



4. PRUEBAS DE CARGA

4.1 Características geotécnicas de los sitios de prueba

Para llevar a cabo la evaluación del comportamiento estático de cimentaciones piloteadas en materiales granulares y arcillosos, según se describió en el primer apartado, es fundamental realizar una comparación cuantitativa de resultados teóricos contra experimentales. El presente capítulo presenta resultados de dos pruebas de carga en pilas instrumentadas llevadas a cabo en la Ciudad de México; las pruebas se identifican como Sitio Periférico y Sitio San Antonio.

Antes de proceder a la realización de la descripción detallada de los sitios de prueba, resulta pertinente bosquejar un panorama global de los mismos. En la figura 4.1 aparece la localización de los sitios en dónde se llevaron a cabo las pruebas de carga. La prueba de carga llevada a cabo en Sitio Periférico se localiza, de acuerdo con la Zonificación geotécnica de la ciudad de México, en la Zona I (zona de lomas). Zona que se caracteriza por estar formada por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos (NTCDF-2004). Por otra parte, el Sitio San Antonio se localiza en la Zona II (zona de transición) definida en las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento del Distrito Federal, esta zona se caracteriza porque los depósitos profundos se encuentran a 20m de profundidad, o menos, y que está constituida primordialmente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con arcilla lacustre (NTCDF-2004).

4.1.1 Sitio San Antonio

Para determinar las características geotécnicas, así como la estratigrafía del sitio San Antonio, se realizó un sondeo de penetración estándar, SPT-2, y un sondeo selectivo con tubo Shelby, SS-2. El sondeo SPT-2, se llevó a una profundidad de 35.5 m de profundidad. La muestra más profunda se recuperó a 25.0 m.

Con base en los trabajos de campo y laboratorio efectuados, se realizó la interpretación estratigráfica que se muestra en la figura 4.2. De tal manera que los estratos que se definieron son los siguientes:

- De 0 a 2m: *Relleno Limo-arenoso*: con alto contenido de raíces y pedacería de ladrillos; el número de golpes varía entre 9 y 15.
- De 2 a 9m: *Arena limosa* con algunas gravillas y compacidad relativa que va de suelta a media; el número de golpes varía entre 4 y 15.
- De 9 a 15m: *Arena limosa* con gravas subredondeadas color café claro, de compacidad media a compacta; el número de golpes oscila entre 23 y 51.
- De 15 a 23m: *Depósito aluvial* formado por intercalaciones de arena arcillosa (con granos de cuarzo), de gruesa a fina, con gravas redondeadas de compacidad relativa que va de compacta a muy compacta, color gris claro.
- De 23.3 a 29.3m: *Arena fina arcillosa* de compacidad compacta a muy compacta, con gravillas cuyo porcentaje aumenta ligeramente con la profundidad.
- De 29.3 a 35.6: *Gravas angulosas con arena limosa*, muy compactas, de color blancuzco.

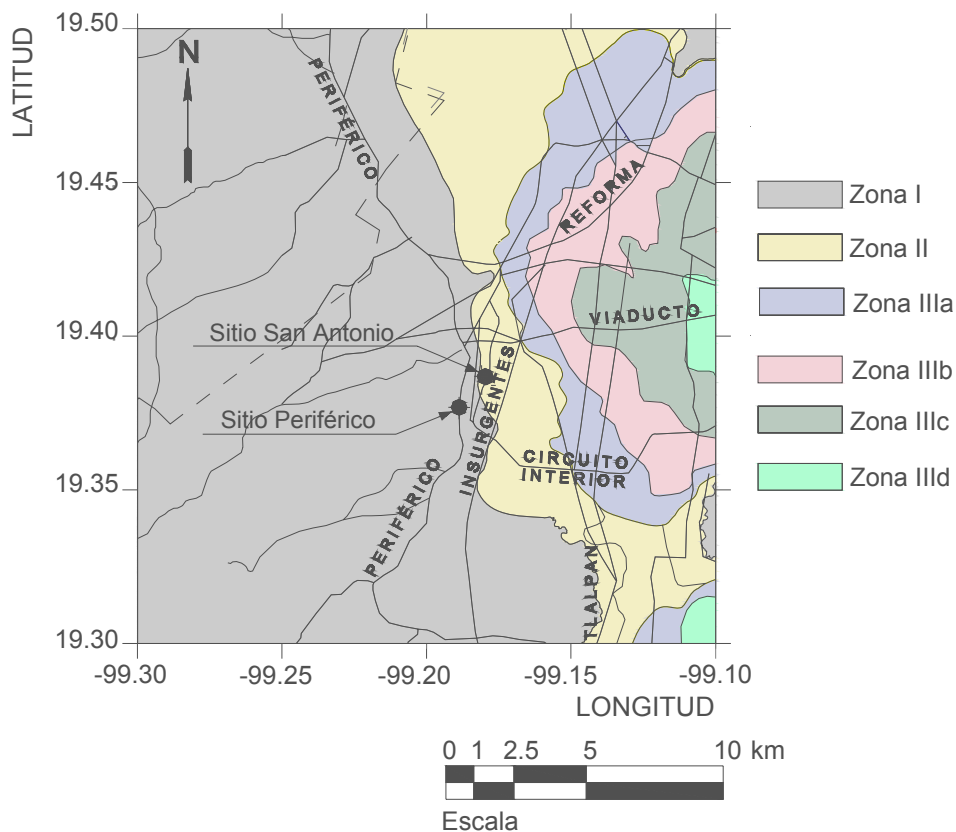


Figura 4.1 Localización de las pruebas de carga, en el marco de la zonificación geotécnica para el Distrito Federal, NTC, 2004



4.1.2 Sitio Periférico

Para llevar a cabo la identificación de los estratos del sitio de prueba, se realizó un sondeo de penetración estándar, SPT-1, y un sondeo selectivo con tubo Shelby; el sondeo por cuestiones de logística fue realizado a 450 m del sitio de prueba. Por otro lado, existe un sondeo de velocidad de onda de cortante, V_s , que se obtuvo con un sondeo de cono sísmico (Ovando *et al.*, 2002), figura 4.3.

La interpretación estratigráfica, figura 4.3, que se realizó con base en la campaña de exploración geotécnica y los análisis realizados en laboratorio, se resume a continuación:

- *De 0 a 2m: Relleno con alto contenido de raíces y pedacería de ladrillos.*
- *De 2 a 6m: Limo arcilloso de consistencia blanda a media, color café claro.*
- *De 6 a 36m: Intercalaciones de limo arenosa y arena limosa de consistencia muy firme y compacidad compacta respectivamente; con números de golpe entre 20 y 30 para el caso de limo arenoso; en tanto que, para los estratos arenosos el número de golpes es mayor de 50 y presentan un porcentaje variable de gravas.*

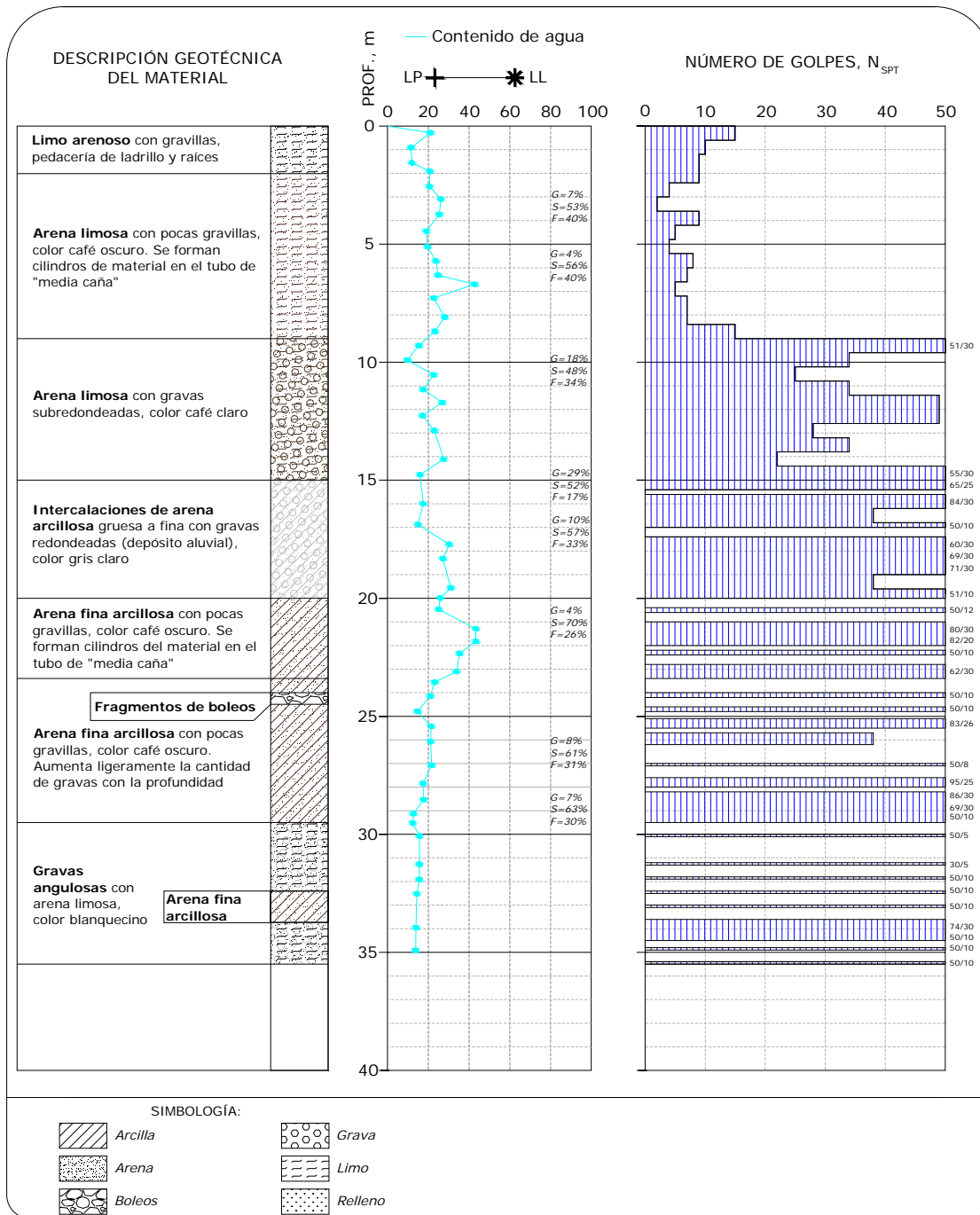


Figura 4.2 SPT- 2. Sitio San Antonio

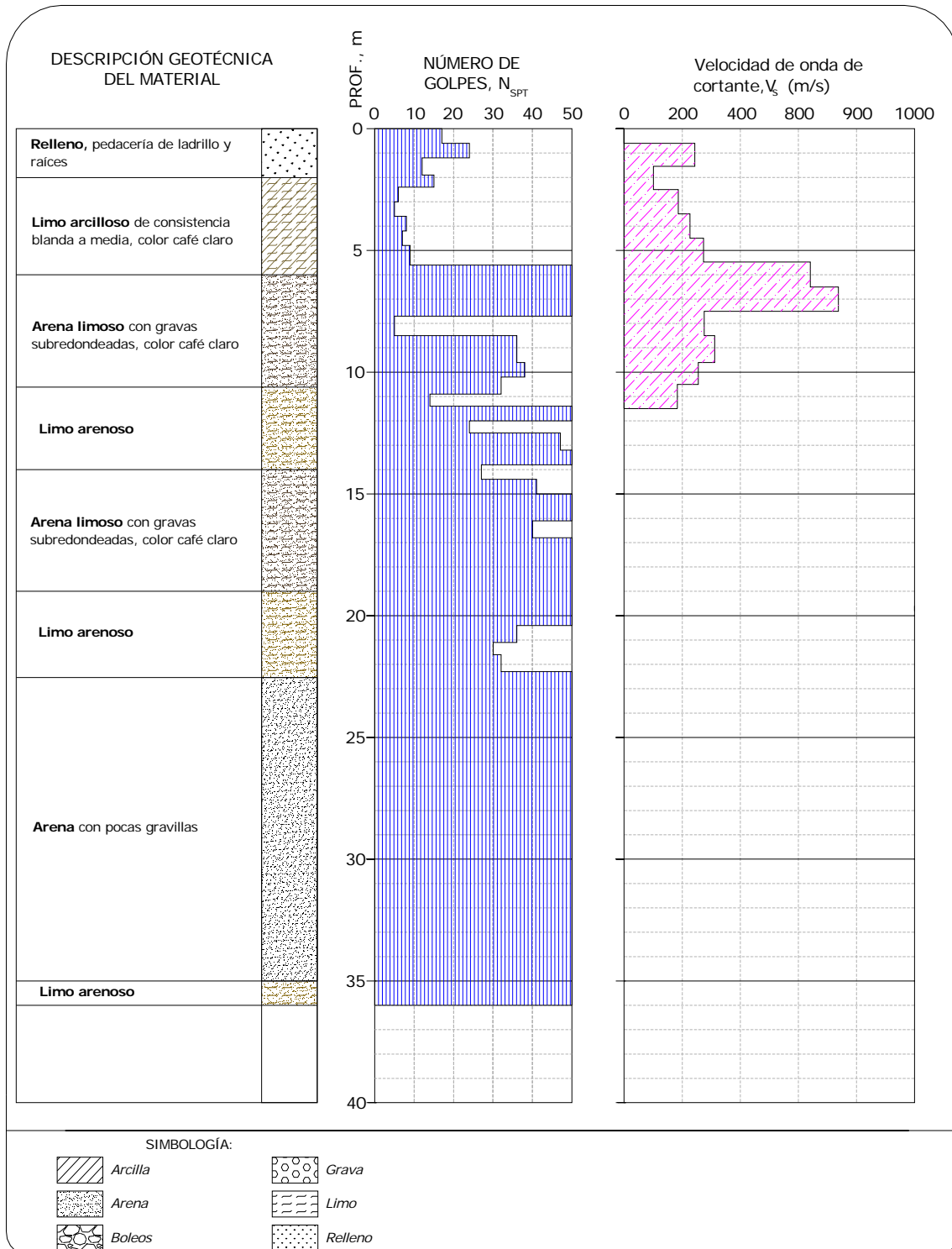


Figura 4.3. SPT. Sitio Periférico



4.1.3 Sitio Torre Mayor

Con la finalidad de determinar las propiedades estratigráficas del sitio, la campaña de exploración consistió en la realización de dos sondeos de cono eléctrico, hasta una profundidad de 40.0m, y cuatro sondeos de muestreo selectivo inalterado.

A las muestras así obtenidas se les aplicó ensayos índice para su clasificación. Mediante la realización de pruebas de compresión unidimensional y ensayos de compresión triaxial no consolidadas no drenadas (UU) y consolidadas no drenadas (CU) se determinaron las propiedades mecánicas para el sitio, tanto de resistencia como de deformabilidad.

Con base en los ensayos de laboratorio y la exploración de campo se realizó la siguiente interpretación estratigráfica, figura 4.4.

- *Relleno artificial*: Se localiza a partir del pavimento y hasta una profundidad de 2.5m; dicho estrato está constituido por una mezcla de arcillas con arenas y gravas.
- *Costra superficial*: Se ubica desde los 2.5 hasta los 5.0m de profundidad; conformado por limo arcilloso café, preconsolidado por secado solar, con lentes delgados de arena; su resistencia a la penetración registrada por el cono eléctrico varía entre 8 y 55 Kg/cm².
- *Formación arcillosa superior*: subyace a la costra superficial y alcanza una profundidad de 25.5 metros. Corresponde a la secuencia de la arcilla de zona de lago y su coloración es gris verdoso. Entre los 5 los 13m de profundidad, la resistencia en pruebas de compresión UU es de 4.2 t/m²; en tanto que, entre los 13 y 18m es de 9.2 t/m²; finalmente, entre los 18 y 25.5 es de 14.8t/m². Por otro lado, su resistencia a la penetración registrada por el cono eléctrico alcanza valores de hasta 150 Kg/cm².
- *Capa dura*: se ubica entre los 25.5 y los 29.5m de profundidad, está conformado por arenas limosas de color verde olivo. En el sondeo con cono eléctrico se registró una resistencia a la penetración de más de 300 Kg/cm².
- *Formación arcillosa inferior*: subyace a la capa dura y alcanza una profundidad de 32.2m; está formada por arcillas lacustres preconsolidadas, intercalados con estratos arenosos. Aquí la resistencia a la penetración del cono se ubica entre 15 y 25 Kg/cm².
- *Depósitos profundos*: a partir de 32.2m y hasta la finalización del sondeo, se encontró un estrato areno limoso con compacidad relativa muy alta. El ángulo de fricción para estos materiales se determinó entre los 32 y 45°. La resistencia a la penetración del cono alcanzó valores del orden de 200 Kg/cm².

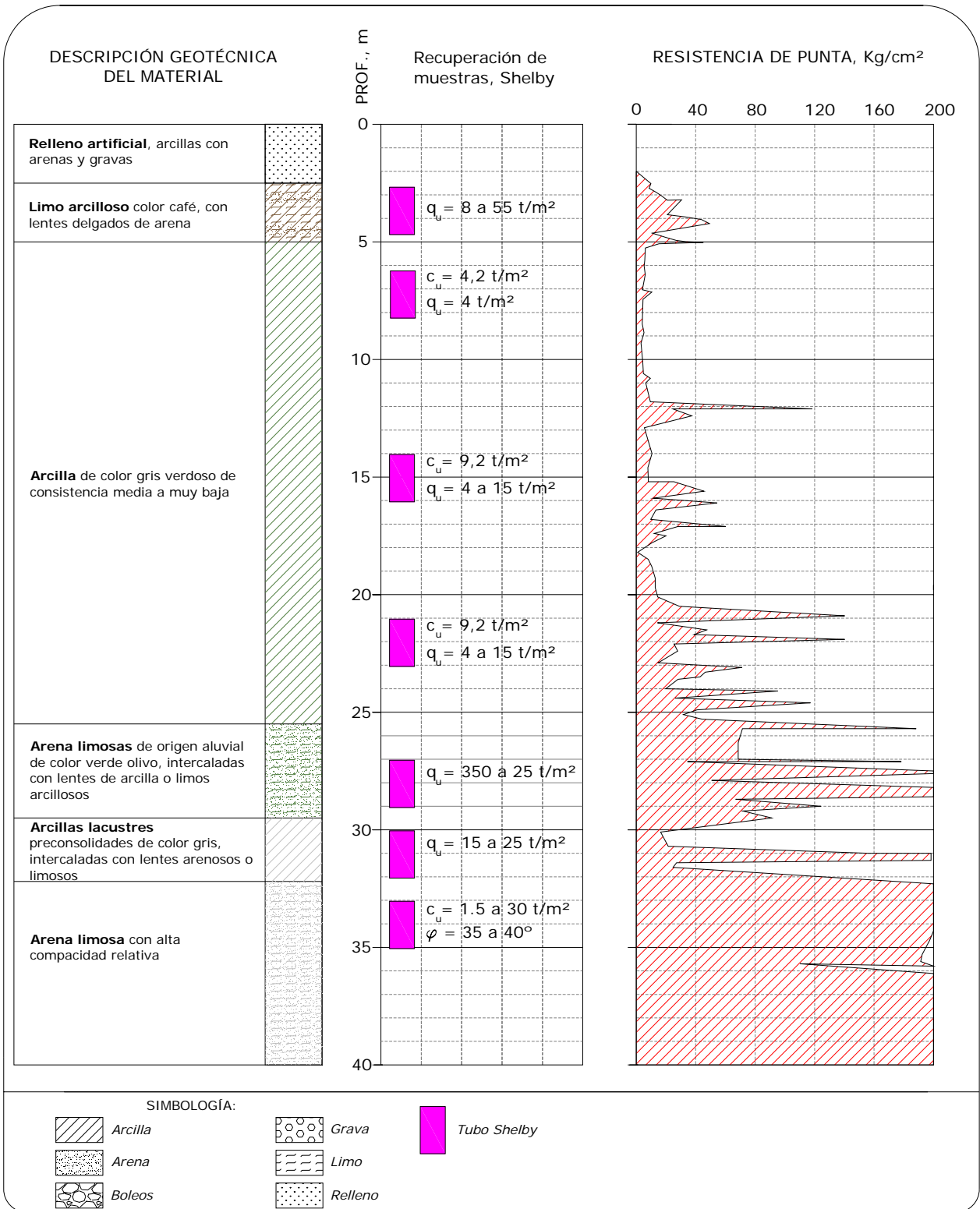


Figura 4.4. Sondeo de Cono Eléctrico. Sitio Torre Mayor



4.1.4 Sitio Viaducto Bicentenario

La exploración de campo consistió en un sondeo mixto (SPT-A72) intercalando la técnica de penetración estándar y recuperación de 2 muestras inalteradas empleando tubo tipo Shelby (de 6.70 m a 8.10 m, y de 10.50 m a 11.90 m); adicionalmente se realizaron 5 pruebas de ficómetro (a las profundidades de 4.70m, 15m, 18m, 21m y 24 m).

A las muestras así obtenidas se les aplicó ensayos índice para su clasificación. Mediante la realización de pruebas de compresión unidimensional y ensayos de compresión triaxial no consolidadas no drenadas (UU) y consolidadas no drenadas (CU) se determinaron las propiedades mecánicas para el sitio, tanto de resistencia como de deformabilidad.

Con base en los ensayos de laboratorio y la exploración de campo se realizó la siguiente interpretación estratigráfica, figura 4.5.

- *Relleno artificial* de 0.60 m de espesor, compuesto principalmente por una arena arcillosa de color café oscuro con 13% de finos; contenido de agua de 10%; presenta más de 50 golpes de acuerdo con la prueba de penetración estándar.
- *Arcilla* de color café oscuro, de consistencia blanda extendiéndose hasta 2.50 m aproximadamente; este estrato presenta entre 65 y 85% de finos, un contenido de agua de 26%, y en promedio reporta 8 golpes en la prueba de penetración estándar (N=8).
- *Grava empacada en una matriz de arena* fina a media, de color café a gris, de compacidad media, se extiende hasta 5.80 m de profundidad y presenta 50% de gravas y 41% de arenas, aproximadamente el contenido de agua en promedio es de 8%. De acuerdo con la prueba de penetración estándar presenta entre 20 a 30 golpes, y de acuerdo con la prueba del ficómetro, la resistencia al esfuerzo cortante está definida por un ángulo de fricción de 18° y resistencia no drenada C_u de 4 t/m^2
- *Arcilla limosa* de color café oscuro de consistencia blanda con algunas intercalaciones de arena fina a media, la cual se extiende hasta los 11.80 m de profundidad; el contenido de agua varía entre 40% y 80%. Su límite plástico varía de 25 a 33% y el límite líquido se encuentra entre 47% y 54%; la densidad de sólidos es de 2.50. De acuerdo con las pruebas triaxiales realizadas, presenta un peso volumétrico de 1.60 a 1.65 t/m^3 . La resistencia al esfuerzo cortante no drenada se encuentra entre 2.3 a 5.0 t/m^2 y un ángulo de fricción Φ_u de 6° . El número de golpes varía entre 3 y 10.
- *Grava empacada en matriz de arena* fina a media, de color gris oscuro, de compacidad muy densa, con lentes de limo arenoso; este paquete se extiende hasta los 30 m de profundidad, el contenido de agua es menor a 20%, presenta una media de 15% de finos y de acuerdo con la prueba de penetración estándar $N > 50$ golpes. El ángulo de fricción de acuerdo con la prueba realizada con



ficómetro varia en el intervalo de 33° a 36° con un promedio de 35°; mientras que la resistencia no drenada C_u varia entre 2.5 a 4.0 t/m².

- *Arcilla arenosa* de color gris verdoso, poco limosa, de compacidad media, que se extiende hasta los 33.50 m de profundidad, presenta en promedio 40% de contenido de agua, la densidad de sólidos es 2.63 y presenta más de 60% de finos, de acuerdo con la prueba de penetración estándar el número de golpes varía entre 11 y 30.
- *Grava empacada en matriz de arena* fina a media, de color gris oscuro, de compacidad muy densa que se extiende hasta la máxima profundidad de exploración. Presenta en promedio 20% de contenido de agua y entre 10 y 17% son partículas finas. $28 > N > 50$ golpes.

El perfil estratigráfico se muestra en la figura 4.5 y los resultados de la prueba de ficómetro se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resumen de las propiedades mecánicas, empleado el ficómetro

| Prof.[m] | Parámetros mecánicos | |
|----------|-----------------------|------------------------|
| | c [t/m ²] | Ángulo de fricción [°] |
| 4.70 | 4.00 | 18.00 |
| 15.00 | 4.00 | 35.00 |
| 18.00 | 2.50 | 33.00 |
| 21.00 | 3.00 | 36.00 |
| 24.00 | 3.50 | 37.00 |

Por otro lado, pese a que se contaban con resultados de cuatro sitios de prueba, en la presente tesis únicamente se llevó a cabo la modelación numérica de los primeros dos sitios de carga (sitio San Antonio y Periférico) toda vez que fueron los que presentaron un mejor comportamiento considerando únicamente la prueba de carga estática.



4.2 Descripción general de las pruebas de carga *in situ*

La finalidad de realizar una prueba de carga en campo (*in situ*) generalmente consiste en someter a la pila a cargas crecientes y decrecientes (carga y descarga), registrando con micrómetros el desplazamiento que sufre el cabezal, referenciándola a apoyos fuera de la influencia de los elementos de reacción y de la propia pila de prueba. Las cargas pueden ser de tipo axial, lateral o de extracción. En lo subsiguiente se hace una descripción general para cada uno de los sitios de prueba.

4.2.1 Pruebas de carga axial

Para los sitios San Antonio y Periférico, el arreglo para llevar a cabo la prueba de compresión axial consistió de una pila central (pila de prueba) y cuatro pilas equidistantes que la rodean. De tal manera que las cuatro pilas que la rodean aportan la reacción necesaria para aplicarle hasta 9810 kN. La separación entre la pila de reacción y la pila de prueba fue de 2.6 m.

En cuanto a las pilas de prueba: la de prueba a compresión axial en el Sitio San Antonio tuvo una longitud efectiva de 26.3 m y un diámetro medio de 0.68 m. Las pilas de reacción se llevaron a una profundidad de 27.5 m y su diámetro medio fue de 0.63 m; éstas se dejaron con una longitud colada saliente de 0.40 m, a partir de la cual sólo continuaban las varillas de una pulgada de diámetro que se sujetaron al marco de reacción. En el sitio Periférico, la longitud efectiva de la pila de prueba a compresión axial fue de 22.5 m y su diámetro medio fue de 0.63 m, de igual manera, estas se dejaron con una longitud colada de 0.40 m. La figura 4.6 muestra un arreglo general de los elementos que intervienen en una prueba de carga. Por otro lado; se ensayaron dos pilas ante carga lateral en el sitio San Antonio, PCLS y PCLC, cuyas profundidades de desplante fueron de 25.6 m y diámetros de 0.63 m y 0.68 m respectivamente. En el sitio Periférico se llevó a cabo una prueba única de carga lateral cuya profundidad de desplante fue de 20.8 m y diámetro de 0.68 m.

Por lo que se refiere a la instrumentación de las pilas sometidas a carga axial se colocaron dos micrómetros y dos transductores de desplazamiento, DCDT, a fin de monitorear los desplazamientos en la pila; y, por otra parte se colocaron cuatro celdas de carga tanto en la cabeza como en la punta de las pilas. La transferencia de carga a lo largo del fuste de la pila fue monitoreada por medio de once strain gages que se soldaron en las barras de acero de refuerzo longitudinal en cada una de las pilas de prueba.

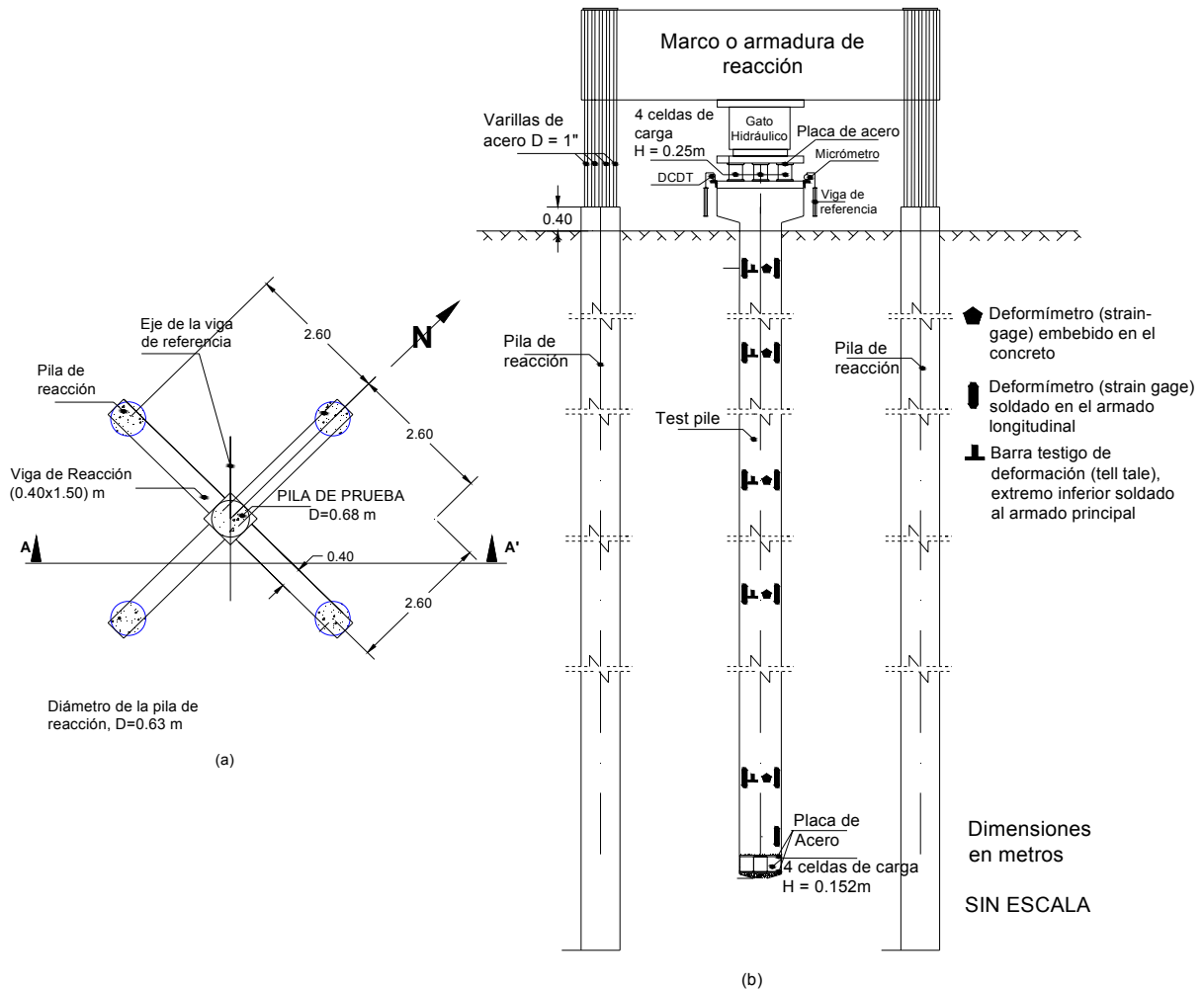


Figura 4.6. Arreglo para llevar a cabo la prueba de carga axial a) vista en planta y b) corte A-A'

4.2.2 Pruebas de carga lateral

Para el sitio de prueba Periférico únicamente se llevó a cabo una prueba de carga; sin embargo, para el sitio San Antonio se llevaron a cabo dos en diferentes pilas, las cuales se referencian como PCLS y PCLC. La pila de prueba del sitio periférico tuvo un diámetro medio de 0.68 m y una longitud de desplante de 20.8 m. Para el sitio San Antonio, la longitud de desplante de ambas pilas fue de 25.60 m con diámetros de 0.63 m y 0.68 m para la pila PCLS y PCLC respectivamente. La instrumentación interna de la pila PCLS fue nula y la carga fue aplicada al nivel del terreno natural. La carga lateral en la pila PCLC se aplicó 1.5 m por debajo de la superficie del terreno, a fin de verificar la influencia

del relleno sobre la respuesta ante carga lateral de la pila. El arreglo del sistema de reacción se muestra en la figura 4.7. La carga horizontal se aplicó mediante gato hidráulico colocado horizontalmente, el sistema de reacción fue constituido por una viga de reacción.

En lo referente al referente al registro de los desplazamientos laterales a lo largo del fuste de cada una de las pilas se colocaron doce strain gages soldados en el acero longitudinal de refuerzo así como un tubo de inclinómetro a lo largo del acero longitudinal de refuerzo. Adicionalmente, únicamente en la pila PCLC se colocaron 12 strain gages embebidos en el concreto.

La figura 4.7 muestra un arreglo general de los elementos que intervienen en una prueba de carga lateral.

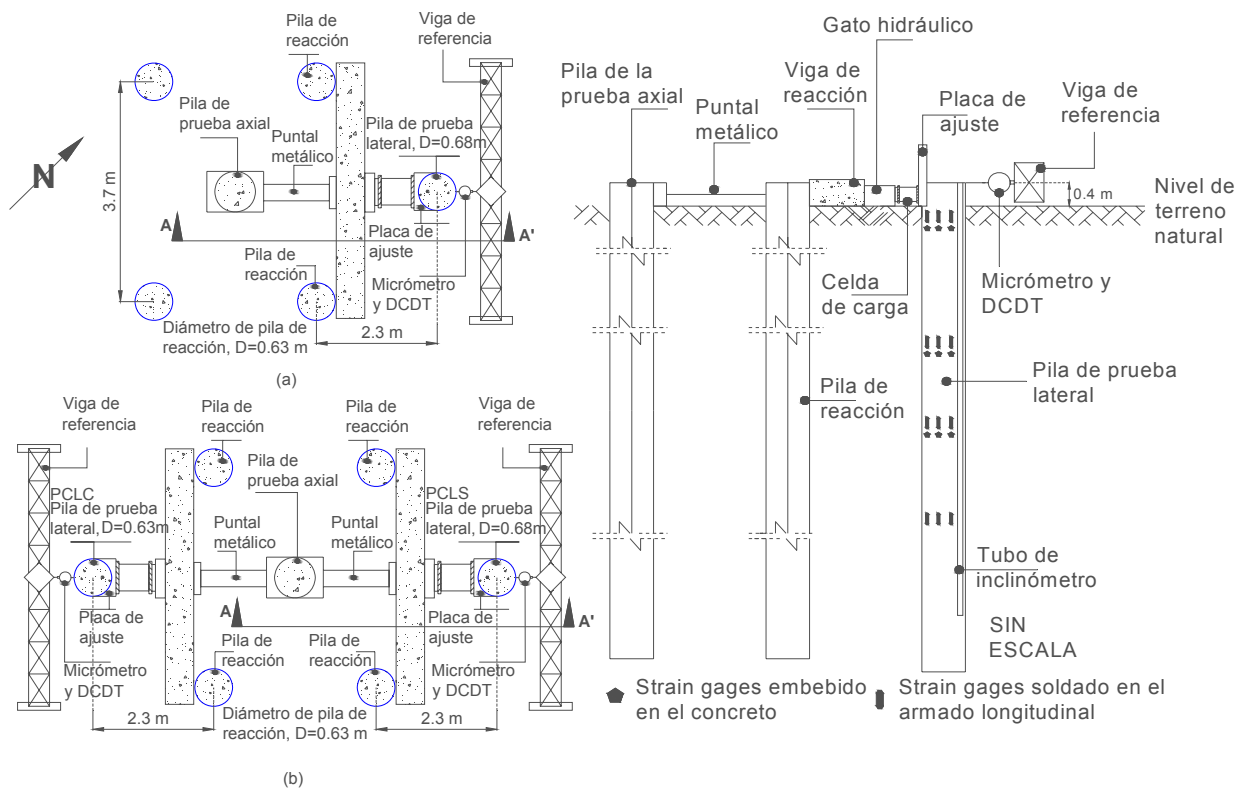


Figura 4.7. Arreglo para llevar a cabo la prueba de carga lateral a) vista en planta Sitio Periférico, b) vista en planta sitio San Antonio y c) corte A – A'



4.3 Resultados de las pruebas de carga

4.3.1 Sitio San Antonio

A continuación se hace una descripción de las pruebas de carga con base en el informe presentado por Mendoza, *et al.*, 2003 referente a “*Pruebas de carga en pilas instrumentadas del distribuidor vial San Antonio*”; así también, se realiza una breve descripción de la prueba de carga axial llevada a cabo en el Sitio Torre Mayor, tomando como referencia principal la tesis de Maestría desarrollada por el Ing. Enrique Ortiz.

Prueba de carga axial

Como se mencionó en el apartado 4.2, generalmente las cargas aplicadas durante la ejecución de una prueba de carga son de carga y descarga. Es preciso mencionar, por tanto, que las pruebas de carga se llevan a cabo en etapas. Las etapas de la prueba de carga axial realizada en el Sitio San Antonio se describen brevemente a continuación, los valores que se muestran son los nominales:

1ª. Etapa de carga a 1569.6 kN

- Se aplicaron 8 incrementos de carga axial de 196.2 kN cada uno, con un intervalo de tiempo de 600 s, con lo que se generaron 1569.6 kN.
- Posteriormente la pila fue descargada, debido a cuestiones técnicas, de manera inmediata.

2ª. Etapa de carga a 3139 kN

- Se aplicaron 8 incrementos de carga axial de 392.4 kN cada uno, teniéndose un intervalo de tiempo de 600 s, con lo que se generaron 3139.2 kN.
- La carga total se mantuvo durante 40 minutos.
- La pila fue descargada mediante decrementos de carga de 392.4 kN; los decrementos se aplicaron cada 180 s.

3ª. Etapa de carga: Procesos de carga cíclica

- Se recargó la pila de manera rápida hasta una carga de 1569.6 kN, la que se mantuvo sostenida, y a partir de la cual se impusieron dos procesos cíclicos de carga cada uno con 30 ciclos y de amplitud constante.

4ª. Etapa de carga y proceso de falla

- Se aplicaron incrementos de carga axial de 490.5 kN cada uno, a intervalos de tiempo de 30 minutos. Esta fase de la prueba tomó 8 horas para su realización. La carga total aplicada fue de 8878.0 kN.
- La carga se mantuvo aplicada durante 40 minutos.
- Se procedió a realizar la descarga de la pila en decrementos de carga de 490.5 kN, en lapsos de 300 s.

En la figura 4.8 se presenta la gráfica de respuesta, carga-desplazamiento, para la segunda y cuarta etapa de carga y descarga. La carga máxima alcanzada durante la prueba fue de 9356 kN registrándose un desplazamiento de 0.0149 m, lo cual representa aproximadamente el 2% del diámetro de la pila. Tal nivel de deformación, así como el comportamiento lineal que se aprecia en la figura 4.8, indican que la capacidad de carga última no se alcanzó durante la prueba de carga.

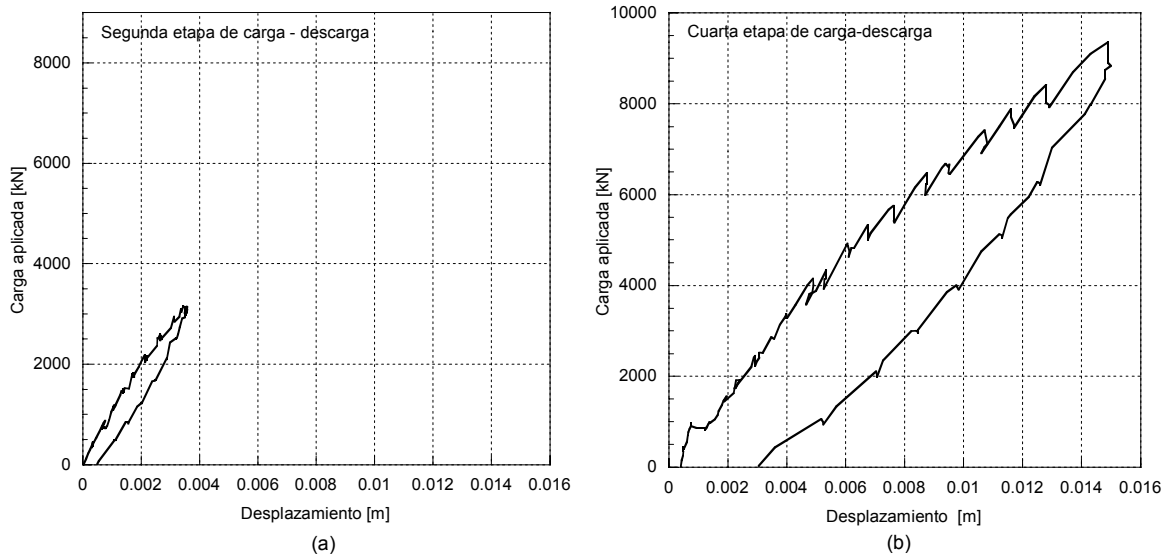


Figura 4.8. Curva carga-desplazamiento en la cabeza de la pila

En la gráfica 4.9 se muestra la variación de los asentamientos con respecto al tiempo. Se observa que los asentamientos permanecen prácticamente constantes para cada intervalo de tiempo, correspondiente a un incremento de carga. En la figura 4.10a se muestra la distribución de carga a lo largo de la pila, en dicha gráfica se aprecia que la aportación debida a fricción se da en los primeros 8 metros de la pila; también se aprecia que la contribución de la punta a la capacidad de carga es prácticamente nula. La figura 4.10b representa el aporte de carga a lo largo del fuste y se obtiene invirtiendo los valores de la figura 4.10a.

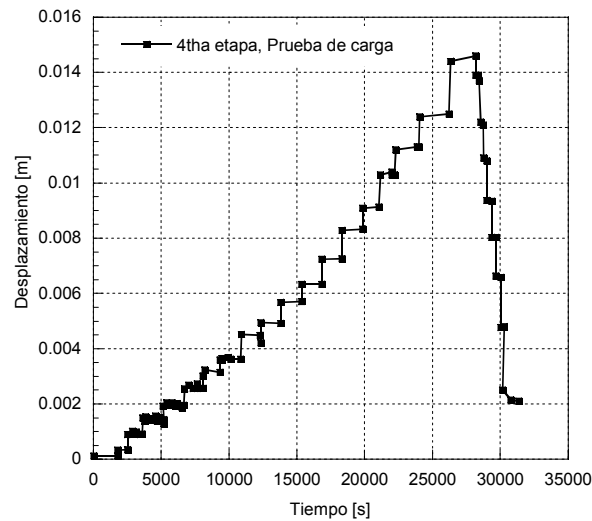


Figura 4.9. Curva tiempo-desplazamiento en el cuarto ciclo de carga y descarga

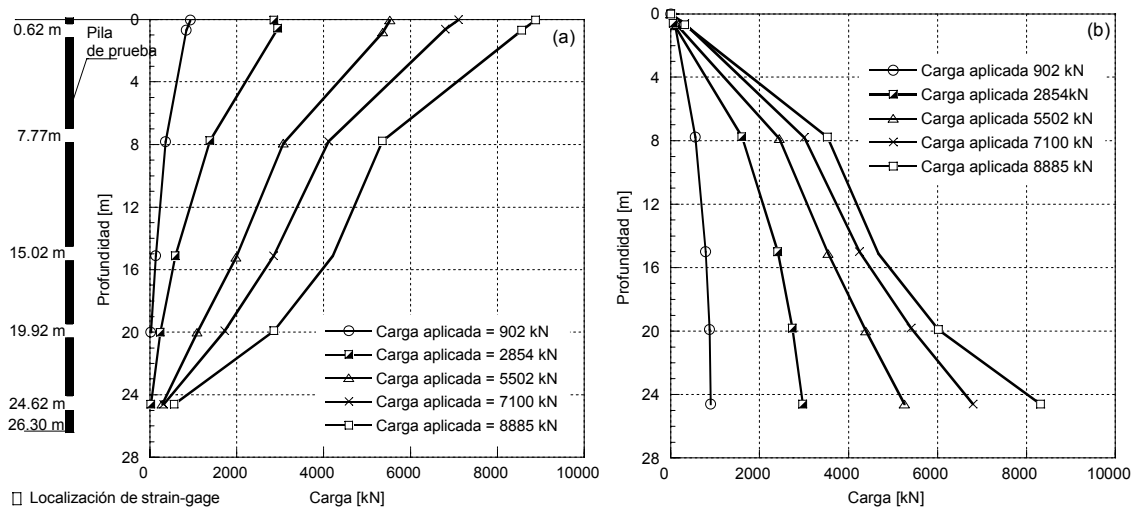


Figura 4.10. Curva de carga-transferencia durante el cuarto ciclo de carga-descarga de la prueba

Prueba de carga lateral

Las pruebas de carga lateral se llevaron a cabo para dos condiciones de sitio: considerándose el relleno, y realizando una excavación conducente al retiro del relleno. Aún para este último caso se aplicó la carga en la base de la excavación (nivel del terreno).

La prueba de carga lateral llevada a cabo en el Sitio San Antonio, considerando efectos de relleno, fue ejecutada en dos etapas. A continuación se describen brevemente:



1ª. Etapa de carga a 294.3 kN

- Se aplicaron 8 incrementos de carga lateral de 36.3 kN cada uno, con un intervalo de tiempo de 10 minutos. Los valores que se presentan son nominales.
- Posteriormente se mantuvo la carga por 15 minutos seguido de lo cual, se procedió a la descarga en cinco decrementos a cada 5 minutos.

2ª. Etapa de carga y proceso de falla

- Fueron aplicados inicialmente cuatro incrementos de carga lateral de 54.0 kN, posteriormente los incrementos fueron de 35.3 kN hasta alcanzar la falla.
- Una vez alcanzada la falla, la cual se caracterizó por la aparición en el terreno circundante de grietas verticales muy abiertas, se procedió a la descarga, con ocho decrementos de carga a cada 5 minutos.

Por otro lado, aquella prueba que se llevó a cabo una vez realizada la excavación también constó de dos etapas para su ejecución:

1ª. Etapa de carga a 323.7 kN

- Fueron aplicados inicialmente cuatro incrementos de carga lateral de 54.0 kN, y luego tres más con incrementos de 35.3 kN, con lo que se impusieron cerca de 323.7 kN.
- Posteriormente se mantuvo la carga por 20 minutos seguido de lo cual, se procedió a la descarga en cinco decrementos a cada 5 minutos.

2ª. Etapa de carga y proceso de falla

- Fueron aplicados inicialmente diez incrementos de carga lateral de 73.6 kN, con lo cual se alcanzó la condición de falla.
- Una vez alcanzada la falla, la cual se caracterizó por la aparición en el terreno circundante de grietas verticales muy abiertas, la carga se mantuvo durante 20 minutos.
- Finalmente se inició el proceso de descarga, con cinco decrementos de carga a cada 5 minutos.

En la figura 4.11a se presenta la curva carga-deformación lateral para la prueba en la cual la carga fue aplicada en a nivel del terreno natural. En la etapa de falla se distingue una variación creciente de la carga que resiste la pila, para la condición de carga máxima (441.5 kN) se alcanzó una deformación lateral de 0.07 m. La figura 4.11b corresponde a la

curva carga lateral-deformación, medida en aquella pila a 1.5 metros por debajo del terreno natural.

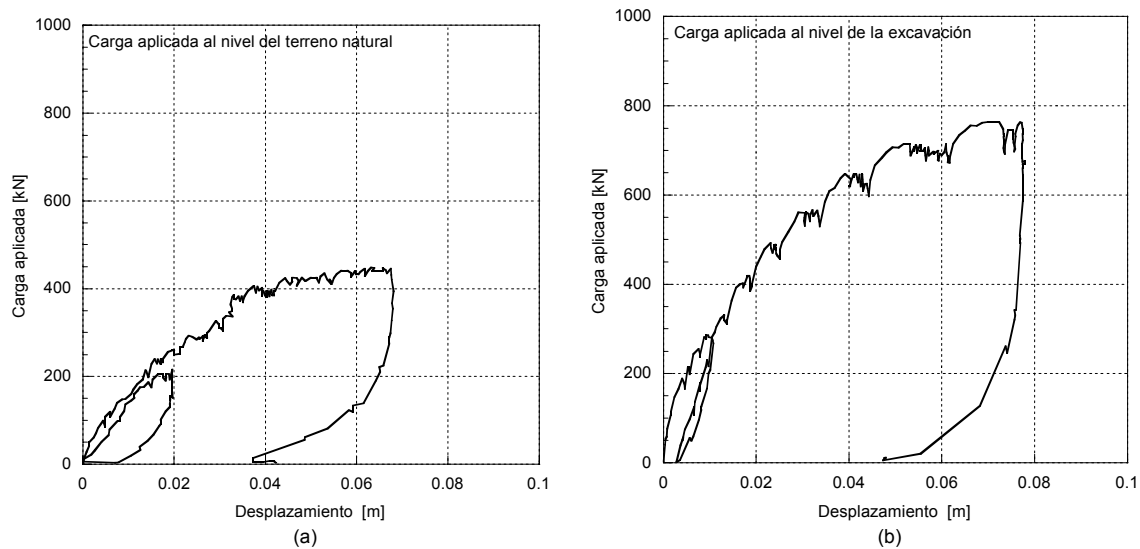


Figura 4.11. Curva de carga-deformación lateral para a) carga aplicada a nivel de terreno natural y b) carga aplicada por debajo de 1.5m del nivel de terreno natural. Sitio San Antonio

La evolución de la curvatura de la pila a la cual se le aplicó la carga por debajo de 1.5m del nivel de terreno natural, se muestra en la figura 4.12. Se hace notar que las curvaturas mayores se encuentran a los cuatro metros de profundidad.

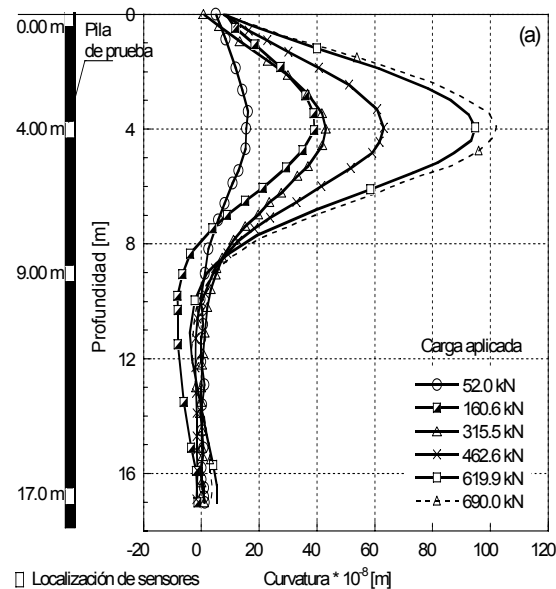


Figura 4.12. Evolución de la curvatura, a través del proceso de carga lateral



4.3.2 Sitio Periférico

Prueba de carga axial

Para la prueba de carga llevada a cabo en el Sitio Periférico, debido a problemas de logística, no fue posible generar la carga que lograrse fallar a la pila. Las etapas de carga que se habían propuesto inicialmente son muy similares a las del Sitio San Antonio; sin embargo, se ha considerado pertinente realizar una breve descripción de las etapas de carga.

1ª. Etapa de carga a 1569.6 kN

- Se aplicaron 8 incrementos de carga axial de 196.2 kN cada uno, con un intervalo de tiempo de 480 s, con lo que se generaron 1569.6 kN. Los valores que se presentan son nominales.
- Posteriormente la pila fue descargada mediante decrementos de igual magnitud que los incrementos, a cada 240 segundos.

2ª. Etapa de carga. Procesos de carga cíclica

- Se recargó la pila de manera rápida hasta una carga de 1569.6 kN, la que se mantuvo sostenida, y a partir de la cual se impusieron tres procesos cíclicos de carga cada uno con 30 ciclos y de amplitud constante. En este proceso se lograron cargas variables entre 784.8 y 2354.4 kN.
- Después de la etapa de cargas cíclicas, se procedió a la descarga total de la pila.

3ª. Etapa de carga a 3139.2 kN

- Se aplicaron 8 incrementos de carga axial de 392.4 kN cada uno. Con lo que se impusieron 3139.2 kN. Los incrementos de carga se dieron cada 360 segundos
- Llegado a los 3139.2 kN se mantuvo esta carga por 30 minutos, dando seguimiento a la evolución de las deformaciones.
- Se llevó a cabo la descarga con decrementos de 519.9 kN cada uno, a intervalos de tiempo de 3 minutos.

4ª. Etapa de carga y proceso de falla

- Se aplicaron 7 incrementos de carga axial de 686.7 kN cada uno con una periodicidad de 15 minutos, con lo que se alcanzó una carga de 4806.9 kN.

- Se realizó un segundo reinicio y se alcanzó una carga de 5395.5 kN, en un lapso de 180 s aproximadamente. Esta carga se mantuvo durante 300s y posteriormente se dieron dos incrementos más de carga para lograr 6867.0 kN.

Las etapas de carga antes descritas condujeron, entre otros tantos, a los resultados que se enfatizan a continuación.

En la primera etapa, figura 4.13, se le impuso a la pila una carga de 1579.4 kN y una deformación de 0.0021 m registrada en el cabezal. Para la tercera etapa se alcanzó una carga máxima de 3335.4 kN, esta carga conllevó una deformación de 0.0041 m. En el tercer ciclo de la cuarta etapa se alcanzó la carga máxima de todo el proceso, esta carga fue igual a 6867.0 kN, y se desarrolló una deformación en el cabezal de 0.0083 m; esta deformación representa cerca del 55% de la alcanzada para el Sitio San Antonio.

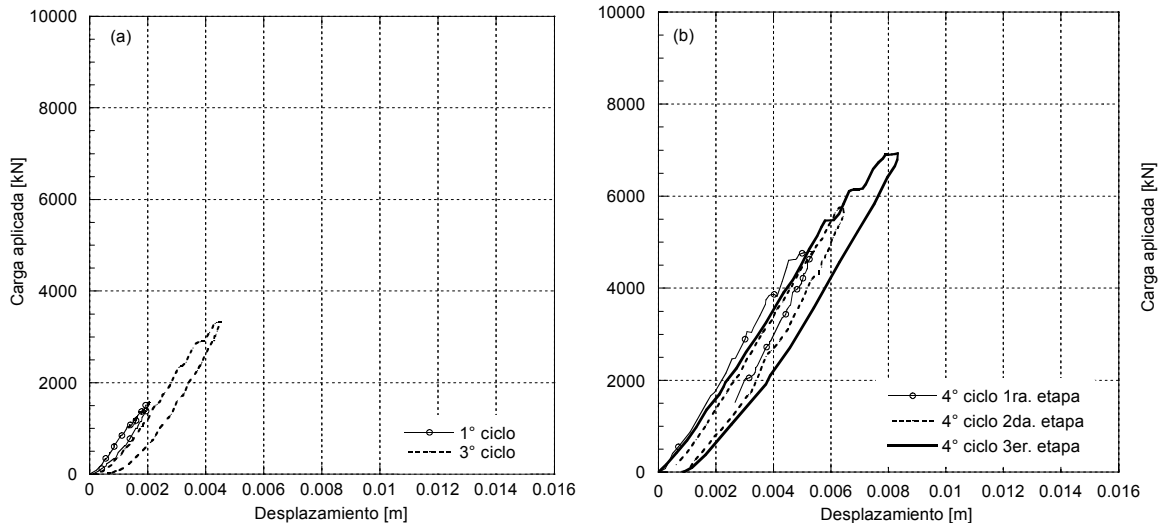


Figura 4.13. Curva carga-desplazamiento en la cabeza de la pila

La historia de carga-tiempo-deformación de los tres ciclos realizados en la cuarta etapa se muestra en la figura 4.14. Se observa que el primer ciclo de carga tuvo una duración de 130 minutos.

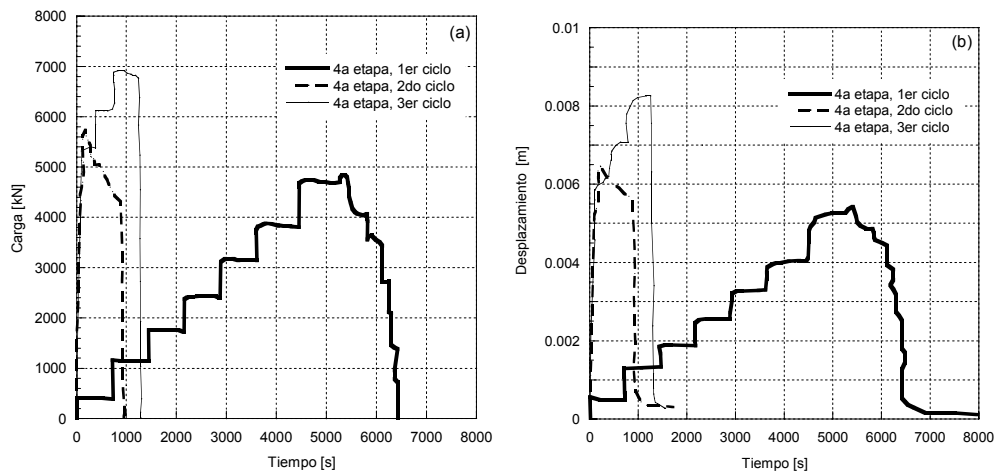


Figura 4.14. Curva carga-tiempo-deformación el cuarto ciclo de carga y descarga

La distribución de carga que se presentó a lo largo de la pila para todos los incrementos de la cuarta etapa se presentan en la figura 4.15a; en la misma curva se aprecia que la contribución de la punta ante carga axial fue mínima. Para el caso de la máxima carga aplicada se prosiguió con el análisis de dicha curva a fin de determinar la fricción generada en el fuste de la pila, ante esta condición de carga.

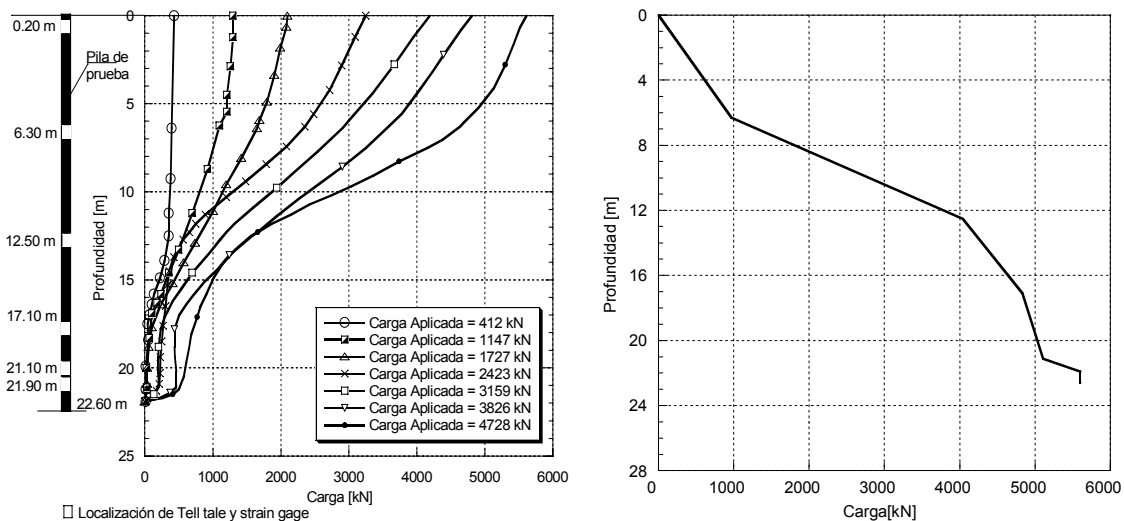


FIG. 4.15. a) Curva de transferencia carga axial-profundidad y b) Fricción generada en el fuste. Sitio Periférico

Prueba de carga lateral

La metodología empleada para llevar a cabo la prueba de carga en el Sitio Periférico siguió el mismo procedimiento empleado en las pruebas de San Antonio

La prueba de carga lateral se llevó a cabo en dos etapas, las cuales se describen brevemente a continuación:

1ª. Etapa de carga a 117.7 kN

- Se aplicaron tres incrementos de carga lateral de 39.2 kN cada uno, a cada 300 segundos. Los valores que se presentan son nominales.
- Posteriormente se mantuvo la carga por 15 minutos seguido de lo cual, se procedió a la descarga en tres decrementos a cada 180 segundos.

2ª. Etapa de carga y proceso de falla

- Fueron aplicados trece incrementos de carga lateral de 39.2 kN, cada veinticinco minutos, hasta alcanzar la falla.
- Para cada incremento de carga se realizó un barrido con inclinómetro.
- Se procedió a la descarga, con ocho decrementos a cada 300 segundos

En la figura 4.16a se presenta la curva carga-deformación; durante la etapa de falla se distingue una variación creciente de la carga que resiste la pila. La carga máxima alcanzada fue de 490.5 kN, teniéndose deformaciones del orden de 0.055 metros. En la figura 4.16b se muestran los desplazamientos medidos en el segundo ciclo de la prueba de carga.

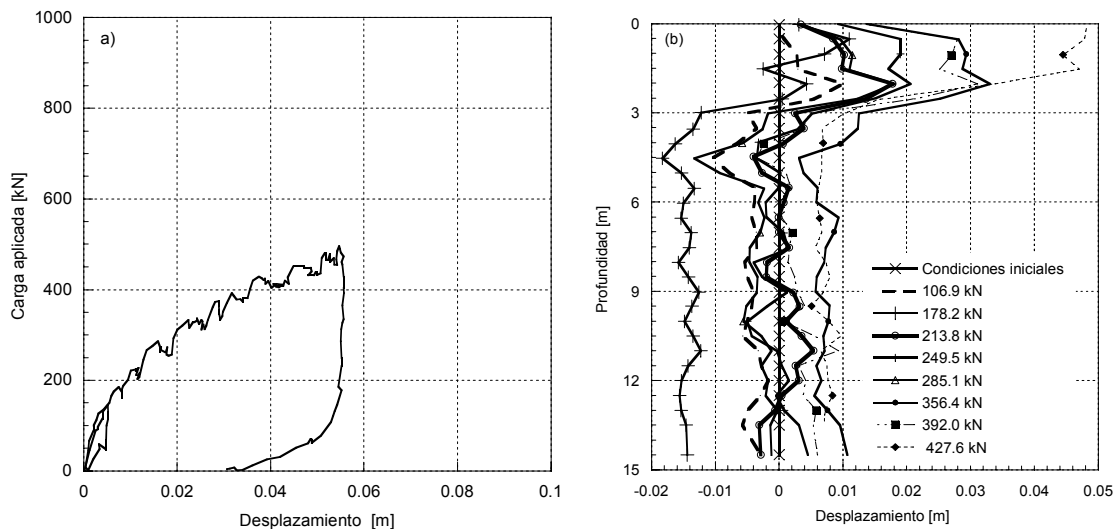


Figura 4.16. (a) Curva de carga-deformación lateral y (b) Desplazamientos medidos mediante la sonda de inclinómetro para el segundo ciclo de carga y descarga

La evolución de la curvatura de la pila a lo largo de sus dos tercios superiores se muestra en la figura 4.17. Se hace notar que las curvaturas mayores se encuentran a los cuatro metros de profundidad.

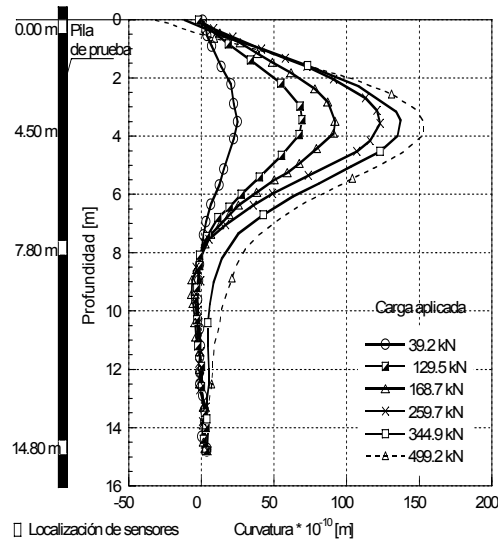


Figura 4.17. Evolución de la curvatura, a través del proceso de carga lateral

4.3.3 Resumen de resultados de las pruebas de carga

Como se ha enfatizado hasta ahora, se tienen resultados provenientes de dos sitios donde se han llevado a cabo pruebas de carga. El Sitio San Antonio, El Sitio Periférico y el sitio denominado Torre Mayor. La estratigrafía para dos sitios es puramente friccionante, tanto a lo largo del fuste como en la punta, toda vez que se tienen estratos constituidos principalmente por arenas y limos arenosos cuyo número de golpes en la prueba SPT se registro superior a 50.

A continuación, en la tabla 4.2, se muestra el resumen de los resultados obtenidos en la prueba de carga axial para cada uno de los sitios citados. Las cargas presentadas son las máximas que se presentaron durante el desarrollo de cada una de las pruebas, por ende las deformaciones presentadas corresponden a tales niveles de carga.

Tabla 4.2. Resumen de resultados, pruebas de carga axial

| Sitio | Carga alcanzada | Deformación en la cabeza | Deformación en la punta | Aportación de la punta | | Aportación del fuste | |
|-------------|-----------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-----|----------------------|------|
| | | | | (kN) | % | (kN) | % |
| San Antonio | 9356.0 | 0.015 | - | 608.14 | 6.5 | 8747.9 | 93.5 |
| Periférico | 6867.0 | 0.008 | - | 185.4 | 2.7 | 6681.6 | 97.3 |



Es importante enfatizar que para las pruebas llevadas a cabo en San Antonio y Periférico no se alcanzaron las cargas de falla. Lo anterior se aprecia claramente puesto que la deformación, en la punta de la pila, está muy por debajo del 5% que proponen diversos autores.

El resumen de resultados obtenidos para cada sitio, en la prueba de carga lateral, se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Resumen de resultados, pruebas de carga lateral

| Sitio | Carga alcanzada | Deformación en la cabeza |
|-------------|-----------------|--------------------------|
| | (kN) | (m) |
| San Antonio | 764.2 | 0.072 |
| Periférico | 490.5 | 0.055 |

La tabla 4.3 muestra, tanto para el Sitio San Antonio como Periférico, el valor de la carga lateral de falla. Se ha asumido como falla a la condición que se caracterizó por la aparición en el terreno circundante de grietas verticales muy abiertas.