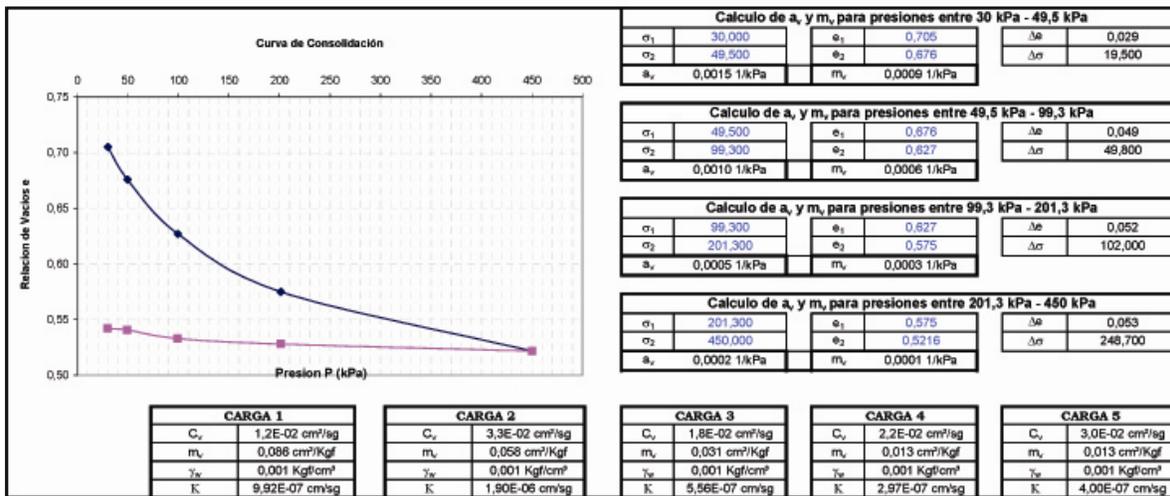


Tabla E-09-145-039 Curva Tiempo - Consolidación (Taylor)



NOTA: Los valores de C_v se calcularon con el método de Taylor

Figuras 31 y 32, ensayo de consolidación (Taylor).

Se concluye que para una presión de servicio de la estructura de $\Delta\sigma = 600 \text{ kN/m}^2$ (reacción de servicio, para la columna más cargada), y una presión de pre-consolidación $\sigma' = 73 \text{ kN/m}^2$, un gráfico similar propuesto en la Figura 6. (b) Schmertmann (métodos para interpretar $e-\log p$), se presenta en la Figura 33. Adicionalmente algunos datos registrados por el laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional de Colombia - seccional Medellín, registran:

Masa seca del espécimen,

$W_s =$

47.46 g

Altura del espécimen al inicio de la prueba,

$h_o =$

19.48 mm

Gravedad específica del espécimen,

$G_s =$

2.76

Diámetro del espécimen,

$\phi =$

44.81 mm

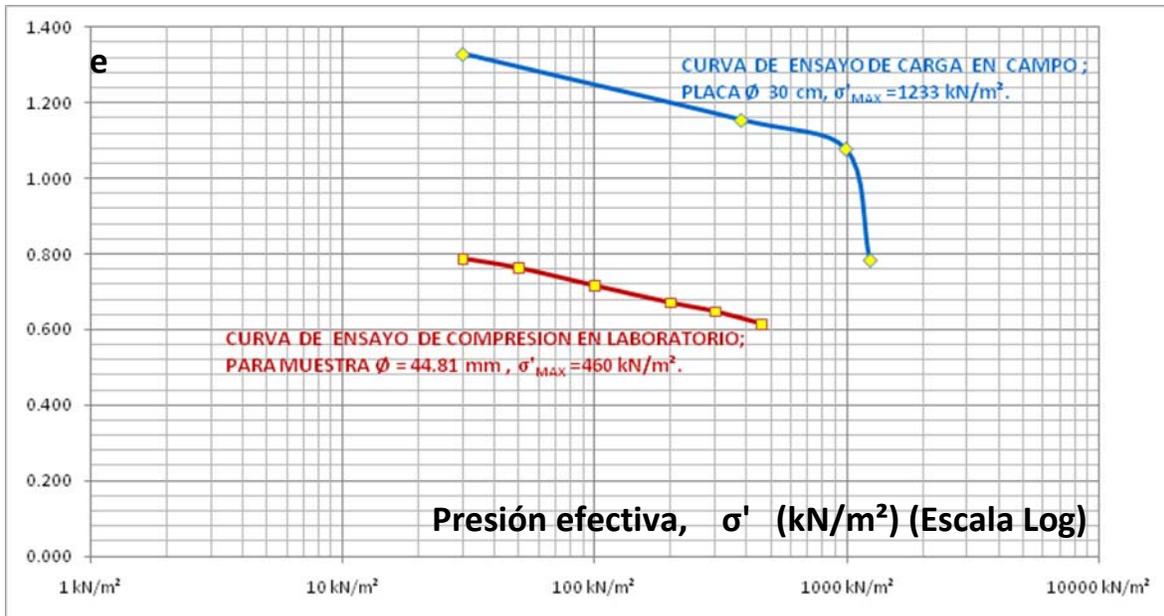


Figura 33. Gráfico, según parámetros dados por Schmertmann (métodos para interpretar e-log p.); relaciona dos curvas: 1) para una muestra de laboratorio de 4.481 cm de diámetro y una Presión efectiva de $\sigma'_{\text{máx}} = 460 \text{ kN/m}^2$ y 2) para un ensayo de carga en campo, realizado con una placa de sección circular de diámetro 30 cm y una presión máxima de 1233 kN/m^2 .

El anterior gráfico de la Figura 33, muestra que la relación de vacíos en el proceso de carga de la placa, se disminuye de 1.329 a 0.785 ($\Delta e = 41\%$), lo que muestra que el suelo finalmente alcanza un estado de compresión superior al estado inicial del suelo; una relación normal para este tipo de suelo en muestras de laboratorio varía entre $e_{\text{mín}} = 0.35$ a $e_{\text{máx}} = 0.92$ (HOUGH B.K. en LAMBE Y WHITMAN, 1979), para el caso se obtuvo la variación para la muestra de laboratorio entre $0.787 \leq e \leq 0.614$ ($\Delta e = 21.98\%$).

En el gráfico (b) de la Figura 6, La relación de vacíos, en la primera etapa de pre-consolidación de un suelo típico, en el ciclo de cargue, para el ensayo de campo y de laboratorio, varía en un 8% aproximadamente. Para la Figura 33, En el ensayo de carga realizado en el edificio San Giussepe La relación de vacíos, en la primera etapa de pre-consolidación del suelo en el ciclo de cargue, para el ensayo de campo y de laboratorio, varía en un 47% aproximadamente.

Lo anterior permite vislumbrar la ventaja de realizar los ensayos de campo en el medio, (en la práctica ingenieril) y adicionalmente permite apreciar ampliamente las diferencias de intervalos entre los ensayos de curvas típicas de laboratorio vs carga en fundaciones profundas, con las curvas de ensayos de laboratorio vs carga, realizados en el proyecto del edificio San Giussepe-Laureles.

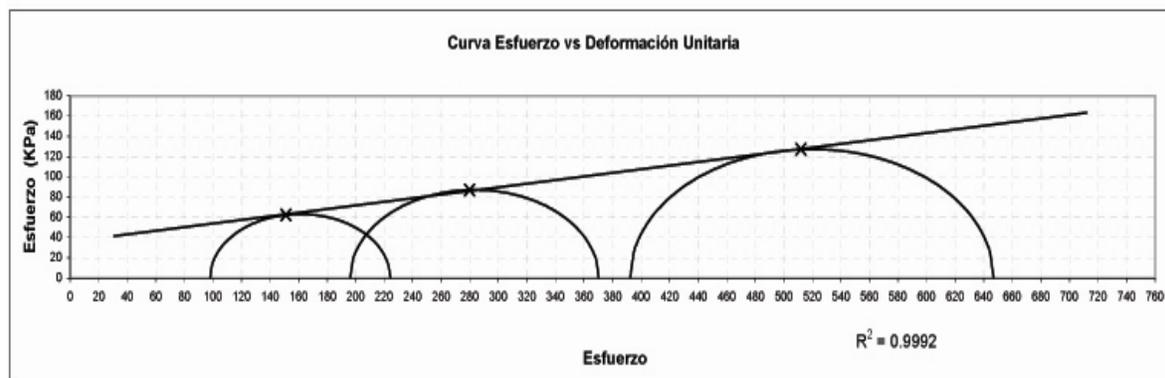
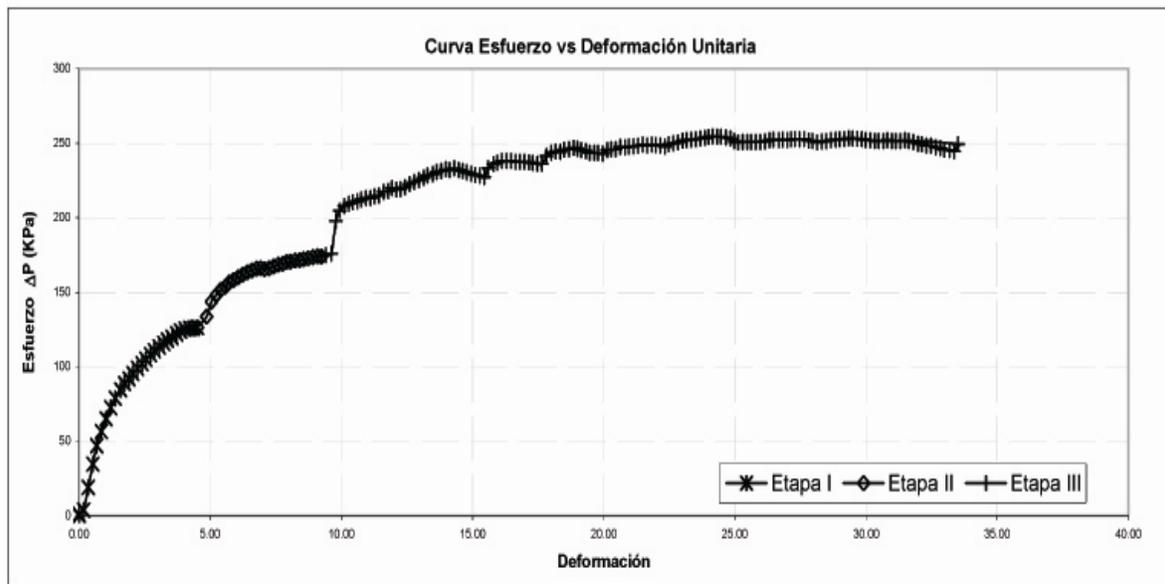
Se presenta en la Figura 34. Los resultados del ensayo de triaxial escalonado, realizado a la muestra entre 4.55-5.00 m, del edificio San Giussepe - Laureles.

ENSAYO DE TRIAXIAL ESCALONADO NORMA ASTM 3999-03

COMPAÑÍA: Intersión
PROYECTO: San Giuseppe
IDENTIFICACIÓN: E-09-145-039

PERFORACIÓN: AP1
MUESTRA: 2
PROFUNDIDAD: 4,55 - 5,0

Etapa No	Presión de P KPa	σ_c Kpa	σ Desviador Kpa	σ Principal Mayor Totales Kpa	σ_c Efectivo Kpa	σ Principal Mayor Efectivos Kpa
1	-	98.07	126.24	224.30	--	--
2	-	196.13	174.10	370.24	--	--
3	-	392.27	254.60	646.86	--	--



Angulo Fricción	10°	Peso Unitario	20.0 KN/m³
Cohesión (kPa)	36	Humedad Natural	26%

Figura 34. Ensayo de triaxial escalonado.

Según el ensayo de triaxial, el valor encontrado del Angulo de fricción interna del suelo, registra una magnitud de 10° y el valor de la cohesión de la muestra, una magnitud de 36 kPa.

5. Resultados de la pruebas piloto

Algunas pruebas, fueron fallidas. La primera versión de la viga de reacción se deformó en forma permanente y excesiva con una carga de 300 kilonewton, los pernos que fijan los rieles a las paredes del pozo fallaron por adherencia y por cizalladura y algunos de los extensómetros no registraron los asentamientos que a todas luces debieron darse. Cada condición anómala fue identificada y subsanada, Figura 35.



Figura 35. Falla de pernos por deformación excesiva, cizalladuras en pernos y en diagonales. Situaciones corregidas.

La Figura 36 muestra los resultados de uno de los ensayos fallidos. A continuación se encuentra un registro de los resultados relevantes de las pruebas de carga ejecutadas con el equipo. Los resultados de pruebas de carga en las que los extensómetros no registraron adecuadamente los asentamientos.

El suelo en el ensayo de carga mediante placa, en el fondo de la cimentación, se encontraba saturado, al momento de realizar los ensayos (Edificio San Giuseppe).

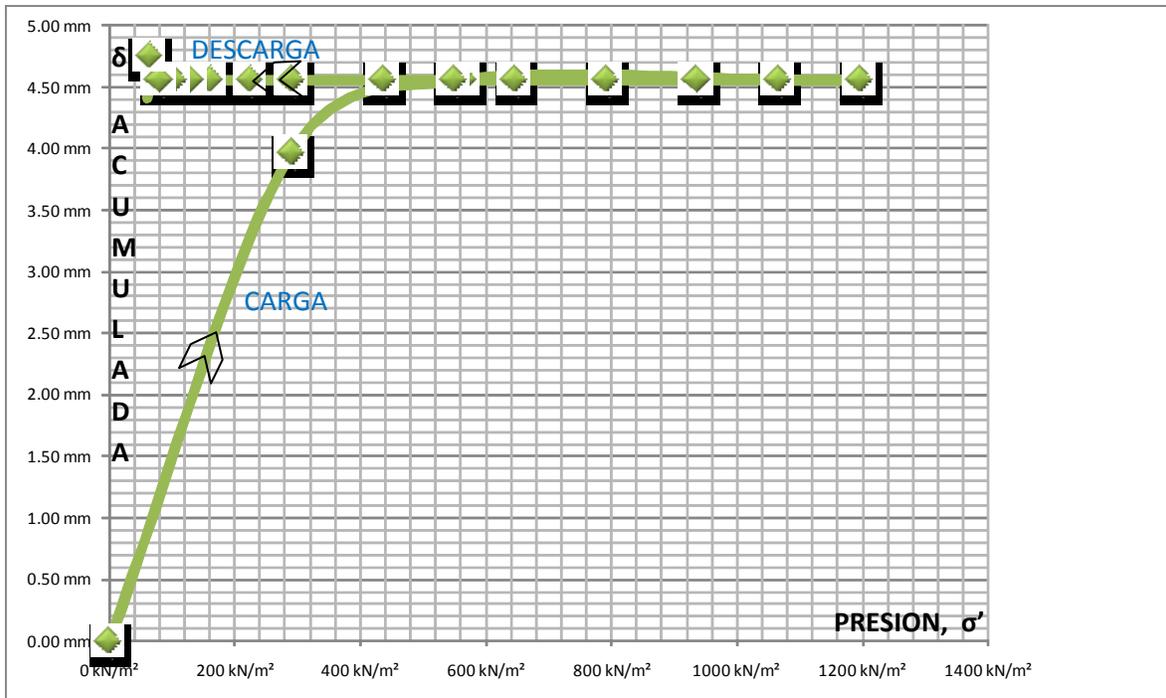


Figura 36. Prueba fallida en placa cuadrada L=12''.

Los resultados de los ensayos de carga en el Edificio San Giuseppe están ilustrados en las Figuras 36 a 46. Los ensayos fueron ejecutados a profundidades de 4 m, con placa cuadrada de lado 0,30 m, con placa circular de diámetro 0,30 m, a 5.0 m de profundidad, y con placa de sección circular de diámetro 0,45 m, a una profundidad de 6.50 m; posteriormente se llevo la excavación del pozo hasta 11.50 m, para verificar la estratigrafía del sitio.

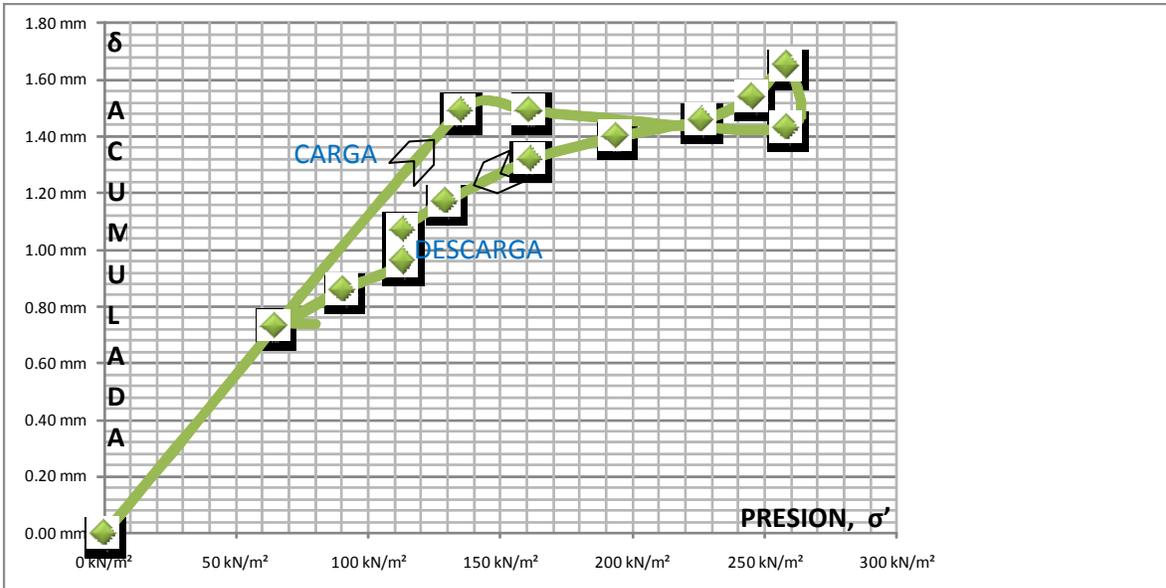


Figura 37. Prueba en placa cuadrada L=12", deformímetro 1.

En la figura 37, en la parte de la curva referente a la carga se observa un cambio de pendiente brusco, aproximadamente cuando la presión aumenta de 120 a 130 kN/m², en la carga del ensayo; lo anterior debido principalmente a lo heterogéneo del suelo, presentado este un acomodamiento del estrato de suelo-placa en la carga y a la participación del suelo granular, que conforman la estructura del mismo.

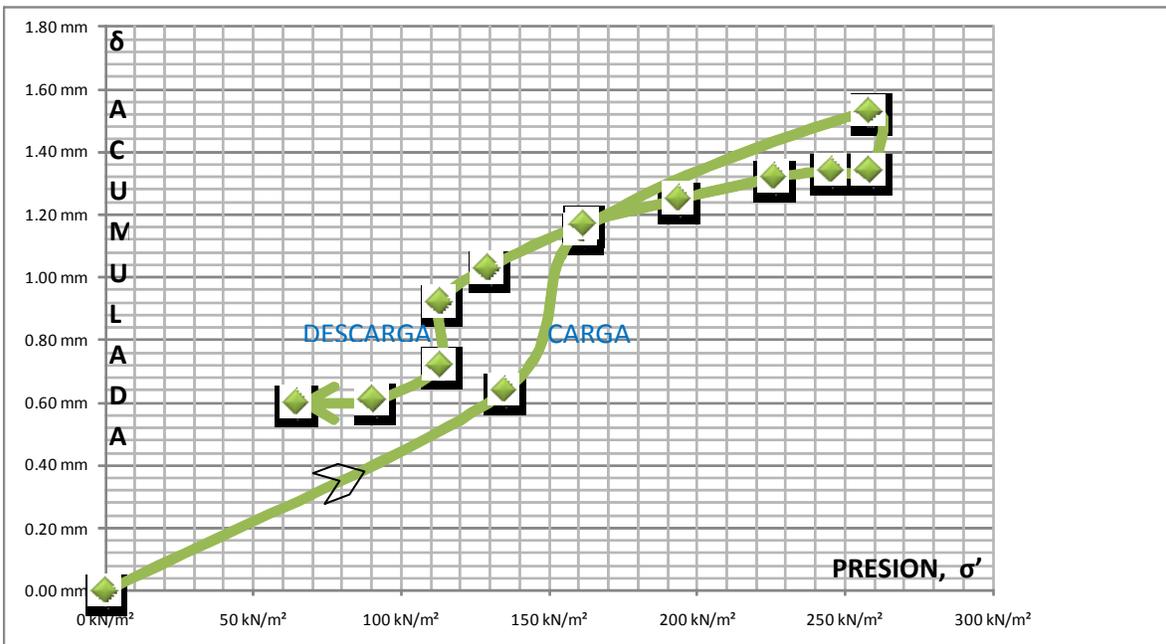


Figura 38. Prueba en placa cuadrada L=12", deformímetro 2.

En la figura 38, en la parte de la curva referente a la carga se observa un cambio de pendiente brusco, aproximadamente cuando la presión aumenta de 140 a 160 kN/m², en la carga del ensayo; lo anterior debido principalmente a lo heterogéneo del suelo, presentado este un acomodamiento del estrato de suelo-placa en la carga, a la participación del suelo granular y del sistema de bombeo, que conforman la estructura del mismo, situación similar presentada en el tramo de la descarga.

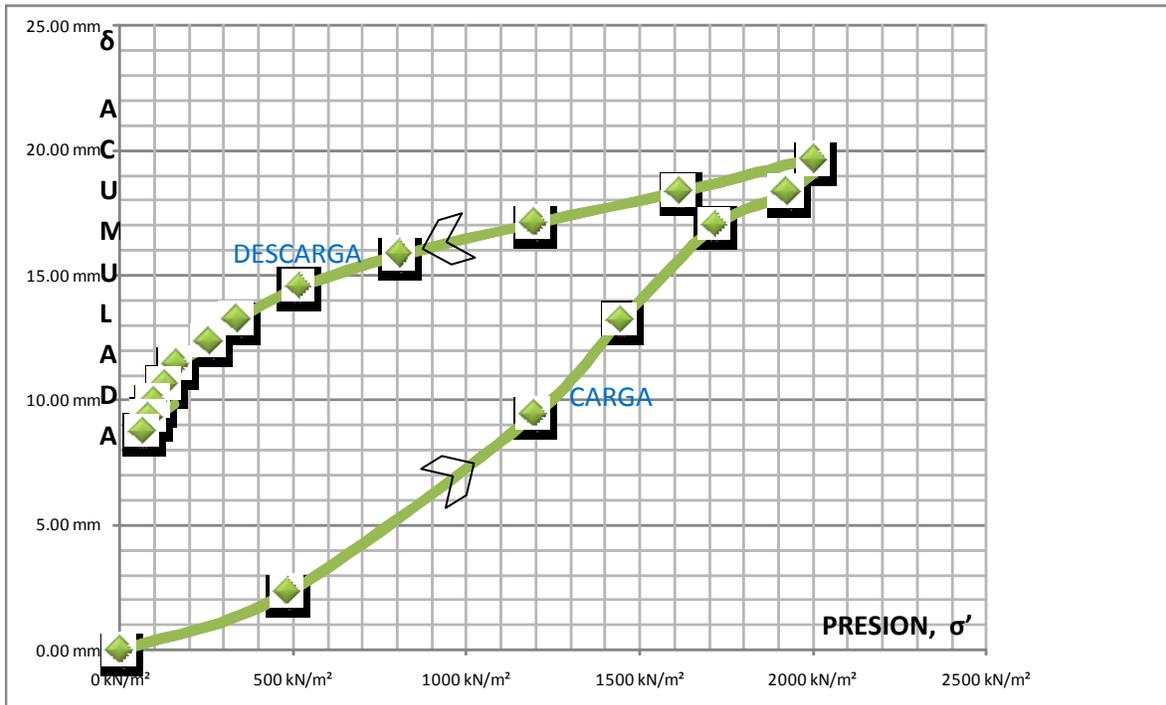


Figura 39. Prueba en placa cuadrada L=12".

En la figura 39, en la parte de la curva referente a la carga, se observa un comportamiento constante de la carga-deformación, situación similar presentada en la descarga. Es de anotar, que en todos los ensayos presentados en el ensayo de carga, por medio de placas; entre 640 kN/m² a 820 kN/m², los rieles adosados y sujetos a las paredes del pozo de inspección, sufrieron un primer desplazamiento brusco (ajuste) con deformaciones entre 0.20 mm a 0.50 mm; que se atribuye al acomodamiento propio de las fijaciones, pernos, rieles y elementos de la viga de reacción.

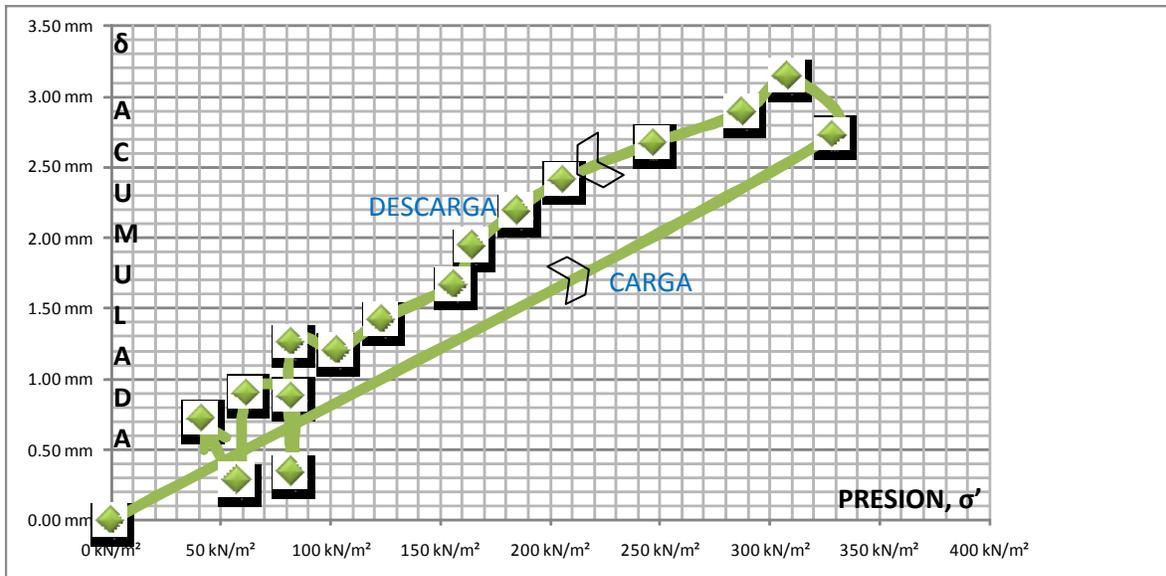


Figura 40. Prueba en placa redonda $\varnothing=12''$.

En la figura 40, en la parte de la curva referente a la carga se observa una pendiente constante lineal. En la descarga, el equipo presentó fluctuaciones de deformaciones, lo anterior debido principalmente a lo heterogéneo del suelo; presentado este un acomodamiento del estrato de suelo-placa en la carga debido a la participación del suelo granular y del sistema de bombeo. Situaciones estas que influyen el comportamiento de la estructura del mismo.

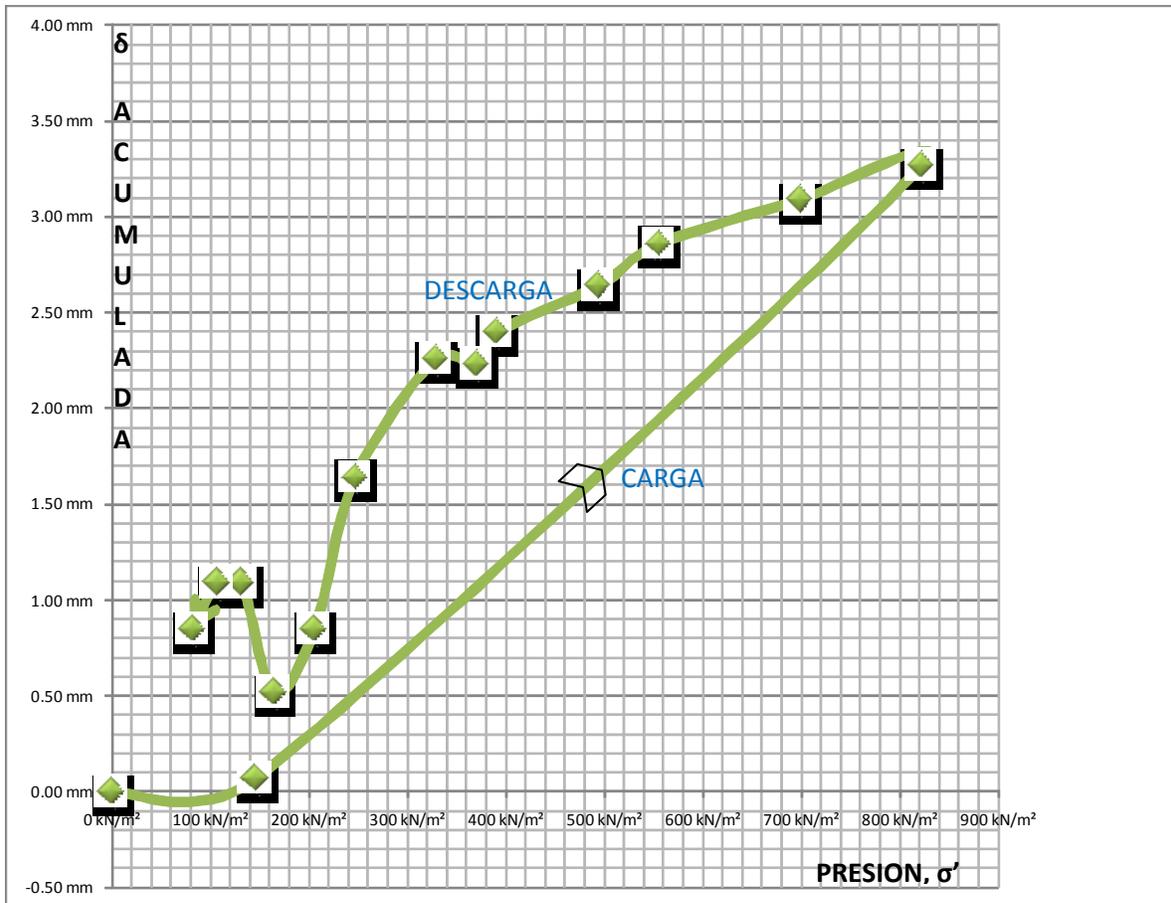


Figura 41. Prueba en placa redonda $\varnothing=12''$.

En la figura 41, en la parte de la curva referente a la carga se observa una pendiente constante. En la descarga, el equipo presenta fluctuaciones de deformaciones, lo anterior debido principalmente a lo heterogéneo del suelo; presentado este un acomodamiento del estrato de suelo-placa en la carga debido a la participación del suelo granular y del sistema de bombeo. Situaciones estas que influyen el comportamiento de la estructura del mismo.

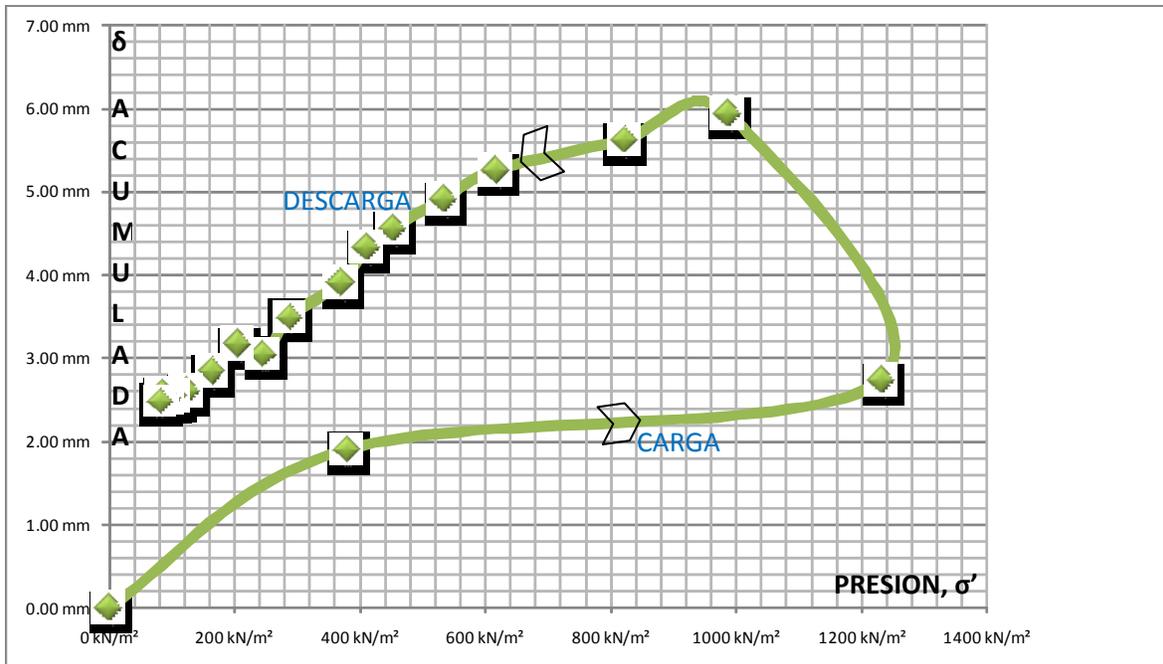


Figura 42. Prueba en placa redonda $\varnothing=12''$.

En la figura 42, en la parte de la curva referente a la carga, se observa un comportamiento constante de la carga-deformación, situación similar presentada en la descarga. Es de anotar, que en todos los ensayos presentados en el ensayo de carga, por medio de placas; entre 640 kN/m^2 a 820 kN/m^2 , los rieles adosados y sujetos a las paredes del pozo de inspección, sufrieron un primer desplazamiento brusco (ajuste) con deformaciones entre 0.20 mm a 0.50 mm ; que se atribuye al acomodamiento propio de las fijaciones, pernos, rieles y elementos de la viga de reacción. Adicionalmente, en el momento de realizarse el drenaje del pozo por medio de la bomba sumergible, se presentaban deformaciones en la placa, con intervalos entre 0.15 mm a 0.42 mm .

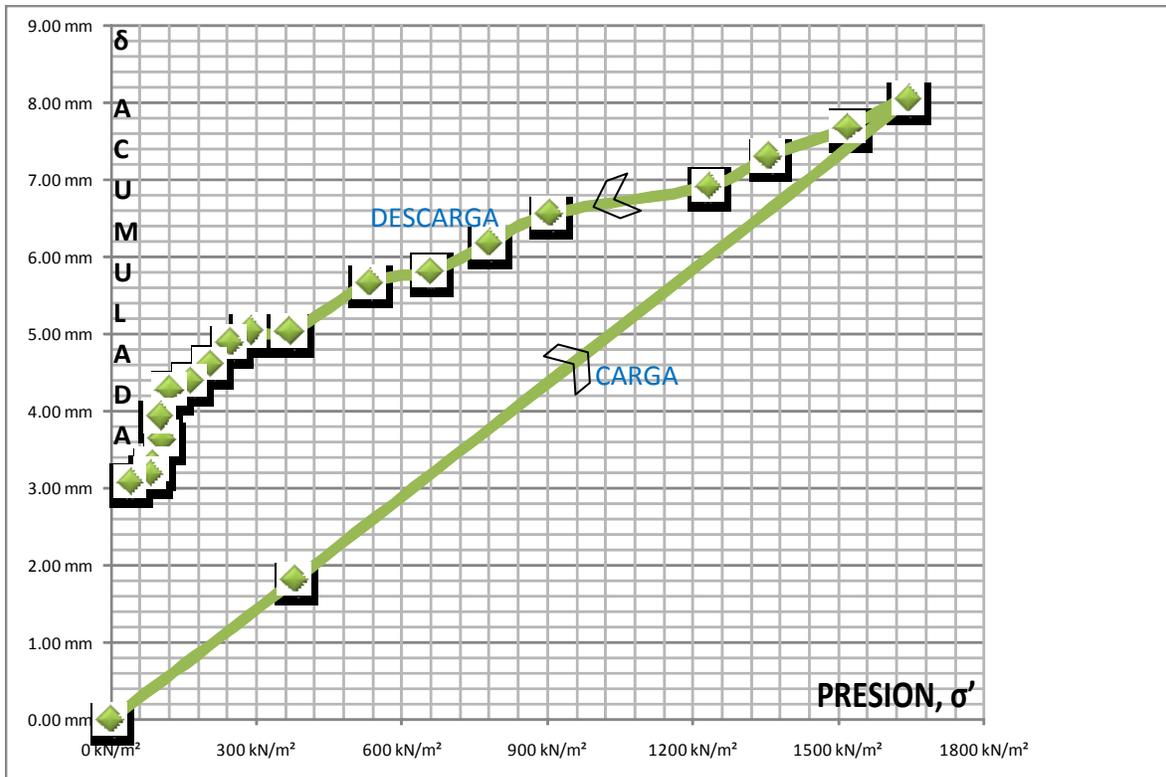


Figura 43. Prueba en placa redonda $\varnothing=12''$.

En la figura 43, en la parte de la curva referente a la carga, se observa un comportamiento constante lineal, de la carga-deformación, situación similar presentada en la descarga. Es de anotar, que en todos los ensayos presentados en el ensayo de carga, por medio de placas; entre 640 kN/m^2 a 820 kN/m^2 , los rieles adosados y sujetos a las paredes del pozo de inspección, sufrieron un primer desplazamiento brusco (ajuste) con deformaciones entre 0.20 mm a 0.50 mm ; que se atribuye al acomodamiento propio de las fijaciones, pernos, rieles y elementos de la viga de reacción. Adicionalmente, en el momento de realizarse el drenaje del pozo por medio de la bomba sumergible, se presentaban deformaciones en la placa, con intervalos entre 0.15 mm a 0.35 mm .

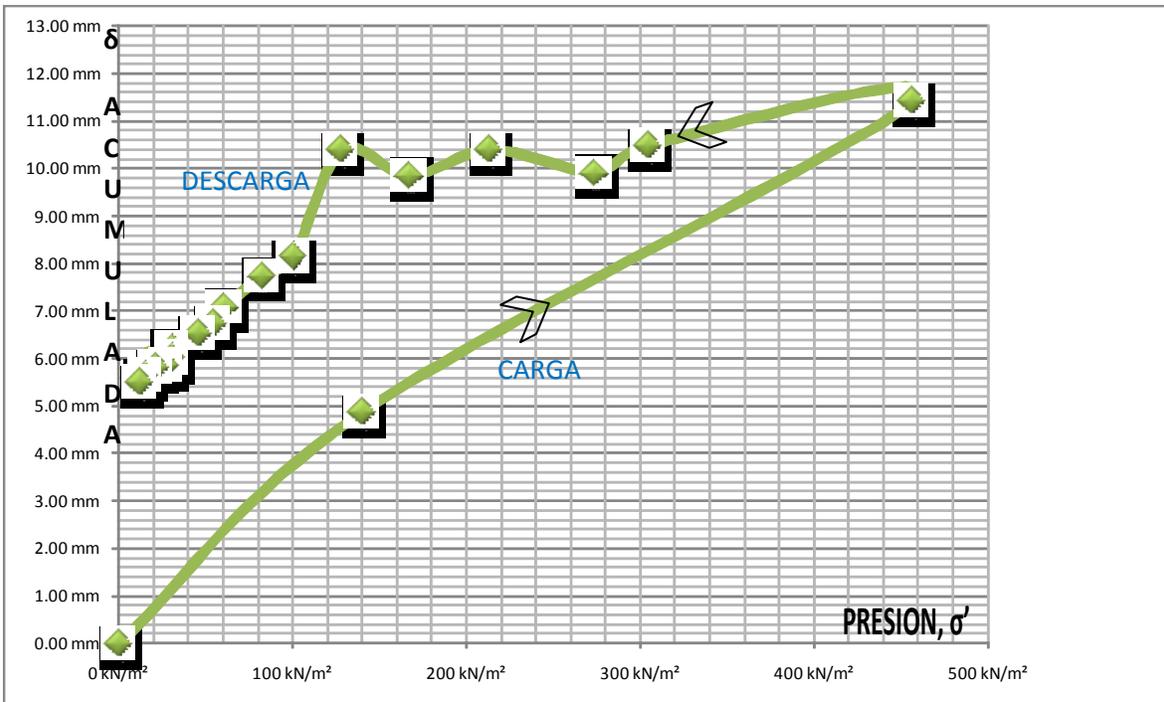


Figura 44. Prueba en placa redonda $\varnothing=18''$.

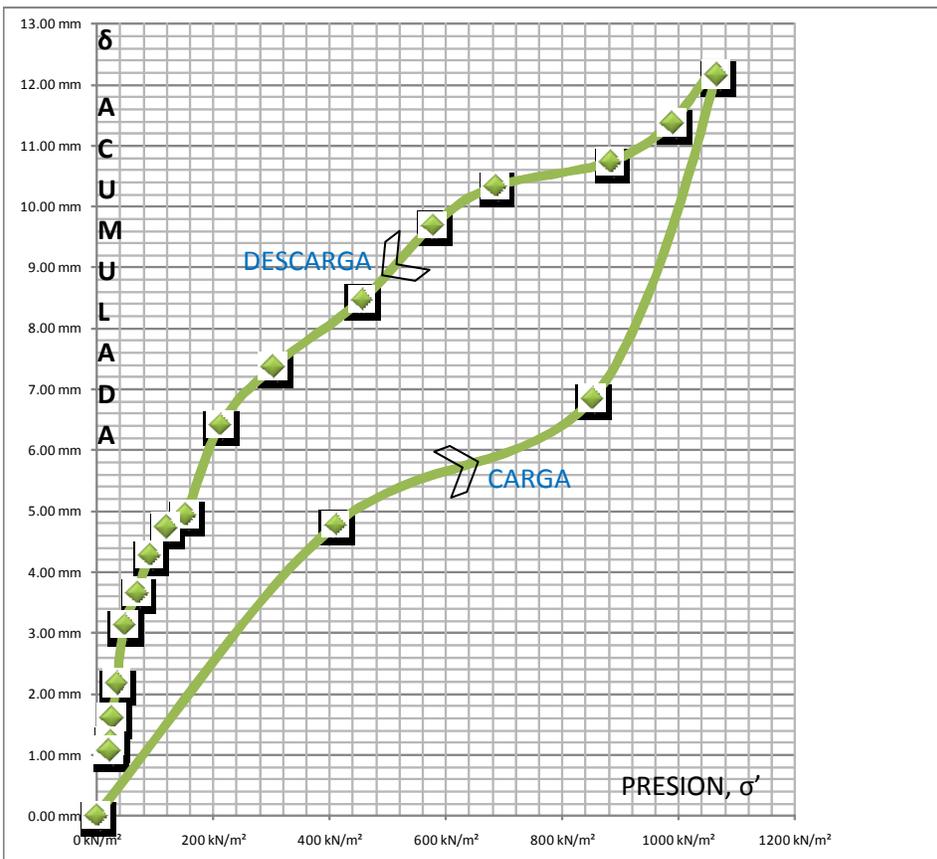


Figura 45. Prueba en placa redonda $\varnothing=18''$.

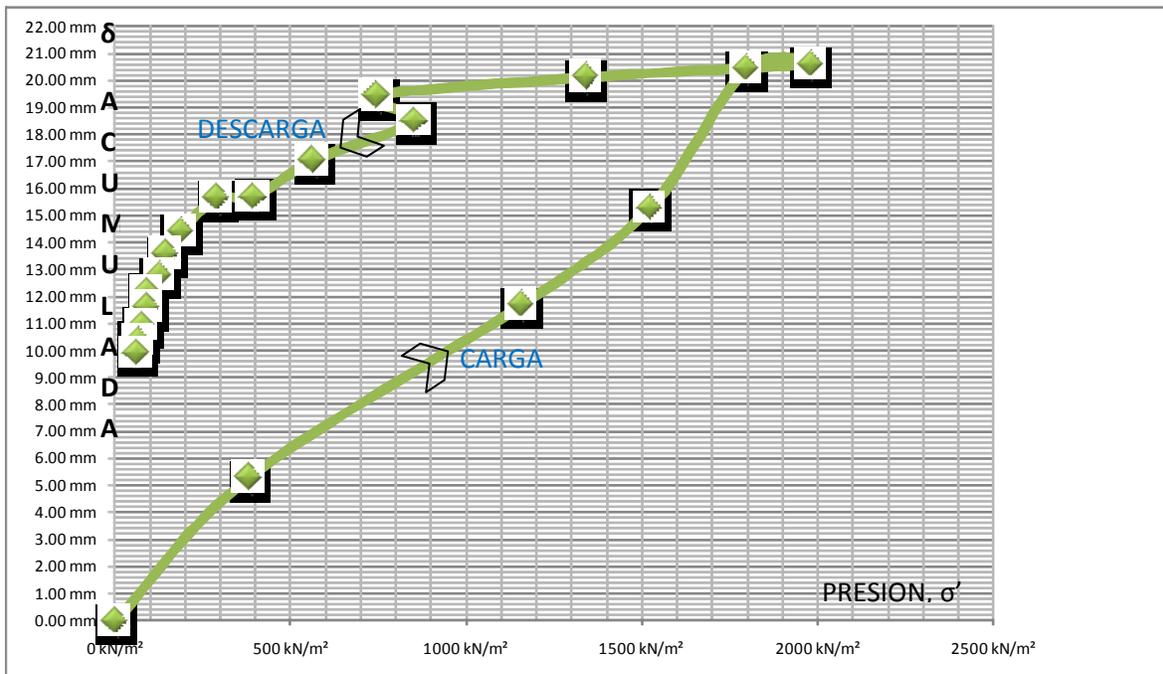


Figura 46. Prueba en placa redonda $\varnothing=18''$.

En las figuras 44, 45 y 46, se presentan, en la parte de la curva referente a la carga, un comportamiento aproximado constante lineal, de la carga-deformación, situación similar presentada en la descarga. Es de anotar, que en todos los ensayos presentados en el ensayo de carga, por medio de placas; entre 640 kN/m^2 a 820 kN/m^2 , los rieles adosados y sujetos a las paredes del pozo de inspección, sufrieron un primer desplazamiento brusco (ajuste) con deformaciones entre 0.20 mm a 0.50 mm ; que se atribuye al acomodamiento propio de las fijaciones, pernos, rieles y elementos de la viga de reacción. Adicionalmente, en el momento de realizarse el drenaje del pozo por medio de la bomba sumergible, se presentaban deformaciones en la placa, con intervalos entre 0.15 mm a 0.35 mm .

Las pruebas con placa cuadrada de $0,3 \text{ m}$ alcanzaron valores de 250 kPa de carga con $1,55 \text{ mm}$ de asentamiento (promedio de dos deformímetros) y 2000 kPa con 19.60 mm de asentamiento. Los asentamientos correspondientes a cargas intermedias de 800 y 1200 kPa , no fueron registrados adecuadamente. El modulo medio de reacción calculado para estas combinaciones de carga y asentamientos, es $13 \times 10^2 \text{ kPa/mm}$, con valores extremos $15,5 \times 10^2 \text{ kPa/mm}$ y $10,4 \times 10^2 \text{ kPa/mm}$. Las pruebas con placa redonda de $0,3 \text{ m}$ alcanzaron valores de 330 kPa de carga con 3.30 mm de asentamiento, 810 kPa de carga con $3,3 \text{ mm}$ de asentamiento, 1250 kPa con $5,9 \text{ mm}$ de asentamiento y 1645 kPa con 8.1 mm de asentamiento. El modulo medio de reacción calculado

para estas combinaciones de carga y asentamiento, s es, 19×10^2 kPa/mm, con valores extremos con valores extremos $9,9 \times 10^2$ kPa/mm y $25,6 \times 10^2$ kPa/mm.

Las pruebas con placa redonda de 0,45 m alcanzaron valores de 460 kPa de carga con 11,4 mm de asentamiento, 1070 kPa de carga con 12,2 mm de asentamiento, y 1980 kPa con 20,4 mm de asentamiento. El modulo medio de reacción calculado para estas combinaciones de carga y asentamientos es, $7,2 \times 10^2$ kPa/mm, con valores extremos $3,50 \times 10^2$ kPa/mm y $9,80 \times 10^2$ kPa/mm.

A guisa de ilustración, toda vez que la comparación no es posible, en las Figuras 22 a 34, se encuentra los resultados del ensayo de compresibilidad sobre un espécimen recuperado del pozo en el que se hizo el ensayo de placa. El modulo edométrico resultante se encuentra entre 1×10^{-4} kPa-1 y 3×10^{-4} kPa-1.

Si se toma como Modulo de Reacción 10×10^2 kPa/mm, puede aceptarse como capacidad admisible de carga en la base de las pilas un valor entre 8000 y 25400 kPa, según sea el factor de seguridad que se utilice.

6. Ventajas y desventajas en la utilización del equipo, comparativamente con otros existentes

Tabla 3. Ventajas y Desventajas comparativas entre equipos a nivel mundial.

CARACTERISTICA EVALUADA	EQUIPO, NORMA UNE 391-75	EQUIPO, NORMA AASTHO Y ASTM	EQUIPO, PROPUESTO VRR
La profundidad en la cimentación.	Permite	No permite	Permite
Costo del ensayo, con profundidades y evaluación de la precisión de resultados (mayores de 3.00 m)	Cumple con moderadas imprecisiones de resultados y moderados costos de instalación y operación ensayo	Cumple con imprecisiones de resultados y bajos costos de instalación y operación ensayo	Cumple con precisiones en resultados y altos costos de instalación y operación ensayo
Tipos de terreno, donde se puede realizar el ensayo	Gravas, arenas, limos y arcillas.	Gravas, arenas, limos y arcillas.	Gravas, fragmentos, arenas, limos y arcillas, macizos rocosos y roca.
Capacidad de carga/área unitaria	50 kN/m ² a 100 kN/m ²	150 kN/m ²	5500 kN/m ²
Amenaza a la vida del operario	Alta	Baja	Moderada con tendencia a baja de lograrse auto-instalar.
Deformaciones	Presenta desviaciones apreciables en las deformaciones por giro de viga y gato, e imprecisión de la instalación	Presenta esfuerzo-deformaciones, con gran probabilidad de lograr valores de deformaciones, con menores presiones de las realmente requeridas.	Presenta buenos resultados, ya que el esfuerzo es aplicado directamente en el fondo de la cimentación.

Tiempo de armado y operación, en profundidad	Rápido	No permite para cimentaciones en profundidad	Moderado
Tiempo de transcripción de los resultados y precisión de los mismos, en profundidad.	Lento e impreciso	No permite en profundidad	Inmediato y más preciso
Presentación estética y técnica del equipo	Moderadamente a baja	Baja	Muy presentable y técnica.

7. Recomendaciones (mejoras del equipo)

- 1) El equipo puede mejorarse por medio de la utilización de servos para auto instalarse.
- 2) El equipo, puede instrumentarse adicionalmente con actuadores, convirtiéndose en apto, para realizar ensayos dinámicos de carga de placa; la velocidad de carga y descarga del equipo, sería previamente calculada con una simulación estructural de la estructura a cimentar (periodo de diseño, T y calculo de R_o = coeficiente de capacidad de disipación de energía básico, definido para cada sistema estructural y cada grado de capacidad de disipación de energía del material estructural. Véase el Capítulo A.3. NSR-98).
- 3) El equipo permitiría medir esfuerzos en el terreno, lo que facilita la instalación de medidores de presión instrumentados en el suelo (debajo y lateralmente), para conformar gráficos paralelos con los gráficos dados por las teorías de bulbos de presiones y esfuerzos; como las propuestas por autores como Meyerhof, Vesic, Terzaghi, Prandtl y otros.
- 4) Con una instrumentación adicional, el equipo podría ofrecer a futuro, ensayos realizados de tres placas contiguas en aproximadamente 4 días, (sin incluir la excavación del pozo).

8. Conclusiones

Del trabajo de diseño, construcción y prueba del equipo para pruebas de carga estática sobre placa en pozos excavados para la construcción de pilas, pueden plantearse las siguientes conclusiones:

- 1) La utilización de este equipo permite evaluar in situ, las condiciones de cimentación de cimentaciones profundas.
- 2) El equipo cuenta con una adecuada instrumentación que permite su utilización en pozos de cualquier profundidad, incluso si la placa de carga se encuentra sumergida.
- 3) Cada uno de los componentes del equipo pueden ser adquiridos o manufacturados localmente.
- 4) La operación del equipo requiere personal especializado en el tema y con conocimientos en estructuras compuestas (estructuras metálicas-hormigón).
- 5) El factor humano es todavía imprescindible en el armado e instalación del equipo, situación esta que podría ser mejorada con tecnologías más sofisticadas de automatización.
- 6) Un ensayo corriente puede ejecutarse en una semana, con entrega inmediata de resultados.
- 7) EL equipo es complejo y los costos de un ensayo son altos.
- 8) El equipo es susceptible de modificaciones y mejoras mediante la utilización de servo motores automatizados y la optimización del registro de datos con instrumentación computarizada; disminuyen los gastos operacionales y el costo del ensayo y aumentan la precisión en los resultados (comparativamente con registro de datos manuales).
- 9) Los gráficos entre los datos registrados por el laboratorio y por los encontrados en el ensayo de carga por medio de placa en cimentaciones profundas, discrepan ampliamente, permitiendo que este tipo de ensayo ofrezca una mayor seguridad y precisión al análisis de cimentaciones.
- 10) El ensayo presenta mediciones tipo manuales, que deben ser superadas mediante la instrumentación y la precisión; ya que este tipo de mediciones manuales, sobre todo en procesos de carga, presentan amplias imprecisiones.

- 11) El equipo requiere la colocación de una celda de presión instrumentada, que permita medir, por medio de la instrumentación, mayores precisiones del ensayo.

9. Limitaciones

- 1) El equipo requiere para su instalación el conocimiento de la ingeniería geotécnica y de la ingeniería en estructuras.
- 2) El equipo requiere de precauciones adicionales con respecto a la seguridad industrial, razón esta que requiere presentar un personal calificado y altas inversiones en protecciones.
- 3) La relación costo/beneficio, en la utilización del equipo lo hace rentable.

Bibliografía

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: ASTM (Estados Unidos). Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements. s.n., 1997. Standard D 1196.
2. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (Estados Unidos): AASHTO Standard T-222-78. Standard Method for Nonrepetitive Static Plate Load Test of Soils and Flexible Pavement Components, for use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements. s.n., 1978.
3. CAQUOT, A & KERISEL, J. Tratado de Mecánica de Suelos. 1ed en castellano. Paris, France: Gaunthier-Villars, 1964.
4. FLORIDA RESEARCH REPORT 68-B (Estados Unidos). Nonrepetitive static load test of soils and flexible pavement components. En: Field Procedure for Performing Plate Bearind Test. s.n., 2000. 10 p. il: p. 9.
5. HOUSEL, W.S. A Generalized Theory of Soil Resistance: ASTM Special Technical Publication 206. s.n., 1956. p. 13-29.
6. COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, INVIAS: Norma I.N.V.E.-168. Ensayo de placa con carga estática no repetida, para emplear en la evaluación y diseño de pavimentos. s.f. p. 9.
7. NORMA ESPAÑOLA: UNE 7-391-75. Ensayo de carga de terrenos con placa. s.n. 1975. P. 3: il. p. 2,3.
8. OTALVARO, I.F. y NANCLARES, F.J. Elementos para obtener el módulo de reacción de subrasante. Dyna. s.n., 2009.
9. POULOS, H.G. Pile Load Test Methods. Applications and Limitations, en Libro homenaje a José A. Jiménez Salas- Geotecnia en: 2000, Ministerio de Fomento, CEDEX y Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica. Madrid : s.n., 2000.
10. SPANGLER, M. G. & HANDY, L. R. Soil Engineering. Fourth Edition. Cambridge: Harper & Row, 1982.
11. SOWERS, G. Y SOWERS, F. Introducción a la mecánica de suelo y cimentaciones. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1977. P. 677.

