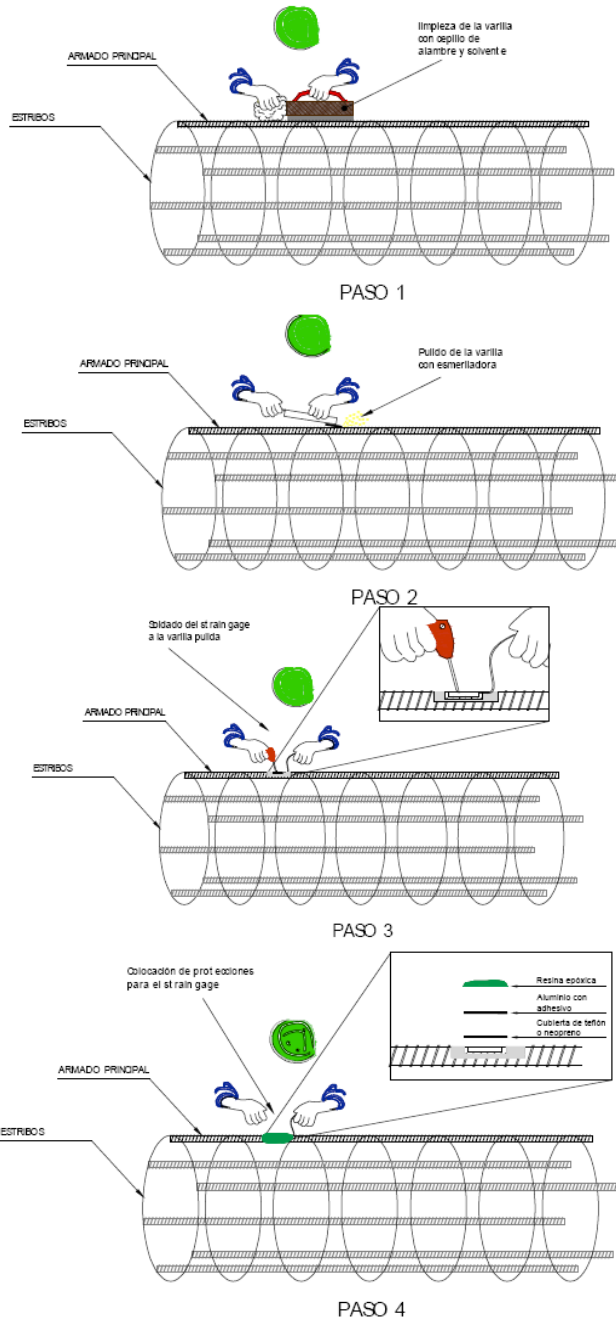


Figura 7 Esquema de colocación de strain gages de acero

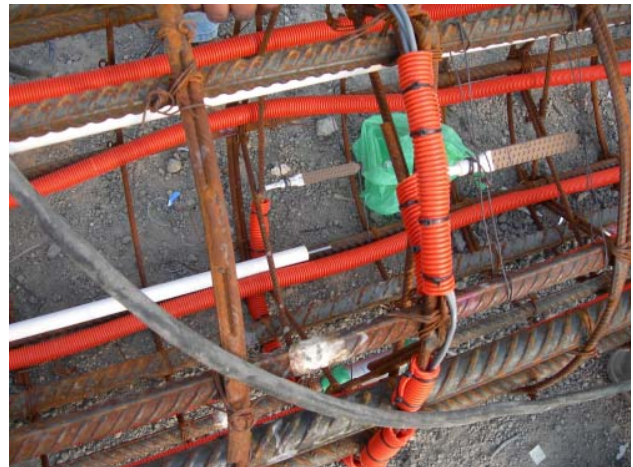


Figura 8 Sensores para ahogarse en concreto

5. CONCLUSIONES

Los registros obtenidos después de realizada la prueba de carga, permitieron establecer ventajas y eventuales desventajas de la instrumentación descrita. Las lecciones aprendidas son las siguientes:

La instrumentación permitió conocer a detalle el aporte del fuste y de la punta en cada etapa de prueba, así como

las curvas de transferencia de carga y de distribución de carga en toda la profundidad (Ibarra y Paniagua, 2008).

Los sistemas redundantes de medición resultaron muy convenientes debido a la falla, prácticamente inevitable, de un porcentaje de los sistemas de medición.

Los sensores de concreto muestran un comportamiento muy estable en sus registros, además de que su instalación es rápida y sencilla.

Los indicadores de deformación a profundidad son elementos mecánicos de fácil instalación, muy económicos y que ofrecen información valiosa para pruebas de carga en pilas, por lo que su uso sistemático en todas las pruebas de carga debe fomentarse.

Los sensores de acero resultaron en algunos casos inestables, debido principalmente a problemas de hermeticidad y a las deformaciones que sufren durante las maniobras de izaje. En la opinión de los autores, este sistema de medición es vulnerable; es mejor la instalación de varillas hermanas (*sister bars*) ensambladas de fábrica.

El sistema de medición de la celda de carga en la punta mostró fallas debido a los mismos problemas de maniobra y estanqueidad. En su lugar, es recomendable instrumentar la punta mayor número de sensores de concreto. Eventualmente, se pueden instalar celdas de presión en la punta.

El sistema de reacción y de aplicación de cargas probó ser eficaz y de fácil aplicación en otras pruebas.

REFERENCIAS

- ASTM Designation D 1143-81 (Reapproved 1987), Standard test method for piles under static axial compressive load, ASTM Standards, New York.
- Ibarra, E. and Mendoza, M. J. (2005), "Axial load tests on an instrumented cast-in-place pile at San Antonio crossroad in Mexico City", Proceedings of the III Young Geotechnical Engineering Conference, iYGEC, Osaka, Japón, septiembre.
- Mendoza, M. J., Ibarra, E., Aire, C., Romo, M. P., Olivares, A., Gómez, E., y Castillo, T. (2003) "Pruebas de carga en pilas instrumentadas del Distribuidor Vial San Antonio. Vías rápidas de la ciudad de México. Informe presentado al Gobierno del Distrito Federal, mayo.
- Ibarra, E., Paniagua, W. I, y Menoza, M.J., (2008), "Aporte del fuste y de la punta a la capacidad de carga axial en una pila colada in situ al Nororiente del Valle de México", XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Aguascalientes.