



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL-GEOTECNIA

INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS DE CARGA AXIAL ESTÁTICAS EN PILAS DE
CIMENTACIÓN Y SU IMPACTO EN EL DISEÑO DE LAS CIMENTACIONES EN
EL VALLE DE MÉXICO

PRESENTA:

MARCIAL CÓRDOVA ENRÍQUEZ

TUTOR PRINCIPAL

M.I. DÉMENEGHI COLINA AGUSTÍN
PROGRAMA DE MAESTRÍA DOCTORADO EN INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, FEBRERO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Magaña del Toro Roberto

Secretario: M.I. Sangines García Héctor

1er Vocal: M.I. Deméneghi Colina Agustín

2do Vocal: Dr. Rivera Constantino Rigoberto

3er Vocal: M. en I. Zea Constantino Carmelino

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, 2019

TUTOR DE TESIS

M.I. DEMÉNEGHI COLINA AGUSTÍN

FIRMA

DEDICATORIA

A mi padre Bartolo Córdova por ser la guía de mi camino.

A mi madre Hermelinda Enriquez, ese ángel en el cielo que es mi fuente de inspiración y amor.

A mis hermanos Bianca, Heymi, Edgar, Sergio y David que siempre han estado apoyándome.

A toda mi familia

A mis amigos

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México,

Al instituto de ingeniería de la UNAM.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) quien a través de su programa de becas ayudo a seguir con mi preparación.

Al M.I. Deméneghi Colina Agustín por haber depositado su interés y confianza en mí para la realización de esta investigación.

A mis sinodales Dr. Rivera Constantino Rigoberto, Dr. Magaña del Toro Roberto, M.I. Zea Constantino Carmelino, M.I. Sangines García Héctor, por el tiempo invertido en la revisión de esta tesis.

A los ingenieros Juan Paulín, José Gonzáles, Luis Cerón, Jorge Elena de la empresa Cimentaciones Mexicanas S.A. de C.V por brindarme la oportunidad y estar interesados en mi formación profesional.

Agradezco la amistad de mis compañeros de generación y Cimesa por hacer mi estancia más amena.

RESUMEN

Debido a la alta densidad de población y el creciente desarrollo de la Ciudad de México, ha llevado a los ingenieros civiles a diseñar edificaciones más pesadas, transmitiendo mayores cargas en áreas muy reducidas. Esto obliga a los ingenieros a mejorar sus diseños de cimentaciones profundas, predecir la capacidad de carga en el subsuelo, así como reducir los asentamientos debido a la sobrecarga aplicada.

Con base a las incertidumbres al determinar las propiedades del suelo, las técnicas analíticas y numéricas que se emplean para estimar la capacidad de carga de un elemento colada *in situ* o bien el proceso constructivo utilizado, da necesidad de realizar pruebas de carga en proyecto de gran envergadura a pesar del costo o el tiempo que lleva se en realizarlas.

El objetivo de este trabajo se enfoca en la instrumentación, vigilancia e interpretación de cuatro pruebas de carga estáticas a compresión axial ejecutadas en dos proyectos reales y el impacto de los resultados en el diseño final de la cimentación.

ABSTRACT

Due to the high population density and the increasing development of Mexico City, it has led civil engineers to design heavier buildings, transmitting greater loads in very small areas. This forces the engineers to improve their deep foundations designs, predict the load capacity in the subsoil, as well as reduce the settlements due to the applied overload.

Based on the uncertainties in determining the properties of the soil, the analytical and numerical techniques used to estimate the load capacity of a cast element in situ or the construction process used, it is necessary to carry out load tests in a large project. magnitude despite the cost or time it takes to perform them.

The objective of this work focuses on the instrumentation, monitoring and interpretation of four axial load static load tests performed on two real projects and the impact of the results on the final design of the foundation

Tabla de contenido

Tabla de contenido.....	VI
Lista de tablas	XI
Lista de figuras	XIII
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Alcances.....	2
Capítulo 2.- Pruebas de carga.....	4
2.1. Normas para la ejecución de prueba de carga	4
2.2. Procedimiento de ejecución de la prueba	5
2.3. Tipos de prueba de carga.....	8
2.4. Instrumentación	28
2.5. Sistemas de reacción	32
Capítulo 3. Diseño geotécnico de cimentaciones profundas	36
3.1. Cimentaciones profundas.....	36
3.2. Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México (RCCD).....	44
3.3. Capacidad de carga en pilas	48
3.4. Comportamiento de una pila individual y un grupo de pilas	59
3.5. Comportamiento general carga-desplazamiento	61
3.6. Curvas de distribución de carga en pilas	63
3.7. Variación de la capacidad de carga con el tiempo en pilas.....	64
Capítulo 4. Casos de pruebas de carga en pilas realizadas en la Ciudad de México	67
4.1. La Fragua.....	67
4.2. Reforma 432	99

Capítulo 5. Calculo de capacidad de carga por métodos analíticos y revisión aplicando el Reglamento de Construcciones para la Ciudad de México.	126
5.1. La Fragua.....	126
5.2. Reforma 432	128
Capítulo 6. Impacto de pruebas de carga en el diseño de cimentaciones profundas.....	130
6.1. La Fragua.....	130
6.2. Reforma 432	133
Capítulo 7. Conclusiones generales y comentarios.	136
7.1. Relativas a pruebas de carga La Fragua	136
7.2. Relativas a pruebas de carga Reforma 432	138
7.3. Relativas al cálculo analítico y las normas NTCDCC 2017	139
7.4. Relativas a Prueba de Carga.	140
7.5. Recomendaciones sobre líneas futuras de investigación	143
Referencias y bibliografía	144
Anexo I.-Registro de carga - asentamiento.....	145
I.-Registros de prueba de carga LT-1	145
II.-Registros de prueba LT-2.....	148
III.-Registros de prueba de carga Pila 802.....	150
IV.-Registros de prueba de carga Pila 902	153

Notación

Los símbolos empleados en esta investigación se presentan a continuación:

C_p	La capacidad de carga por punta considerando un factor de resistencia unitario
Q_u	Carga ultima
L_p	Longitud del pilote o pila
N_p	Profundidad de desplante de la zapata, losa o el cajón de cimentación, y
FN	Fricción negativa
A_T	Área trinitaria entre pilas y pilotes
P_p	Perímetro de la pila
m	Número de estratos cohesivos a lo largo del fuste del pilote o pila
C_{ui}	La cohesión media aparente determinada en ensaye triaxial no-consolidado no-drenado del estrato i
L_i	Longitud del pilote correspondiente al estrato i
α_i	Coefficiente de adherencia lateral elemento-suelo del estrato i
\bar{P}_{vi}	Presión vertical debida al peso del suelo a la profundidad media del estrato i .
NTCDCC	Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones del 2017
F_R	Factor de reducción con valor igual a 0.65
Z_i	Profundidad media del estrato i
B	Ancho o diámetro equivalente de los pilotes o pilas
Θ	Ángulo de fricción interna
A_p	Área de la sección transversal de la base
A_s	Área superficial del eje
F_s	Fricción del fuste
N_c y N_q	Factores de carga

D_r	Densidad relativa
α_r	Factor de forma que depende del ancho de la superficie de falla.
r_o	Radio de la pila o pilote
C_p	Carga por punta
C_f	Adherencia por fuste
(C_u)	resistencia al corte no drenado del suelo

Lista de tablas

Tabla 1.- Control para prueba de carga lateral Procedimiento A (ASTM D 3966)	19
Tabla 2.- Control para prueba de carga lateral Procedimiento B carga en exceso	20
Tabla 3.- Control para prueba de carga lateral Procedimiento C Carga en exceso	20
Tabla 4.-Control para prueba de carga lateral Procedimiento C Carga en exceso para ciclos.....	21
Tabla 5.-Coeficiente N^*_c	48
Tabla 6.-Valor de $N_{m\acute{a}x}$ y $N_{m\acute{i}n}$ para el calculo de N_q^*	48
Tabla 7.-Estratigrafía (CIMESA)	69
Tabla 8.-Características de la Pila.....	70
Tabla 9.-Ubicación de sensores (Sister Bars).....	71
Tabla 10.-Estratigrafía (CIMESA).....	100
Tabla 11.-Ubicación de sensores (Sister Bars).....	101
Tabla 12.-Capacidad de carga por aporte en el fuste y punta empleando el calculo analítico de Zeevaert, Burland y Meyerhof en pila desplantada a 70 m LT-1.	126
Tabla 13.- Capacidad de carga por aporte en el fuste y punta empleando el calculo analítico de Zeevaert, Burland y Meyerhof en pila desplantada a 50 LT-2.	127
Tabla 14.-Revisión de capacidad de carga axial mediante las NTCDC 2017 en pila desplantada a 70 m de profundidad LT-1.	127
Tabla 15.-Revisión de capacidad de carga axial mediante las NTCDC 2017 en pila desplantada a 50 m de profundidad LT-2.	127

Tabla 16.-Capacidad de carga por aporte en el fuste y punta empleando el cálculo analítico de Zeevaert, Burland y Meyerhof en pilas desplantadas a 55 m sin ademe metálico pila 802.	128
Tabla 17.-Capacidad de carga por aporte en el fuste y punta empleando el cálculo analítico de Zeevaert, Burland y Meyerhof en pila desplantada a 55 m con ademe metálico pila 902.	128
Tabla 18.-Revisión de capacidad carga axial por aporte en el fuste y punta en pila 802 desplantada a 55 m sin ademe metálico.	128
Tabla 19.-Revisión de capacidad de carga por aporte en el fuste y punta en pila 902 desplantada a 55 m de profundidad con ademe metálico.	128
Tabla 20.-Capacidades de carga última esperada de proyecto y obtenida en pruebas de carga "La Fragua"	131
Tabla 21.-Capacidades de carga admisibles para diseño	131
Tabla 22.-Profundidad de elementos de cimentación "La Fragua"	132
Tabla 23.- Capacidades de carga ultima esperada de proyecto y obtenida en pruebas de carga "Reforma 432"	133
Tabla 24.-Capacidades de carga admisibles para diseño "Reforma 432"	134
Tabla 25.-Profundidad de elementos de cimentación "Reforma 432"	134

Lista de figuras

Figura 1.- Etapas para el diseño y ejecución de una prueba de carga (SMMS, 1982).....	6
Figura 2.-Fallo del sistema de reacción en la pila de prueba (Handley & Bullivant, 2006)..	8
Figura 3.- Tipos de pruebas de carga en pilas y pilotes (SMMS, 2017a).....	9
Figura 4.-Procedimientos de carga norma ASTM D 1143 para pruebas de carga a compresión (SMMS, 2017a)	11
Figura 5.-Procedimientos de carga recomendados por la norma ASTM D 3689 para pruebas de carga estática a tensión.....	11
Figura 6.- Control de prueba para procedimiento B carga sostenida (SMMS, 2017a)	13
Figura 7.- Control de la prueba para procedimiento E (SMMS, 2017a)	14
Figura 8.- Control de la prueba para el procedimiento G.....	15
Figura 9.-Comparación del tiempo requerido para distintos métodos de prueba (Prakash & Sharma, 1990)	16
Figura 10.-Comparación carga-desplazamiento para distintos métodos de prueba de carga (Prakash & Sharma, 1990)	16
Figura 11.-Ejemplo de una disposición de aplicación de carga de compresión axial (Prakash & Sharma, 1990)	17
Figura 12.- Tipos de prueba de carga lateral (SMMS, 2002).....	18
Figura 13.- Procedimiento de carga lateral recomendado por la norma ASTM D 3966. ...	18
Figura 14.-Aparatos típicos de instalación y medición de carga lateral con tubo para inclinómetro (Prakash & Sharma, 1990).....	22

Figura 15.-a) Acelerómetro, medidor de deformación y transmisor Wifi, b) medidor de deformación combinada y acelerómetro (Hannigan et al., 2016)	23
Figura 16.-Esquema general de prueba dinámica (SMMS, 2017a)	25
Figura 17.- (a)–(c) en compresión, (d)-(e) en extracción, (f)–(h) en la carga lateral (Wrana, 2015)	25
Figura 18.-Esquema y vista del sistema Osterberg (www.loadtest.com)	26
Figura 19.-Conjunto de celdas O-cell instalado de forma segura dentro de barrettes.(Melvin & Paul F., 2008)	27
Figura 20.-Prueba estático-dinámica sobre pilotes de hormigón prefabricado (Handley & Bullivant, 2006)	28
Figura 21.-Instrumentación en el cabezal de la pila de prueba y viga de referencia (CIMESA)	30
Figura 22.-Deformímetros de cuerda vibrante (sister bar) amarrada con alambres al acero de refuerzo principal de una pila de prueba (CIMESA).....	31
Figura 23.- Sistema de reacción con peso muerto (Handley & Bullivant, 2006; M.J. Tomlinson, 1994)	33
Figura 24.-Sistema de marco de reacción para pilotes de anclaje(Alva Hurtado & Fic, 1993)	34
Figura 25.- Arreglo del marco de carga utilizado en la prueba de carga en el Distribuidor Vial de San Antonio (M. Mendoza, n.d.).....	34
Figura 26.-Prueba típica de carga de extracción usando gatos hidráulicos que actúan hacia arriba en ambos extremos de la prueba (ASTM D 3689, 2014)	35
Figura 27.-Configuraciones para la aplicación de carga lateral con gato hidráulico(ASTM D3966, 2010).....	35

Figura 28.- Tipos de cimentación comúnmente empleados(Tamez Gonzáles, 2017)	36
Figura 29.- Diferentes usos de cimentaciones profundas: a) punta, b) fricción, c) carga de tensión, d) cargas laterales, e) inclinados ante cargas laterales (Prakash & Sharma, 1990).	37
Figura 30.- Perforación en pila de 1.2 m de diámetro a 27 m (Lago Filt,)	39
Figura 31.-Esquema resumen del Proceso de construcción del Muro Milán (CIMESA)....	44
Figura 32.-Consideraciones para la estimación de la fricción negativa (GOCM, 2017) (Auvinet, Méndez, & Juárez, 2017).	46
Figura 33.-Formas típicas de curvas carga-desplazamiento (Hirany y Kulhawy, 1989). ...	49
Figura 34.-Factores de capacidad de carga para cimentaciones superficiales y profundas (Meyerhof, 1963).....	50
Figura 35.- Superficie potencial de deslizamiento (Zeevaert, 1972)	51
Figura 36.-Carga última obtenida con el criterio De Beer (1967).	54
Figura 37.-Carga ultima con criterio de Davisson (1972)	56
Figura 38.-Modelo numérico para la determinación carga-desplazamiento bajo carga de 2700 kN (Holko & Stacho, 2014).....	58
Figura 39.-Prueba de carga Modelo Elementos Finitos (MEF3D).....	59
Figura 40.-Comparación de las zonas influenciadas debajo del grupo de pila y pila individual (a) Pila individual (b) Grupo de pila (Tomlinson & Woodward, 2008)	60
Figura 41.-Falla de cortante del grupo de pilas o pilotes, (a) prueba de carga en una pila aislada cuando la arcilla blanda no está cargada significativamente, (b) carga aplicada a un grupo de pilas cuando la arcilla blanda está muy cargada.....	61
Figura 42.-Curvas carga-desplazamiento en pilas (Kulhawy, 1991)	62

Figura 43.-Método gráfico para estimar la capacidad por fricción (Tamez, 2001)	63
Figura 44.-Distribución de cargas verticales vs profundidad en la pila instrumentada (SMMS, 2017b)(Ibarra, Rangel, Holguín, & Flores-Eslava, 2017).....	64
Figura 45.-Superficies de falla para la carga de compresión en pilas (Tomlinson & Woodward, 2008).....	65
Figura 46.-Aumento de capacidad de carga con el trascurso del tiempo después de la perforación de pilas en arcillas suaves (Tomlinson & Woodward, 2008)	66
Figura 47.-Localización del sitio del Proyecto	67
Figura 48.-Esquema Preliminar de la cimentación La Fragua (CIMESA)	68
Figura 49.-Zonificación geotécnica para el Distrito Federal.....	68
Figura 50.-Ubicación de los sondeos de exploración (CIMESA).....	69
Figura 51.-Perforación LT-2 a -50 m.	71
Figura 52.-(a) Deformímetros para concreto (“sister bar”) (b) Cables de los sensores (carretes).....	72
Figura 53.- Unidad de registro (Datalogger)” (CIMESA	72
Figura 54.- Topografía convencional (CIMESA).	73
Figura 55.-Instalación de ademes (La fraga)	73
Figura 56.-Tubos de reservación para post-inyección.	74
Figura 57.-Sistema de reacción y Marco de referencia e instrumentación	75
Figura 58.- Prueba de carga estática a compresión curva carga vs asentamiento LT-1 ...	78
Figura 59.- Prueba de carga estática a compresión curva carga vs asentamiento Pila LT-2	79

Figura 60.-Etapas de Post-inyección Pila LT-1	80
Figura 61.-"Grafica fuerza - Tiempo en pila LT-1 (Lectura de referencia antes de post-inyección)"	81
Figura 62.-Grafica fuerza - Tiempo en pila LT-1 (Lectura de referencia antes de iniciar prueba)"	81
Figura 63.- Curva de distribución de carga LT-1	82
Figura 64.-"Grafica descarga-profundidad pila LT-1"	83
Figura 65.-Gráfica esfuerzo en valores absolutos de fricción – asentamiento, Capa resistente en pila LT-1 (Lectura de referencia desde Post-inyección).	84
Figura 66.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Capa resistente en pila LT-1 (Lectura de referencia desde Post-inyección).....	84
Figura 67.-Gráfica esfuerzo en valores absolutos de fricción – asentamiento, FAI en pila LT-1 (Lectura de referencia desde Post-inyección)	85
Figura 68.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, FAI en pila LT-1 (Lectura de referencia desde Post-inyección)	85
Figura 69.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos profundos en pila LT-1 (Lectura de referencia desde Post-inyección).....	86
Figura 70.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos profundos en pila LT-1 (Lectura de referencia desde Post-inyección).....	86
Figura 71.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos profundos en pila LT-1 (Lectura de referencia desde Post-inyección).....	87
Figura 72.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos profundos en pila LT-1 (Lectura de referencia desde Post-inyección).....	87

Figura 73.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos profundos en pila LT-1 (Lectura de referencia desde Post-inyección).....	88
Figura 74.-Curva carga vs asentamiento Criterios Brinch Hasen 90% y Chin LT-1	89
Figura 75.-Etapas de post-inyección LT-2	90
Figura 76.-Grafica fuerza - Tiempo en pila LT-2 (Lectura de referencia antes de post-inyección)	91
Figura 77.-Grafica fuerza - Tiempo en pila LT-2 (Lectura de referencia antes de iniciar prueba)”.....	91
Figura 78.- Curva de distribución de Carga LT-2.....	92
Figura 79.- Curva de distribución de Descarga LT-2	93
Figura 80.-Gráfica esfuerzo en valores absolutos de fricción – asentamiento, Capa resistente en pila LT-2 (Lectura de referencia desde Post-inyección).	94
Figura 81.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Capa Resistente en pila LT-2 (Lectura de referencia desde Post-inyección).....	94
Figura 82.-Gráfica esfuerzo en valores absolutos de fricción – asentamiento, FAI en pila LT-2 (Lectura de referencia desde Post-inyección).	95
Figura 83.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, FAI en pila LT-2 (Lectura de referencia desde Post-inyección).	95
Figura 84.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos en pila LT-2 (Lectura de referencia desde Post-inyección).....	96
Figura 85.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos en pila LT-2 (Lectura de referencia desde Post-inyección).....	96
Figura 86.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos en pila LT-2 (Lectura de referencia desde Post-inyección).....	97

Figura 87.- Curva carga vs asentamiento. Criterios Brinch Hasen 90% y Chin PL-2.....	98
Figura 88.-Localización del sitio del Proyecto	99
Figura 89.-Esquema Preliminar de la cimentación de la torre (CIMESA).	100
Figura 90.-“Deformímetros sister-bar” (CIMESA).....	102
Figura 91.-“Unidad de registro Datalogger (CIMESA).	102
Figura 92.- (a) Transductores de desplazamiento (b) Topografía convencional (CIMESA).	103
Figura 93.-Ademe metálico Pila 902 (CIMESA).	103
Figura 94.-Tubos de reservación para post-inyección (CIMESA)	104
Figura 95.- a) Cilindros Hidráulicos (b) Bomba Eléctrica (CIMESA).....	105
Figura 96.-Prueba de carga estática a compresión en Pila 802 (CIMESA).	106
Figura 97.-Prueba de carga estática de compresión Pila 902- Prueba 1 (CIMESA).	107
Figura 98.-Prueba de carga estática de compresión Pila 902- Prueba 2 (CIMESA).	108
Figura 99.-Grafica fuerza - Tiempo en pila 802.....	109
Figura 100.-Curva de distribución de carga en Pila 802 (CIMESA)	110
Figura 101.-Grafica descarga vs profundidad pila 802	111
Figura 102.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Costra Superficial pila 802	111
Figura 103.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Fase Arcillosa Superior Pila 802	112
Figura 104.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Capa Dura Pila 802	112

Figura 105.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Fase Arcillosa Inferior Pila 802	113
Figura 106.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Estrato Arenoso Pila 802.....	113
Figura 107.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos Pila 802	114
Figura 108.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos Pila 802	114
Figura 109.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos Pila 802	115
Figura 110.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos Pila 802	115
Figura 111.-Curva de estimación de Carga Ultima en Pila 802 (CIMESA).	116
Figura 112.-Grafica fuerza - Tiempo en pila 902	117
Figura 113.-Curva de distribución de carga en Pila 902 –prueba 1 (CIMESA).....	118
Figura 114.-Curva de distribución de carga en Pila 902 –prueba 2 (CIMESA).....	119
Figura 115.-Curva de descarga en Pila 902 –prueba 2 (CIMESA).....	120
Figura 116.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Capa Dura Pila 902 (Ambos ciclos)	121
Figura 117.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Fase Arcillosa Inferior 902 (Ambos ciclos).....	121
Figura 118.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Estrato Arenoso 902 (Ambos ciclos)	122
Figura 119.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos 902 (Ambos ciclos).....	122
Figura 120.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos 902 (Ambos ciclos).....	123

Figura 121.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos 902 (Ambos ciclos).....	123
Figura 122.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos 902 (Ambos ciclos).....	124
Figura 123.-Curva de estimación de Carga Ultima en Pila 902 ambos ciclos.	125
Figura 124.-Diseño final de cimentación "La Fragua"	132
Figura 125.-Diseño preliminar de cimentación "Reforma 432"	135

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes

Los altos niveles de población y el creciente desarrollo de la Ciudad de México ha llevado a los ingenieros a al diseño de obras de infraestructura de manera vertical y horizontal, tendiendo hacer las construcciones más pesadas, transmitiendo mayores cargas en áreas muy reducidas, ha puesto a los ingenieros a mejorar sus diseños de cimentaciones, predecir la capacidad de carga del subsuelo, así como reducir los asentamientos debido a la sobrecarga aplicada, empleando diversos tipos de cimentaciones , desde superficiales como lo son zapatas y losas, o profundas como pilas o pilotes. Alternativamente, se utilizan cimentaciones mixtas, utilizando cajones como medio para compensación, agregando pilas o pilotes, los cuales son un medio para reducir grandes asentamientos y seguir los procesos simultáneos de consolidación. a la alta densidad de población

En los últimos años las cimentaciones con pilas coladas *in situ* han tenido un gran auge en la zona lacustre del Valle de México, ya sea en la construcción de torres, edificios, puentes, así como viaductos elevados, que requieren la implementación de cimentaciones de secciones cada vez mayores y profundas, esto obliga a los ingenieros a mejorar sus diseños de cimentaciones profundas.

Con base a las incertidumbres al determinar las propiedades del suelo, las técnica analíticas y numéricas que se emplean para estimar la capacidad de carga de un pilote o pila colada *in situ* o bien el proceso constructivo utilizado, da necesidad de realizar pruebas de carga en proyecto de gran envergadura a pesar del costo o el tiempo que se lleva en realizarlas.

La instrumentación y vigilancia de cimentaciones resulta una herramienta elemental para diseñar, analizar, y construir, así como aportar información real del comportamiento en condiciones de suelos blandos, característica de la Ciudad, dejando de lado los diseños donde se introducen suposiciones e hipótesis que pueden diferir de las condiciones reales. El monitoreo del desempeño mediante pruebas de carga y el registro de datos reales en pilas de cimentación de grandes proyectos, constituye un paso importante en el desarrollo de métodos de diseño más eficientes, así como sustentar la normativa establecida por la autoridad en la Ciudad de México, en donde se ha observado que los métodos de diseño subestiman en forma significativa la capacidad de carga por fuste y punta de pilas.

Hoy en día una herramienta de cálculo que resulta de gran utilidad para evaluar el comportamiento del diseño de una cimentación, son las técnicas numéricas como el método de elementos finitos (MEF), con la cual se puede obtener una rápida solución en el diseño de cimentaciones, no obstante, para aumentar la certidumbre del diseño y ejecución de proyectos de gran envergadura se ve necesario realizar pruebas de carga.

A través del apoyo de Cimentaciones Mexicanas (CIMESA) este trabajo se basa en 2 proyectos, una torre de oficinas de 264 m de altura (54 niveles) con 7 sótanos de estacionamiento con una profundidad de 23.5 m, formado por un muro diafragma (Muro Milán) y 102 pilas tipo Barrettes desplantadas a 55 m por debajo del nivel de la calle, que se encuentra por Av. Paseo de la Reforma, y un edificio con 47 niveles, azotea y 7 sótanos a 28 m de profundidad de estacionamiento el cual se localiza en calle La Fragua, que se conforma por un Muro Milán desplantado a 35 y 40 m de profundidad, 42 pilas tipo Barrettes desplantadas a dos profundidades 55 y 74 m de profundidad.

1.2. Objetivos

Se persigue en esta tesis el objetivo central siguiente:

El objetivo principal de esta investigación es la interpretación de pruebas de carga axial estáticas a compresión realizadas en pilas coladas *in situ* sobre las arcillas del Valle de México, así como contribuir a la formulación y replanteamiento de las propuestas de diseño de cimentaciones profundas.

1.3. Alcances

Atendiendo a lo anterior, para alcanzar el objetivo planteado se llevaron a cabo pruebas de carga estática a compresión axial, realizadas en pilas circulares de 1 m de diámetro desplantadas a 50, 55 y 70 m de profundidad, situadas en la zona metropolitana de la Ciudad de México bajo condiciones estratigráficas diversas, mostrando el real comportamiento de la resistencia y deformabilidad del subsuelo, validando el diseño de la cimentación impuesto, técnica constructiva y capacidad de carga en pilas.

El desarrollo de este planteamiento se integrará en seis capítulos:

En el capítulo 2 se realiza una revisión de las distintas normas y estándares establecidos para llevar a cabo la ejecución de pruebas de carga en pilas coladas *in situ*. Se describen

los distintos tipos de pruebas de carga estáticas o dinámicas, así como los procedimientos a emplear en cada tipo prueba y su instrumentación.

En el capítulo 3 abarca los distintos tipos de cimentaciones profundas empleadas en la Ciudad de México y en otros países, así como soluciones empleadas para el análisis y comportamiento de pruebas carga bajo diferentes condiciones.

El en el capítulo 4 se presenta 2 casos de prueba de carga llevadas a cabo en proyectos reales, el proceso constructivo de la pila de prueba y su comportamiento durante la ejecución de pruebas de carga.

En el capítulo 5 se presenta un cálculo analítico en el diseño de capacidad de carga de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones del 2017

En el capítulo 6 se presenta el impacto de pruebas de carga en cada uno de los proyectos, el diseño final empleado en la cimentación con base a la interpretación de prueba y los resultados obtenidos en pruebas de carga.

Capítulo 2.- Pruebas de carga

2.1. Normas para la ejecución de prueba de carga

Existen diferentes normas y procedimientos para la ejecución de pruebas de carga, las cuales tienen diferencias desde el diseño y construcción del sistema de reacción, o bien el procedimiento de cómo llevar a cabo la aplicación de la carga a la pila de prueba.

Una de las normas internacionales más utilizadas y completas para la ejecución de las distintas pruebas de carga, se encuentran descritas por American Society for Testing and Materials (ASTM), asociación que radica Estados Unidos encargada de probar la resistencia de los materiales para la construcción de bienes, desde 1898 ha realizado grandes aportaciones y es una de las organizaciones internacionales de desarrollo de normas más grandes del mundo

La ASTM cuenta con distintas normas y procedimientos para la ejecución de las distintas pruebas de carga, las cuales se mencionan a continuación.

- ASTM D 1143 Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load
- ASTM D 3689 Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Tensile Load
- ASTM D 3966 Standard Test Methods for Deep Foundations Under Lateral Load
- ASTM D 4945 Standard Test Methods for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations
- ASTM D7383 Standard Test Methods for Axial Compressive Force Pulse (Rapid) Testing of Deep Foundations

La Administración Federal de Carreteras (Federal Highway Administration o FHWA), es una división del Departamento de Transporte de los Estados Unidos especializada en transporte por carretera fundada desde 1967, cuenta con procedimientos para la ejecución de pruebas de carga (Hannigan, Rausche, Likins, Robinson, & Becker, 2016).

- Axial Compression Load Test
- Tensión Load Test
- Lateral Load Test

- Dynamic Testing and Singal Matching Analysis
- Rapid Load Testing

British Standards Institution (BSI) fundado en 1931, es el Organismo Nacional de Normas del Reino Unido, es una multinacional cuyo fin se basa en la creación de normas para la estandarización de procesos. Cuenta con la norma BS EN 22477- Investigación Geotécnica y Pruebas.

Pruebas de estructuras geotécnicas.

- Part 1: Pile load test by static axially loaded compression
- Part 2: Pile load test by static axially loaded tension
- Part 3: Pile load test by static transversally loaded tension
- Part 4: Pile load test by dynamic axially loaded compression test

En el presente trabajo seguirá los lineamientos de la norma ASTM, procedimiento y ejecución de pruebas de carga.

2.2. Procedimiento de ejecución de la prueba

Existen diferentes procedimientos de ejecución de pruebas de carga que varían en base al tipo de prueba que será llevada a cabo, sin embargo, es esencial que sigan los procedimientos estandarizados, ya que no llevar a cabo una correcta ejecución de la prueba, impactara los resultados obtenidos, así como una interpretación errónea. Se presenta las etapas de diseño y ejecución de la prueba de carga (figura 1).

Una de las referencias de uso más extendido y completa para definir los procedimientos de prueba carga son las Normas American Society for Testing and Materials (ASTM), así como Federal Highway Administration (FHWA).

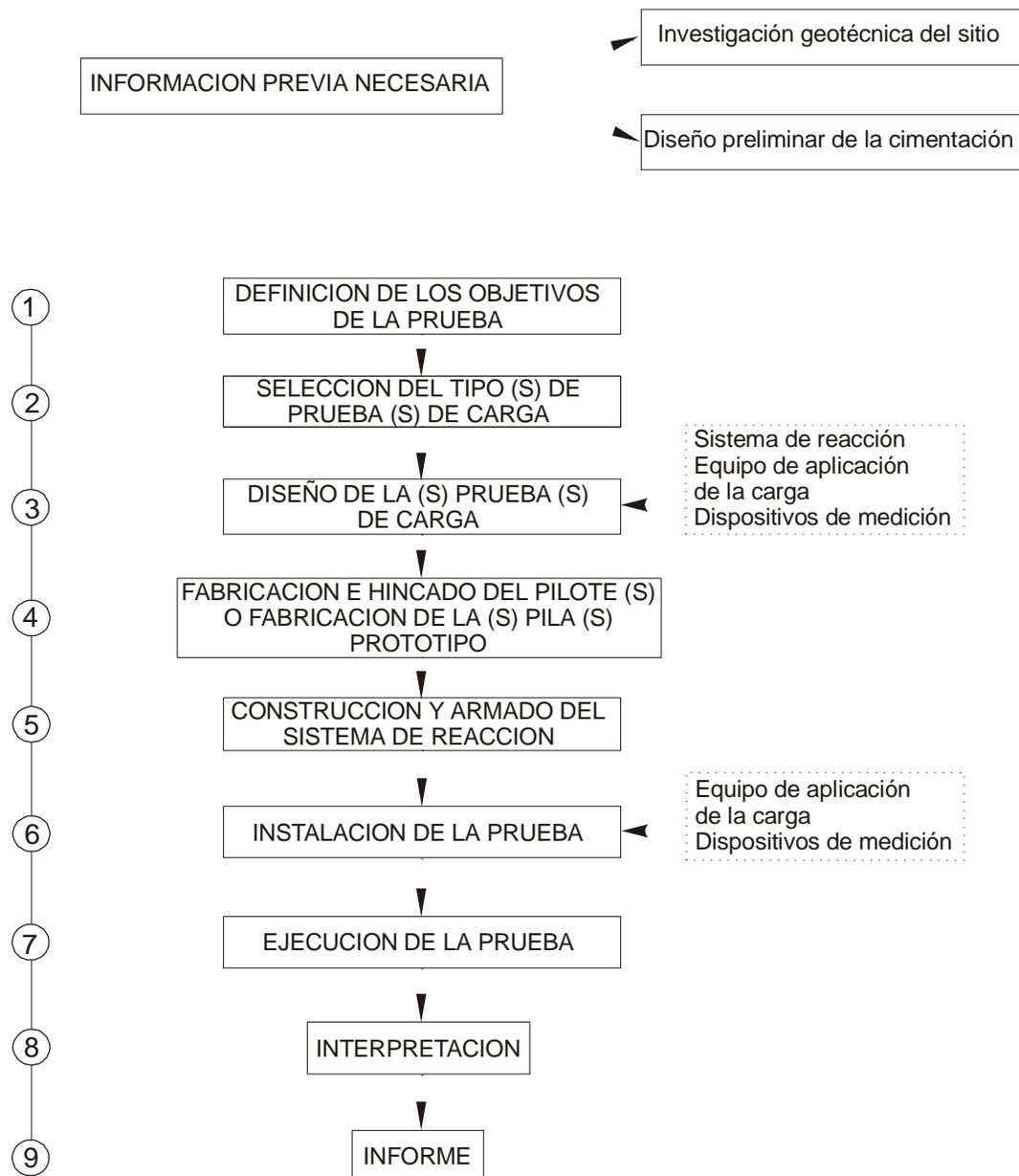


Figura 1.- Etapas para el diseño y ejecución de una prueba de carga (SMMS, 1982)

Existen aspectos de importancia al llevar a cabo pruebas de carga; tener una correcta planeación y ejecución de las pruebas, así como tener en cuenta los aspectos de seguridad necesarios.

(Handley & Bullivant, 2006), menciona los siguientes aspectos a considerar:

- El área que rodea la pila de prueba debe limpiarse de escombros, lodo, basura y equipo.
- Considerar una plataforma de nivel diseñada adecuadamente con dimensiones suficientes para realizar trabajos, equipo y con acceso adecuado para operarios, vehículos de transporte y planta elevadora debe ser proporcionada.
- La prueba de carga se debe realizar en un ambiente seguro y libre de contaminación de cualquier índole, se recomienda suspender la operación de maquinaria y equipos cercanos a la zona que sean ajenos a la prueba o en su caso desplazarlos a una zona donde no influyan en ejecución de la prueba.
- Se pueden usar barreras electrónicas con advertencias para mantener el área de prueba despejada, bajo ninguna circunstancia se permitirá ninguna excavación dentro de la zona de prueba.
- Se recomienda colocar alarmas sónicas de presencia en la zona de carga, para evitar dar incrementos si hay algún operador cerca.

Iluminación

- Dependiendo del régimen de carga acordado, puede ser necesario que algunas de las operaciones se lleven a cabo durante periodos de iluminación natural u oscuridad; el área debe estar adecuadamente iluminada para permitir que la prueba de carga se realice de manera segura y para el rendimiento de la pila de prueba que se controlará durante toda la duración de la prueba. Se recomienda contar con generadores de electricidad y luminarias necesarios para que el área de trabajo sea totalmente visible sin importar la hora.

Límites de aplicación de carga

- La carga de prueba máxima a aplicar debe ser acordada previamente para que la pila de prueba y el equipo de prueba de la carga (pilas de reacción / peso muerto / gato hidráulico y bomba / celda de carga bidireccional / energía de prueba rápida o dinámica) se diseñen de manera que soporten la carga máxima de prueba de forma segura.
- Cuando la intención es probar una pila ante fallas geotécnicas, se debe considerar debidamente a la capacidad de todo el sistema de prueba. Si la falla geotécnica de

la prueba no se ha producido en la pila al aplicar la carga de prueba máxima, entonces este hecho debería ser aceptado.

- Todo el personal del sitio de supervisión debe conocer la especificación y la carga régimen a seguir, así como el método y el riesgo evaluaciones relacionadas con la prueba de carga.
- Durante el transcurso de la prueba de carga, se debe monitorear todo el sistema para excentricidades de carga y acciones apropiadas tomadas si esto se vuelve excesivo.
- Los sistemas que usan solo dos pilas de reacción son inherentemente menos estables que aquellos con tres o más y, en consecuencia, solo se debe considerar donde se encuentran las cargas de prueba y las condiciones del suelo permiten la ubicación de las pilas de reacción a más tolerancias estrictas de lo normal.
- Si ocurre alguna anomalía durante la prueba de carga que podría dar lugar a una situación insegura, no debe cargarse más la pila y el área de prueba debe ser despejada inmediatamente (figura 2).



Figura 2.-Fallo del sistema de reacción en la pila de prueba (Handley & Bullivant, 2006)

2.3. Tipos de prueba de carga

Una prueba de carga es un método para evaluar la capacidad de carga de una pila o pilote en escala natural. La necesidad de realizar pruebas de carga en los cimientos profundos se justifica, en el cálculo teórico de la capacidad de carga y los desplazamientos que se adoptan en los parámetros e hipótesis de diseño sujeto a la certidumbre de las propiedades del subsuelo, así como la confiabilidad del proceso constructivo empleado en la

cimentación. Las pruebas de carga pueden ser parte de la investigación del sitio y pueden realizarse antes del diseño y / o adjudicación del contrato para la construcción de la cimentación. El programa de pruebas de carga de debe considerar como parte del diseño y proceso de construcción, y no llevado a cabo de manera apresurada en respuesta inmediata a un problema de construcción.

Existe una variedad de pruebas de carga que persiguen objetivos distintos, tales como, evaluar el diseño de la cimentación o pruebas para fines de investigación (figura 3). Una prueba de carga se puede ejecutar con cargas estáticas axiales a compresión o a extracción, con cargas estáticas laterales o con cargas estáticas combinadas (axial y lateral a la vez); las hay también con cargas pseudo estáticas o con carga dinámica, las cuales son llevadas a cabo en proyectos de cierta envergadura.

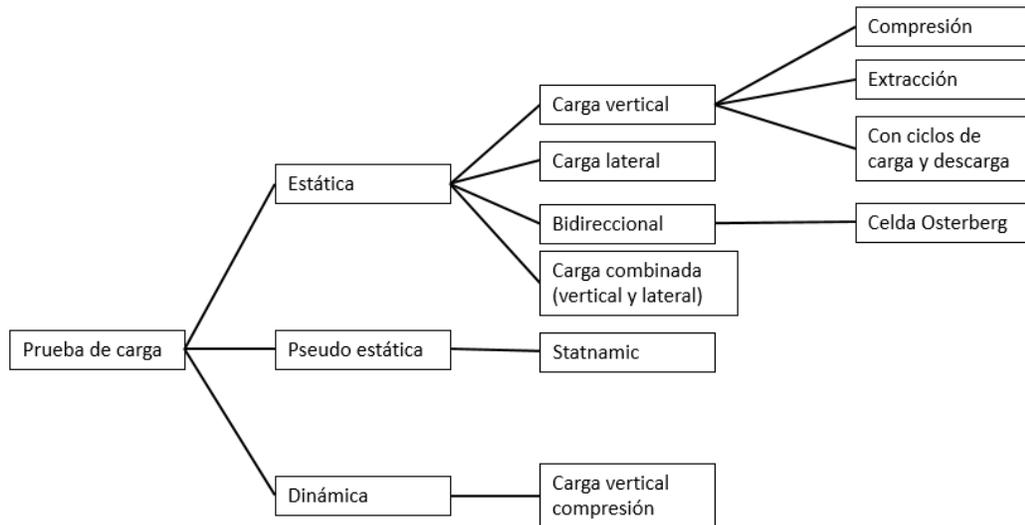


Figura 3.- Tipos de pruebas de carga en pilas y pilotes (SMMS, 2017a)

La prueba de carga proporciona al ingeniero valiosa información de verificación de diseño sobre la resistencia y la respuesta de deformación de las pilas de prueba, esto porque las pilas no se pueden inspeccionar fácilmente una vez que se han construido, ya que la pila se construye debajo de la superficie del suelo, en materiales sobre los cuales solo hay información y comprensión limitada.

Existe una serie de razones para realizar pruebas de carga, que concuerdan diferentes autores como (Poulos & Davis, 1980), (Crowther, 1988), (Fellenius, 2006),(Gunaratne, 2006) , (Hannigan et al., 2016), incluyen lo siguiente:

- Las pruebas de carga en pilas en este momento pueden usarse para verificar que las relaciones reales de suelo y pila de la capacidad final, distribución entre fricción de la fuste y soporte en punta, transferencia de carga y deflexión de carga (asentamientos) corresponden a las características particulares asumidas en el diseño.
- Pruebas de carga en cimentaciones existentes se pueden realizar como una herramienta de investigación después de que se hayan producido asentamientos o fallas el edificio.
- Proporcionar información para la verificación del diseño o el refinamiento del diseño, así como la información para la verificación de la construcción o la modificación del procedimiento de construcción con base a la medición de la carga medida o datos de transferencia de carga obtenidos.
- Determinar la capacidad de cargas última o capacidad de carga de diseño del cimiento.
- Determinar el comportamiento de asentamiento de una pila, datos con los cuales se pueden usar para predecir asentamientos grupales y de otras pilas.

2.3.1. Pruebas de carga estática axial

En pruebas de carga axial estática existe una variedad de procedimientos para la aplicación de carga en pruebas estáticas ya sean a compresión o a extracción, como carga controlada y desplazamientos controlados, los cuales requieren mayor control y equipo especializado por lo que su uso es menos frecuente.

Las pruebas de cargas axiales estáticas de pilas se deben llevar a cabo de acuerdo a normas establecidas. La norma (ASTM D1143, 2007) cuenta siete procedimientos referidos para pruebas de carga estática en compresión (figura 4). Para pruebas de extracción cuenta con 6 procedimientos referidos a la norma (ASTM D 3689, 2014) (figura 5).

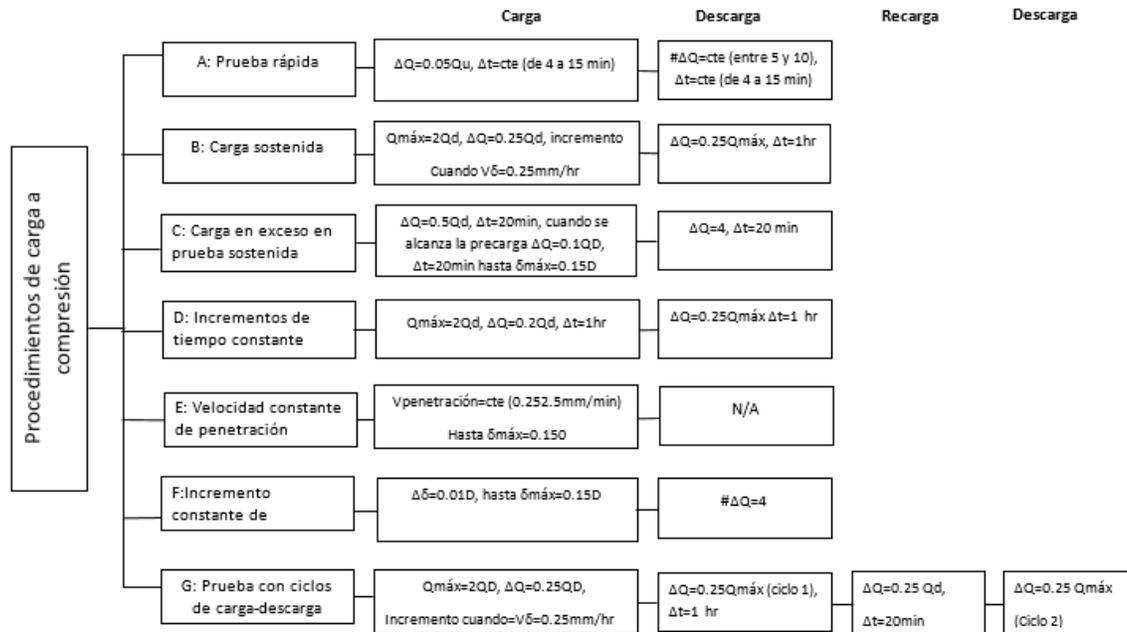


Figura 4.-Procedimientos de carga norma ASTM D 1143 para pruebas de carga a compresión (SMMS, 2017a)

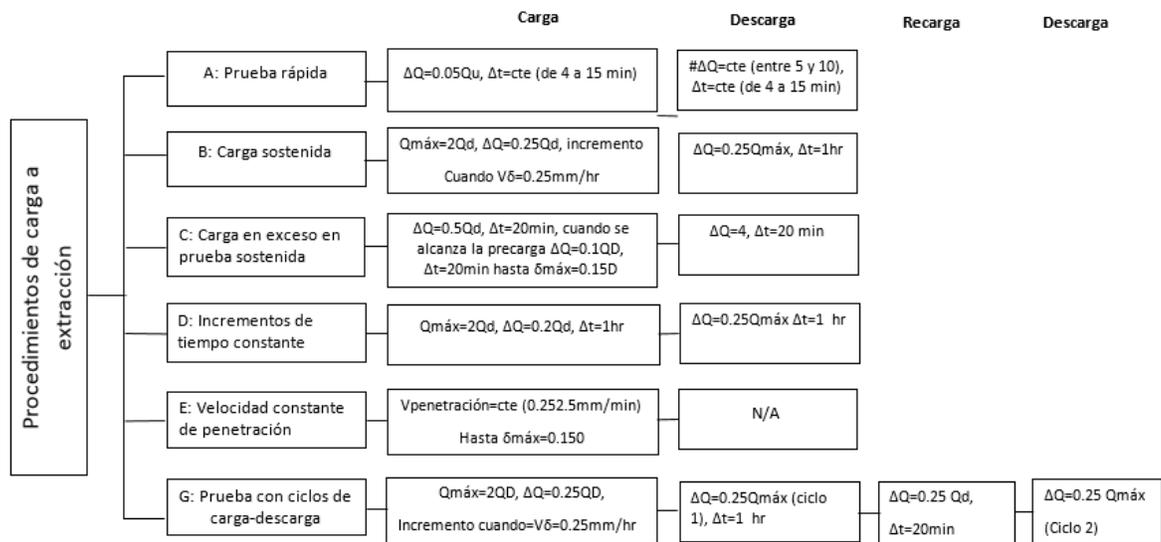


Figura 5.-Procedimientos de carga recomendados por la norma ASTM D 3689 para pruebas de carga est\atica a tensi3n

Procedimiento A: Prueba r\apida

Prueba r\apida: aplique la carga de prueba en incrementos del 5% de la carga prevista como carga \ultima (Q_u). A\adir cada Incremento de carga de manera continua e inmediata

después de completar las lecturas de movimiento para el anterior intervalo de carga. Se agregan incrementos de carga hasta llegar a una falla geotécnica, pero cuidando de no rebasar la capacidad estructural del sistema de reacción o del sistema de carga. Durante cada intervalo de carga, mantenga la carga constante durante un intervalo de tiempo de no menos de 4 minutos y no más de 15 minutos, usando el mismo intervalo de tiempo para todos los incrementos de carga a lo largo de la prueba. Retire la carga en cinco a diez decrementos aproximadamente iguales, manteniendo la carga constante durante un intervalo de tiempo de no menos de 4 minutos y no más de 15 minutos, utilizando el mismo intervalo de tiempo para todas las descargas. Considere intervalos de tiempo más largos para la carga de falla para evaluar el comportamiento de fluencia y para la carga final evaluar el comportamiento de rebote elástico de la pila de prueba totalmente descargada.

Se tomarán lecturas de los instrumentos dispuestos para medir carga-asentamiento y otros, a los 0.5 min, 1 min, 2 min, y 4 in después de la completa aplicación de cada incremento de carga, las lecturas serán a 1 min y 4 min después de aplicar la descarga y, de igual manera si el tiempo es prolongado, se tomarán las lecturas a 8 y 15 min. Finalmente, se tomarán las lecturas a 1 min, 4 min, 8 min y 15 min después de la descarga total.

Procedimiento B: Carga sostenida

A menos que ocurra la falla primero, se carga la pila hasta una carga máxima mantenida del 200% de la carga de diseño (Q_d) anticipada para pruebas en pilas individuales, o el 150% de la carga de diseño para un grupo de pilas, aplicando la carga en incrementos del 25% de la carga de diseño. Mantenga cada incremento de carga hasta que la velocidad del movimiento axial no exceda los 0.25 mm por hora (Figura 6), con un tiempo mínimo adecuado para verificar este índice de movimiento basado en la precisión de las lecturas del indicador de movimiento, y con un máximo de 2 horas. Después de aplicar la carga máxima ($Q_{máx}$) y alcanzar una duración de prueba de al menos 12 horas, comience la descarga cuando el movimiento axial medido durante un período de 1 hora no exceda de 0,25 mm ; de lo contrario, permita que la carga máxima permanezca en el grupo de pila o pila durante 24 horas. Si ocurre una falla durante la carga, mantenga la carga de falla, o la carga máxima posible, hasta que el movimiento axial total sea igual 15% del diámetro o ancho de la pila. Después de completar la carga final incremente, elimine la carga en decrementos del 25% de la carga de prueba máxima con 1 hora entre decrementos.

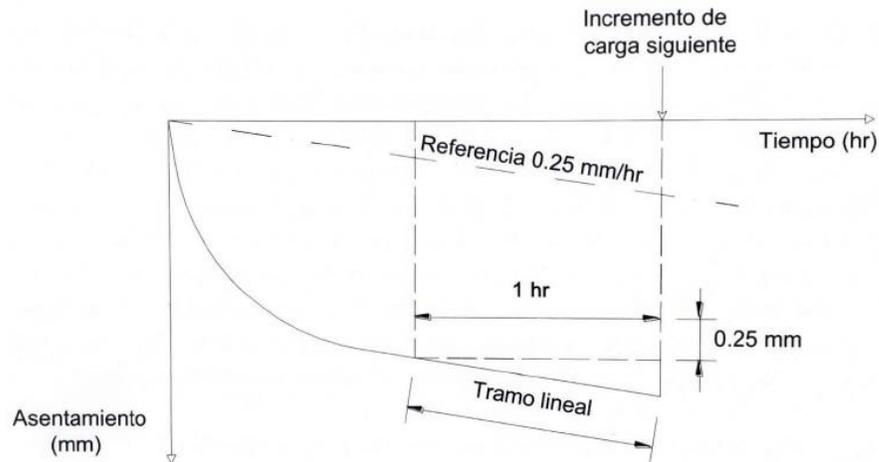


Figura 6.- Control de prueba para procedimiento B carga sostenida (SMMS, 2017a)

Procedimiento C: Carga en exceso en prueba sostenida

Si el sistema de reacción tiene capacidad suficiente y no se alcanzó la falla geotécnica al cabo del procedimiento B, vuelva a cargar la pila de prueba o el grupo de pilotes hasta la carga máxima mantenida en incrementos del 50% de la carga de diseño del grupo de pila o pilote, permitiendo 20 min entre incrementos de carga, de tal forma que, en 80 min, se tendrá la carga de $2Q_d$. A continuación, aplique carga adicional en incrementos del 10% de la carga de diseño para el grupo de pilas o pila hasta alcanzar la carga máxima requerida o falla, permitiendo 20 minutos entre incrementos de carga. Si ocurre una falla, continúe con la carga hasta que el desplazamiento sea igual al 15% del diámetro o ancho de la pila. Si no ocurre la falla, mantenga la carga completa durante 2 horas y luego retire la carga en cuatro decrementos iguales, permitiendo 20 minutos entre decrementos.

Procedimiento D: Incremento de tiempo constante

Siga los procedimientos de B, pero aplique la carga en incrementos de 20% de la carga de diseño de pila o grupo de pilas con 1 hora entre carga incrementos. A continuación, descargue las pilas con 1 hora entre carga decrementos semejantes a los utilizados en la etapa de carga.

Procedimiento E: Velocidad constante de penetración

El aparato para aplicar cargas debe tener una capacidad especificada. Use un sistema mecánico de elevación hidráulica equipado con una válvula de purga, dispositivo de

velocidad variable u otros medios para proporcionar una entrega de presión durante toda la prueba. Varíe la carga aplicada según sea necesario para mantener una pila tasa de penetración de 0.25 a 1.25 mm por minuto para suelo cohesivo o de 0,75 a 2,5 mm por minuto para suelos granulares, o según lo especificado por el ingeniero (figura 5). Continuar cargando la pila hasta lograr una penetración continua en la tasa especificada. Mantenga la carga máxima aplicada hasta obtener una penetración total de la pila de al menos 15% del diámetro o ancho de la pila, o hasta que la pila deje de penetrar. Gradualmente liberar la carga final para proteger la carga y la medición

Se controla la tasa de penetración comprobando el tiempo tomado por sucesivos pequeños incrementos iguales de penetración y luego ajustando el gato en consecuencia. Alternativamente, use un dispositivo mecánico o eléctrico para monitorear y controlar la tasa de penetración para que permanezca constante (figura 7).

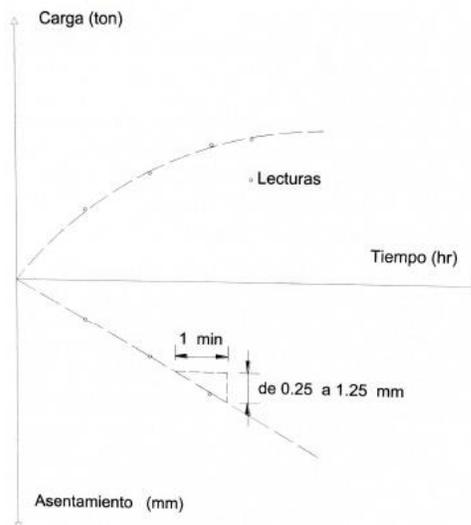


Figura 7.- Control de la prueba para procedimiento E (SMMS, 2017a)

Procedimiento F: Incremento constante de desplazamiento

Aplicar cargas en incrementos requeridos para producir un desplazamiento de la pila de equivalentes a aproximadamente 1% del diámetro o ancho promedio de la pila. Varíe la carga aplicada para mantener constante el incremento de desplazamiento, y no aplicar carga adicional hasta que su variación sea menor del 1% de la total carga aplicada por hora.

Continúa cargando la pila en tales incrementos hasta que el desplazamiento total sea igual al 15% de la pila promedio diámetro o ancho.

Eliminar la carga en cuatro decrementos iguales después de mantener el incremento de desplazamiento final hasta que la tasa de la variación de carga es menor al 1% de la carga total aplicada por hora. Después de eliminar la primera disminución de carga, no eliminar decrementos adicionales hasta que el desplazamiento vertical sea menor que 0.3% del diámetro o ancho de la pila por hora.

Procedimiento G: Prueba de carga cíclica

Para la primera aplicación de incrementos de carga se realizan de forma semejante al procedimiento B. Después de la aplicación de cargas iguales a 50, 100 y 150% de la carga de diseño de una pila, o para cargas equivalentes para 50 % y 100 % de la carga de diseño para un grupo de pilas, mantenga la carga de total en cada caso durante 1 hora y elimine la carga en decrementos igual a los incrementos de carga, permitiendo 20 min entre decrementos. Después de eliminar cada carga máxima aplicada, vuelva a aplicar la carga a cada nivel de carga anterior en incrementos iguales al 50% de la carga de diseño, permitiendo 20 min entre incrementos. Aplique cargas adicionales de acuerdo con procedimiento B (figura 8).

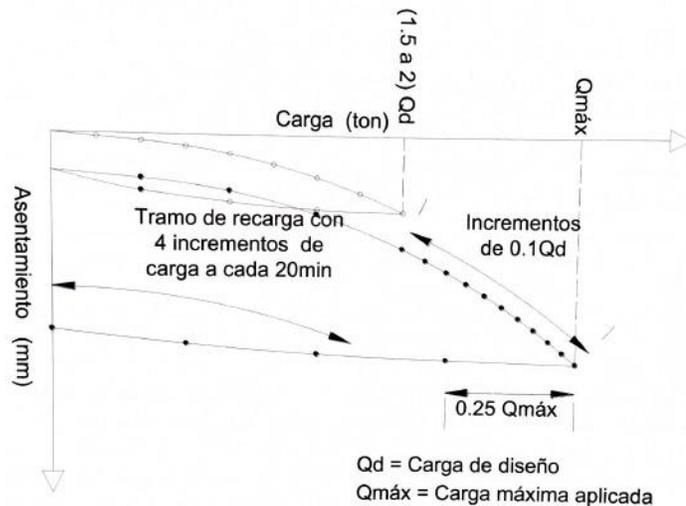


Figura 8.- Control de la prueba para el procedimiento G.

De los distintos métodos de prueba de carga disponibles, los siguientes cuatro métodos se pueden identificar como los métodos básicos de prueba de carga. En la figura 9 se presenta

esquemáticamente la comparación de la graficas carga-tiempo para los procedimientos A prueba rápida, B carga sostenida, E velocidad constante de penetración y G prueba de carga cíclica. Se puede observar de la figura 10 que los procedimientos donde la carga se aplicó con mayor rapidez, tienden a mostrar curvas carga-desplazamiento de mayor rigidez inicial y mayor carga máxima.

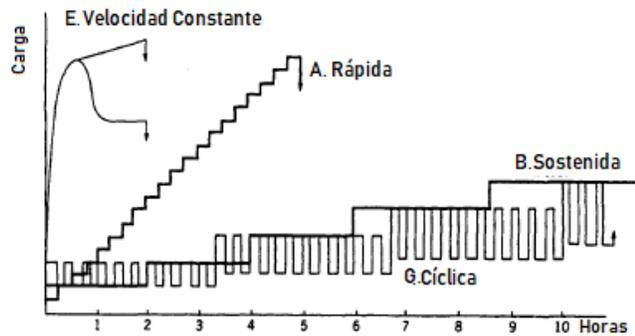


Figura 9.-Comparación del tiempo requerido para distintos métodos de prueba (Prakash & Sharma, 1990)

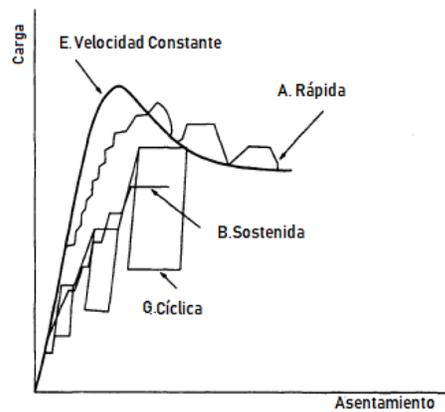


Figura 10.-Comparación carga-desplazamiento para distintos métodos de prueba de carga (Prakash & Sharma, 1990)

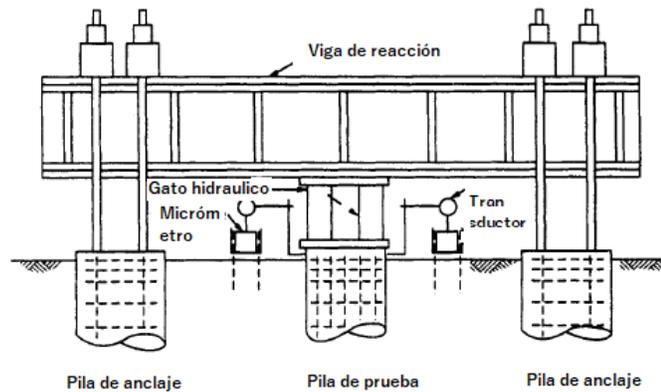


Figura 11.-Ejemplo de una disposición de aplicación de carga de compresión axial (Prakash & Sharma, 1990)

2.3.1. Pruebas de carga estática lateral

Las pruebas de carga lateral se realizan en proyectos donde las pilas están sometidas a cargas laterales significativas, permitiendo caracterizar el comportamiento de una pila, un pilote o grupo de ellos al interactuar con cargas horizontales. La importancia de determinar la respuesta de la pila a la carga lateral se ha incrementado en gran medida, particularmente con respecto a la consideración de estados límite de eventos extremos como el impacto sísmico.

La mayoría de las pruebas de carga lateral se realizan en una sola pila con una condición de cabeza libre. En servicio, la mayoría de las pilas se instalan en grupos que tienen una condición de cabeza fija. Por lo tanto, los resultados de la prueba de carga lateral en una sola pila con una condición de pila libre pueden no ser directamente aplicables al diseño. Para las pruebas de etapa de diseño, las dos pilas pueden ser diferentes tipos de pilotes o secciones de pilotes, lo que permite evaluar el comportamiento de deformación lateral para dos tipos de pilotes con una prueba de carga lateral. Existe una variedad de pruebas de carga lateral, que son los de carga controlada o los de velocidad controlada (figura 12).

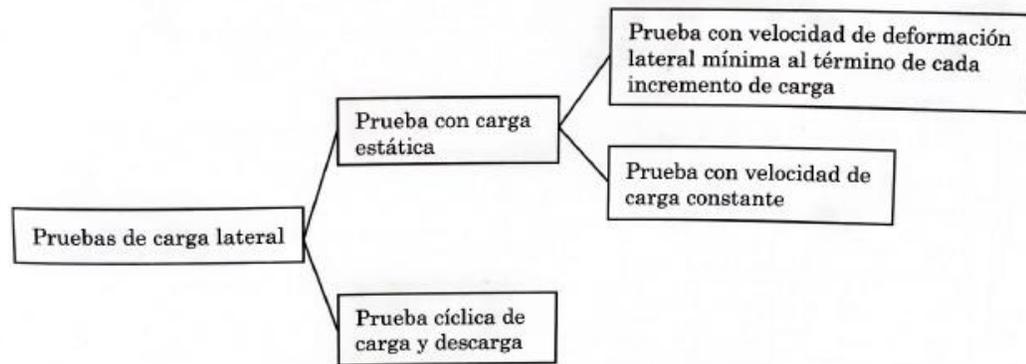


Figura 12.- Tipos de prueba de carga lateral (SMMS, 2002)

La norma ASTM cuenta con diferentes procedimientos para prueba de carga lateral. En la figura 13 se resume los 6 procedimientos con los que cuenta la norma ASTM D3966.

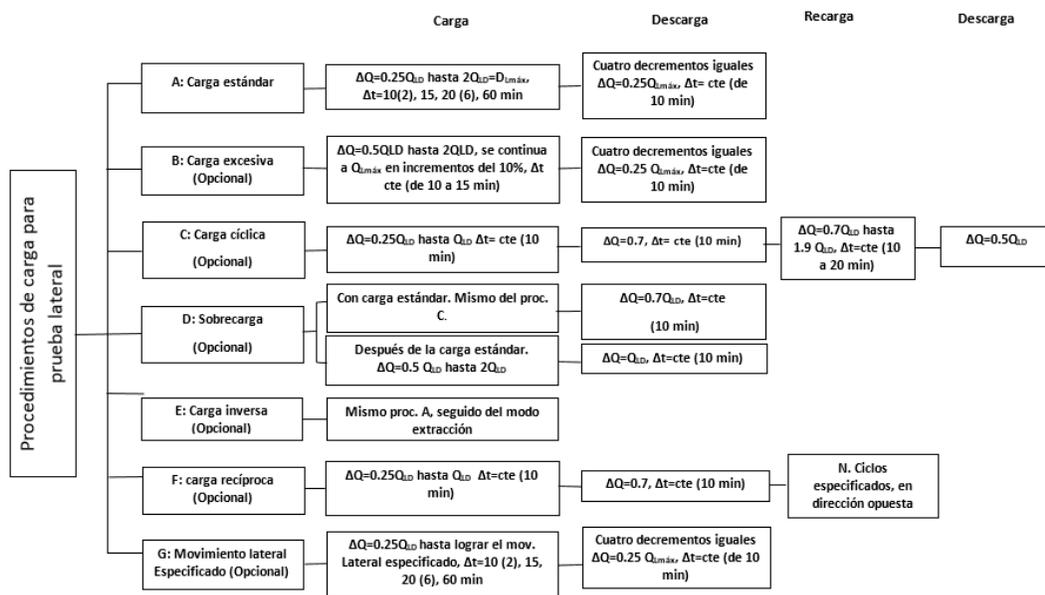


Figura 13.- Procedimiento de carga lateral recomendado por la norma ASTM D 3966.

Procedimiento A: Prueba estándar

La carga lateral se aplica en incrementos iguales de aproximadamente 25% de la carga lateral de diseño (Q_{LD}) hasta alcanzar una carga de 150% de Q_{LD} , para luego incrementar a 170%, y 10% adicionales hasta la carga máxima de prueba ($Q_{Lm\acute{a}x}$) igual al 200% de Q_{LD} . Los incrementos de carga se aplican con intervalos variables entre 10 y 20 min, mientras

que la carga máxima se mantiene durante 60 min. En la tabla 1 se muestra los incrementos y decrementos de acuerdo el procedimiento A (tabla 1).

Tabla 1.- Control para prueba de carga lateral Procedimiento A (ASTM D 3966)

Control de la prueba de carga procedimiento A	
Porcentaje de la carga lateral de diseño	Duración de la carga, min
0	-
25	10
50	10
7	15
100	20
125	20
150	20
170	20
180	20
190	20
200	60
150	10
100	10
50	10
0	-

Procedimiento B: Carga en exceso

Después de retirar la carga de acuerdo con el procedimiento A, se podrá realizar un segundo ciclo para aplicar cargas laterales mayores a la máxima alcanzada; para ello, con la pila totalmente descargada, se realizan cuatro incrementos de carga del 50% de Q_{LD} hasta alcanzar la carga máxima de la prueba previa ($Q_{Lmáx}$) igual a 200 % de Q_{LD} ; los intervalos serán de 10 min. A partir de ese punto, se va incrementando la carga lateral en incrementos del 10 % de Q_{LD} en intervalos constantes de 15 min, hasta alcanzar la carga deseada o alcanzar la deflexión lateral máxima permisible. La descarga se efectúa con cuatro decrementos del 25 % de la carga máxima en exceso alcanzada. En la tabla 2 se presenta la magnitud de los incrementos-decrementos.

Tabla 2.- Control para prueba de carga lateral Procedimiento B carga en exceso

Control de la prueba de carga procedimiento B	
Porcentaje de la carga lateral de diseño	Duración de la carga, min
0	-
50	10
100	10
150	15
200	20
210	20
220	20
230	20
240	20
250	20
Continúa hasta carga máxima requerida	Continúa con intervalos de 15 min
Máxima	30
75 Máxima	10
50 Máxima	10
25 Máxima	10
0	-

Procedimiento C: Ciclos de carga-descarga

Se aplica y remueve la carga de prueba, en cuatro ciclos de completos de carga-descarga. La carga alcanzada por ciclo es de 50%, 100%, 150% y en el cuarto ciclo, se alcanzará la carga máxima de 200% de Q_{LD} . Tabla 3

Para aplicar un quinto ciclo carga-descarga con carga superior a 200% de Q_{LD} , se debe mantener la carga del 200% durante 15 min, posterior a eso, se aplica el patrón de cargas y duración de incrementos para cargas adicionales hasta alcanzar una carga máxima igual al 300% de la carga lateral de diseño Q_{LD} en dos ciclos adicionales (tabla 4).

Tabla 3.- Control para prueba de carga lateral Procedimiento C Carga en exceso

Control de la prueba de carga procedimiento C			
carga lateral de diseño	Duración de la carga, min	carga lateral de diseño	Duración de la carga, min
0	-	75	10
25	10	0	10
50	10	50	10
25	10	100	10
0	10	150	10
50	10	170	20
75	15	180	20
100	20	190	20
50	10	200	60
0	10	150	10
50	10	100	10
100	10	50	10
125	20	0	-
150	20	-	-

Tabla 4.-Control para prueba de carga lateral Procedimiento C Carga en exceso para ciclos

Control de la prueba de carga procedimiento C			
carga lateral de diseño	Duración de la carga, min	carga lateral de diseño	Duración de la carga, min
Siguiendo la		100	10
carga cíclica		0	10
de 200%		50	10
200	60	100	10
100	10	150	10
0	10	200	10
50	10	250	10
100	10	260	15
150	10	270	15
200	10	280	15
210	15	290	15
220	15	300	30
230	15	225	10
240	15	150	10
250	15	75	10
200	10	0	-

Procedimiento E: Carga inversa

La carga inversa implica la aplicación de cargas laterales en dos sentidos, es decir, seguido por el modo de retracción o viceversa. La pila o grupo de estas se ensayan de acuerdo con el programa de carga A según se especifica, primero en una dirección y posteriormente en la dirección opuesta.

Procedimiento F: Carga recíproca

En este proceso se aplica y retira cada uno de los niveles de carga lateral y luego en la dirección opuesta para el número de ciclos especificados. Se requiere un aparato adecuado para permitir invertir las cargas. Las cargas recíprocas pueden ser aplicadas con un sistema de manivela con un dispositivo para medir las cargas aplicadas.

Procedimiento G: Movimiento lateral específico

Este procedimiento se sigue de acuerdo con los procedimientos A Y D, hasta que el movimiento lateral de la pila de prueba o grupo de pilas sea como especifica el proyecto. Posteriormente, se retira la carga de prueba en cuatro decrementos iguales duración es de 10 min.

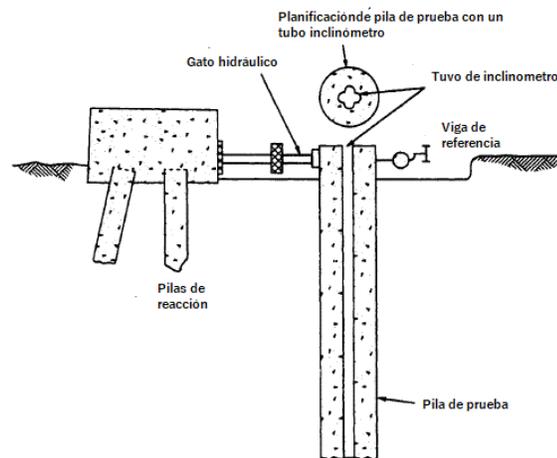


Figura 14.-Aparatos típicos de instalación y medición de carga lateral con tubo para inclinómetro (Prakash & Sharma, 1990)

2.3.2. Pruebas de carga dinámicas

Las pruebas de carga dinámica es un ensayo de campo que sirve para evaluar la capacidad de carga de un pilote mientras se hinca. En pruebas de carga dinámica se puede obtener información importante sobre el comportamiento del sistema de manejo del pilote y la respuesta del pilote y el suelo, que no está disponible en una prueba de carga estática de pilotes. La prueba consiste en medir, en un punto cercano al cabezal del pilote, la aceleración y las deformaciones producidas durante su hincado.

El sistema típico de prueba dinámica consta de un mínimo de dos deformímetros y dos acelerómetros. Los medidores reutilizables están atornillados externamente a lados diametralmente opuestos de la pila en una ubicación de dos a tres diámetros por debajo del cabezal de pila. Estos medidores miden la deformación y la aceleración, así como los impactos de martillo no uniformes y la flexión de la pila, donde las mediciones obtenidas son enviadas o transmitidas a la unidad de proceso que generalmente es una computadora, conectada mediante cables o transmitidas vía wifi (figura 15).

Los resultados de las pruebas dinámicas deben evaluarse adicionalmente utilizando técnicas de concordancia de señales para determinar la distribución relativa de la resistencia del suelo en la pila, así como las propiedades dinámicas del suelo para su uso en los análisis de ecuaciones de ondas.

(SMMS, 2017a) Con las pruebas dinámicas se estudian los siguientes aspectos:

- Funcionalidad del sistema de hincado
- Determinación de la resistencia nominal y la capacidad de carga del pilote, esta última se puede correlacionar con los resultados de las pruebas estáticas.
- Evaluación de los esfuerzos generados durante el hincado del pilote
- Determinación de la distribución relativa de la resistencia del suelo a lo largo del pilote, así como las propiedades dinámicas del suelo, cuando la prueba se complementa con la técnica de acoplamiento de señales.
- Esfuerzos de hincado e integridad. Conocer los esfuerzos de compresión y tensión generada durante el hincado, es útil cuando, en la práctica se presentan problemas durante el hincado, por lo que con esta información es posible ajustar el procedimiento de instalación.



Figura 15.-a) Acelerómetro, medidor de deformación y transmisor Wifi, b) medidor de deformación combinada y acelerómetro (Hannigan et al., 2016)

La prueba de carga dinámica esta normado por ASTM D 4945, el procedimiento convencional es el siguiente:

1.- determinación de la velocidad de onda del concreto del pilote. El pilote se coloca sobre soportes o a nivel del terreno natural. Se instala un acelerómetro en uno de sus extremos y en el extremo opuesto, se produce un impacto con un martillo manual, procurando no dañar o abollar el pilote. Se registra y se graba del acelerómetro en el analizador. Se mide el

tiempo entre los picos de aceleración para un número determinado de mediciones de reflexión de la onda en el pilote.

2.- Preparación. El pilote de prueba se marca claramente a intervalos apropiados para conocer su longitud desde la punta hasta la cabeza; dependiendo del pilote y del material se realizan preparaciones para fijar los transductores. Se iza el pilote hasta una posición de hincado, se verifica la colocación del martillo, esto para que los impactos se aplican axial concéntricamente al a cabeza del pilote; se sujetan los transductores al pilote con tornillos, pegamento o soldadura. Para verificar el correcto funcionamiento de la instrumentación, se aplica una serie de impactos con el martillo y con el analizador se toman y se graban las señales de fuerza y velocidades correspondientes.

3.- Se anota el número de impactos de martillo para una penetración específica. Así mismo, para martillos de caída simple, se anotan la altura de caída de su émbolo; también se anota el número de golpes por minuto entregados por el martillo.

4.- Revisión de la calidad de las mediciones. Para confirmar la calidad de los datos se comparan las gráficas de fuerza y velocidad contra el tiempo en una serie de impactos seleccionados durante el hincado el pilote. Debe existir consistencia y proporcionalidad entre las señales de fuerza o transductores de desplazamiento.

5.- Mediciones de prueba. El analizador proporciona, directamente en pantalla, las gráficas de fuerza y velocidad de cada impacto. Posteriormente, en el análisis se utilizan los registros de la fuerza de impacto y la velocidad, así como la máxima y mínima fuerza para los golpes de martillo representativos; la máxima aceleración se obtiene directamente de la señal de los acelerómetros.

Las pruebas de carga a compresión, extracción y lateral, sin un buen programa de cargas puede llevar a la falla geotécnica de la pila sin previo aviso, por tal motivo es de importancia una correcta predicción teórica comportamiento carga - desplazamiento de la pila (figura 17).

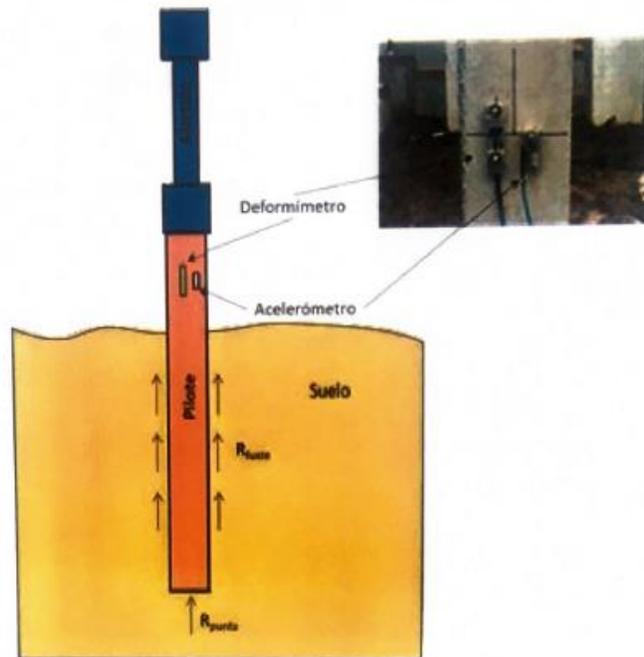


Figura 16.-Esquema general de prueba dinámica (SMMS, 2017a)

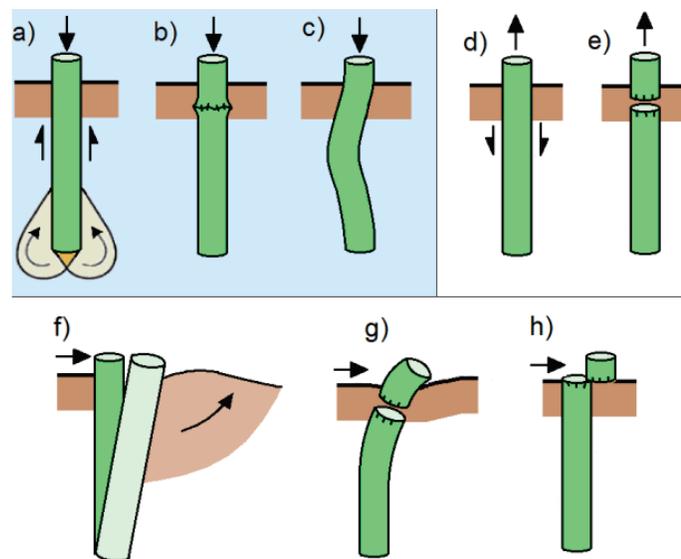


Figura 17.- (a)–(c) en compresión, (d)–(e) en extracción, (f)–(h) en la carga lateral (Wrana, 2015)

2.3.3. Pruebas bidireccionales

El método de prueba Osterberg o también conocido como procedimiento bidireccional, es aplicable a pilas coladas en *in situ*. El sistema trata de un par de celdas con un gato hidráulico de alta capacidad al interior de las celdas, el cual se coloca en el cuerpo de la

pila cercano a la punta. Esta celda se colocó en el armado de la pila, para después ser introducida al interior de la perforación y posteriormente se coló (figura 18).

Durante la prueba, la celda O-cell se expande hidráulicamente de modo tal, que la parte superior de la pila reacciona por la resistencia de fuste ejercida con la parte inferior, donde se moviliza la resistencia por punta.

El diseño y construcción del sistema de reacción no es necesario al utilizar la celda Osterberg, ya que el suelo de apoyo en la punta proporciona la reacción y el fuste de la pila trabaja a extracción. De esta forma, es posible ensayar tanto la punta de la pila, como el fuste, con mecanismos que van en direcciones contrarias, para lo cual construir elementos adicionales como pilas y marco de reacción son innecesarios. Las celdas O-cell son eficientes en distintas situaciones, tal su uso es posible colocar más de una celda O-cell, teniendo la gran virtud de permitir la aplicación de grandes cargas en pilas de gran diámetro (figura 19).

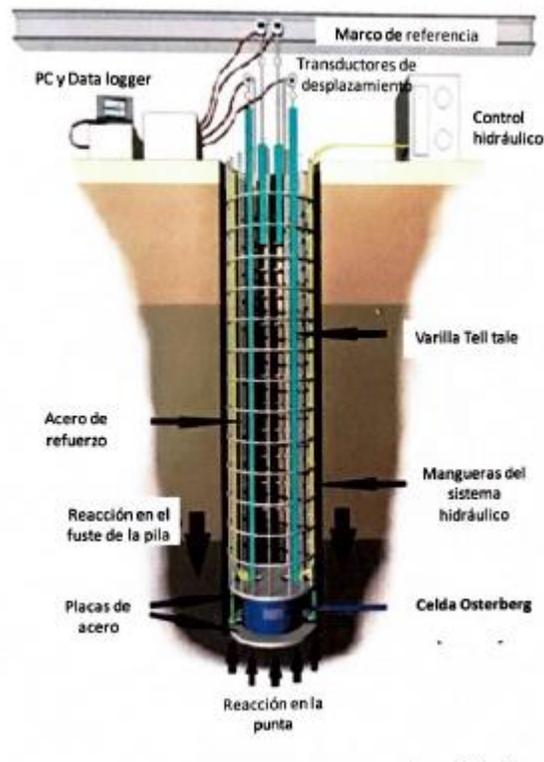


Figura 18.-Esquema y vista del sistema Osterberg (www.loadtest.com)



Figura 19.-Conjunto de celdas O-cell instalado de forma segura dentro de barrettes.(Melvin & Paul F., 2008)

2.3.4. Pruebas estático-dinámicas

El método de prueba estático - dinámico fue desarrollado en 1988 por Bermingham. Este procedimiento utiliza combustible sólido quemado dentro de una cámara de presión para acelerar rápidamente hacia arriba la masa de reacción colocada sobre la cabeza de la pila (figura 20). A medida que aumenta la presión del gas, se ejerce una fuerza hacia arriba sobre la masa de reacción, mientras que una fuerza igual y opuesta se empuja hacia abajo sobre la pila. La carga aumenta hasta un máximo y luego se descarga mediante la ventilación de la presión del gas. Una celda de carga y acelerómetros miden la carga y la aceleración. Típicamente, la masa de reacción pesa un mínimo del 5% de la carga estática de prueba (Handley & Bullivant, 2006)

Se han realizado pruebas estadísticas para la evaluación de la capacidad de pilotes estáticos en pilas de acero, hormigón y madera. En la actualidad, se pueden probar pilas individuales o grupos de pilotes con una resistencia combinada estática y dinámica. Se han realizado pruebas de compresión axial en pilas verticales y perforadas. El método de prueba se ha utilizado en tierra y sobre agua.

Los procedimientos de pruebas de carga rápida están estandarizados en ASTM D 7383, método de prueba el cual se puede utilizar en tierra y sobre agua en pruebas estáticas y laterales.



Figura 20.-Prueba estático-dinámica sobre pilotes de hormigón prefabricado (Handley & Bullivant, 2006)

2.4. Instrumentación

2.4.1. ¿Por qué conocer el comportamiento de una pila a lo largo de su profundidad?

La instrumentación empleada a lo largo de la profundidad de la pila nos ayuda a comprender el real comportamiento de la pila-suelo, su contribución por estrado a la capacidad de carga por fricción, y la resistencia de punta movilizada.

En pruebas de carga-descarga, se puede conocer en pilas instrumentadas tanto en la cabeza como en el cuerpo de la pila, como una vez realizada el primer ciclo de cargas, la pila queda pre cargada con una carga en su punta, y el fuste queda con esfuerzos residuales. Los esfuerzos remanentes en la pila, deben considerarse si se realizarse un segundo ciclo de carga-descarga. Los esfuerzos remanentes a la descarga del 1er ciclo, se deben considerar como la condición inicial de esfuerzos para el análisis del 2do ciclo carga-descarga.

2.4.2. Instrumentación en la cabeza de la pila

La realización de pruebas de carga cada vez se hace con mejores equipos de medición e instrumentación en todo el cuerpo de la pila, ya que nuestra profesión se está dando cuenta de que una prueba de carga convencional en una pila proporciona información limitada, mientras que el movimiento de carga medido en el cabezal de pila establece la capacidad de la pila, no proporciona información cuantitativa sobre la transferencia de carga en su profundidad. (Fellenius, 2006)

En el cabezal de la pila de prueba se colocan instrumentos para medir desplazamientos y carga. Los instrumentos de medición pueden ser de lectura manual, sensores con sistema automático de adquisición de datos, o una combinación de instrumentos de mediciones manuales y automatizadas (figura 21). Es importante contar con, al menos, dos sistemas para medir los desplazamientos y dos sistemas para medir la carga, para control de la prueba, con lo cual la adquisición de datos no está limitada.

(SMMS, 2017a), Los desplazamientos en el cabezal de la pila de prueba se pueden registrar con los instrumentos siguientes:

- Transductores de desplazamiento; se colocan sobre la cabeza, dos por lo general diametralmente opuestos, para obtener un valor medio de ambas mediciones. Los transductores deben de ser de carrera largo, de al menos 3 pulgadas (7.5 cm). Los transductores se soportan mediante bases magnéticas fijas a la viga de referencia.
- Indicadores de carátula; para completar la medición de transductores, se pueden utilizar indicadores de carátula o mejor conocidos como micrómetros. Los micrómetros se colocan igualmente con bases magnéticas apoyadas en la viga de referencia, en los extremos del cabezal. Los micrómetros resultan muy eficientes en campo para sensibilizarse sobre magnitud de los movimientos diferentes etapas de prueba, ya que es posible verificar visualmente la velocidad del movimiento a través de las manecillas.
- La viga de referencia sobre donde se fijan los transductores o micrómetros, deben estar apoyados en sus extremos, los cuales se anclan fuera del área de influencia de los movimientos de la pila de prueba y elementos de reacción empleados. Es común proteger la viga de referencia con material aislante y reflejante, con el objetivo de poder minimizar los cambios de temperatura que pudiesen presentarse.

- Escala graduada; este es un método para medición d desplazamiento de menor resolución que los anteriores, pero resultad muy útil para registrar la historia de desplazamiento de forma continuas existen cuando existen grandes movimientos, especialmente cuando se agota la carrera de los transductores o micrómetros.
- Referencias topográficas; es recomendable llevar un registro topográfico de precisión de los movimientos, no solo de del cabezal de la pila, sino también de las pilas de reacción, así como puntos de control en el marco de reacción, con el propósito de monitorear las deflexiones en los elementos estructurales y alertar sobre deflexiones excesivas.



Figura 21.-Instrumentación en el cabezal de la pila de prueba y viga de referencia (CIMESA)

2.4.3. Deformímetros de cuerda vibrante

Para el registro de deformaciones en concreto y acero, que se traducen durante el post proceso en valores de carga a diferentes profundidades de la pila, se utilizan sensores llamados deformímetros o sensores resistivos conocidos como strain gages, los cuales registran micro deformaciones unitarias. Estos sensores son colocados en diferentes secciones, por pares diametralmente opuestos, para conocer encada etapa de prueba las micro deformaciones unitarias y contar con la distribución de carga a profundidades distintas en la pila (figura 22).



Figura 22.-Deformímetros de cuerda vibrante (sister bar) amarrada con alambres al acero de refuerzo principal de una pila de prueba (CIMESA)

2.4.4. Medidores de profundidad

Los instrumentos medidores de profundidad o tell tales, brindan datos respecto a la compresión que sufre el concreto desde su cabeza a la punta de la pila. Para construir los tell tales, se colocan durante el armado del acero de refuerzo a diferentes profundidades, donde el ingeniero especialista decidirá el número y a que profundidad. Cada varilla se coloca dentro del tubo de PVC, taponando su extremo, esto para impedir el ingreso del concreto fluido. Durante la prueba de carga, la función de un medidor es medir la deformación entre los puntos extremos de la pila. Las varillas sobresalen hasta el cabezal, con el fin de asegurar la medición de deformaciones que sufre el cuerpo de la pila. En las tapas que sobresalen tell tales en el cabezal de la pila se apoyan el vástago de micrómetros.

2.4.5. Celdas de carga

La colocación de celdas de carga en la punta permite conocer la carga desarrollada de forma directa, donde es posible obtener datos certeros de la carga en punta. La colocación de celdas de carga en punta, crea un incremento de carga debido al peso de la celda, y su maniobra al colocarla en la perforación.

Los resultados obtenidos en el uso de celda de carga en su punta, proporciona datos fiables y seguros, donde su beneficio se ve retribuido eliminar las suposiciones de carga ejercida en la punta.

2.5. Sistemas de reacción

Los sistemas de reacción para la ejecución de pruebas de carga estática, carga lateral o dinámica, tienen una variedad de diseños que atienden a la magnitud de la carga aplica, condiciones del sitio de construcción como el espacio disponible, pilas construidas o la compañía ejecutora.

A continuación, se mencionan los diferentes sistemas de reacción empleados para prever la reacción en los distintos tipos de pruebas.

2.5.1. Sistema con peso muerto

Los sistemas de peso muerto que utilizan para general la reacción en pruebas de carga estática a compresión, son una alternativa cuando no es posible instalar pilas o pilotes de reacción. Para llevar a cabo el sistema de peso muerto se coloca una plataforma estable sobre el cabezal de la pila o pilote de prueba, donde se coloca peso muerto en forma geométrica y equilibrada (figura 23).

Los elementos utilizados como peso muerte pueden variar dependiendo del espacio y maquinaria; pueden bloques de concreto, vigas metálicas o cualquier otro material que permita estabilizarse sobre la plataforma hasta acumular un peso de al menos 110% a 120% de la carga de prueba por aplicarse en la pila.



Figura 23.- Sistema de reacción con peso muerto (Handley & Bullivant, 2006; M.J. Tomlinson, 1994)

2.6.1. Marco estructural

Los sistemas de reacción mediante el uso de marco estructural y gatos hidráulicos permiten aplicar mayor magnitud de cargas que el sistema de con pesos muertos. El marco estructural se conforma por vigas, de acero o de concreto, los cuales se anclan al terreno circundante mediante pilas, pilotes o anclas (figura 24).

Cuando se requiere aumentar la capacidad del sistema de reacción, se opta por aumentar el número de elementos de reacción, ya sean pilas o pilotes. Los pilotes o pilas de reacción se aumentan por pares, procurando arreglos simétricos respecto al centro de la pila o pilote de prueba, esto con el fin de evitar excentricidades y sobre esfuerzo de los elementos de reacción (figura 25).

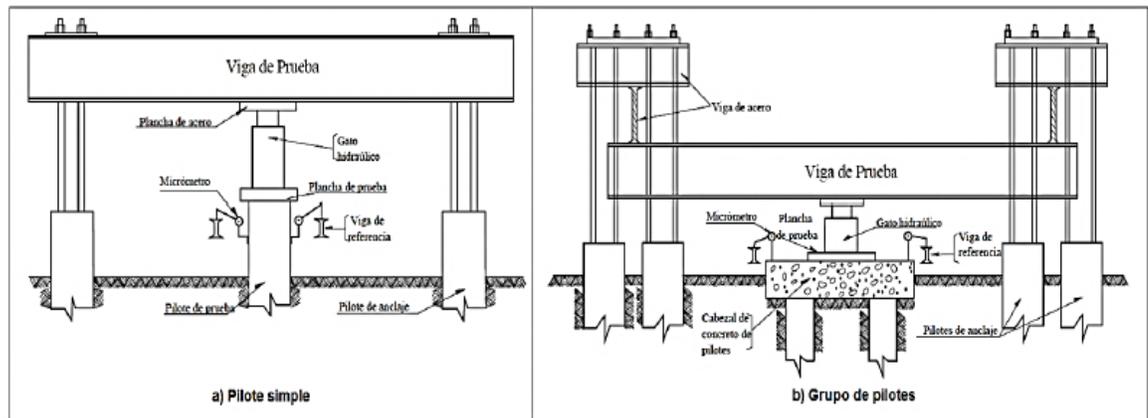


Figura 24.- Sistema de marco de reacción para pilotes de anclaje (Alva Hurtado & Fic, 1993)

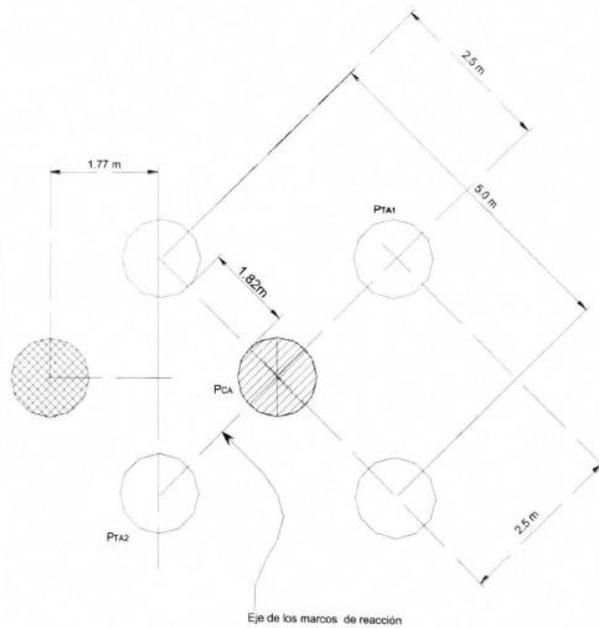


Figura 25.- Arreglo del marco de carga utilizado en la prueba de carga en el Distribuidor Vial de San Antonio (M. Mendoza, n.d.)

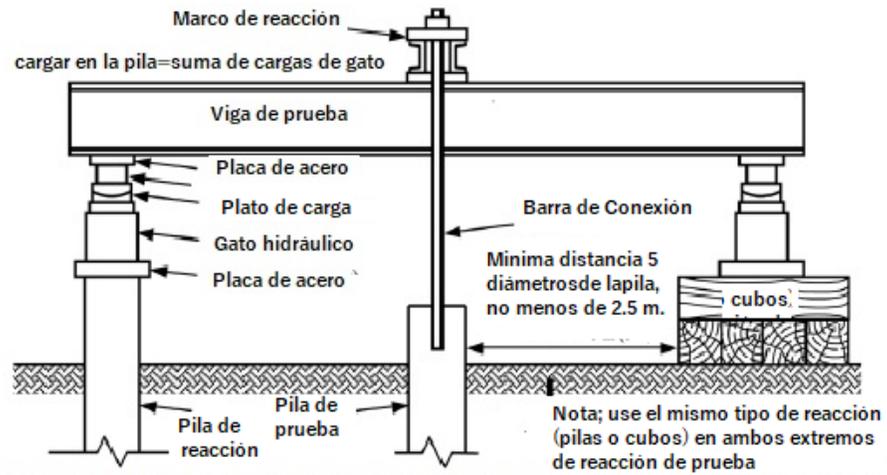


Figura 26.-Prueba típica de carga de extracción usando gatos hidráulicos que actúan hacia arriba en ambos extremos de la prueba (ASTM D 3689, 2014)

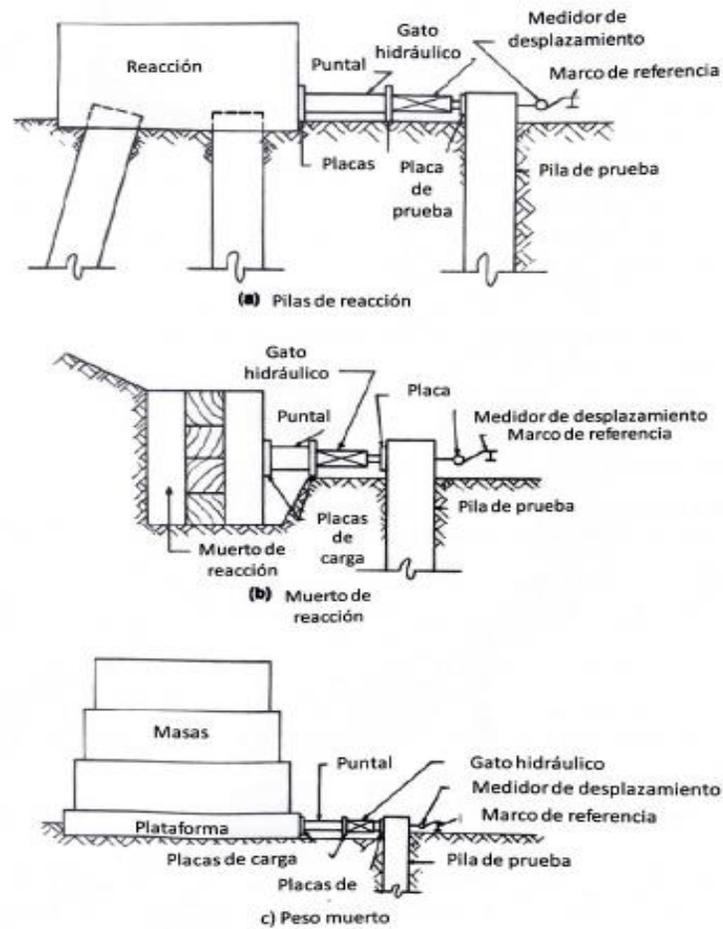


Figura 27.-Configuraciones para la aplicación de carga lateral con gato hidráulico (ASTM D3966, 2010)

Capítulo 3. Diseño geotécnico de cimentaciones profundas

3.1. Cimentaciones profundas

Cuando la superficie del suelo muestra poca capacidad de carga y la compresibilidad del suelo es alta para las cargas impuestas por la estructura, las cimentaciones superficiales que son apoyadas directamente sobre el suelo de desplante no cumplen con las cargas impuestas, los ingenieros geotécnicos deben investigar estratos más profundos que pueden soportar grandes cargas, con desplazamientos tolerables. Las cimentaciones profundas se caracterizan por transferir sus cargas a estratos de suelos resistentes y competentes, localizados a gran profundidad. Con base al diseño de la cimentación las cargas son llevadas directamente a los estratos resistentes empleando pilas o pilotes de punta para la descarga. Alternativamente, se utilizan cimentaciones mixtas, empleando cajones como medio para compensación agregando pilas o pilotes (punta y/o fricción).

En la figura 28 se muestran algunos tipos de cimentación que se emplean en la Ciudad de México dependiendo la magnitud de las cargas, del tipo y dimensiones de la superestructura, espesor resistencia y deformabilidad de los suelos sobre los que se apoya la cimentación profunda.

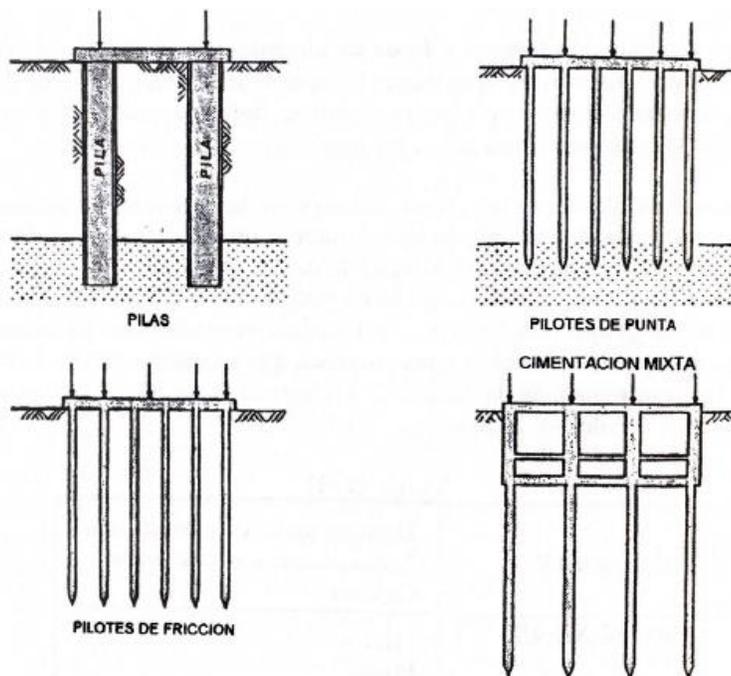


Figura 28.- Tipos de cimentación comúnmente empleados(Tamez Gonzáles, 2017)

Las cimentaciones profundas como pilas o pilotes pueden requerirse para soportar cargas de compresión y a tensión en estructuras altas, esbeltas o sujetas a momentos de volteo producto de viento o sismo. Se utilizan en estructuras marinas que están sujetas a cargas laterales producto del impacto de embarcaciones y oleaje. Cuando se utilizan en estructuras de retención, apoyos de puentes y cimentación de maquinaria, soportan combinaciones de carga vertical y horizontal (figura 29). (M. J. Mendoza, Ibarra, Rufiar, & Paniagua, 2012)

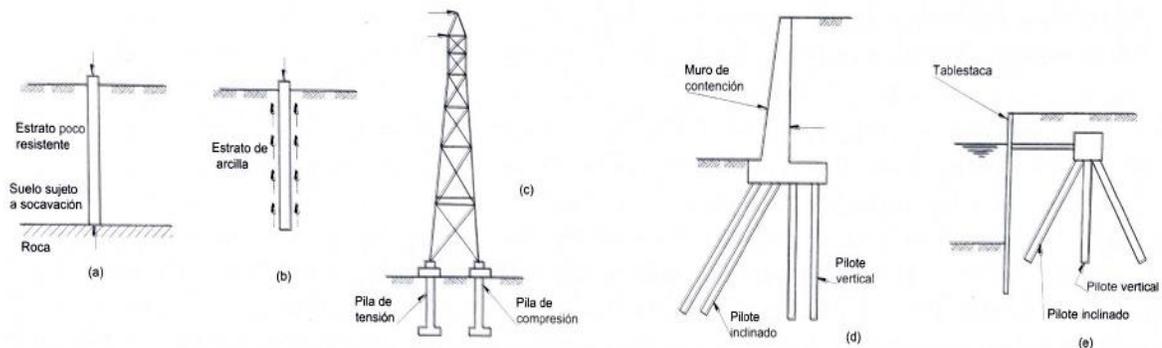


Figura 29.- Diferentes usos de cimentaciones profundas: a) punta, b) fricción, c) carga de tensión, d) cargas laterales, e) inclinados ante cargas laterales (Prakash & Sharma, 1990).

Los factores determinantes para definir el tipo de cimentación a emplear son los siguientes (Tomlinson & Woodward, 2008);

- Costumbres de construcción locales
- La ubicación y tipo de superestructura a soportar
- Las condiciones estratigráficas del subsuelo, junto con las propiedades del subsuelo
- Magnitud y distribución de cargas, incluyendo dinámicas
- Tipo, uso y condiciones de la cimentación adyacentes
- Requerimientos específicos, como asentamientos restringidos atendiendo su uso
- Durabilidad

3.1.1. Pilas

Las pilas son elementos que tienen la función de transferir carga desde la superestructura a través de estratos compresibles débiles, arena o a través del agua, en suelos más rígidos o más compactos y menos compresibles. En la actualidad los diseños pueden requerir que cargue cargas elevadas para soportar estructuras altas, sujetas a fuerzas de vuelco y

vientos. Las pilas son elementos de cimentación que se distinguen por su tamaño creciente (diámetro mayor o igual a 750 mm) y en consecuencia de su sistema constructivo que son coladas *in situ*.

Las pilas pueden ser de múltiples secciones transversales entre las más comunes son: las circulares, rectangulares, oblongas y combinadas.

Las pilas se clasifican según la manera en que se diseñan y para transferir la carga estructural del suelo:

- Las pilas rectas, se prolongan a través de los estratos superiores del suelo débil y su punta se apoya sobre un estrato de suelo o roca que tenga una gran capacidad de carga, donde las propiedades mecánicas de este tipo de pilas es que la resistencia a la carga aplicada se puede desarrollar por el soporte de su punta y a su vez por la fricción.
- Las pilas acampanadas, están constituidas de un fuste recto con una campana de fondo, la cual se apoya sobre un suelo con buena capacidad de carga. La campana puede construirse con forma de domo o inclinada.
- En el caso de las pilas inclinadas, las herramientas para ensanchar el fondo, disponibles en la industria de la construcción tienen un intervalo de 30° a 45° respecto a la vertical.



Figura 30.- Perforación en pila de 1.2 m de diámetro a 27 m (Lago Filt)

Los métodos de construcción de pilas de cimentación se pueden clasificar en tres grupos:

- a) Método seco: es la forma más sencilla y económica de ejecutar una excavación. Este método es aplicable en suelo y roca que se encuentre arriba del nivel de agua freática y que se mantenga estable en toda la longitud de perforación, durante el período de construcción de la pila. Este método se puede utilizar en arcillas de consistencia media a firme, e incluso en arenas con cierto grado de cementación o cohesión aparente.
- b) Método con ademe: los ademes son tubos metálicos de diámetro acorde al diámetro de la perforación requerida en la pila. El espesor de la pared del tubo es función de los esfuerzos que estará sometido durante su excavación, y su longitud depende de los problemas de inestabilidad particulares de cada caso. Los ademes metálicos empleados en la perforación de pilas pueden ser recuperables cuando se extraen al finalizar el colado de la pila, o bien perderse cuando se integran a ellas.
- c) Método con lodo: los lodos proveen soporte al subsuelo debido a la presión hidrostática que ejercen hacia las paredes y el fondo de la perforación. Durante la perforación el nivel de lodo debe mantenerse siempre por arriba del nivel de aguas

freáticas encontrado en el suelo, y en ocasiones, en un nivel superior a la superficie de trabajo. Existen diversos tipos de lodos dependiendo las condiciones del suelo, como pueden ser: a) lodo espuma; b) lodo bentonítico; y c) lodo con polímeros.

En muchos casos es necesario utilizar combinaciones de los tres métodos, dependiendo de las condiciones geotécnicas, ya que algunos elementos del diseño de las pilas dependerán del método de construcción que se utilice (SMMS, 2017a).

Ventajas

- La longitud se puede adecuar fácilmente para ajustar de acuerdo con la profundidad del estrato competente.
- En condiciones favorables del subsuelo, se puede realizar ampliaciones de la cimentación.
- Las diferentes herramientas de perforación pueden romper boleos u otro tipo de obstrucciones que no pueden ser penetrados con pilotes de desplazamiento.
- El diseño estructural no está gobernado por los esfuerzos de manejo o hincado.
- Pueden realizarse con menor ruido y vibración.
- No producen desplazamientos lateral ni expansión del suelo.
- Pueden construirse bajo techo o con poca altura.
- Las longitudes pueden alcanzar hasta 130 m y diámetros de hasta 3 m, con capacidades de carga considerables.

Desventajas

- En suelos blandos o sueltos, la sección transversal es susceptible a socavaciones o caídos.
- La presión lateral del concreto fresco puede provocar mayor consumo en suelos blandos.
- Se requiere procedimientos especiales para colocar el concreto bajo agua o lodo; por ejemplo; empleo de tubería tremie.
- El concreto no puede inspeccionarse después de construir la pila; existen pruebas no destructivas para su verificación.
- No se pueden construir ampliaciones de base en suelos granulares gruesos.

- En suelos granulares gruesos se puede afectar la compacidad del estrato de apoyo debido a los procesos de perforación.
- Perforar pilas en grupo puede causar pérdida de suelo y asentamiento en estructuras colindantes.
- En pilas de hélice continua una mayor velocidad de rotación puede reducir la capacidad de carga por fricción. Una velocidad de extracción demasiado rápida puede causar un estrechamiento en la sección transversal.

3.1.2. Pilotes.

Los pilotes son elementos constructivos de tipo puntual usados para cimentación profunda en obras de construcción, los cuales permiten transmitir las cargas de la estructura hasta capas de suelo más profundas que tengan la capacidad de carga suficiente para soportarlas. Los pilotes transmiten al terreno las cargas que reciben de la estructura por medio de una combinación de rozamiento lateral, resistencia por fuste, resistencia a la penetración y por punta, donde su sección transversal y su gran esbeltez propician que su colocación mediante una piloteadora o martinete faciliten el hincado.

Los pilotes se hincan verticalmente sobre la superficie del terreno por medio de golpes, utilizando maquinas a golpe de masas o un martillo neumático. Esto permite que el pilote descienda, penetrando el terreno, hasta que se alcanza la profundidad de capas de suelos resistentes y se produzca el “rechazo” del suelo en caso de ser un pilote que trabaje por “punta”, o de llegar a la profundidad de diseño, en caso de ser un pilote que trabaje a “fricción”.

Existen diferentes materiales para la construcción de pilotes que pueden ser de madera, acero, concretos pres forzado. Se clasifican por sus materiales y sus características estructurales.

Los pilotes por sus características estructurales y funcionamiento pueden ser:

- Pilotes de carga por punta; se implementan si los registros de perforación del suelo muestran la presencia de un lecho de roca o de un material rocoso a una profundidad asequible, y se pueden extender hasta la superficie de la roca. En este caso, la capacidad última de los pilotes dependerá en su totalidad de la capacidad de carga del material subyacente, de ahí el nombre de pilotes de carga de punta.

- Pilotes de fricción; son aquellos que están totalmente sumergidos en materiales blandos, de tal manera que la resistencia emana de manera casi total, de la adherencia que se desarrolla en el fuste del pilote, aplicándose para suelos cohesivos o de la fricción entre suelo y pilote para los suelos friccionantes. Suelen ser una alternativa cuando los pilotes de punta resultan ser muy largos y costosos.

Los pilotes hincados se siguen utilizando aun con las restricciones cada vez más estrictas (SMMS, 2017a)

Ventajas

- El material que el pilote puede ser inspeccionado con fines de calidad antes del hincado.
- No está sujeto a deformaciones en su sección transversal.
- Las operaciones de construcción no se ven afectadas por el agua en el suelo
- Puede colocarse arriba del nivel del suelo, ventaja en estructuras marinas
- Puede hincarse en longitudes largas: pilotes H hasta 50 m; pilotes tubulares hasta 40 m; pilotes de concreto hasta 40 m.
- Puede diseñarse para soportar esfuerzos de tensión y momentos flexionantes altos.
- Puede re-hincarse si se ve afectado por la expansión del suelo.
- Puede soportar cargas de más de 10,000 kN, usando pilotes de acero de gran diámetro y hasta 15,000 kN con concreto en el interior
- Se pueden utilizar en longitudes pequeñas y con juntas para uso bajo techo o con poca altura.

Desventaja.

- En un diseño sin juntas, no es sencillo extender la longitud para ajustarse a variaciones del estrato resistente de apoyo.
- Se puede romper durante el hincado.
- Los pilotes de madera son difíciles de unir en tramos.
- Pueden sufrir daños no visibles que disminuye su capacidad de carga.
- Son poco eficientes económicamente si la sección transversal está gobernada por los esfuerzos debido al izaje, manejo e hincado, en vez de los esfuerzos de trabajo.
- En ciertas condiciones el ruido y la vibración pueden ser inaceptables.

- El desplazamiento lateral del suelo producto del hincado puede dañar o levantar estructuras colindantes.
- Puede ser difícil corregir desviaciones una vez comenzado el hincado.
- El hincado de pilotes H en yeso, puede causar fracturamiento del estrato de roca alrededor del pilote.
- Algunas juntas entre tramos pueden no ser adecuadas para cargas de tensión o laterales.

3.1.3. Muro Milán

El Muro Milán, diafragma o Muro Pantalla, colado en sitio (*in situ*), se puede definir como una pared tablestaca de concreto reforzado, es un ingenio constructivo que ha influenciado notablemente en la construcción de estructuras alojadas en el subsuelo, sistemas subterráneos de transporte urbano, muelles sótanos y cajones de cimentación de edificios en muchas ciudades del mundo. En nuestro país se le utilizó por primera vez en la construcción del Metro de la Ciudad de México. Su función principal es la de servir como elementos de sostenimiento temporal o definitivo de zanjas longitudinales abiertas en la masa de suelo y también se ha empleado extensamente para estabilizar excavaciones profundas para la construcción de cimentaciones.

En el diseño de un Muro Milán es fundamental conocer la respuesta del suelo ante los cambios provocados por la excavación, ya que ésta origina un alivio de los esfuerzos por la remoción de suelo y agua, cuyo resultado es el movimiento de la masa de suelo por lo que el diseño se debe concentrar en el control y mitigación de las deformaciones inducidas. El control de estos movimientos es importante ya que su magnitud puede dañar a estructuras adyacentes o a los servicios públicos (figura 31).

CIMESA perfora estos muros con equipos hidráulicos guiados y auto corregibles, equipados con inclinómetros que permiten conocer y corregir las desviaciones de la perforación manteniendo la verticalidad durante la perforación.

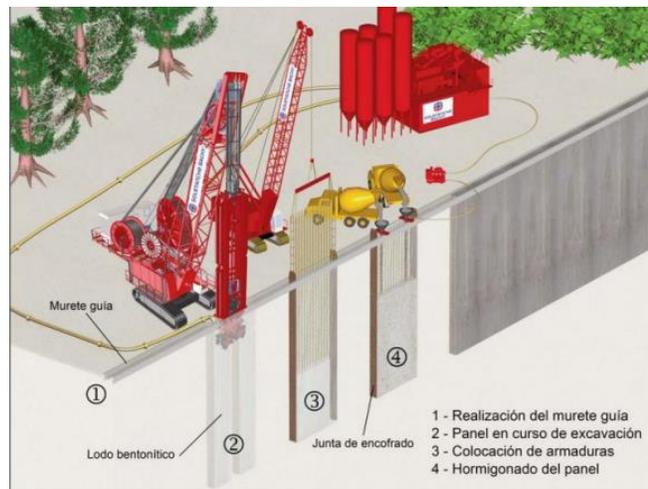


Figura 31.-Esquema resumen del Proceso de construcción del Muro Milán (CIMESA)

CIMESA, Para llevar a cabo la construcción del muro en la primera etapa realiza un brocal, el cual se conforma de por dos muros alineados paralelamente de concreto con la función de;

- Realizar el Muro Milán definiendo el trazado del muro con precisión.
- Guiar la herramienta de perforación automatizada.
- Asegurar una reserva de lodo de perforación.
- Se asegura la estabilidad de la trinchera durante los trabajos, la perforación se realiza a través de paneles de longitud limitada.
- Se procede a efectuar la excavación de un panel, después se coloca el armado en la perforación llena de lodo.
- Se vierte el concreto en la en la perforación con ayuda de tubería tremie.

La variedad de sus aplicaciones cada día es mayor y la calidad que se le puede dar también ha mejorado, incremento su empleo como muros estructurales definitivos tanto en cajones de cimentación o para cajones en metros subterráneos, en cimentación de edificios, en simples muros de contención y muros de protección contra inundaciones.

3.2. Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México (RCCD)

En las modificaciones a las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones (NTCDCC) del Reglamento de Construcciones de la

Ciudad de México (GOCM, 2017), se propone el cálculo para estimar la capacidad de carga de pilas o pilotes de manera siguiente:

Capacidad de carga

- Para pilas o pilotes interiores

La magnitud de la carga por fricción negativa deberá estimarse por tanteos, variando la profundidad del nivel neutro (z_0), hasta que se cumpla:

$$\frac{\Sigma Q}{N_p} + FN = FP + C_p \quad 3 - 1$$

Donde:

ΣQ : Las acciones permanentes más acciones variables con intensidad media

N_p : Número de pilotes o pilas

$FP = C_f|_{z_0}^{Df+Lp}$: es la fricción positiva igual a la capacidad de carga por adherencia lateral (C_f), desde el nivel neutro (z_0) hasta la profundidad de la punta del pilote o pila ($Df+Lp$), considerando un factor de resistencia unitario,

C_p : La capacidad de carga por punta considerando un factor de resistencia unitario,

L_p : Longitud del pilote o pila,

N_p : Profundidad de desplante de la zapata, losa o el cajón de cimentación, y

FN : Fricción negativa, igual a:

$$FN = \min \left\{ \begin{array}{l} C_f|_{Df}^{z_0} \\ \Delta\sigma_{z_0}A_T \end{array} \right. \quad 3 - 2$$

Donde:

$C_f|_{Df}^{z_0}$ = Capacidad de carga por adherencia lateral (C_f) desde la profundidad de desplante (Df) hasta el nivel neutro (z_0), considerando un factor de resistencia unitario,

$\Delta\sigma_{z_0}$ = Incremento del esfuerzo efectivo a la profundidad (z_0), sin considerar la presencia de los pilotes o pilas, generado por el abatimiento de la presión de poro en el futuro que se considere más probable o una sobrecarga en el terreno circundante,

A_T = Área trinitaria entre pilas y pilotes

En la figura 32 se explica cómo se considera el incremento del esfuerzo efectivo a la profundidad del nivel neutro. La consideración del valor mínimo de la fricción negativa que los pilotes interiores no alcanza en condiciones límite.

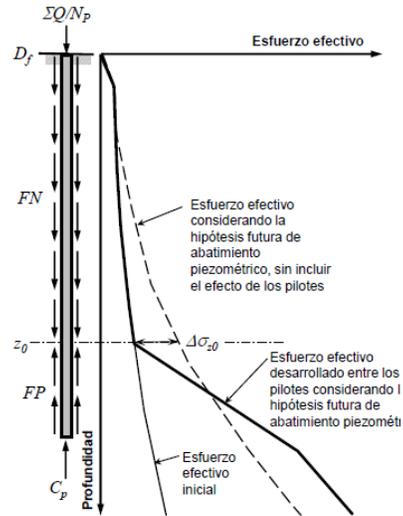


Figura 32.-Consideraciones para la estimación de la fricción negativa (GOCM, 2017) (Auvinet, Méndez, & Juárez, 2017).

- Para pilotes o pilas de borde y esquina

Para el caso de pilas o pilotes perimetrales que no alcanzan a apoyar su punta en un estrato resistente, la fricción negativa podrá estimarse con el criterio establecido anteriormente, considerando $FN=Cf|Dfz_0$.

Para el cálculo de la capacidad de carga por adherencia lateral puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$C_f = P_p F_R \sum_{i=1}^m \alpha_i c_{ui} L_i \quad 3 - 3$$

Donde;

P_p : Perímetro de la pila,

F_R : Factor de reducción con valor igual a uno,

m : número de estratos cohesivos a lo largo del fuste del pilote o pila;

C_{ui} : La cohesión media aparente determinada en ensaye triaxial no-consolidado no-drenado del estrato i ,

L_i : Longitud del pilote correspondiente al estrato i , y
 α : Coeficiente de adherencia lateral elemento-suelo del estrato i

El factor α se obtiene como:

$$\alpha_i = 0.5 \sqrt{\frac{\bar{P}_{vi}}{c_{ui}}} \quad 3 - 4$$

Donde:

\bar{P}_{vi} = Presión vertical debida al peso del suelo a la profundidad media del estrato i .
Los valores mínimos y máximos de α_i serán de 0.3 y 1 respectivamente

La capacidad de carga por fricción lateral, C_f , para suelos friccionantes, se calculará como:

$$C_f = P_p F_R \sum_{i=1}^m \bar{p}_{vi} B_{ui} L_i \quad 3 - 5$$

Donde;

F_R : Factor de reducción con valor igual a 0.65,
 m : número de estratos friccionantes a lo largo del fuste de pilote o pila;
 β_i : es el coeficiente de fricción elemento-suelo en el estrato i , que se estimará como:

$$\beta_i = 1.5 - 0.24\sqrt{Z_i}; 0.25 \leq \beta \leq 1.2 \quad 3 - 6$$

Donde:

Z_i = es la profundidad media del estrato i

La capacidad de carga por punta (C_p) para suelos cohesivos de cada pilote o pila se calculará por medio de la siguiente ecuación

$$C_p = (c_u N_c * F_R + P_v) A_p \quad 3 - 5$$

Donde:

A_p : es el área transversal de la base de la pila o del pilote,
 P_v : es la presión vertical total debida al peso del suelo a la profundidad de desplante de los pilotes o pilas,
 F_R : se tomará igual a 0.65,
 c_u : es la cohesión aparente del suelo de apoyo determinada en ensaye triaxial no-consolidado no-drenado (UU)
 N_c^* : es el coeficiente de capacidad de carga definido por:

Tabla 5.-Coeficiente N_c^*

ϕ_u	0°	5°	10°
N_c^*	7	9	13

La capacidad de carga de un pilote o pila, C_p , apoyado en un estrato friccionante, se calculará de preferencia a partir de los resultados de pruebas de campo calibradas mediante pruebas de carga realizadas sobre los propios pilotes o pilas (método D).

$$C_p = (\bar{p}_v N_q * F_R + P_v) A_p \quad 3 - 6$$

P_v : es la presión vertical efectiva debida al peso del suelo a la profundidad de desplante de los pilotes o pilas

N_q^* es el coeficiente de capacidad de carga definido por:

$$N_q * = N_{min} + L_e \frac{N_{máx} - N_{min}}{4B \tan(45^\circ + \frac{\theta}{2})} \quad 3 - 7$$

Cuando $L_e/B < 4 \tan(45^\circ + \theta/2)$; o bien

$$N_q * = N_{máx} \quad 3 - 8$$

Cuando $L_e/B > 4 \tan(45^\circ + \theta/2)$; o bien

Tabla 6.-Valor de $N_{máx}$ y $N_{mín}$ para el cálculo de N_q^*

ϕ	20°	25°	30°	35°	40°	45°
$N_{máx}$	12.5	26	55	132	350	1000
$N_{mín}$	7	11.5	20	39	78	130

L_e es la longitud del pilote o pila empotrada en el estrato friccionante;

B es el ancho o diámetro equivalente de los pilotes o pilas;

θ es el ángulo de fricción interna,

F_r se tomará igual a 0.35

3.3. Capacidad de carga en pilas

El tiempo transcurrido entre la construcción de la pila de prueba y el inicio de la prueba de carga es un factor que debe considerarse en la planeación. A lo largo de la historia los

distintos autores han tenido distintas interpretaciones sobre la capacidad de carga, donde la experiencia en pruebas de carga- desplazamiento juega un papel importante en la idónea interpretación de resultados.

(Hirany y Kulhawy, 1989) describen cinco tipos de curvas observadas en diversas experiencias de pruebas de carga. En las curvas del tipo A, B Y D se pueden identificar de forma visual la carga última alcanzada en la prueba de carga. En curvas con morfología del tipo C Y E, donde se observa una tendencia creciente con el desplazamiento que no tiende a un límite, haciendo difícil establecer de forma visual cual es la carga ultima total, los diferentes autores extrapolan la carga última (figura 33).

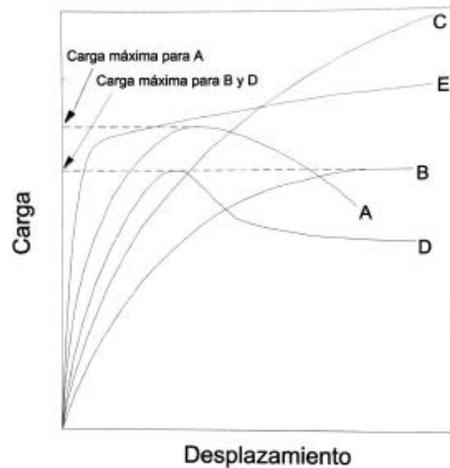


Figura 33.-Formas típicas de curvas carga-desplazamiento (Hirany y Kulhawy, 1989).

Método meyerhof

(Meyerhof, 1951) Para pilas o pilotes individuales cargados axialmente, la capacidad de carga general es la siguiente

$$Q = (c_u N'_c + \gamma DN'_q) + A_p + f_s A_s \quad 3 - 9$$

Donde:

A_p = Área de la sección transversal de la base

A_s : Área superficial del eje

F_s : Fricción del fuste

Los factores de capacidad de carga semiempíricos (Meyerhof, 1953) N'_c y N'_q para pilotes hincados cónicos se muestran en la figura siguiente. Estos factores se aplican solo si la base del pilote esta embebida en el estrato que soporta la carga cerca de la base, al menos hasta una profundidad que es aproximadamente

$$D = \sqrt{N'_q B}$$

3 – 10

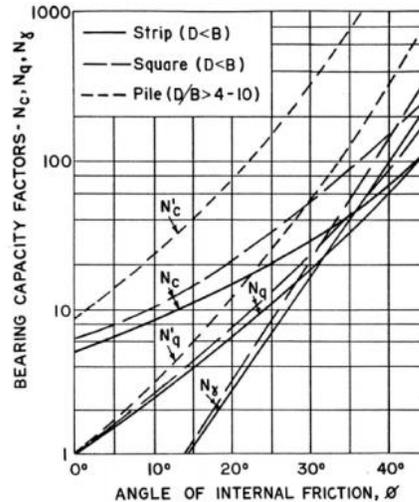


Figura 34.-Factores de capacidad de carga para cimentaciones superficiales y profundas (Meyerhof, 1963)

Método de Zeevaert

De acuerdo con la teoría del Dr. Zeevaert sobre la capacidad de carga por punta, un pilote individual se muestra en la figura 35, donde solo se medirá la resistencia por punta separar la acción de la capacidad de la fricción del fuste.

La geometría de la superficie de deslizamiento para una masa de suelo isotrópica puede ser asumida como se muestra en la figura interior, es decir una espiral logarítmica que inicia bajo la cimentación y termina con una tangente vertical. Las condiciones de equilibrio límite plásticas pueden obtenerse bajo la suposición conservadora de que a masa del suelo es la espiral logarítmica no tiene peso.

Para el caso de cimentaciones profundas, establecer reglas de diseño para obtener resultados precisos, que dependen de gran medida de las propiedades mecánicas locales y de la estratigrafía de los materiales del subsuelo, ya que en la naturaleza el comportamiento y las propiedades mecánicas del subsuelo asumen diferentes valores.

Para conocer si el comportamiento de una pila o pilote desarrollara resistencia por punta y fricción positiva o negativa a lo largo del fuste, es necesario saber si uno de estos comportamientos estará presente en el área del pilote.

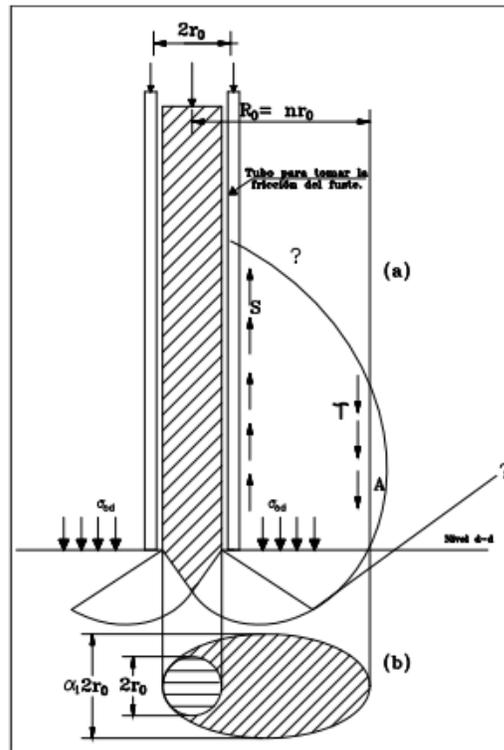


Figura 35.- Superficie potencial de deslizamiento (Zeevaert, 1972)

$$Q_P = \pi r_0^2 \alpha_1 [cN_c + \sigma_{0d} N_q] (D_r + 0.1)$$

3-11

Donde:

Q_p : Capacidad de carga por punta

C : Cohesión

N_{0d} : Esfuerzo vertical efectivo en la elevación del plano horizontal d-d.

N_c y N_q : Factores de carga

D_r : Densidad relativa

α_r : Factor de forma que depende del ancho de la superficie de falla.

r_o : Radio del pilote

Los parámetros teóricos N_c y N_q están en función del ángulo de fricción interna y longitud de la superficie de deslizamiento.

Método de Burland β

Todos los métodos analíticos en términos de esfuerzos efectivos para determinar la capacidad de carga por fuste en pilotes, se basa en la determinación de la resistencia cortante unitaria de la interface pilote-suelo (f_s).

El método β , fue sugerido por (Burland, 1973) para el cálculo de la resistencia en el fuste, usando el principio de esfuerzo efectivos. Este principio es muy claro, el suelo se puede visualizar como un esqueleto compresible de partículas sólidas que encierran vacíos, en el caso de suelos saturados se llenan de agua. El esfuerzo cortante solo puede ser llevado por el esqueleto. Sin embargo, el esfuerzo normal total en cualquier plano es la suma de dos componentes: la presión en el agua u y el esfuerzo transportado por las partículas sólidas se le denominan el esfuerzo efectivo la resistencia al corte de los suelos está determinada en gran medida por las fuerzas de fricción que surgen durante el deslizamiento en el contacto entre las partículas del suelo. El método hace las siguientes suposiciones:

- 1.- El remoldeo del suelo adyacente al pilote reduce los esfuerzos efectivos, la cohesión interceptada en el círculo de Mohr es cero.
- 2.- El esfuerzo que actúa sobre la superficie del pilote después de la disipación del exceso de presión de poro, generado por el deslizamiento del volumen es al menos igual al esfuerzo efectivo horizontal (K_o) antes de la instalación del pilote o pila.
- 3.- La mayor distorsión del cortante durante la carga del pilote se limita a una zona relativamente delgada alrededor del eje del pilote y el drenaje de esta delgada zona se produce rápidamente, durante la carga tiene lugar bajo condiciones de drenaje.

Por lo tanto, la fricción del eje en cualquier punto está dado por:

$$\tau = \tau_h^1 \tan \delta$$

3 – 12

Donde:

τ_h^1 Es el esfuerzo efectivo horizontal que actúa en el pilote

Es el ángulo de fricción efectivo entre la arcilla y el eje del pilote.4.- La suposición simplificada adicional se hace que τ_h^1 es proporcional a la presión de sobre carga efectiva vertical

$$\tau_h^1 = k * p \quad 3 - 13$$

Donde:

$$p = (\gamma_s * d - \gamma_w * h)$$

Por lo tanto, la ecuación se convierte:

$$\tau_s = k * p \tan \delta \quad 3 - 14$$

La cantidad de $k * p$ puede ser indicada por β

$$\beta = \frac{\tau_s}{p} = K * \tan \delta \quad 3 - 15$$

La diferencia importante es que β se relaciona con los parámetros de esfuerzos efectivos fundamentales K y δ . La mitad del coeficiente de presión en reposo K depende del tipo de suelo, el historial de esfuerzos del suelo y el método de instalación. El valor de δ depende del tipo de suelo y de las propiedades de la superficie del pilote.

3.2.1. Antecedentes de soluciones teóricas de capacidad de carga en pilas

La interpretación de pruebas de carga, se han propuesto distintos “criterio de falla” o distintos métodos para estimar la carga última. Los criterios, están basados en distintas pruebas realizadas en pilas y pilotes, de una variedad de tipos y tamaños. La mayoría de los criterios se han basado en distintos métodos, ya sea en pruebas de carga axial, a extracción o carga lateral. Conocer la carga en la punta y en el cuerpo de la pila son valores fundamentales.

Brinch Hansen (1963) describió dos métodos para interpretar la carga última. El "criterio del 90%" define la falla de los suelos como el esfuerzo para el cual la deformación última es el

doble de la deformación unitaria correspondiente al 90% del esfuerzo máximo aplicado. El "criterio del 80%" define la falla como el esfuerzo en cual la deformación es igual a cuatro veces la deformación correspondiente al 80% del esfuerzo máximo aplicado. Los criterios asumen relaciones hiperbólicas en la curva esfuerzo-deformación unitario.

Los métodos de Brinch Hansen no fueron formulados para ser aplicados en pruebas de carga de cimientos profundos, si no para la relación esfuerzo-deformación unitaria de los suelos de manera general. Sin embargo, el criterio del 90% se ha generalizado como un criterio de falla en la prueba de carga de pilotes (Fellenius 1990). Brinch Hansen (1963) sugirió la definición de falla utilizando el criterio del 80% para ser útil para la práctica.

De Beer (1967) describió un método para pruebas lentas e interpretó la carga de falla como la carga en la intersección de dos líneas rectas, que se grafican en la relación carga-desplazamiento en una escala logarítmica doble. Este método es de interpretación de la carga última a partir de los datos registrados en la prueba (figura 36).

Consiste en siguientes pasos:

- (a) Trazar carga y desplazamiento en escalas logarítmicas.
- (b) Estos valores caen en dos líneas rectas.
- (c) La carga de falla se define entonces como la carga que cae en la intersección

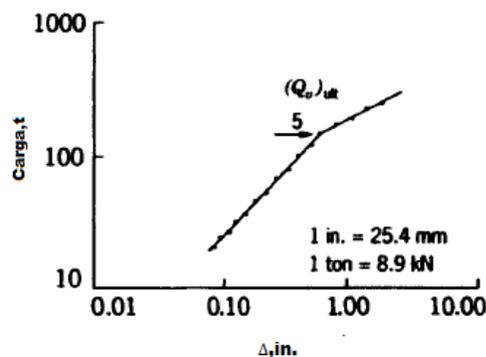


Figura 36.-Carga última obtenida con el criterio De Beer (1967).

(Chin, 1970), propuso un método para encontrar la carga de falla, que involucra la movilización de la capacidad de carga última, es decir, es un método de extrapolación para pruebas donde no se alcanzó la falla de forma evidente. Similar al criterio de Brinch Hasen

(1963), el método de Chin supone que, cuando la carga aplicada se aproxima a la carga de falla, la curva carga-desplazamiento presenta una forma hiperbólica. Chin (1970), realizó una serie de pruebas de laboratorio en modelos de pilas de acero de 1.94 in (49) de diámetro y tres pruebas de campo en pilotes de concreto reforzado de 14 in (356 mm) de diámetro para verificar su método; todos los incrementos de carga fueron aplicados en intervalos constantes de tiempo. Este método es ampliamente usado como método de extrapolación de resultados de pruebas de carga en pilas y pilotes y es aplicable para pruebas rápidas o lentas, considerando incrementos de tiempo constantes.

Este método de interpretación de la carga máxima es aplicable para las pruebas de QM y SM, siempre que se usen incrementos de tiempo constantes durante la prueba. Al seleccionar la línea recta desde los puntos, se debe entender que los puntos de datos no parecen caer en la línea recta hasta que la carga de prueba haya pasado el valor límite de Davisson. Este método puede no proporcionar un valor de falla realista para las pruebas llevadas a cabo según el Método estándar de ASTM porque puede no tener incrementos de carga de tiempo constantes

Weltman (1980), sugirió que se usara un desplazamiento en la cabeza del 10% del diámetro del pilote para determinar la carga de falla. Para pilas en suelos granulares, Weltman sugiere que puede no existir una carga final única, ya que la resistencia de la pila puede aumentar con la penetración a movimientos más grandes de lo que se lograría en las pruebas en la práctica. Sin embargo, todavía se recomienda el 10% del diámetro de la pila sobre la base de que es el movimiento mínimo que podría asociarse con la falla del suelo en la punta de la pila.

O'Neill y Reese (1999) definieron la falla en pilas, ya sea por falla de hundimiento o por un asentamiento bruto del 5% del diámetro de la pila si no se puede lograr el hundimiento en la prueba de carga. Este criterio se basa en la experiencia adquirida y el método de construcción utilizado en los Estados Unidos y no se utiliza normalmente para pilas largas.

Davisson (1972) desarrolló un criterio de falla utilizando los resultados de las pruebas de carga en pilotes conducidos de 12 in (300 mm) de diámetro, en conjunto con análisis de ecuaciones de onda y mediciones de parámetros dinámicos. Dicho método fue diseñado para usarse con la prueba de carga rápida. La carga de falla se define como la carga correspondiente a un desplazamiento en el cual excede el comportamiento elástico de la

pila para un valor de 0.15 in (2.5. mm), se define como el desplazamiento requerido para causar la fluencia del suelo cercano en la punta de la pila. Davisson sugiere que es igual a alrededor de 0.1 in (2.5 mm), para pilas de 12 in (300 mm) de diámetro. El criterio está dado por la siguiente ecuación:

$$\Delta_M = \frac{PL}{AE} + Q_{tip} + 0.15 \quad 3 - 16$$

Donde

P = carga aplicada

L = longitud de pila

A = área de pila

E = módulo elástico del eje del pilote.

Una ventaja es que la interpretación de la carga de falla no es subjetiva, ya que requiere solo un cálculo matemático simple y no requiere una interpretación gráfica de la relación carga-movimiento. El método se puede incluir en las especificaciones del contrato para que el ingeniero pueda determinar de antemano el movimiento máximo permitido para una carga teniendo en cuenta la longitud y el tamaño de una pila (figura 37).

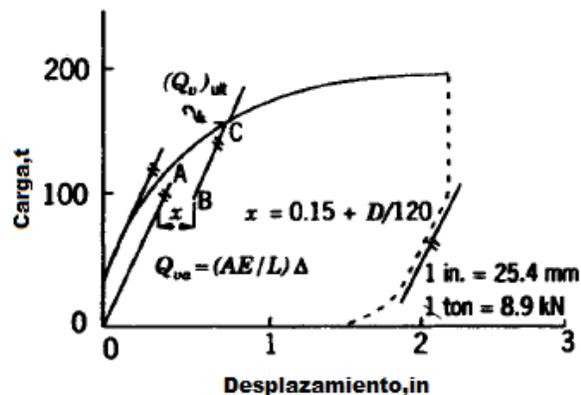


Figura 37.-Carga ultima con criterio de Davisson (1972)

Hirany y Kulhawy (1989), sugirieron el uso de una interpretación de la carga de falla o carga última para pilas coladas *in situ*, la cual corresponde a la “falla limite”. Está definida como el punto en el cual la curva carga-desplazamiento se vuelve nuevamente lineal, después de una región inicial lineal seguida de una curva denominada región de “transición”. Estudiando un número de pruebas de carga en pilas coladas *in situ* entre 0.4 m y 1.1 m de diámetro y

longitudes menores que 17 m, Hirany y Kulhawy (1989), encontraron que la falla límite generalmente ocurre cuando el desplazamiento de la cabeza de la pila es de 4% el diámetro de la misma y método de interpretación es un criterio de desplazamiento límite y no puede aplicarse como un método de extrapolación.

3.2.2. Predicciones teóricas del comportamiento para la prueba de carga

La predicción teórica del comportamiento es fundamental para diseñar un buen programa de pruebas, así como el diseño estructural de los elementos de reacción y del marco de carga, ya que, el conocimiento de la capacidad de carga puede llevar a sobre diseñar o a sobre esforzar los elementos de reacción, como las viga, placas, conexión y pilas de reacción.

Estos métodos buscan reproducir las condiciones del suelo mediante operaciones matemáticas. El suelo, como un medio, es representado por medio de elementos compuestos por nodos. Cada uno de los nodos está representado por las diferentes propiedades de resistencia y deformación del suelo. El objetivo es que a partir de la solución del sistema de ecuaciones matriciales, se encuentren las diferentes incógnitas como: esfuerzos deformaciones, desplazamientos, fuerzas y momentos.(Holko & Stacho, 2014; Zuiavska, Zahoruiko, & Lozovyi, 2014)

Existen diversas herramientas de cálculo computacional de gran utilidad para evaluar el comportamiento carga-desplazamiento de una pila o pilote. Con las técnicas numéricas se puede realizar simulaciones de la prueba de carga, donde se puede obtener la curva carga desplazamiento en la cabeza, con base a esa predicción se puede diseñar el programa de pruebas de manera racional, definiendo el procedimiento de aplicación de la carga máxima, la magnitud de los incrementos de carga, intervalos, desplazamientos inducidos, entre otros aspectos (figura 38).

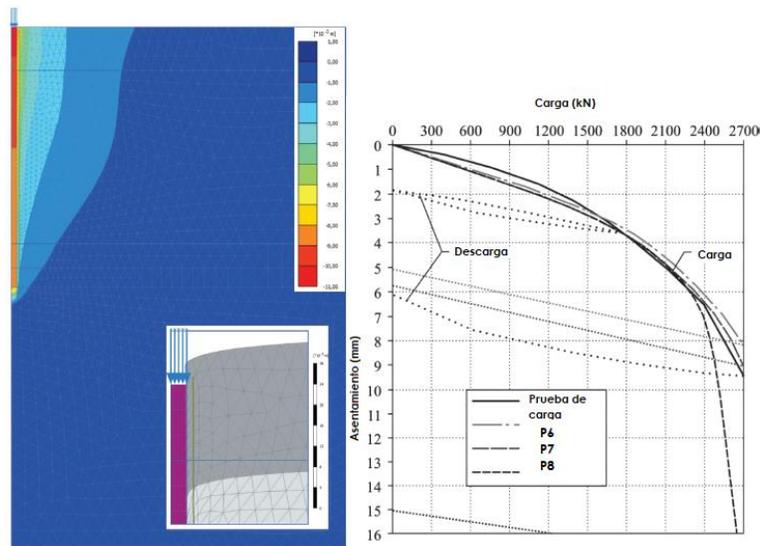


Figura 38.-Modelo numérico para la determinación carga-desplazamiento bajo carga de 2700 kN (Holko & Stacho, 2014)

Los métodos numéricos utilizados para la modelación de diseños geotécnicos pueden ser los siguientes:

- Método de diferencias finitas (MDF)
- Método de elementos finitos (MEF)
- Método de elemento frontera (MEFr)
- Método de elementos discretos (MED)

El empleo programas informáticos para el diseño de cimentaciones profundas, se debe calibrar posteriormente con los resultados de la prueba de carga, a fin de extrapolar los resultados de campo, ya sea para conocer el comportamiento de cimientos de mayores dimensiones o para valorar el trabajo de grupo de pilas, poniendo especial cuidado y énfasis en la interpretación de las pruebas de carga, ya que los resultados de las pruebas se derivan decisiones de gran impacto para el proyecto.

El emplear herramientas eficientes y de última generación aporta sin duda alguna eficiencia y resultados confiables que ayudan a desempeñar y entender mejor el comportamiento presentado en los elementos de cimentaciones profundas. El método numérico como MEF 3D permite analizar, modelar el proceso constructivo y entender el comportamiento del subsuelo. Es una herramienta que permite analizar problemas complejos de la geotecnia,

modelación de materiales, diferentes geometrías, condiciones de frontera, sistemas constructivos (figura 39).

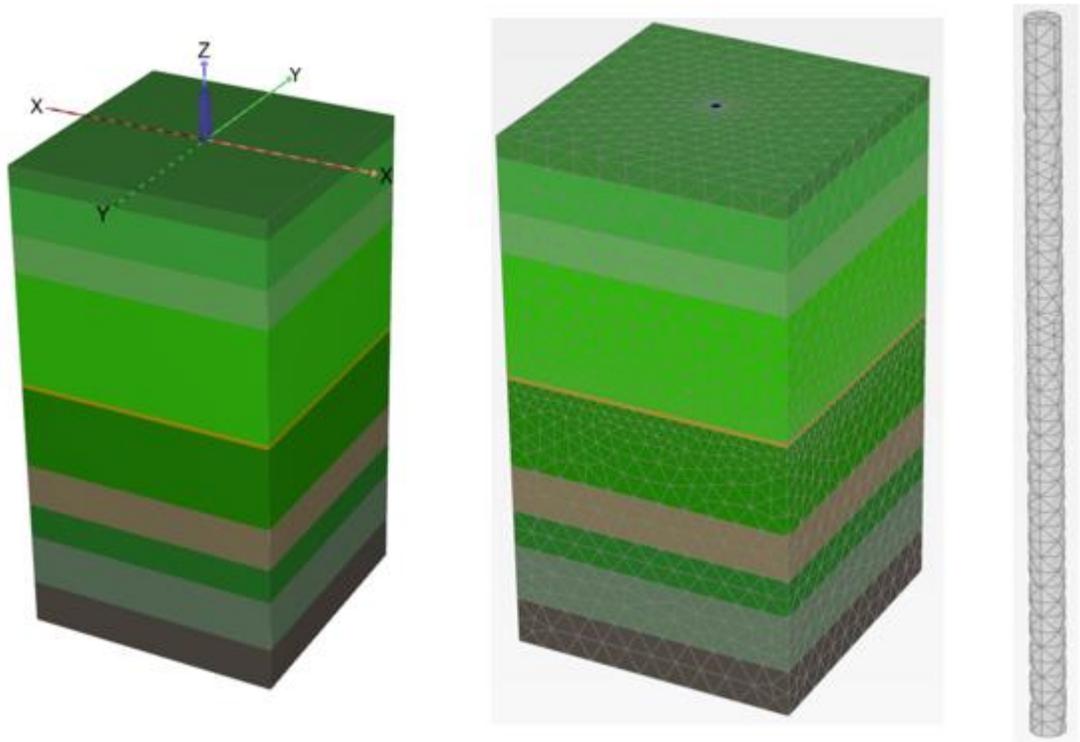


Figura 39.-Prueba de carga Modelo Elementos Finitos (MEF3D).

3.4. Comportamiento de una pila individual y un grupo de pilas

(Zeevaert, 1972) dice, Los desplazamientos verticales medidos en ensayos de pilotes individuales no pueden aplicarse en el caso de grupos de pilotes para estimar el asentamiento en conjunto, ya que las tensiones del subsuelo causadas por un solo pilote son cuantitativamente diferentes de las causadas por un grupo de pilotes o pila. El único medio para estimar el asentamiento de grupos de pilotes es, calcularlos a partir de la estratigrafía, las condiciones hidráulicas y las propiedades de compresibilidad de los materiales del suelo, así como del incremento de los esfuerzos inducidos en el subsuelo por el grupo.

La capacidad de carga de un grupo de pilas cargadas verticalmente puede en muchas situaciones ser considerablemente menor que la capacidad de una pila individual, ya que

los asentamientos elásticos y de consolidación del grupo son mayores. El resultado de la gran disminución de capacidad de carga recae en que la zona de suelo o roca debajo de un grupo de pilas es mayor el esfuerzo inducido en ancho y profundidad, a diferencia de la pila individual (figura 40).

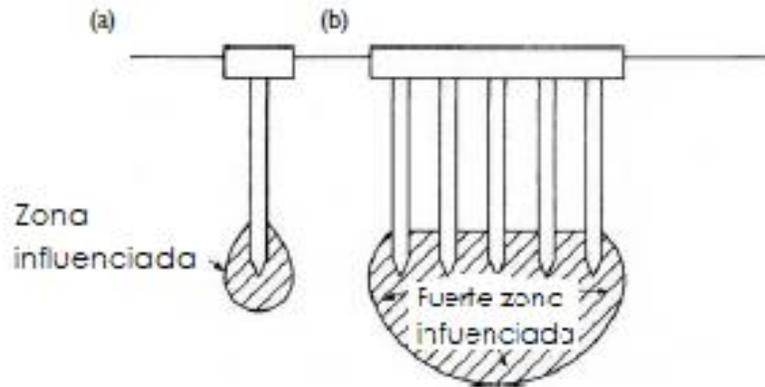


Figura 40.-Comparación de las zonas influenciadas debajo del grupo de pila y pila individual (a) Pila individual (b) Grupo de pila (Tomlinson & Woodward, 2008)

Las pruebas de carga llevadas a cabo en una sola pila han revelado en muchas ocasiones un comportamiento satisfactorio. Un caso típico de falla de la cimentación es que una pila individual se comporta satisfactoriamente en una capa de suelo compacta o rígida cubierta por arcilla blanda comprimible o suelos competentes. La última formación no se somete a un esfuerzo significativo cuando se carga la pila individual, pero cuando la carga de la superestructura se aplica a todo el grupo la zona influenciada se extiende hacia otros estratos más profundos para lo cual puede ocurrir un asentamiento excesivo o falla completa general del grupo de pilas (figura 41).

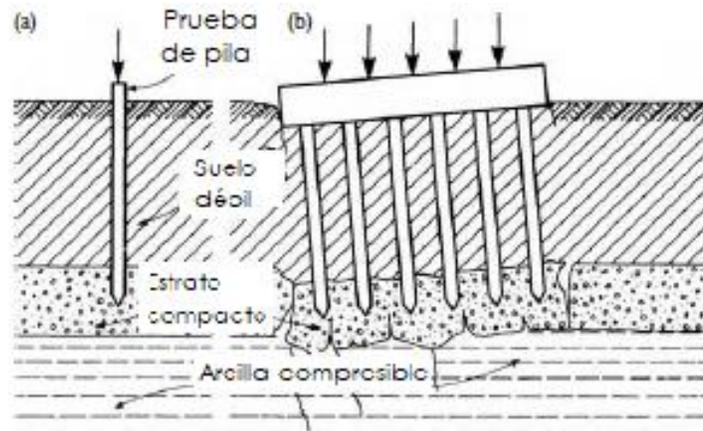


Figura 41.-Falla de cortante del grupo de pilas o pilotes, (a) prueba de carga en una pila aislada cuando la arcilla blanda no está cargada significativamente, (b) carga aplicada a un grupo de pilas cuando la arcilla blanda está muy cargada

(Taylor 1948), dice que la solución de un grupo de pilas de fricción se considera resultado de tres causas;

- Asentamiento debido a la compresión de la pila y del movimiento de la pila en relación con el suelo inmediatamente adyacente. Cuando se desarrolla la fricción total del fuste, esta solución corresponde a la observada en una prueba de carga en una sola pila.
- Asentamiento debido a la compresión que ocurre en el suelo entre las pilas.
- Asentamiento debido a la compresión que ocurre en los estratos compresibles debajo de las puntas de las pilas.

3.5. Comportamiento general carga-desplazamiento

En pruebas de carga de compresión axial en las que únicamente se registra la carga y el deslizamiento en el cabezal y no se cuenta con instrumentación en el cuerpo de la pila es posible determinar de manera muy burda el aporte de punta y del fuste, a través de la inspección de las diferentes tendencias de la gráfica carga-desplazamiento.

En la figura 42 se muestran las curvas típicas carga-desplazamiento de la punta, del fuste y del comportamiento conjunto punta y fuste (total para pilas).

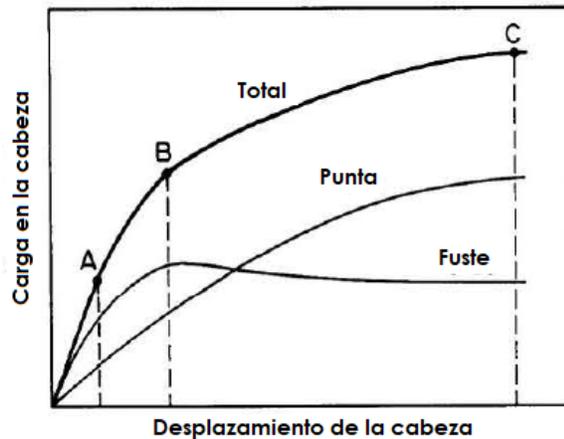


Figura 42.-Curvas carga-desplazamiento en pilas (Kulhawy, 1991)

Se observa que la resistencia del fuste sigue un comportamiento aproximadamente elástico-plástico. Con una tendencia inicial rígida hasta cierto punto, donde la rigidez decae e incluso ya no es capaz de tomar más carga. La carga máxima del aporte del fuste se alcanza para desplazamientos pequeños, generalmente de unos cuantos milímetros.

Por su parte la curva carga-desplazamiento de la punta sigue una tendencia creciente más o menos lineal hasta la movilización de su resistencia última, que requiere desplazamientos grandes que alcanzan generalmente más del 15% del diámetro o incluso en ocasiones no se llega a desarrollar estos grandes desplazamientos.

Ambos comportamientos combinados, fuste y punta, se miden en la cabeza de la pila durante las pruebas de compresión axial, de tal suerte que la capacidad por fricción última puede ubicarse de manera aproximada entre los puntos A y B de la curva carga-desplazamiento registrada en la cabeza. La diferencia entre la carga total C registrada en la prueba menos la carga última del fuste estimada corresponde a la carga movilizada en la punta.

Tamez (2003), sugiere un método gráfico simple para conocer la carga última del fuste entre los puntos A y B, el cual consiste en extender una línea recta secante a los puntos B y C de la figura del Kulhawy hasta interceptar el eje de las ordenadas, en cuyo cruce se tiene la resistencia última por fricción de manera aproximada (figura 43).

- Resistencia por punta movilizada.
- Capacidad de carga total por fuste.

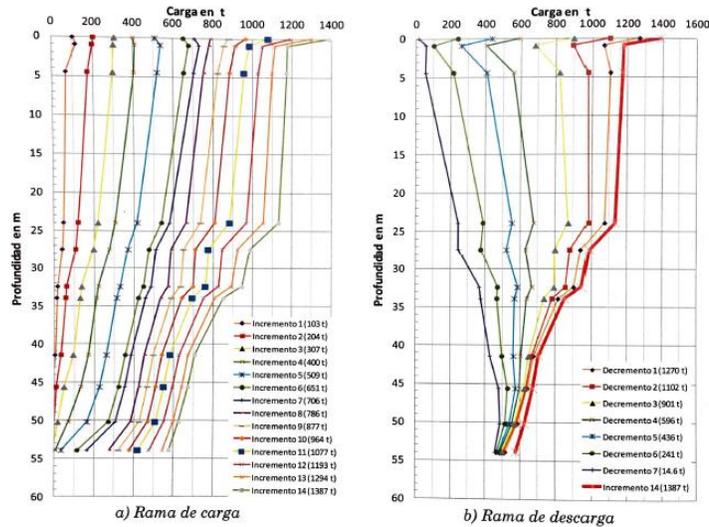


Figura 44.-Distribución de cargas verticales vs profundidad en la pila instrumentada (SMMS, 2017b)(Ibarra, Rangel, Holguín, & Flores-Eslava, 2017)

3.7. Variación de la capacidad de carga con el tiempo en pilas

Debido a que los métodos de instalación de pilas o pilotes tienen un efecto tan importante en la fricción del fuste, se espera que con el tiempo después de la instalación haya más cambios en el estado de la arcilla en la circunferencia de la pila, lo que provocará un aumento o reducción de la capacidad de carga. El efecto es bien conocido en pilotes hincados en arcillas blandas que muestran una resistencia inicial muy baja por el efecto del hincado y el remoldeo, ya que el suelo se desplaza lateralmente y en una dirección ascendente, inicialmente en una medida igual al volumen de la pila que ingresa al suelo. La arcilla cerca de la superficie de la pila se remueve extensamente y se desarrollan presiones de poro alto.

El efecto de la perforación causa un alivio de la presión lateral en las paredes de la excavación, dando como resultado en hinchamiento de la arcilla y hay una migración de agua hacia la cara de arcilla expuesta. Si la perforación atraviesa grietas llenas de agua, el agua se escurrirá por el agujero y formará un lodo con la arcilla cuando las herramientas de perforación bajen o se eleven. Si se usa bentonita para soportar los lados de la excavación, se producirá un ablandamiento de la arcilla debido al alivio de la presión lateral en las

paredes de la perforación, pero no se producirá flujo de agua por ninguna fisura. También existe el riesgo de que se atrapen bolsas de bentonita en lugares donde la operación de perforación rotativa ha provocado un sobregiro.

Los efectos en una arcilla son desplazamiento lateral y ascendente del suelo tiene lugar en una dirección radial alrededor de la pila. Si la arcilla tiene una estructura fisurada, las grietas radiales alrededor de la pila se propagan a lo largo de las fisuras a una profundidad considerable, en la punta, la arcilla se remueve extensamente y se destruye la estructura fisurada. Las altas presiones de poro desarrolladas en la zona cercana a la superficie de la pila se disipan rápidamente en el sistema de grietas circundante y las presiones negativas de poro se establecen debido a la expansión del suelo (figura 45).

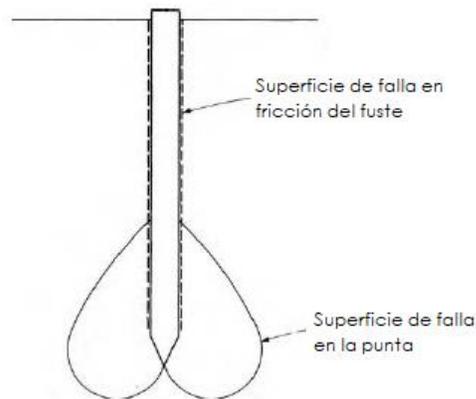


Figura 45.-Superficies de falla para la carga de compresión en pilas (Tomlinson & Woodward, 2008)

(Tomlinson & Woodward, 2008), En el caso de una arcilla blanda y sensible, la cohesión total no perturbada debe tomarse solo cuando la carga de trabajo se aplica a la pila después de que la arcilla ha tenido tiempo de recuperar su resistencia original (es decir, después de la disipación total del exceso de presión de poro). Cabe señalar que se requiere un período de hasta un año para el pleno desarrollo de la capacidad de carga en las arcillas. En términos de teoría de la mecánica del suelo, la fricción final del fuste está relacionada con la presión efectiva horizontal que actúa sobre el eje y el ángulo de fricción remoldeado efectivo entre el pilote y la arcilla (figura 46).

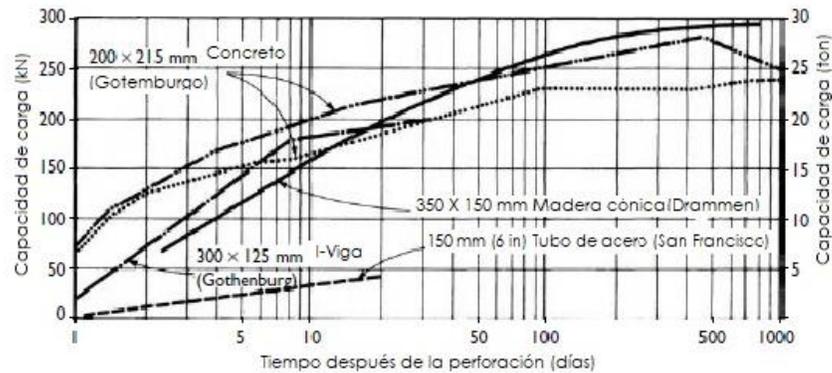


Figura 46.-Aumento de capacidad de carga con el transcurso del tiempo después de la perforación de pilas en arcillas suaves (Tomlinson & Woodward, 2008)

(Meyerhof y Murdock, 1953), dicen un aspecto importante es después de colocar el concreto en la perforación, el agua migra desde el concreto no fraguado hacia la arcilla, causando un mayor reblandecimiento del suelo. El aumento en el contenido de humedad debido a los efectos combinados de la perforación y la colocación de hormigón, midieron un aumento del 4% en el contenido de agua de arcillas de Londres. El aumento se extendió a una distancia de 76 mm de la interfaz.

Capítulo 4. Casos de pruebas de carga en pilas realizadas en la Ciudad de México

4.1. La Fragua

En este capítulo se describe la exploración y muestreo que se efectuó en el predio del proyecto: por lo tanto, las justificaciones del tipo de prueba y la selección del lugar del muestreo son puntos a abordar en dicho segmento. En consecuencia, se presenta el procedimiento de ejecución de dos pruebas de carga estática a compresión en pilas circulares instrumentadas de 1.00 m de diámetro a 70 m y 50 m de profundidad, así como resultados que son primordiales para el diseño la cimentación profunda.

4.1.1. Condiciones del sitio

El proyecto consiste en un edificio con 50 niveles y 8 sótanos de estacionamiento sobre calle La Fragua N° 13, Colonia Tabacalera, Benito Juárez, Ciudad de México (figura 47).



Figura 47.-Localización del sitio del Proyecto

La cimentación consistirá en 8 sótanos de estacionamiento para una profundidad de excavación de 28.0 m dentro de un cajón formado por un muro diafragma estructural definitivo “llamado Muro Milán” de 0.80 m de espesor. La cimentación estará formada por 42 pilas tipo “Barrettes” desplantadas a una profundidad de 70 m y 50 m por debajo del nivel calle. Dado que los sótanos se construirán por el método “Top-Down”, será necesario dejar ahogados dentro de las Barrettes perfiles metálicos que servirán como columnas para soportar las losas durante la construcción (figura 48).

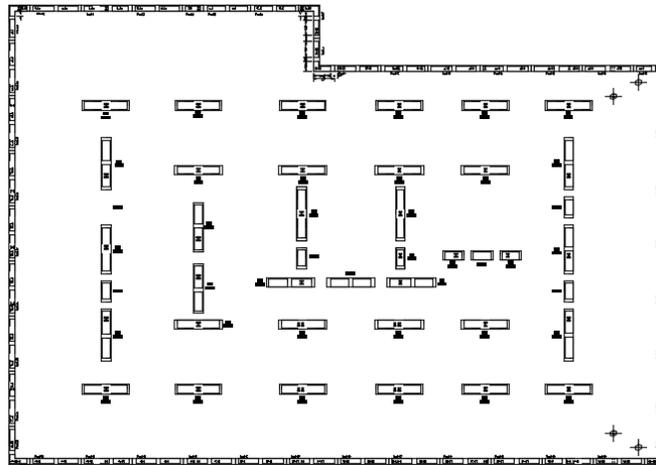


Figura 48.-Esquema Preliminar de la cimentación La Fragua (CIMESA)

Como es bien sabido, la mayor parte de la Ciudad de México se encuentra asentada en suelos lacustres, se presenta la estratigrafía típica de la zona III (Zona del Lago), integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Lugar donde se han llevado a cabo los trabajos de investigación que anteceden este trabajo (figura 49).

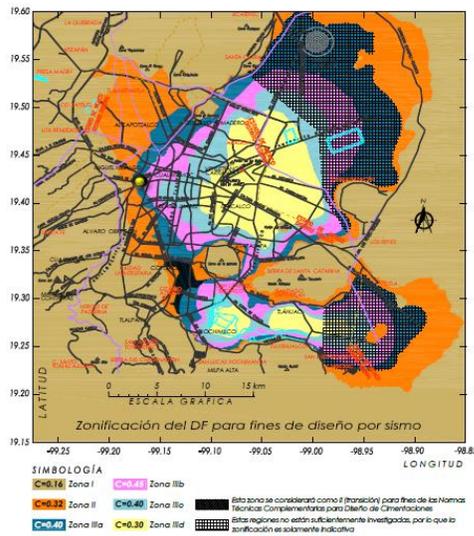


Figura 49.-Zonificación geotécnica para el Distrito Federal

Localización de Sondeos

Con el fin de definir a detalle las condiciones estratigráficas del sitio en estudio, se llevaron a cabo cuatro sondeos mixtos combinando la técnica de penetración estándar (SPT) con la de cono eléctrico (SCE) a 75.0 m de profundidad, estos con el objeto de determinar la resistencia a la penetración del suelo y recuperar muestras alteradas para la clasificación de los geomateriales que conforman el depósito de suelo en estudio (figura 50). Adicionalmente, de dos de los sondeos se recuperaron muestras inalteradas mediante tubos de pared delgada tipo Shelby, con las cuales se llevaron a cabo ensayos triaxiales y de consolidación.

Por otra parte, con el fin de determinar las condiciones hidrostáticas del sitio, se instalaron dos estaciones piezométricas conformadas cada una de ellas por tres bulbos, colocados a profundidades de 6, 13 y 20 m para la primera estación y 24, 32 y 45 m para la segunda. Así mismo, se instaló un pozo de observación a 10 m para la medición del nivel freático.

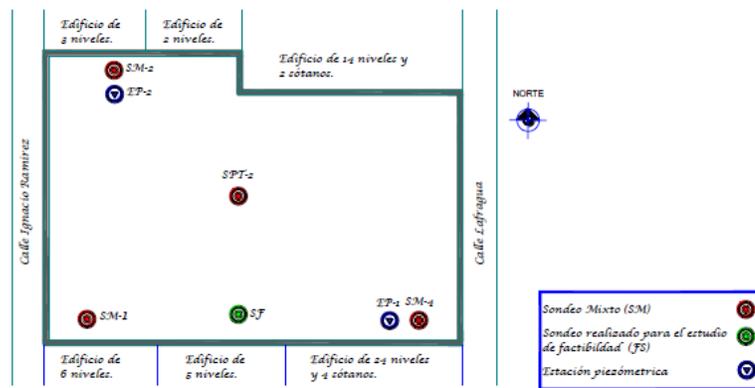


Figura 50.-Ubicación de los sondeos de exploración (CIMESA).

Tabla 7.-Estratigrafía (CIMESA)

De (m)	A (m)	Descripción	e	W %	γ (t/m ³)	U (t/m ²)	c (t/m ²)	ϕ (°)
0.00	2.40	Costra superficial. Arcilla arenosa café oscuro de consistencia firme a dura	2.05	73.50	1.17	-	1.90	-
2.40	30.20	Serie arcillosa superior. Arcilla arenosa café oscuro de consistencia firme a dura con intercalaciones de arena compacta	4.95	350.00	1.25	10.21	12.80	-
30.20	35.60	Primera capa dura. Limo arenoso gris verdoso de consistencia muy firme a dura.	1.29	73.00	1.57	3.51	-	35.00
35.60	40.00	Serie arcillosa inferior. Arcilla de consistencia blanda a firme de color gris verdoso.	3.48	159.00	1.30	15.95	28.90	-
40.00	75.00	Depósitos profundos. Limo café oscuro verdoso de consistencia firme a dura.	0.70	29.00	1.83	25.53	4.10	33.00

4.1.2. Prueba de carga

Se realizaron pruebas de carga axial, para verificar las capacidades de carga y valores de asentamiento en pilas semejantes a las de proyecto real, de modo que se pueda validar el modelo de cálculo de éstas y su comportamiento. Esta verificación se realizó a través de la aplicación de cargas estáticas de compresión sobre pilas de 1.00 m de diámetro, desplantadas a -70 y -50 m de profundidad, llamadas “Pila LT-1” y LT-2”, mediante cilindros hidráulicos apoyados contra un sistema de reacción conformado por un marco metálico anclado a Muro Milán definitivo de proyecto y a pilas de reacción construidas para este fin. Empleando los lineamientos de la norma internacional American Society for Testing and Materials (ASTM), empleando la norma ASTM D 1143 cargas estáticas de compresión” método D” que consiste en aplicar incrementos de carga de igual magnitud en intervalos de tiempo constantes de 30 min para tratar de alcanzar el 200 % de la carga admisible.

Tabla 8.-Características de la Pila

Prueba No.	Longitud (m)	φ Pila (m)	Carga (t)	Características de la Pila
Pila LT-1	70.00	1.00	2200.0	Se elimina parcialmente la fricción en el fuste mediante la colocación de un doble ademe de acero del nivel 0.00 m al -28.0 que corresponderá a la excavación de los sótanos.
Pila LT-2	50.00	1.00	2200.0	

Se realizó la perforación hasta el nivel de -70.00 m y -50.00 m respectivamente con bote arcillero de 1.00 de diámetro para tener control de la verticalidad del elemento, posteriormente se realiza la perforación a nivel de -28.00 con bote arcillero de 1.20 m para la colocación de ademes metálicos (Figura 51).



Figura 51.-Perforación LT-2 a -50 m.

4.1.3. Instrumentación de la prueba

Con el fin de conocer el comportamiento de las pilas durante las pruebas se emplearon instrumentos para la medición de la carga, el asentamiento y las deformaciones unitarias a diferentes niveles (tabla 9). La instrumentación del cuerpo de las pilas se realizó con deformímetros de cuerda vibrante: “Sister bars” que se sujetaron al acero vertical (Figura 52) y midieron las deformaciones unitarias del concreto. Estos sensores se distribuyeron a lo largo de las pilas en pares de modo que registrara la información necesaria en los puntos de interés indicados en los pares de proyecto y testigos de deformación (tell-tales). Todos los instrumentos de cuerda vibrante fueron conectados a una unidad de registro (“Datalogger”), la cual se programó para registrar una medida cada minuto (figura 53).

Tabla 9.-Ubicación de sensores (Sister Bars)

Nivel	Pila LT-1	Pila LT-2
N-1	-0.80	-0.50
N-2	-28.00	-28.00
N-3	-30.00	-30.00
N-4	-35.00	-35.00
N-5	-40.00	-40.00
N-6	-50.00	-45.00
N-7	-58.00	-49.00
N-8	-63.00	
N-9	-69.00	



Figura 52.- (a) Deformímetros para concreto (“sister bar”) (b) Cables de los sensores (carretes)

Los asentamientos se midieron de tres formas distintas, con medidores de desplazamiento tipo “cuerda vibrante”, topografía convencional (nivel automático), y reglas metálicas e hilos en conjunto con reglas transparentes pegadas sobre espejos (figura 54).



Figura 53.- Unidad de registro (Datalogger)” (CIMESA)



Figura 54.- Topografía convencional (CIMESA).

Implementación de Ademe metálico

Esta etapa es aplicable a las Pilas LT-1 y LT-2, las cuales se equipan con 2 ademes o camisas metálicas de 40" y 44" de diámetro respectivamente (figura 55), pero solo hasta el nivel -28.00 m ya que únicamente se elimina la fricción en la parte de la pila que no tendrá función estructural (altura de sótanos).

Se realizó la habilitación de los ademes metálicos, se inicia con el ademe de $\varnothing 44"$ (112 cm) en un solo tramo de la longitud total, el cual se empata previamente en piso mediante soldadura de penetración completa en cordones de 8 cm de longitud equidistantes radialmente a cada 60° centro a centro, de igual manera se hace el mismo habilitado de ademe de $\varnothing 40"$.



Figura 55.-Instalación de ademes (La fraga)

Post-inyección

Cuatro semanas después de la construcción de las pilas se realizó un mejoramiento del contacto pila–suelo en la punta del elemento inyectando lechada a presión (35 kg / cm^2). Lo anterior se realizó por medio de tubos de acero de 4" diámetro que se dejaron como reservación durante la construcción de los elementos. El material inyectado consistió en una lechada agua: cemento: más un aditivo reductor de agua de alto rango para mantenerla fluida (figura 56).

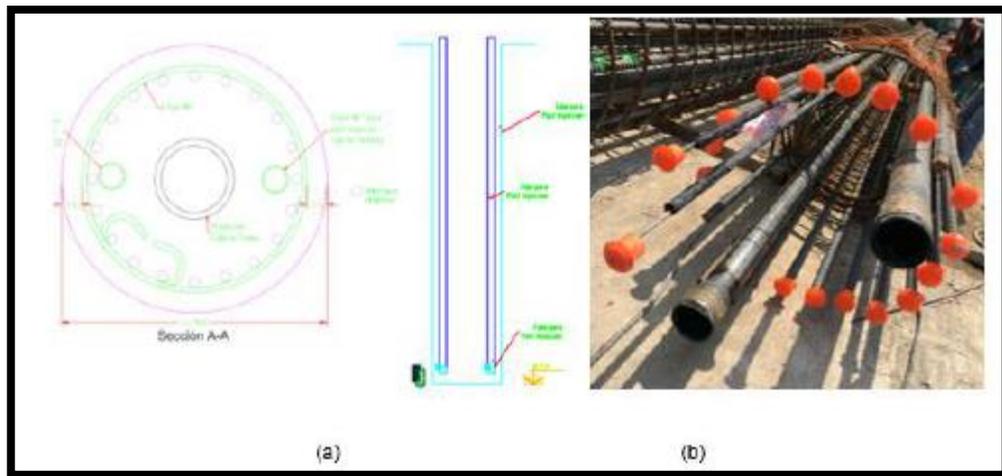


Figura 56.-Tubos de reservación para post-inyección.

Sistema de reacción

Se muestra una vista del sistema que se utilizó para la aplicación de las cargas sobre pilas de prueba. En las Pilas de reacción se dejarán ahogadas una serie de barras roscadas de alta resistencia tipo “DIWYDAG” para hacer la conexión de las pilas de reacción el marco. La cantidad y diámetro de estas barras depende de la magnitud de la carga a transmitir a cada elemento de reacción (figura 57).

Para la aplicación de la carga se emplearon 3 gatos hidráulicos con capacidad de 1000 t (9810 kN), donde para cada incremento se realizó accionando una bomba eléctrica. Se tomó como criterio de falla de la pila la carga para la cual el asentamiento fuera igual al 15% de diámetro de la pila.



Figura 57.-Sistema de reacción y Marco de referencia e instrumentación

Proceso de prueba LT-1

- a. Se realizó un ciclo de carga de 10 incrementos, el cual consistió en realizar incrementos de carga del 10% a cada 180 minutos, hasta alcanzar el criterio de paro por desplazamiento (15 cm), lo anterior hasta alcanzar una carga máxima de 1400 t aproximadamente.
- b. Cada incremento de carga se aplicó accionando la bomba que inyecta presión a los gatos. La magnitud de la carga aplicada se determinó mediante los registros del datalogger y celdas de carga.
- c. Se verificó en los manómetros que la presión en los cilindros fuera constante, y en caso de pérdida, se acciona la bomba para recuperarla y mantener la carga de la forma lo más constante posible. La frecuencia del accionar de la bomba dependió del asentamiento que se presentó en la pila en cada fase de carga.
- d. La toma de lecturas de las cargas en las celdas de carga se hizo después de aplicar un nuevo incremento y antes de aplicar el siguiente. La lectura del manómetro de la bomba de los gatos se verificará constantemente para asegurar la permanencia de la carga en la pila.
- e. La lectura se realizó a los 5, 10, 20, 30, 60, 80, 100, 120, 140 y 160 minutos después de aplicarse cada incremento.
- f. La lectura de los hilos o cables frente a los espejos con reglas se realizó en los mismos intervalos de tiempo antes mencionados para los indicadores de desplazamiento.

- g. Una vez alcanzada la carga correspondiente al criterio de paro, se sostuvo la carga por 3 horas haciendo lecturas de la instrumentación a los 5, 10, 20, 30, 60, 80, 100, 120, 140, 160 y 180 minutos.
- h. Terminado el periodo de sostener la carga máxima por tres horas se aplicaron seis decrementos para descargar la pila totalmente. La duración de cada decremento fue de dos horas.
- i. Se realizó una última lectura de los hilos y reglas aproximadamente 12 horas después de haber descargado totalmente para medir el asentamiento residual.

Proceso de prueba de LT-2

- a. Se aplicaron incrementos de carga constantes iguales a 10% de la carga de prueba prevista (2200 t) para un máximo de 10 incrementos.
- b. Se realizó un ciclo de carga de siete incrementos, el cual consistió en realizar incrementos de carga del 10 % de la carga a cada 30 minutos, hasta alcanzar el criterio de paro por desplazamiento (15 cm), lo anterior hasta alcanzar una carga máxima de 1100 t aproximadamente.
- c. Cada incremento de carga se aplicó accionando la bomba que inyecta presión a los gatos. La magnitud de la carga aplicada se determinó mediante los registros del datalogger.
- d. Se verificó en los manómetros que la presión en los cilindros fuera constante, y en caso de pérdida, se accionaba la bomba para recuperarla y mantener la carga de la forma lo más constante posible. La frecuencia del accionar de la bomba dependió de que se mantuviera la carga en el manómetro de la bomba.
- e. La toma de lecturas de las cargas en las celdas de carga se hizo inmediatamente después de aplicar un nuevo incremento y antes de aplicar el siguiente. La lectura del manómetro de la bomba de los gatos se verificó constantemente para asegurar la permanencia de la carga en la pila.
- f. La lectura se realizó a los 5, 10, 20 y 30 minutos después de aplicarse cada incremento.
- g. La lectura de los hilos o cables frente a los espejos con reglas se realizó en los mismos intervalos de tiempo antes mencionados para los indicadores de desplazamiento.

- h. Una vez alcanzada el criterio de falla, se sostuvo la carga por dos horas haciendo lecturas de la instrumentación a los 5, 10, 20 y 30 minutos y posteriormente cada 20 minutos hasta dos horas de carga sostenida.
- i. Terminado el periodo de sostener la carga alcanzada por dos horas, se aplicaron 10 decrementos para descargar la pila totalmente. La duración de cada decremento fue de una hora.
- j. Se realizó la última lectura de los hilos y reglas aproximadamente 12 horas después de haber descargado totalmente para medir el asentamiento residual.

4.1.4. Relación carga - asentamiento

Se presentan los resultados de las pruebas de carga en pilas LT-1 y LT-2, relación carga-asentamiento, distribución de cargas a diferentes profundidades de la pila.

En la aplicación de la carga de la pila de prueba LT-1 se llevaron 10 incrementos de carga, alcanzando una carga en la cabeza de la pila de 1390 t con un desplazamiento de 186.5 mm con lo cual se cumplió el criterio de falla con base a la norma ASTM D1143 / 1143M - 13 donde se indica que el criterio de paro se cumple al obtener un desplazamiento igual al 15% del diámetro de la pila (150 mm). La carga máxima se sostuvo tres horas, después de la cual se descargó en seis decrementos. Después de retirar la carga por completo se tuvo un asentamiento residual de 173.0 mm. En la curva carga-asentamiento se observa un asentamiento importante a partir de las 1330 t. El criterio de falla se cumplió con una carga de 1390 t (Figura 58).

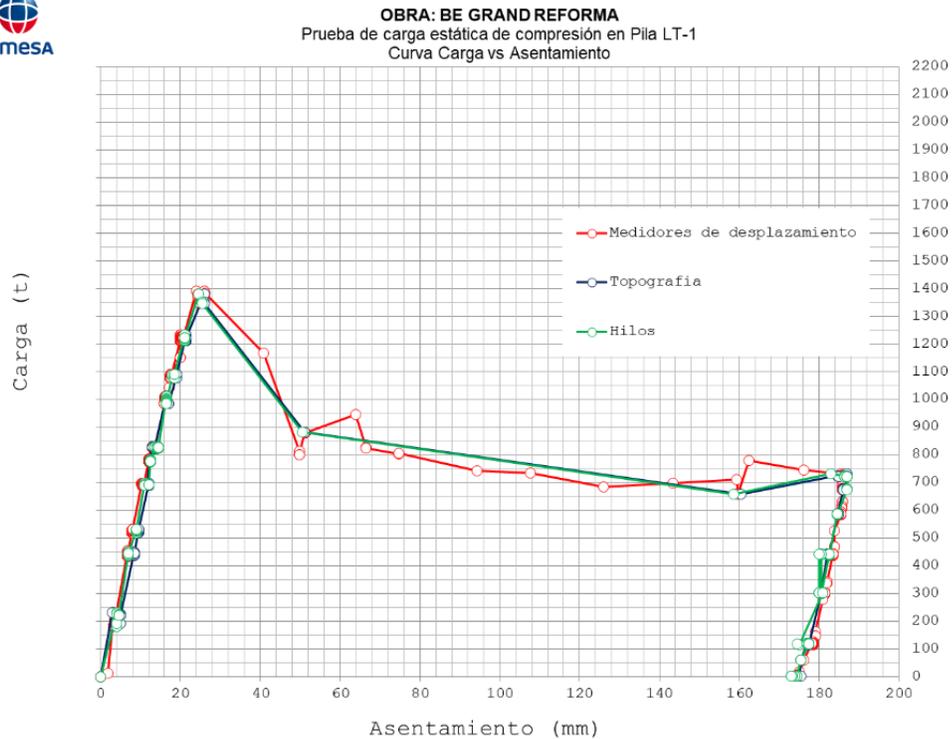


Figura 58.- Prueba de carga estática a compresión curva carga vs asentamiento LT-1

En la aplicación de la carga de la pila de prueba LT-2, se llevaron siete incrementos de carga, alcanzó una carga de 1180 t con un asentamiento de 168.4 mm, con lo cual se cumplió con el criterio de falla de la norma ASTM D1143 / 1143M-07 donde se indica que esto se presenta con desplazamiento igual al 15% del diámetro de la pila (150 mm). La carga máxima se sostuvo tres horas, después de la cual se descargó en diez decrementos. Después de retirar la carga por completo se tuvo un asentamiento residual de 151.6 mm. En la curva carga-asentamiento (figura 59) se observa un desplazamiento importante a partir de las 762 t, momento en que comienza a moverse la carga de punta, de tal forma que para la carga máxima de prueba de 1100 t la carga tomada en la punta de la pila es del orden de 434.46 t.

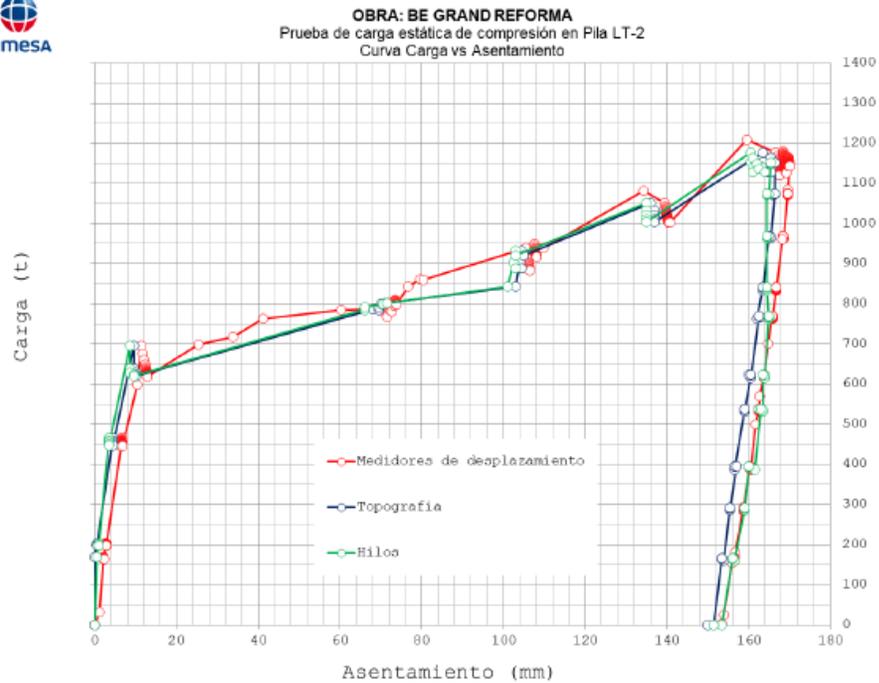


Figura 59.- Prueba de carga estática a compresión curva carga vs asentamiento Pila LT-2

4.1.5. Comportamiento en el cuerpo de la pila LT-1

Método para el cálculo de la distribución de Cargas

Para conocer la distribución de carga en distintas profundidades a lo largo de las pilas de prueba se emplearon deformímetros para concreto de cuerda vibrante del tipo “sister-bar” colocados en pares por nivel de instrumentación. Estos instrumentos envían constantemente una señal en forma de frecuencia sonora que por medio de un transductor se convierten a una señal eléctrica. El resultado es un valor adimensional denominado “dígito” que al ser multiplicado por un factor de calibración dado por el fabricante se traducen en deformaciones unitarias.

Las deformaciones unitarias medidas a lo largo de la prueba asociadas a cada uno de los incrementos de carga se multiplican por el módulo de elasticidad del concreto para conocer el esfuerzo. A continuación, se determina la fuerza actuante en la sección multiplicando el esfuerzo por el área real de la sección. Al hacer diferencias entre dos niveles de instrumentos consecutivos, es posible conocer la fuerza actuante en un tramo de la pila. Finalmente, esta fuerza se divide entre el perímetro de la pila para conocer la fricción en el fuste.

Para hacer el cálculo anterior se puede asumir que la pila tiene una sección cilíndrica en toda su longitud, lo cual se cumple en las zonas donde se tiene el ademe metálico. Sin embargo, en las zonas donde el concreto quedará en contacto con el suelo, no es rara la ocurrencia de sobre volúmenes que dé como resultado una sección mayor a la teórica que puede influenciar en los resultados de los cálculos. Para asegurar el empleo de las secciones correctas en los cálculos se hicieron mediciones por medio de una sonda ecográfica (“KODEN”).

Para asegurar el contacto pila-suelo se empleó un tratamiento de pos-inyección con el fin de asegurar un contacto adecuado entre los elementos de cimentación y el material de desplante (remoledo del suelo y azolve) con el fin de disminuir los defectos de construcción asegurando la capacidad de carga estimada para el diseño de carga inyectando a una presión de 35 kg / cm² generando una fuerza de 300 t en la punta de la pila t (figura 63). Se muestra las diferentes etapas generadas en cada uno de los niveles, donde se puede apreciar los esfuerzos generados en la etapa de perforación, lavado, colocación de lechada de hasta 85 t (figura 60).

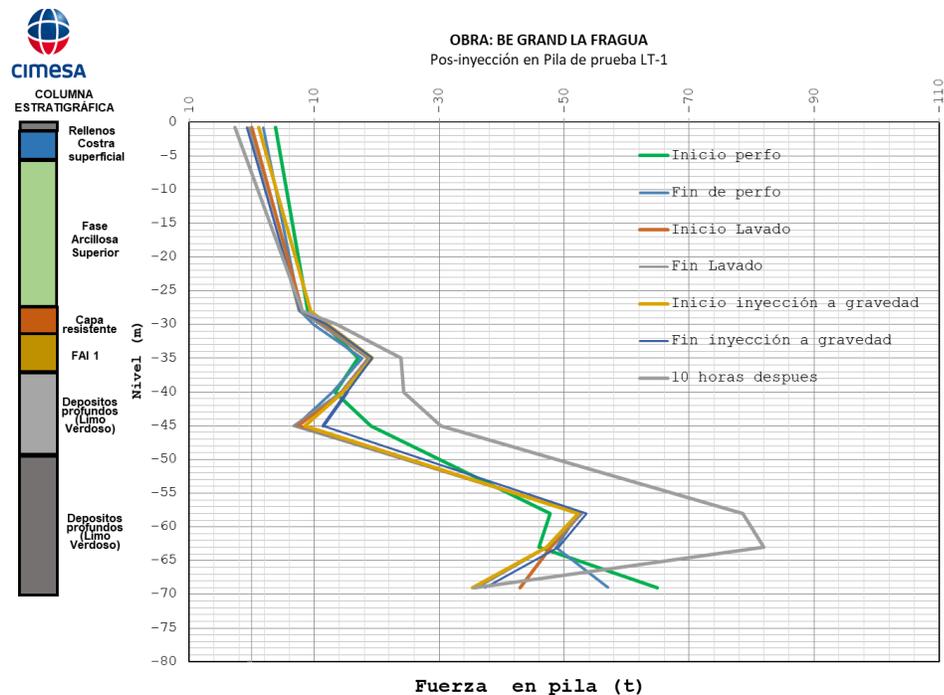


Figura 60.-Etapas de Post-inyección Pila LT-1

La figura 61 y 62 muestra la historia de fuerzas actuantes en la pila en los diferentes niveles de instrumentación. La figura 61 es tomando como valor inicial los valores antes de la post-inyección y el día de la prueba respectivamente. Se presenta la evolución de las fuerzas en la

pila para cada nivel de instrumentación, valores que son congruentes con la aplicación de las cargas en la cabeza de la pila.

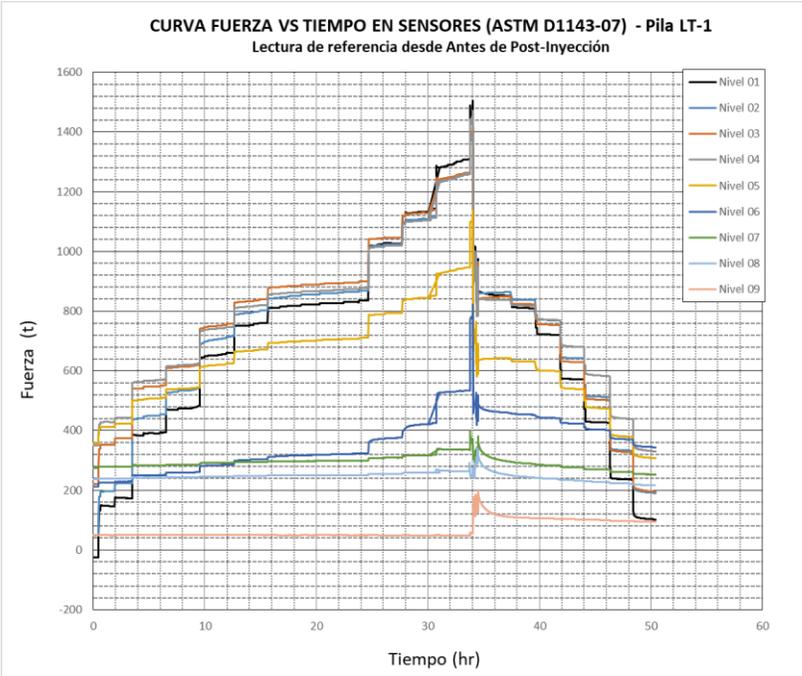


Figura 61.-"Grafica fuerza - Tiempo en pila LT-1 (Lectura de referencia antes de post-inyección)"

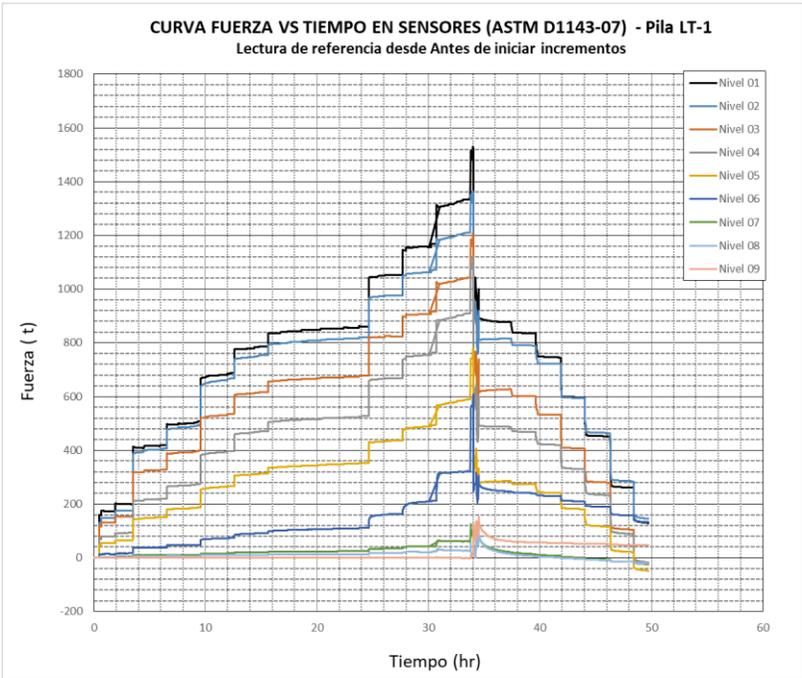


Figura 62.-"Grafica fuerza - Tiempo en pila LT-1 (Lectura de referencia antes de iniciar prueba)"

Pila LT-1. Se graficó una curva de distribución de carga para cada incremento (figura 63). La curva lineal es tomando como valor inicial desde la post-inyección y la punteada valor del día de la prueba. Se observa en la curva lineal que hasta el octavo incremento que corresponde a una carga de 1222 t, prácticamente la totalidad es tomada por fricción en el fuste. Es claro que en los primeros 28 m, donde se ubica el doble ademe metálico la carga pasa integra hasta los -28 m. A partir de la frontera entre la fase arcillosa superior (FAS), la primera capa dura (CD) y la serie arcillosa inferior (SAI) la transmisión de carga al suelo es considerable, ya que se encuentra una precarga en la pila generada por la etapa de post-inyección, provocando que hasta el octavo incremento la mayor parte de la carga es tomada por esta por fricción en el fuste. Por otra parte, por debajo de los 50 m a 60 m en los depósitos profundos existe una capacidad considerable por fuste que se manifiesta como una disminución paulatina de la fuerza conforme nos acercamos a la punta. En el noveno incremento de carga (1410 t), rompe la precarga generada en la pila, provocando un asentamiento súbito la pila (165 mm) registrando una carga de punta de 60 t. La figura 63 muestra la distribución de carga de la pila LT-1 en función de la profundidad.

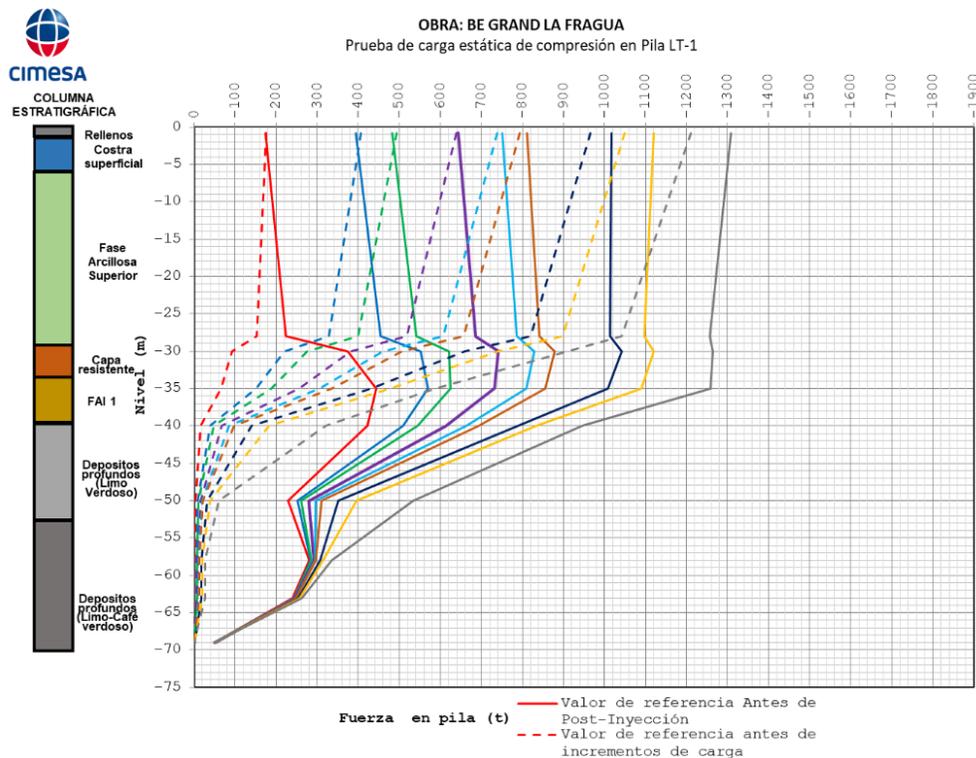


Figura 63.- Curva de distribución de carga LT-1

Se graficó una curva descarga para cada decremento como valor inicial la etapa de post-inyección (curva lineal) y curva punteada valor del día de la prueba. Se observa que la fricción desarrollada en el cuerpo de la pila, ahora trabaja en sentido opuesto en sentido al de la rama de carga, es suficiente para impedir que la reacción alcanzada por la punta se descargue, quedando una 50 t en la punta. Para la descarga total de seis decrementos, la punta permanece con una pre-carga de poco menos de 100 t y el fuste de la pila permanece en toda su longitud con esfuerzos residuales (figura 64).

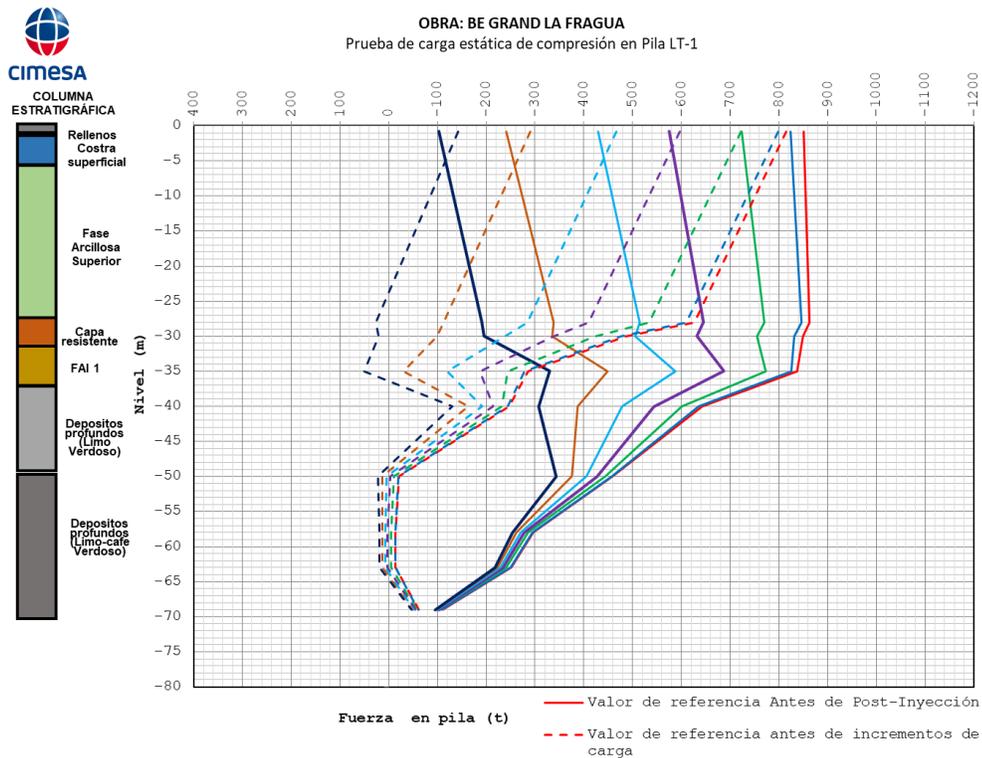


Figura 64.-"Grafica descarga-profundidad pila LT-1"

En la interacción pila-suelo con base a la distribución de carga con la profundidad, es posible determinar el esfuerzo cortante (f_s) desarrollado en el fuste del elemento entre secciones instrumentadas. La diferencia de carga obtenida entre dos secciones (Niveles de sensores) dividida entre el área lateral de la pila de prueba, es el esfuerzo cortante del fuste (figura 65-73).

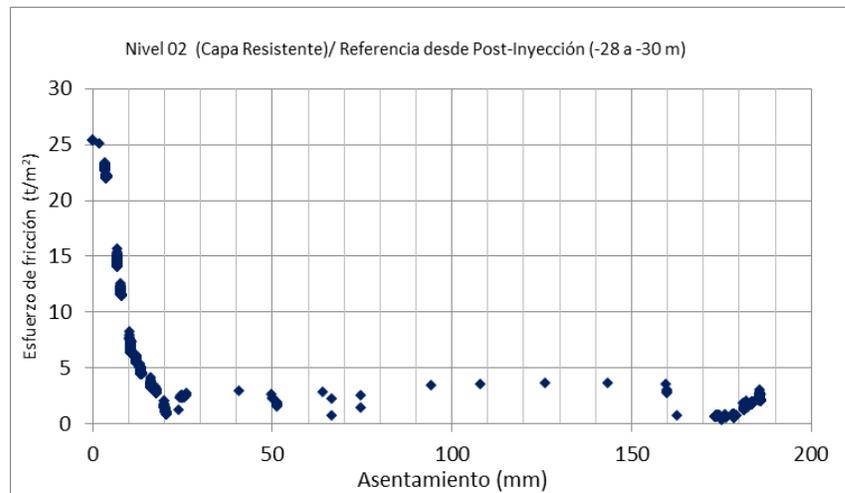


Figura 65.-Gráfica esfuerzo en valores absolutos de fricción – asentamiento, Capa resistente en pila LT-1 (Lectura de referencia desde Post-inyección).

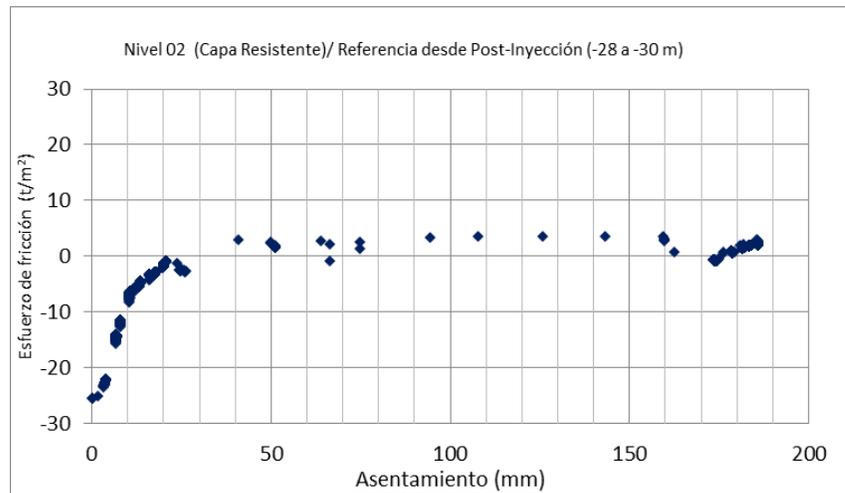


Figura 66.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Capa resistente en pila LT-1 (Lectura de referencia desde Post-inyección).

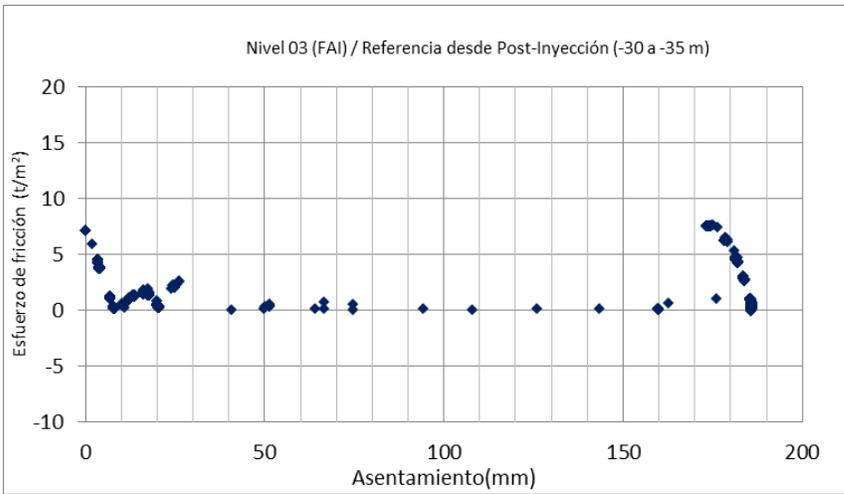


Figura 67.-Gráfica esfuerzo en valores absolutos de fricción – asentamiento, FAI en pila LT-1 (Lectura de referencia desde Post-inyección)

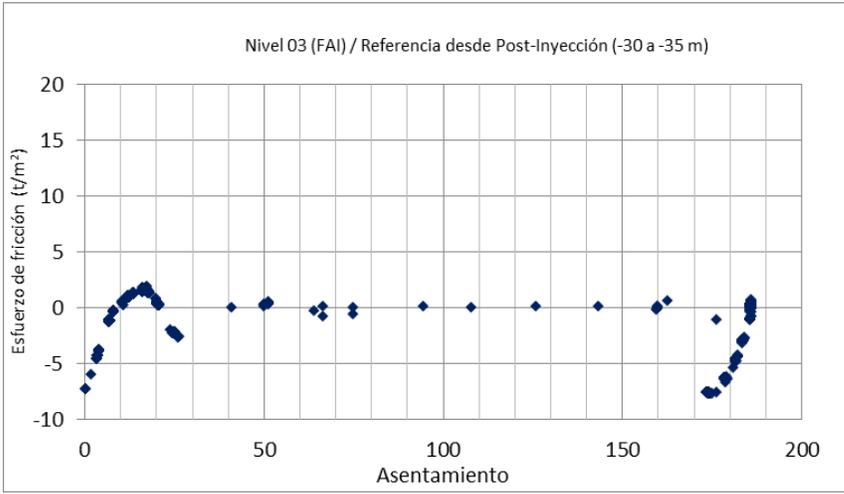


Figura 68.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, FAI en pila LT-1 (Lectura de referencia desde Post-inyección)

“Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México”

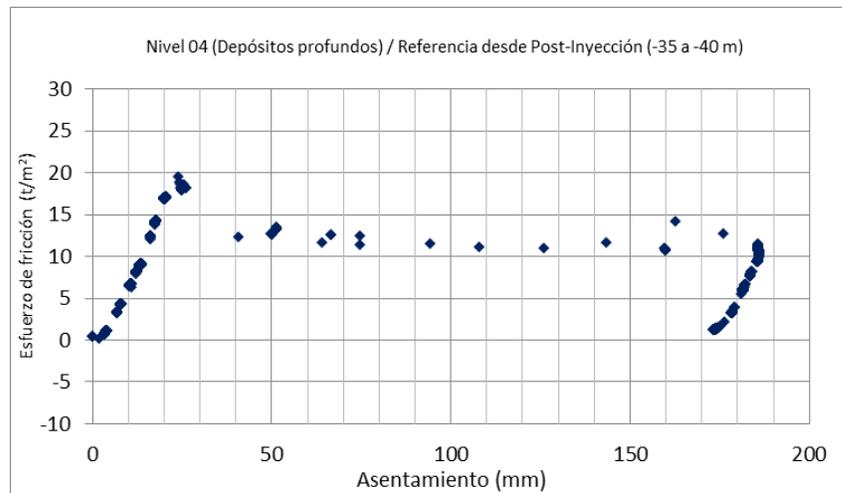


Figura 69.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos profundos en pila LT-1 (Lectura de referencia desde Post-inyección)

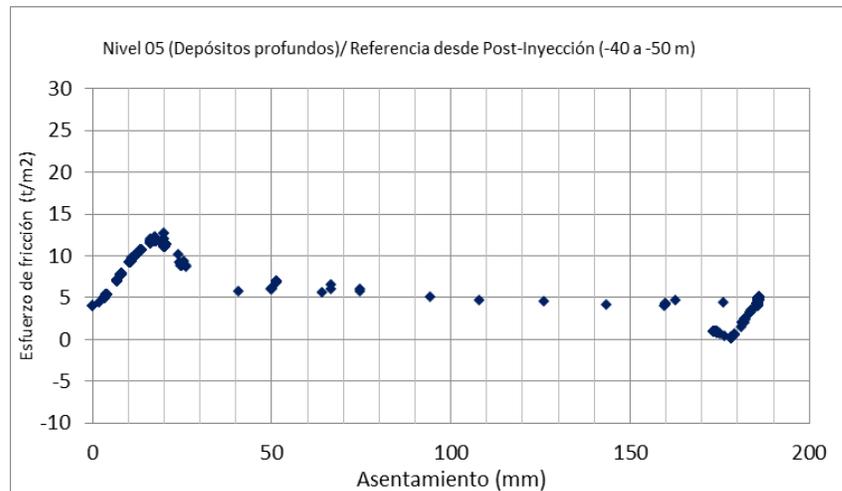


Figura 70.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos profundos en pila LT-1 (Lectura de referencia desde Post-inyección)

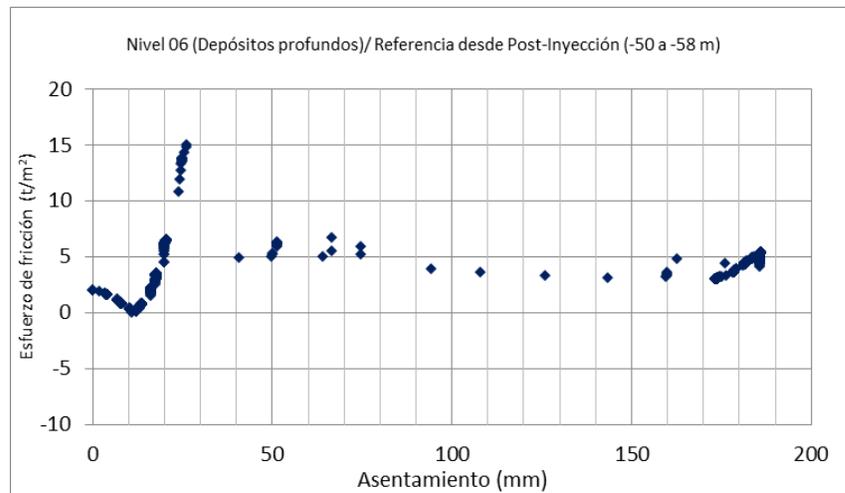


Figura 71.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos profundos en pila LT-1 (Lectura de referencia desde Post-inyección)

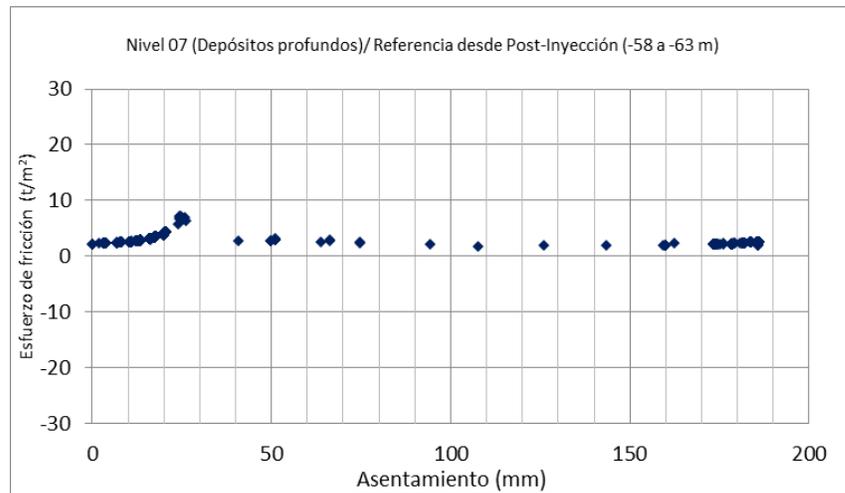


Figura 72.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos profundos en pila LT-1 (Lectura de referencia desde Post-inyección)

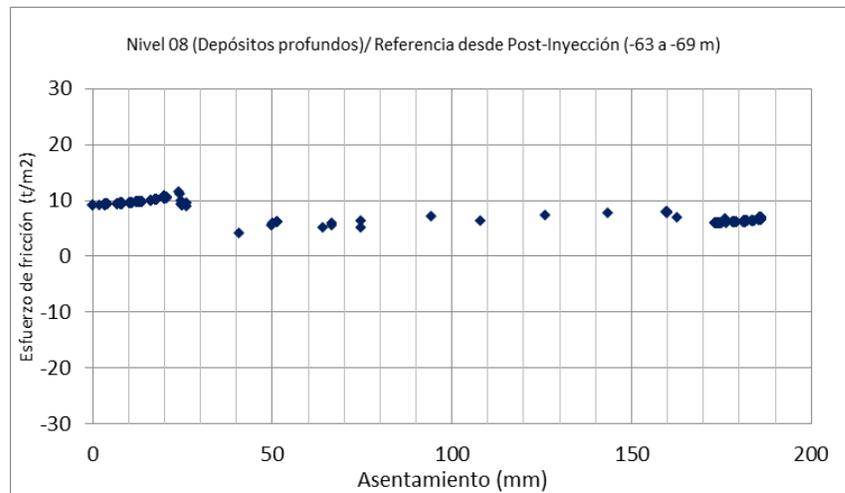


Figura 73.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos profundos en pila LT-1 (Lectura de referencia desde Post-inyección)

Las gráficas de la figura 65 a 73 muestran la variación del esfuerzo cortante en el fuste desarrollado contra el desplazamiento vertical inducido en cada uno de los estratos. Para los estratos arcillosos muestran un aporte de 30 t/m², presentando para cierto desplazamiento un comportamiento elástico-plástico, mostrando su máximo aporte a los primeros incrementos de carga, manteniendo su aporte hasta finalizar la prueba. Los depósitos profundos muestran un aporte considerable en el fuste manteniéndose; se componen de suelos arenosos, arcillas duras, gravas compactadas y limos arenosos los cuales su aporte máximo por fuste se presenta para desplazamientos cortos, influenciados por la fuerza generada en la etapa de post-inyección.

Estimación de la capacidad última

Se emplearon dos metodologías para estimar la capacidad última de las pilas de prueba. La primera debida a Chin (Fellenius 1980), en la cual se asume que la curva carga-asentamiento tiene una forma hiperbólica cuando la carga aplicada está próxima a la falla. La segunda, basada en el criterio de Brinch Hasen 90 % (1963) de la capacidad de carga última, en el cual se busca modelar el comportamiento carga-asentamiento.

En la figura 74 se muestra los puntos experimentales de las curvas carga – deformación, ajustadas de los datos medidos en la prueba. La primera curva corresponde al método de chin y en la segunda gráfica se emplea el método de Brinch Hasen 90 %.

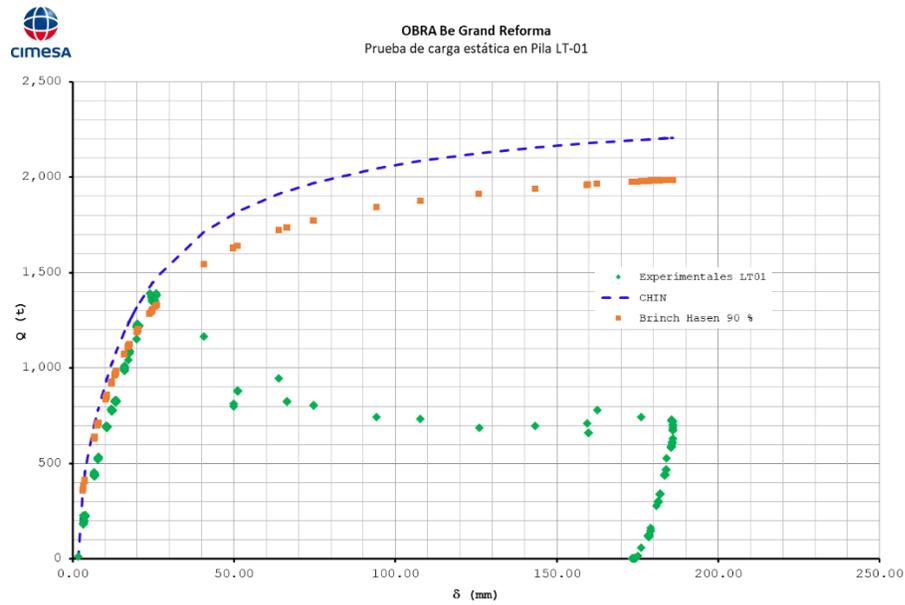


Figura 74.-Curva carga vs asentamiento Criterios Brinch Hasen 90% y Chin LT-1

4.1.6. Comportamiento en el Cuerpo de la Pila LT-2

Para asegurar el contacto pila-suelo de la pila LT-2, se empleó un tratamiento de post-inyección con el fin de asegurar un contacto adecuado entre los elementos de cimentación y el material de desplante. Se muestra los esfuerzos generados en la post-inyección de hasta 50 t. Se muestra las diferentes etapas generadas en cada uno de los niveles, se pueden observar los esfuerzos generados en la etapa de perforación, lavado, colocación de lechada (figura 76). La presión de inyección fue de 35 kg/cm² llegando a generar una fuerza en la punta de la pila de 350 t (figura 79)

“Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México”

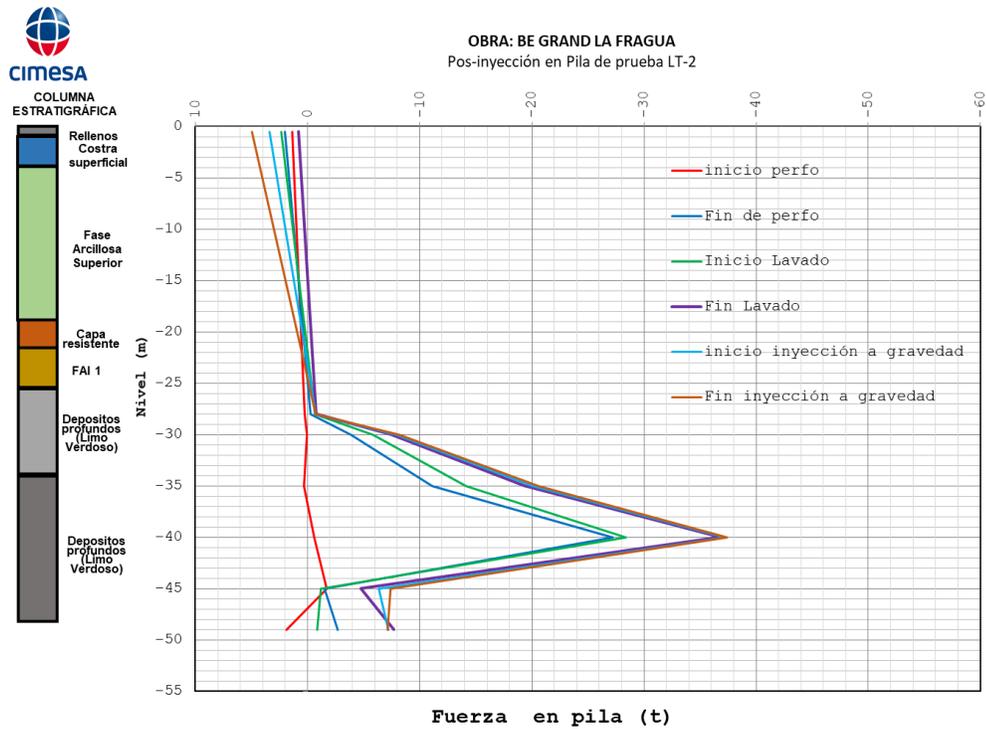


Figura 75.-Etapas de post-inyección LT-2

La figura 76 y 77 muestra la historia de fuerzas actuantes en la pila en los diferentes niveles de instrumentación. La figura 76 es tomando como valor inicial los valores antes de la post-inyección y el día de la prueba respectivamente. Se presenta la evolución de las fuerzas en la pila para cada nivel de instrumentación, valores que son congruentes con la aplicación de las cargas en la cabeza de la pila.

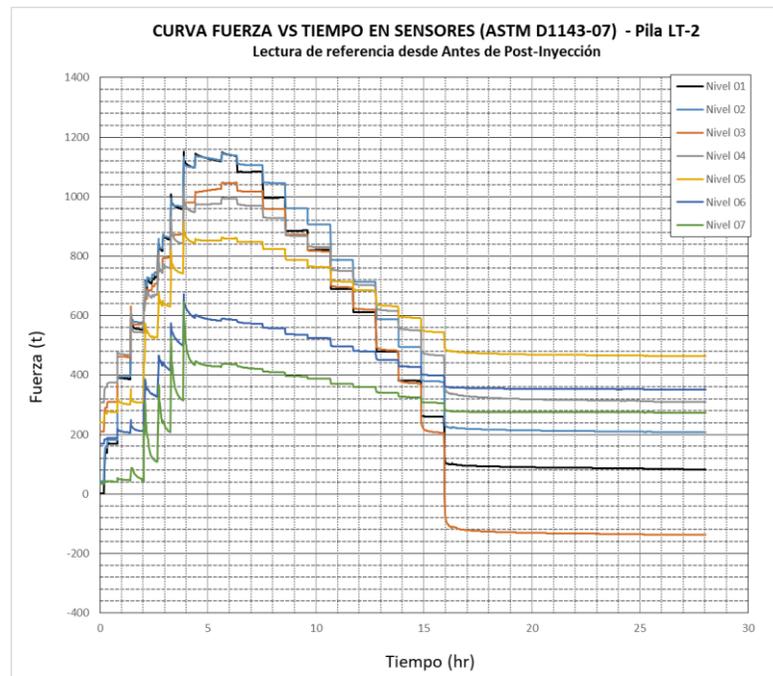


Figura 76.-Grafica fuerza - Tiempo en pila LT-2 (Lectura de referencia antes de post-inyección)

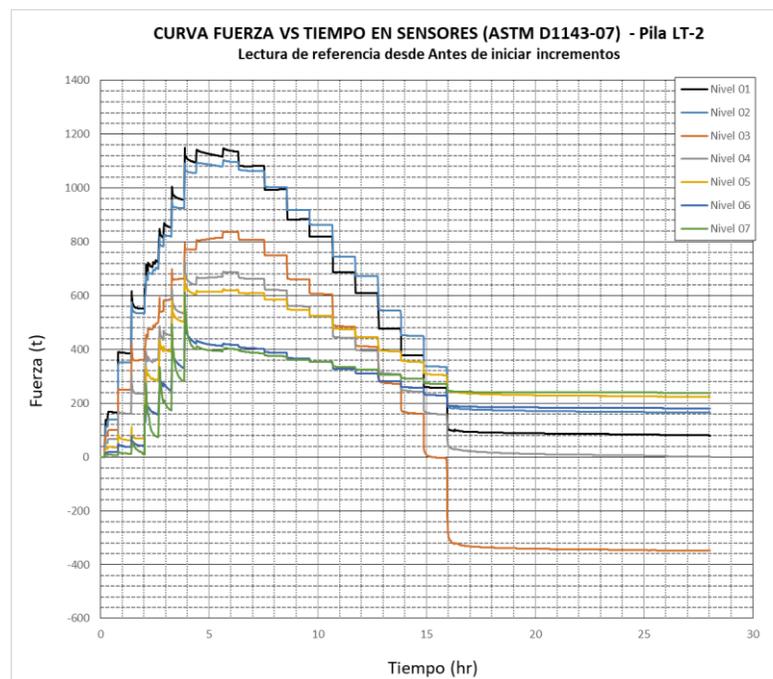


Figura 77.-Grafica fuerza - Tiempo en pila LT-2 (Lectura de referencia antes de iniciar prueba)”

Pila LT-2. Se graficó una curva de distribución de carga para cada incremento (figura 78). La curva lineal es tomando como valor inicial desde la post-inyección y la punteada valor del día

de la prueba. Se observa en la curva lineal que hasta el tercer incremento que corresponde a una carga de 660 t, prácticamente la totalidad es tomada por fricción en el fuste, ya que se encuentra una precarga en la pila generada por la etapa de post-inyección, provocando que la mayor parte de la carga sea tomada por fricción en el fuste. En los primeros 28 m, donde se ubica el doble ademe metálico la carga pasa integra hasta los-28 m. A partir de la frontera entre la fase arcillosa superior (FAS), la primera capa dura (CD) la transmisión de carga al suelo es considerable. Por otra parte, por debajo de los 40 m a 50 m en los depósitos profundos donde existen suelos arenosos densos y arcillas duras existe una capacidad considerable por fricción conforme nos acercamos a la punta. En el cuarto incremento de carga (880 t), rompe la precarga generada en la pila, provocando un asentamiento la pila (59.6 mm) donde la punta empieza a moverse registrando una carga de punta de 109 t. Para el sexto incremento en la pila de 1160 t se tiene una movilización de punta de 434 t con un desplazamiento de.

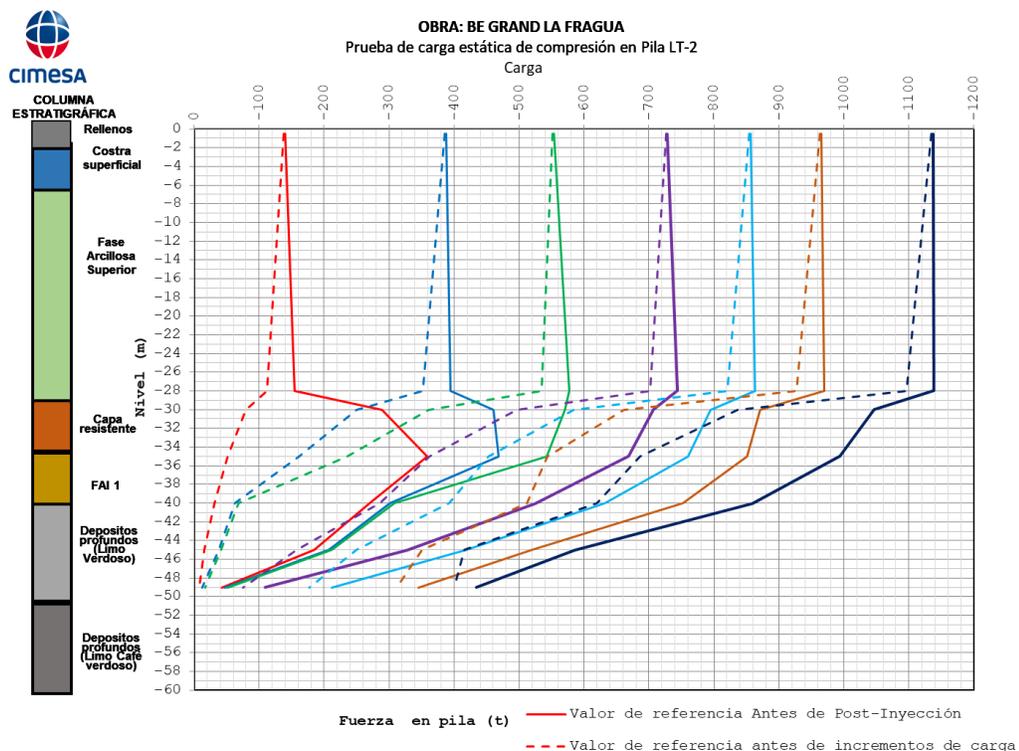


Figura 78.- Curva de distribución de Carga LT-2

Se graficó una curva descarga para cada decremento como valor inicial la etapa de post-inyección (curva lineal figura 79) y curva punteada valor del día de la prueba. Se observa que la fricción desarrollada en el cuerpo de la pila, ahora trabaja en sentido opuesto en sentido al

de la rama de carga, es suficiente para impedir que la reacción alcanzada por la punta se descargue. Para la descarga total de 10 decrementos, la punta permanece con una pre-carga de poco más de 270 t y el fuste de la pila permanece en toda su longitud con esfuerzos residuales para valores iniciales de post-inyección. La diferencia entre los valores de referencia entre la post-inyección y valores del día de la prueba varían con base a las 60 t generadas al mejoramiento de la punta.

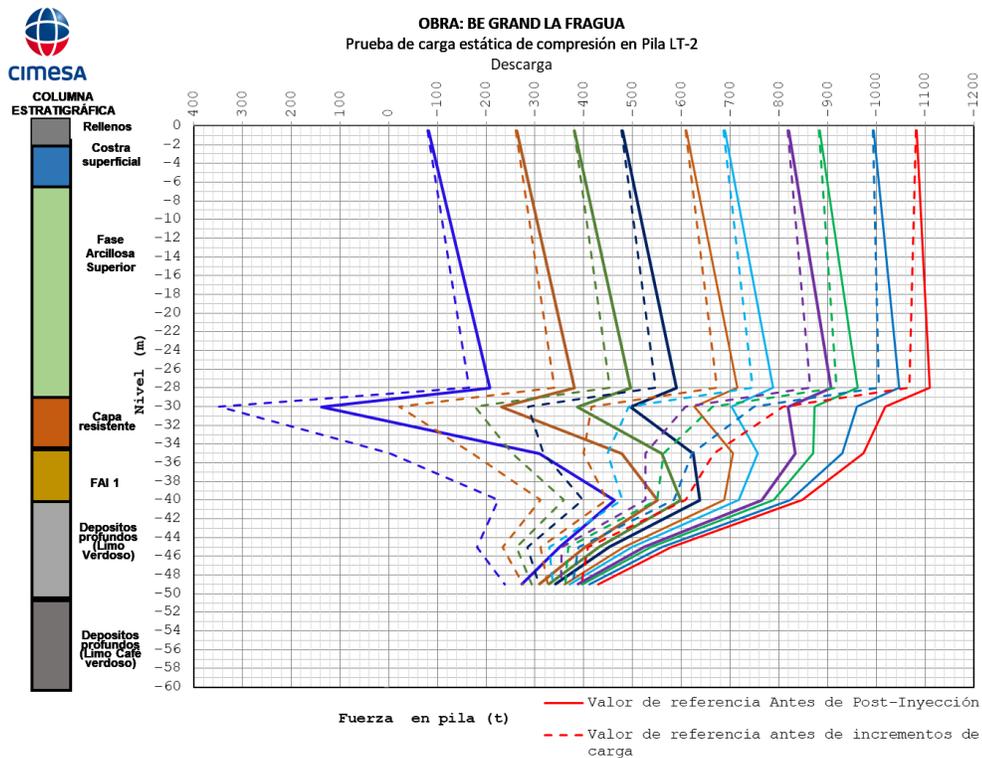


Figura 79.- Curva de distribución de Descarga LT-2

Las gráficas de las figuras (80 – 86) muestra la variación del esfuerzo cortante en el fuste desarrollado contra el desplazamiento vertical inducido en cada uno de los estratos. Para los estratos arcillosos muestran un comportamiento elástico-plástico, mostrando su máximo aporte a los primeros incrementos de carga, llegando a su máximo aporte por fuste antes de llegar al máximo aporte por fuste registrado.

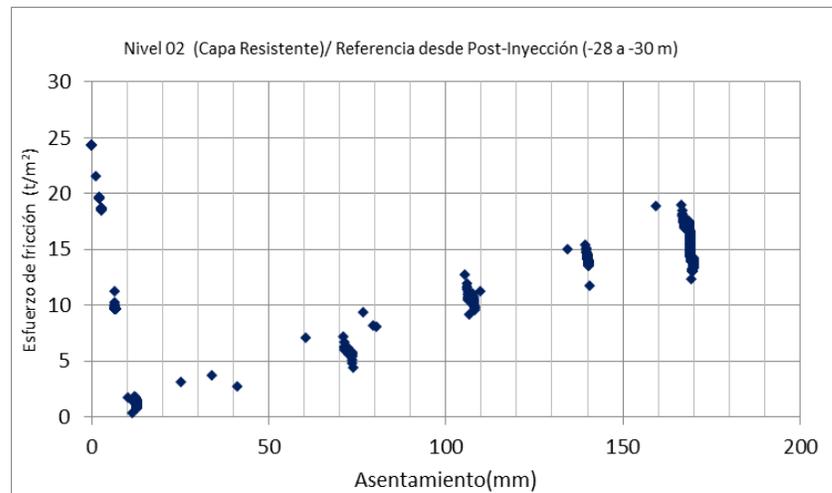


Figura 80.-Gráfica esfuerzo en valores absolutos de fricción – asentamiento, Capa resistente en pila LT-2 (Lectura de referencia desde Post-inyección).

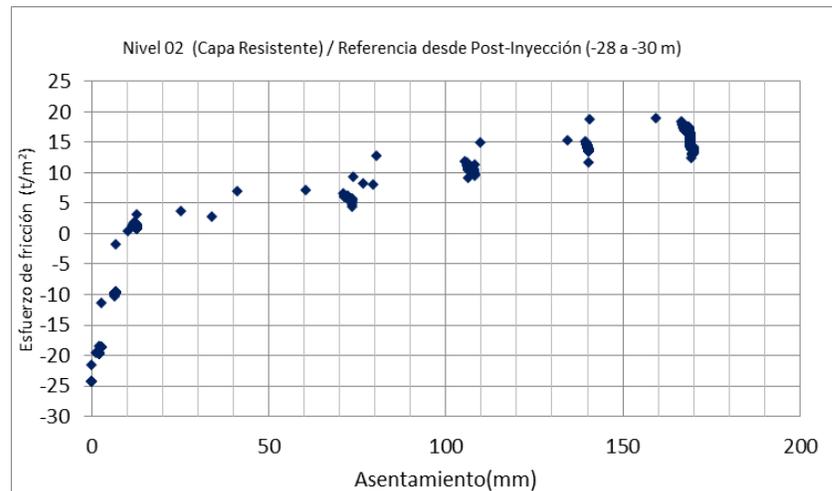


Figura 81.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Capa Resistente en pila LT-2 (Lectura de referencia desde Post-inyección).

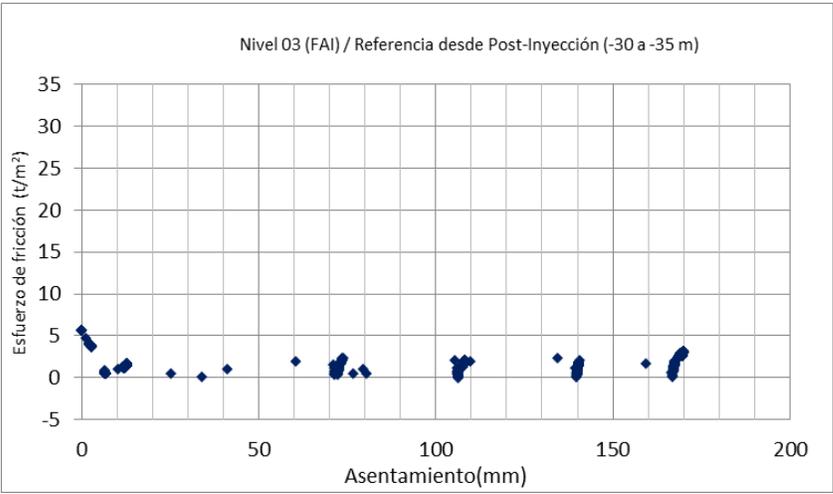


Figura 82.-Gráfica esfuerzo en valores absolutos de fricción – asentamiento, FAI en pila LT-2 (Lectura de referencia desde Post-inyección).

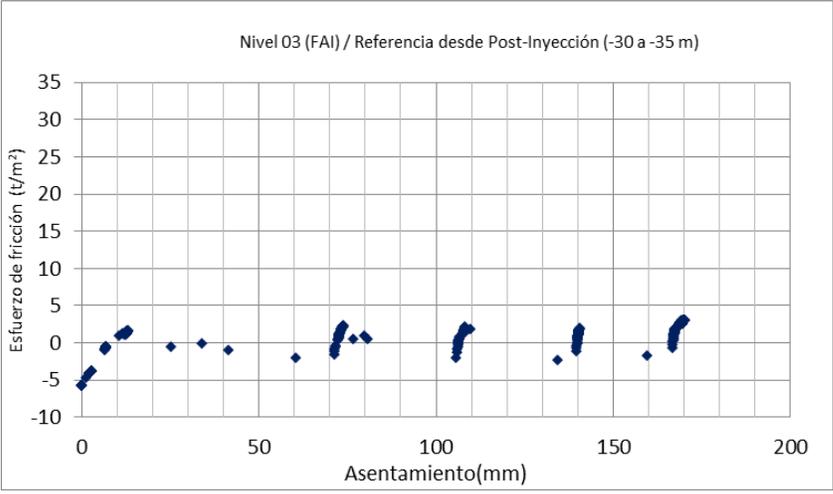


Figura 83.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, FAI en pila LT-2 (Lectura de referencia desde Post-inyección).

“Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México”

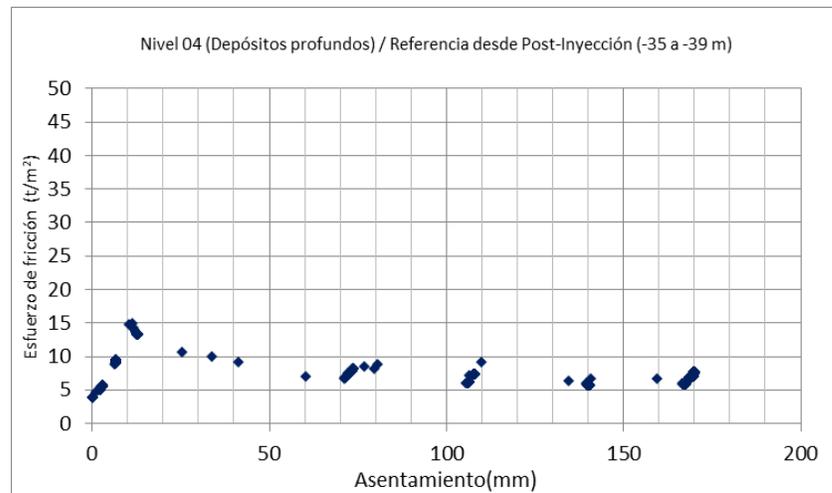


Figura 84.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos en pila LT-2 (Lectura de referencia desde Post-inyección).

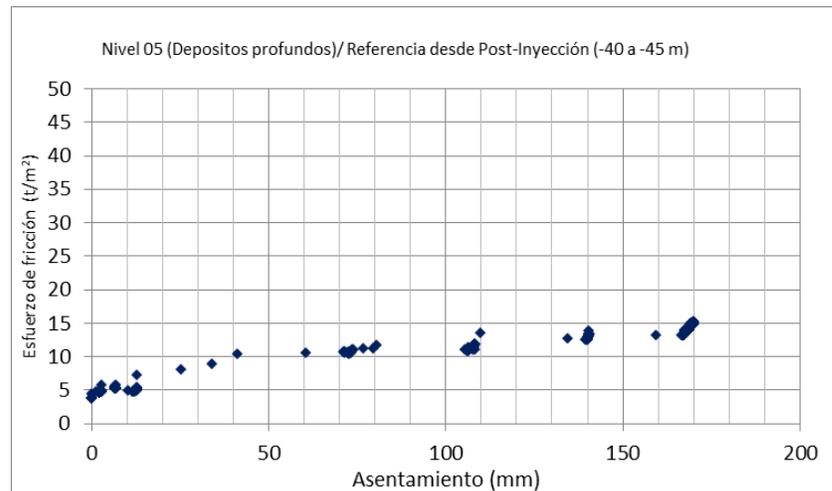


Figura 85.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos en pila LT-2 (Lectura de referencia desde Post-inyección)

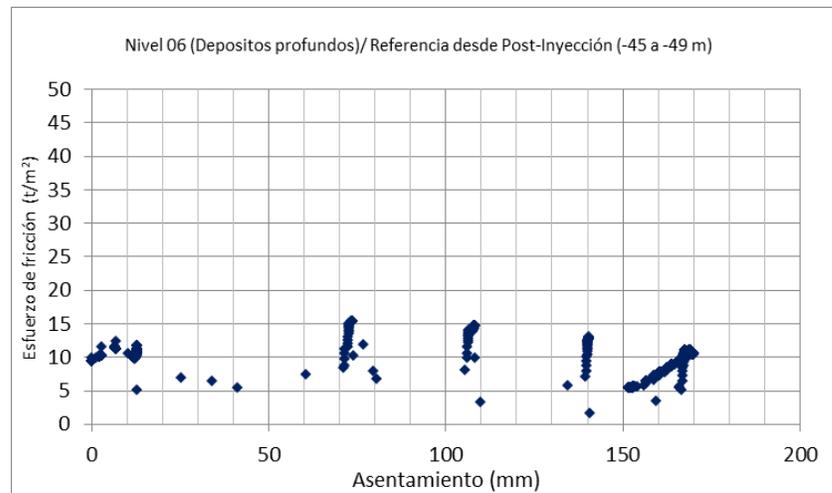


Figura 86.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos en pila LT-2 (Lectura de referencia desde Post-inyección).

Los depósitos profundos muestran un aporte importante en el fuste; se componen de suelos arenosos, gravas compactadas y limos arenosos los cuales su aporte máximo por fuste se presenta para desplazamientos grandes. Lo cual es representativo por un proceso de compensación, donde unos estratos reducen su resistencia cortante a valores residuales.

Estimación de la capacidad última

Se emplearon dos metodologías para estimar la capacidad última de las pilas de prueba. En la figura 87 se muestra los puntos experimentales y las curvas carga –deformación, ajustadas de los datos medidos en la prueba. La primera curva corresponde al método de chin. En la segunda grafica se emplea el método de Brinch Hasen 90 %.

“Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México”



OBRA Be Grand Reforma
Prueba de carga estática en Pila LT-02

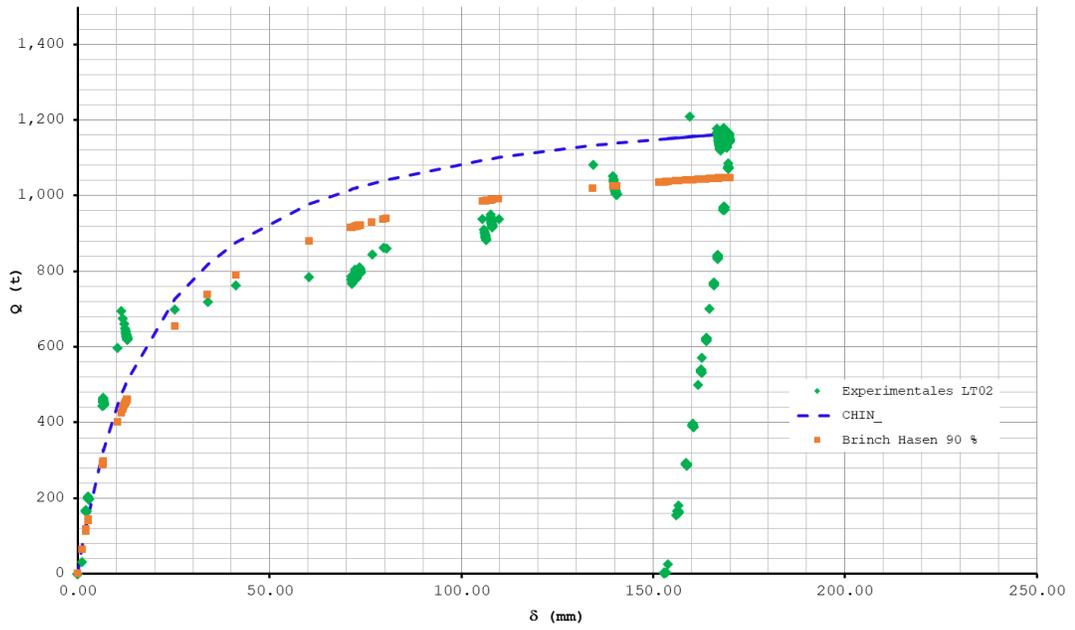


Figura 87.- Curva carga vs asentamiento. Criterios Brinch Hasen 90% y Chin PL-2

4.2. Reforma 432

En este capítulo se describe la exploración y muestreo que se efectuada en el predio del proyecto: por lo tanto, las justificaciones del tipo de prueba y la selección del lugar del muestreo son puntos a abordar en dicho segmento. En consecuencia, se presenta el procedimiento de ejecución de dos pruebas de carga estática de 2000 t a realizar en pilas circulares instrumentadas de 1.00 m de diámetro y 55 m de profundidad, así como resultados que son primordiales para el el diseño de pruebas de carga y diseño de la cimentación profunda.

4.2.1. Condiciones del sitio

El proyecto consiste en una torre de oficinas de 264 m de altura (74 niveles), que se construirá sobre Av. Paseo de la Reforma, N° 432, Colonia Juárez, Delegación Cuauhtémoc, Ciudad de México, entre calle Dublín y vialidad Sevilla (figura 88).



Figura 88.-Localización del sitio del Proyecto

La cimentación consistirá en 9 sótanos de estacionamiento para una profundidad de excavación de 35 m dentro de un cajón formado por un muro diafragma estructural definitivo “llamado muro Milán” de 1.0 y 1.20 de espesor desplantado a 42 m profundidad. La cimentación, estará formada por 102 pilas tipo “Barrettes” desplantadas a una profundidad de 68 m por debajo del nivel calle. Dado que los sótanos se construirán por el método “Top-Down”, será necesario dejar ahogados dentro de las Barrettes perfiles metálicos que servirán como columnas para soportar las losas durante la construcción (figura 86).

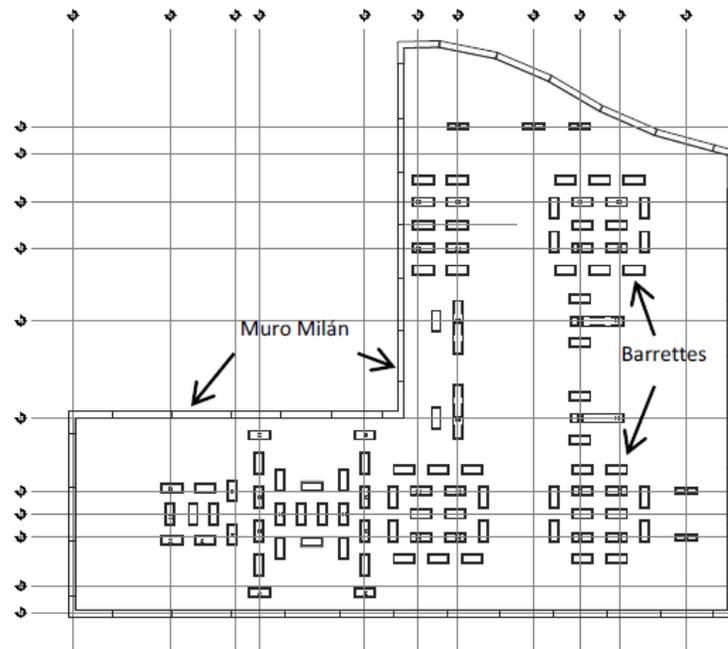


Figura 89.-Esquema Preliminar de la cimentación de la torre (CIMESA).

Como es bien sabido, la mayor parte de la Ciudad de México se encuentra asentada en suelos lacustres, se presenta la estratigrafía típica de la zona III (Zona del Lago), lugar donde se han llevado a cabo los trabajos de investigación que anteceden esta tesis. El predio en estudio se encuentra en la zona de Lago IIIa, con un coeficiente sísmico $C_s=0.40$. De acuerdo a la zonificación del Valle de México, está formada por la presencia de predominan grandes espesores de arcillas de alta compresibilidad con intercalaciones de arenas y limos volcánicos, a los que subyacen paquetes tobáceos que corresponden a la formación Tarango, constituidos por tobas limo-arenosas y areno-gravosas compactas.

Tabla 10.-Estratigrafía (CIMESA).

De (m)	A (m)	Descripción	e	W %	γ (t/m ³)	U (t/m ²)	C (t/m ²)	ϕ' (°)
0.00	0.30	Relleno	1.98	90.00	1.45	0.00	2.10	-
0.30	5.00	Costra superficial, Arcilla y limo poco arenoso	4.27	110.00	1.47	2.40	3.13	-
5.00	23.30	Serie arcillosa superior.-Arcilla con lentes de arena fina y ceniza volcánica.	4.91	365.00	1.23	13.85	12.30	-
23.30	26.00	Capa dura.Arenas y limos arenosos de consistencia rígida	1.17	89.50	1.71	25.66	-	27.90
26.00	31.20	Serie Arcillosa Inferior. Arcillas y limos arenosos de consistencia rígida con lentes de arena y ceniza volcánica	3.98	125.60	1.57	28.00	44.10	-
31.20	41.40	Arena fina,limos arcillosos de consistencia firmes	2.07	55.00	1.30	30.94	40.00	0.00
41.40	70.20	Depósitos profundos Arena fina,limos café verdoso	0.95	64.30	1.88	37.42	0.90	34.00

4.2.2. Prueba de carga

Se ejecutan pruebas de carga axial a compresión, para verificar las capacidades de carga y valores de asentamiento en pilas, de modo que se pueda validar el modelo de cálculo de éstas y su comportamiento. Esta verificación se realizó a través de la aplicación de cargas estáticas de compresión sobre pilas de 1.00 m de diámetro, desplantadas a -55 m de profundidad, llamadas “Pila 802” y Pila 902”, mediante cilindros hidráulicos apoyados contra un sistema de reacción conformado por un marco metálico anclado a pilas de reacción construidas para este fin, empleando los lineamientos de la norma internacional American Society for Testing and Materials (ASTM), empleando la norma ASTM D 1143 cargas estáticas de compresión “método D” que consiste en aplicar incrementos de carga de igual magnitud en intervalos de tiempo constantes de 30 min para tratar de alcanzar el 200% de la carga admisible.

4.2.3. Instrumentación de la Prueba

Con el fin de conocer el comportamiento de las pilas durante las pruebas se emplearon instrumentos para la medición de la carga, el asentamiento y las deformaciones unitarias. La instrumentación del cuerpo de las pilas se realizó con deformímetros de cuerda vibrante de dos tipos: “Sister bars” que se sujetarán al acero vertical (figura 90) y medirán las deformaciones unitarias del concreto y “Strain gages” que estarán adheridos en el acero vertical que medirán las deformaciones unitarias en el acero. Estos sensores se distribuirán a lo largo de las pilas en pares de modo que pueda registrarse la información necesaria en los puntos de interés indicados en los pares de proyecto. Todos los instrumentos de cuerda vibrante fueron conectados a una unidad de registro (“Datalogger”) (figura 91), la cual se programó para registrar una medida cada min.

Tabla 11.-Ubicación de sensores (Sister Bars)

Nivel	Pila 802	Pila 902
N-1	-1.00	-1.00
N-2	-6.00	-26.50
N-3	-24.00	-24.00
N-4	-26.50	-30.00
N-5	32.00	-35.00
N-6	39.00	-40.00
N-7	-46.00	46.00
N-8	-53.00	-53.00



Figura 90.-“Deformímetros sister-bar” (CIMESA).

Los asentamientos se midieron de tres formas distintas, con transductores de desplazamiento tipo “cuerda vibrante”, topografía convencional (nivel automático), y reglas metálicas e hilos en conjunto con reglas transparentes pegadas sobre espejos (figura 92).



Figura 91.-“Unidad de registro Datalogger (CIMESA).



Figura 92.- (a) Transductores de desplazamiento (b) Topografía convencional (CIMESA).

En la pila 902 se colocó un doble ademe metálico para representar a la zona que posteriormente ocuparán los sótanos, para esto se utilizaron dos tubos de acero concéntricos de 1,000 y 1,100 mm de diámetro interior respectivamente con el fin de eliminar la fricción que generaría el suelo en esa zona, colocados hasta una profundidad de -24.5 m (figura 93).

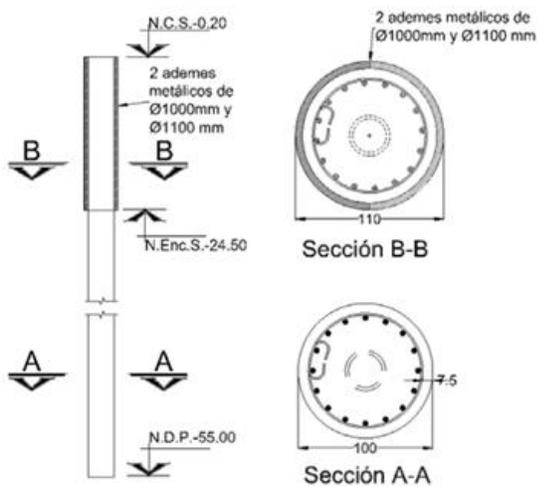


Figura 93.- Ademe metálico Pila 902 (CIMESA).

Tratamiento de Post-inyección

Dos semanas después de la construcción de las pilas se llevó a cabo un mejoramiento del contacto pila-suelo en la punta del elemento inyectando lechada a presión. Lo anterior se realizó por medio de tubos de acero de 2" y 4" de diámetro que se dejaron como reservación durante la construcción de los elementos (figura 94). El material inyectado consistió en una lechada agua: cemento: bentonita, más un aditivo reductor de agua de alto rango para mantenerla fluida.



Figura 94.-Tubos de reservación para post-inyección (CIMESA)

Sistema de reacción

Se muestra una vista frontal del sistema que se utilizará para la aplicación de las cargas sobre pilas de prueba. En las Pilas de reacción se dejarán ahogadas una serie de barras roscadas de alta resistencia tipo “DIWYDAG” para hacer la conexión de las pilas de reacción el marco. La cantidad y diámetro de estas barras depende de la magnitud de la carga a transmitir a cada elemento de reacción (figura 9534).

Para la aplicación de la carga se emplearon 3 gatos hidráulicos con capacidad de 1000 t (9810 kN), donde para cada incremento se realizó accionando una bomba eléctrica. Se tomó como criterio de falla de la pila la carga para la cual el asentamiento fuera igual al 15% de diámetro de la pila.



Figura 95.- a) Cilindros Hidráulicos (b) Bomba Eléctrica (CIMESA)

4.2.4. Relación carga-asentamiento

Se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de carga en pilas 802 y 902, relación carga-asentamiento, distribución de cargas a diferentes profundidades de la pila y carga ultima.

Pila 802. Se llevaron a cabo dos ciclos de carga – descarga. En el primero se aplicaron 14 incrementos para llegar a una carga máxima de 1,225 t con un asentamiento de 81 mm. La carga máxima se sostuvo 1 hr, después de la cual se descargó en ocho decrementos y se tuvo un asentamiento residual de 67 mm. En el segundo ciclo, nuevamente se aplicaron 14 incrementos de carga alcanzando 1,520 t y un asentamiento acumulado de 172 mm. La carga se sostuvo 1 hr, después de la cual se descargó en siete decrementos al final de los cuales se tuvo un asentamiento residual de 158 mm. El criterio de falla se cumplió con una carga de 1,428 t (Figura 85).



OBRA: REFORMA 432
Prueba de carga estática de compresión en Pila 802
Curva Carga vs Asentamiento

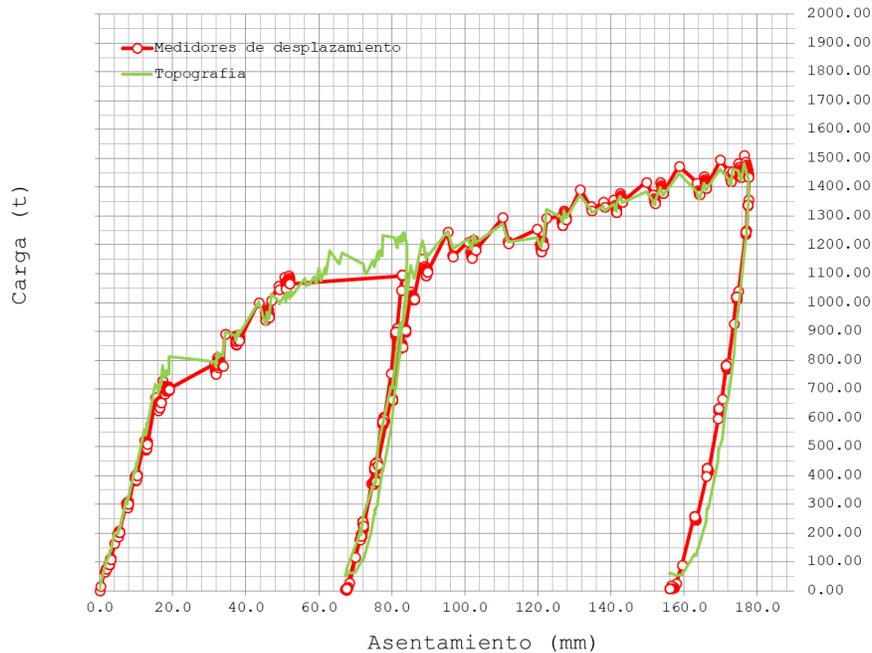


Figura 96.-Prueba de carga estática a compresión en Pila 802 (CIMESA).

Pila 902. A esta pila se le realizaron dos pruebas. En la primera solo se hizo un ciclo carga-descarga, por medio de 12 incrementos, para llegar a una carga máxima de 580 t con un asentamiento de 161 mm. La carga máxima se sostuvo 1 hr, al final de la cual se descargó en seis decrementos, teniendo un asentamiento residual de 151 mm (figura 86). La segunda prueba se realizó un mes después, en esta se hicieron dos ciclos de carga–descarga. En el primero se aplicaron 15 incrementos para llegar a una carga máxima de 780 t con un asentamiento de 62 mm. La carga máxima se sostuvo 1 hr, después de la cual se descargó en 11 decrementos, teniendo un asentamiento residual de 71 mm. En el segundo ciclo se aplicaron ocho incrementos de carga hasta alcanzar 1,190 t y un asentamiento acumulado de 223 mm. La descarga se hizo en 11 decrementos al final de los cuales se tuvo un asentamiento residual de 207 mm. El criterio de falla se cumplió para una carga de 1,080 t. La realización de las dos pruebas con un espacio de tiempo de un mes muestra un claro incremento en la capacidad de carga (figura 97).

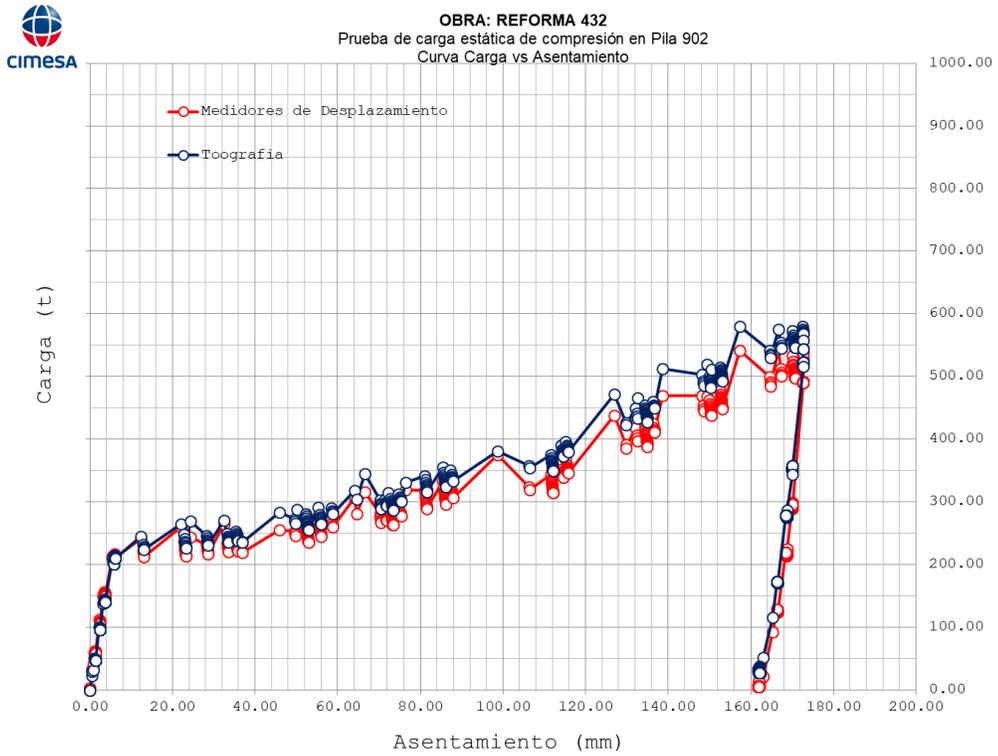


Figura 97.-Prueba de carga estática de compresión Pila 902- Prueba 1 (CIMESA).

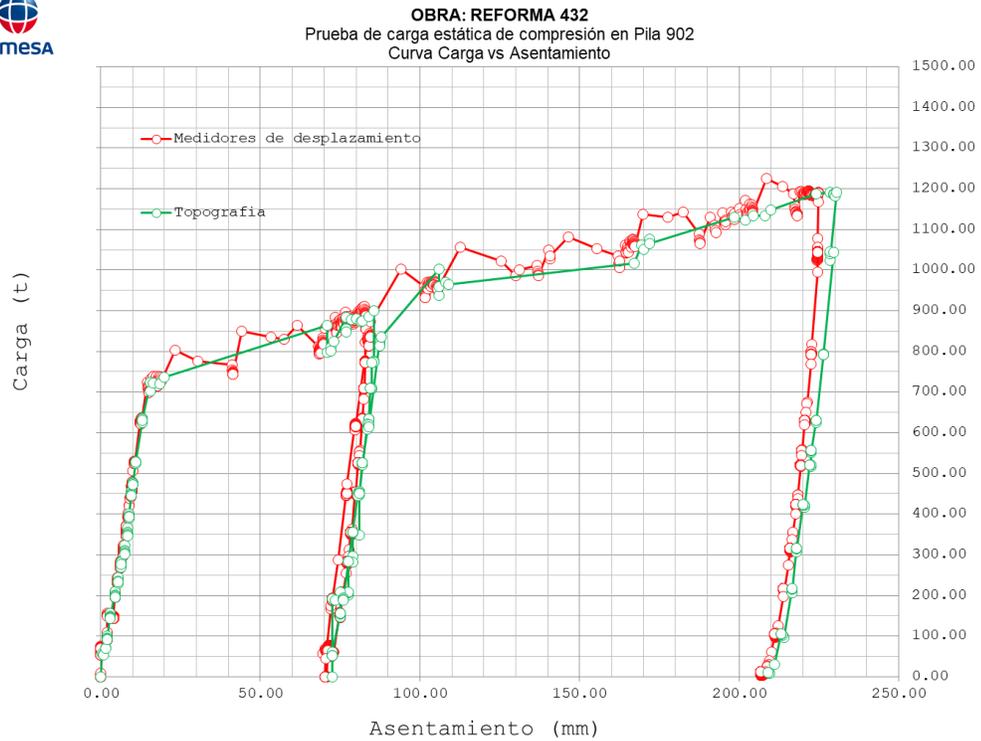


Figura 98.-Prueba de carga estática de compresión Pila 902- Prueba 2 (CIMESA).

4.2.5. Comportamiento en el cuerpo de la pila 802

La figura 99 muestra la historia de fuerzas actuantes en la pila en los diferentes niveles de instrumentación. Se presenta la evolución de las fuerzas en la pila para cada nivel de instrumentación, valores que son congruentes con la aplicación de las cargas en la cabeza de la pila.

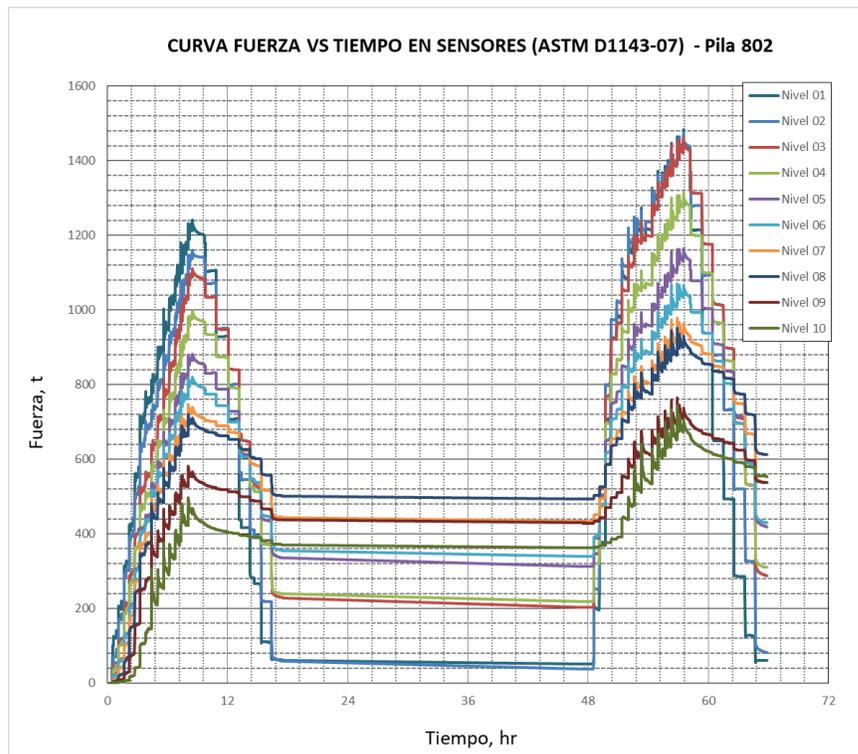


Figura 99.-Grafica fuerza - Tiempo en pila 802

Pila 802. Se graficó una curva de distribución de carga para cada incremento. Se observa que hasta el quinto incremento que corresponde a una carga de 560 t, prácticamente la totalidad es tomada por fricción en el fuste. Es claro que en los primeros 24 m, donde se ubica la frontera entre la fase arcillosa superior (FAS) y la primera capa dura (CD) la transmisión de carga al suelo fue muy poca, siendo cada vez más evidente en los últimos incrementos de carga, donde la carga se transmitió íntegramente desde la cabeza hasta la frontera mencionada anteriormente. Por otra parte, por debajo de los 24 m existe una mayor capacidad por fricción que se manifiesta como una disminución paulatina de la fuerza conforme nos acercamos a la punta. En el último incremento de carga (1428 t), la pila toma una carga de punta de 730 t. La figura 89 muestra la distribución de carga de la pila 802 en función de la profundidad.

“Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México”

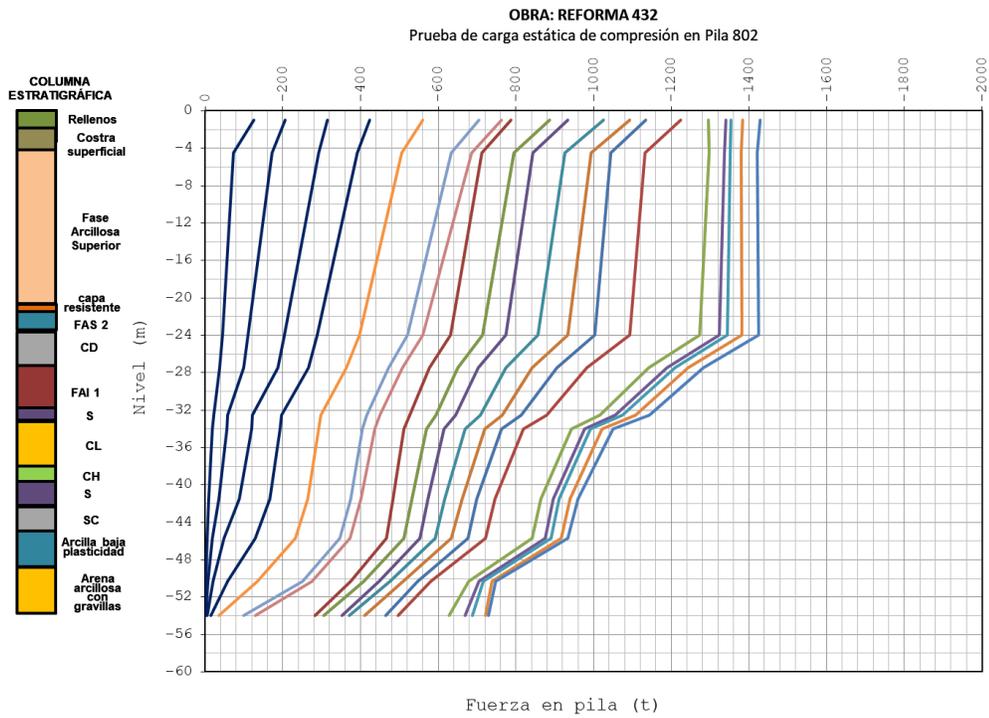


Figura 100.-Curva de distribución de carga en Pila 802 (CIMESA)

Se graficó una curva descarga para cada decremento como valor inicial el día de la prueba. Se observa que la fricción desarrollada en el cuerpo de la pila, ahora trabaja en sentido opuesto en sentido al de la rama de carga, es suficiente para impedir que la reacción alcanzada por la punta se descargue. Se grafica una gráfica con base a los incrementos solicitados (figura 101).

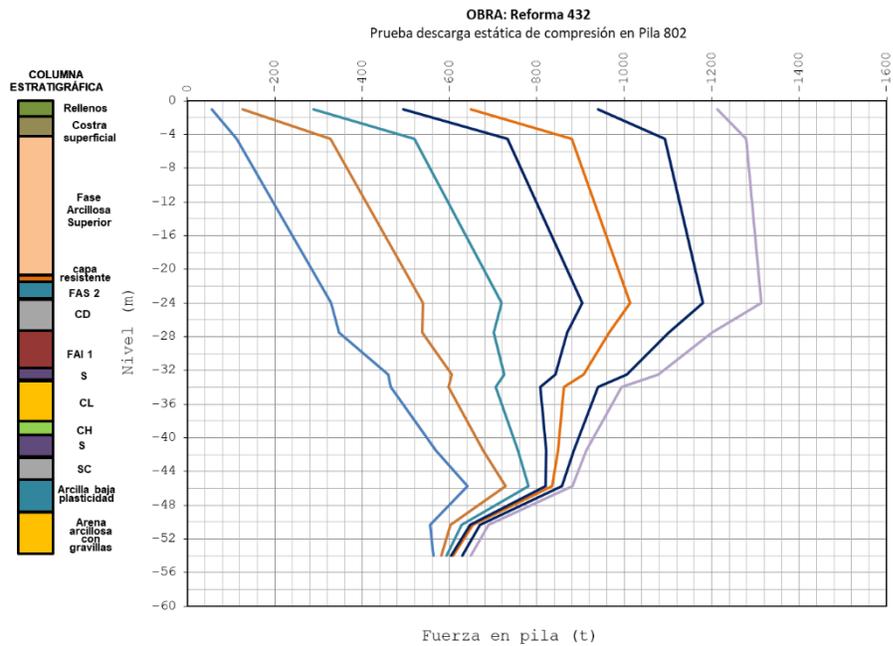


Figura 101.-Gráfica descarga vs profundidad pila 802

En la interacción pila-suelo con base a la distribución de carga con la profundidad, se determinó el esfuerzo cortante (f_s) desarrollado en el fuste del elemento entre secciones instrumentadas. (102,110).

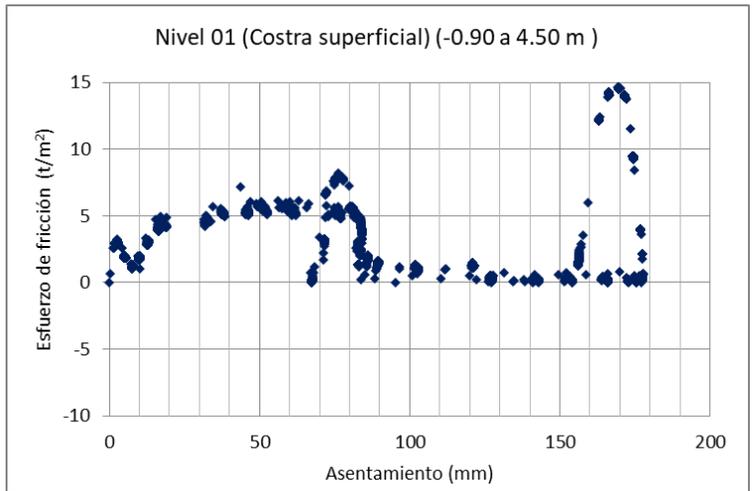


Figura 102.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Costra Superficial pila 802

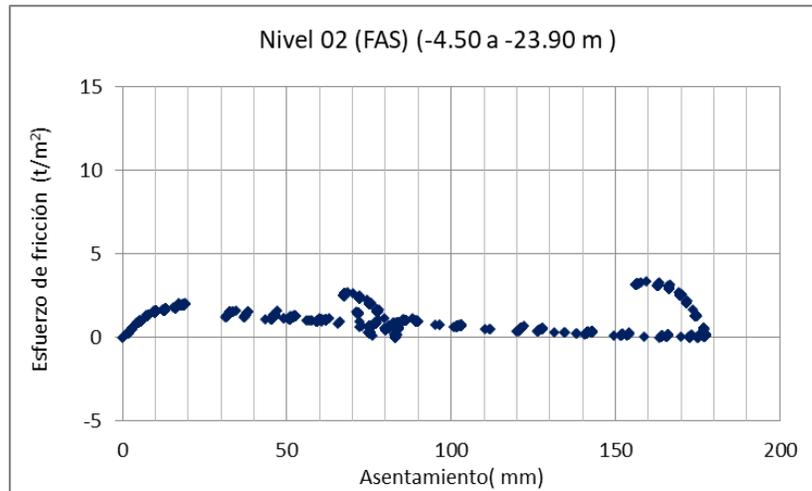


Figura 103.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Fase Arcillosa Superior Pila 802

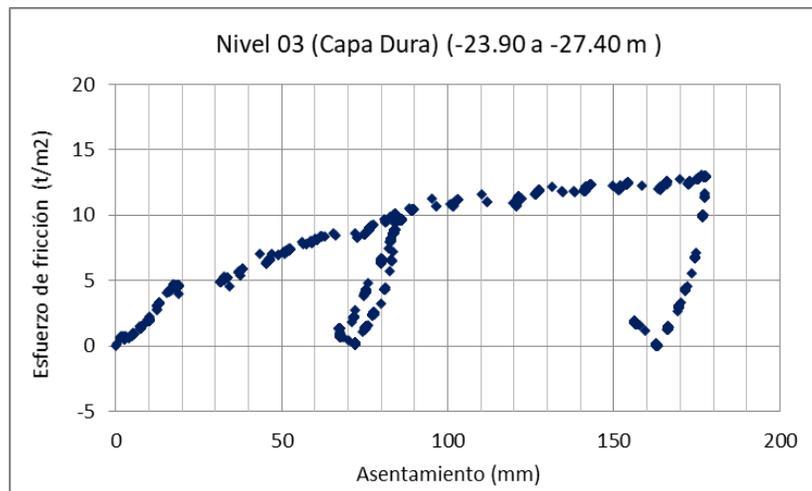


Figura 104.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Capa Dura Pila 802

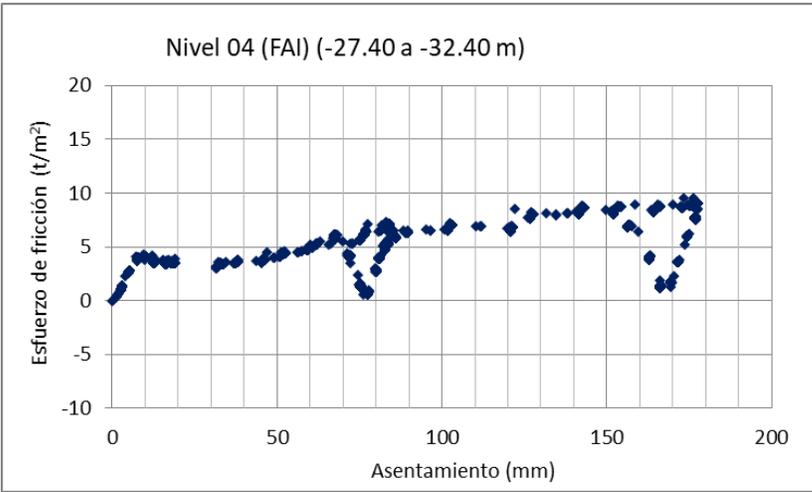


Figura 105.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Fase Arcillosa Inferior Pila 802

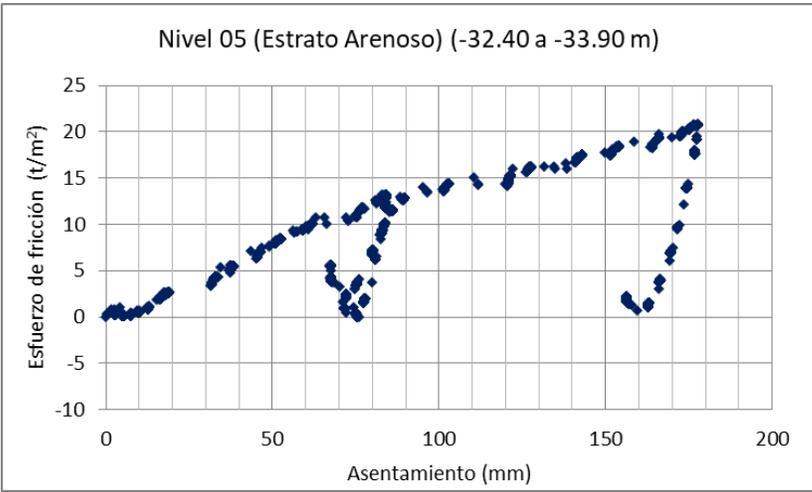


Figura 106.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Estrato Arenoso Pila 802

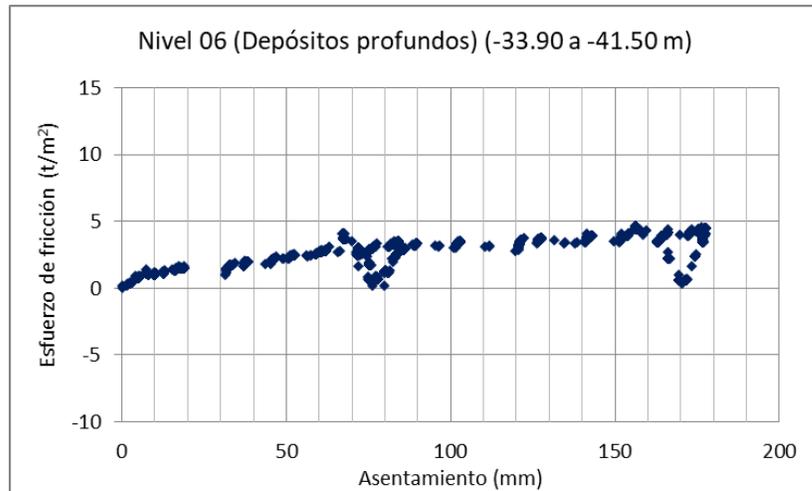


Figura 107.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos Pila 802

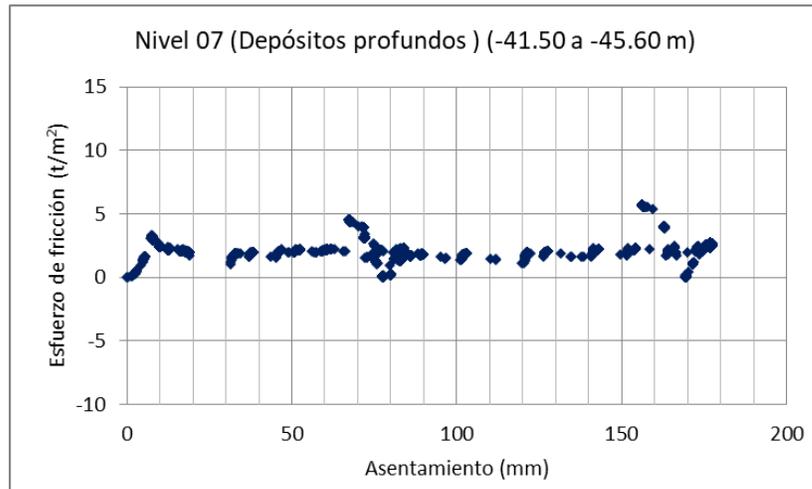


Figura 108.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos Pila 802

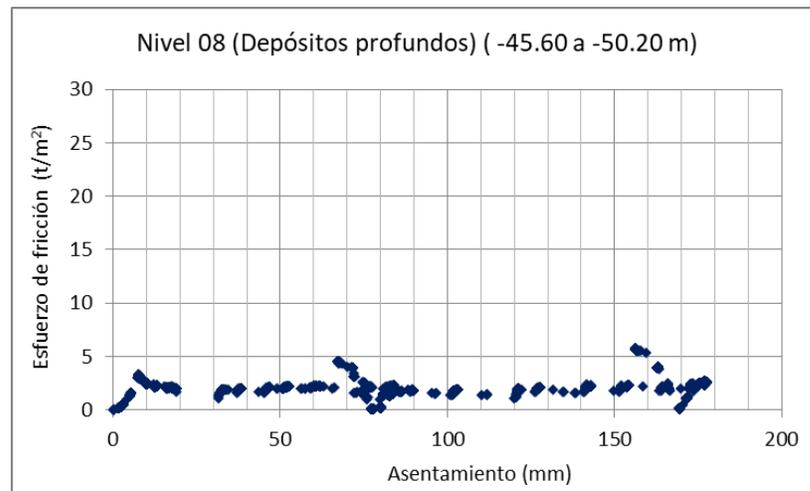


Figura 109.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos Pila 802

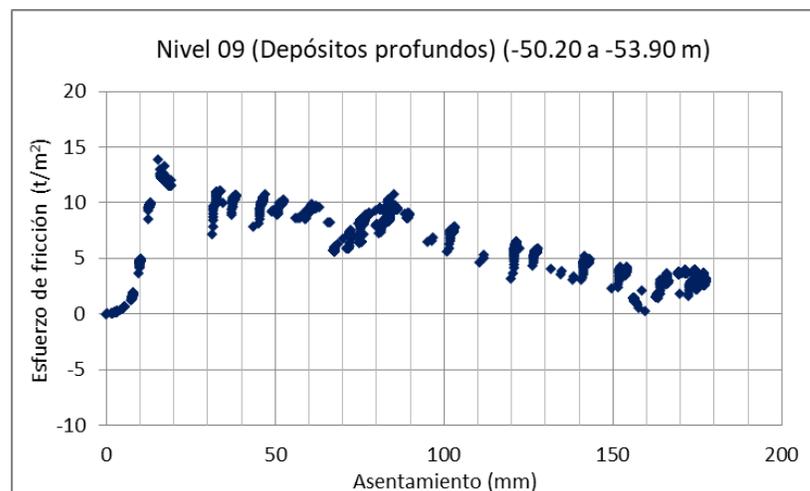


Figura 110.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos Pila 802

Los depósitos arcillosos muestran un aporte menor en el fuste; aporte el cual no se puede emplear para el diseño final; por el proceso de excavación a ejecutar por los cajones de estacionamiento que formaran parte del diseño. En estratos arenosos es representativo el aporte de 30 t / m² para desplazamientos cortos, aporte el cual alcanzo su límite por fuste.

Estimación de la capacidad última

Se emplearon dos metodologías para estimar la capacidad última de las pilas de prueba. La primera debida a Chin (Fellenius 1980), en la cual se asume que la curva carga-asentamiento tiene una forma hiperbólica cuando la carga aplicada está próxima a la de falla. La segunda, basada el criterio de Brinch Hasen 90 % de la capacidad de carga ultima, en el cual se busca modelar el comportamiento carga-asentamiento. Las curvas de estimación de carga asentamiento para los métodos propuestos dan resultados similares. Se tiene un ajuste aceptable de dichas curvas con relación a los datos de campo. En un caso la carga asintótica estaría alrededor de las 1450 t y 1305 t, sin embargo, este dato es de poca utilidad ya que el asentamiento en ese momento es de 250 mm; demasiado para fines de diseño (figura 111)

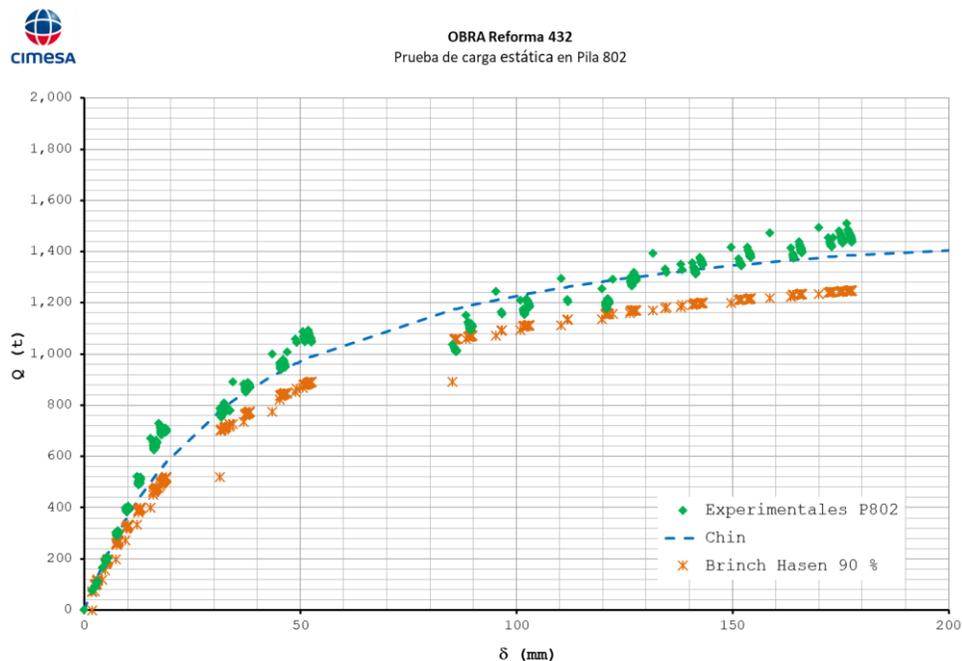


Figura 111-Curva de estimación de Carga Última en Pila 802 (CIMESA).

La figura 114 muestra la historia de fuerzas actuantes en la pila 902 en los diferentes niveles de instrumentación. Se presenta la evolución de las fuerzas en la pila para cada nivel de instrumentación, valores que son congruentes con la aplicación de las cargas en la cabeza de la pila.

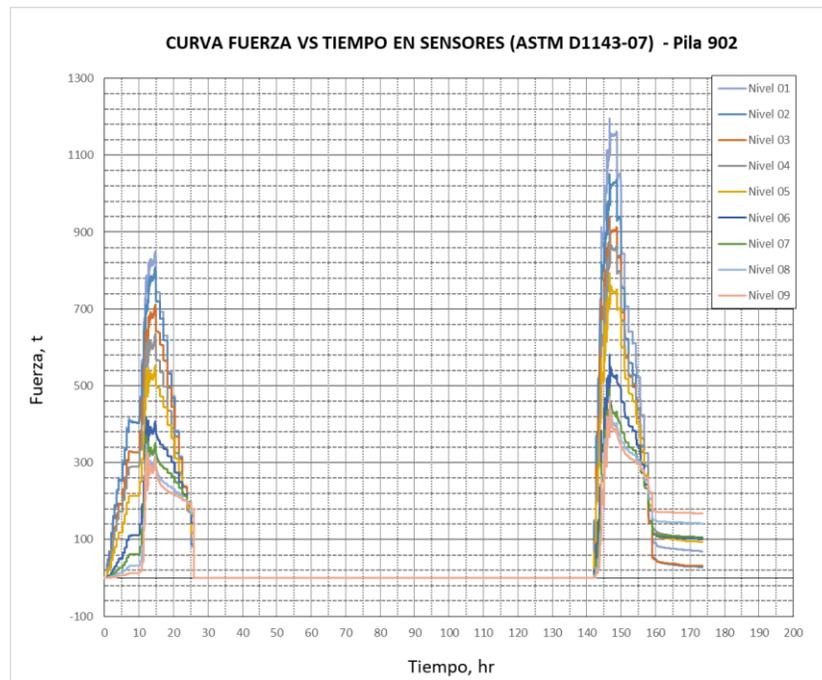


Figura 112.-Grafica fuerza - Tiempo en pila 902

4.2.6. Comportamiento en la pila 902

Pila 902. Al igual que en el caso anterior se graficó una curva de distribución de carga para cada incremento. Ahora se observa que en el cuarto incremento que corresponde a una carga de 211 t, la totalidad es tomada por fricción en el fuste (figura 115). Es aún más claro que en los primeros 24 m donde se ubica la frontera entre la fase arcillosa superior (FAS) y la primera capa dura (CD) la transmisión de carga al suelo fue prácticamente nula, debido al doble ademe colocado que impide el contacto con el suelo por lo que la carga se transmitió íntegramente desde la cabeza hasta la frontera mencionada anteriormente. Por debajo del doble ademe se nota la capacidad por fricción que se manifiesta como una disminución paulatina de la fuerza conforme nos acercamos a la punta. En el último incremento de carga (530 t), la pila toma una carga de punta de 311 t.

“Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México”

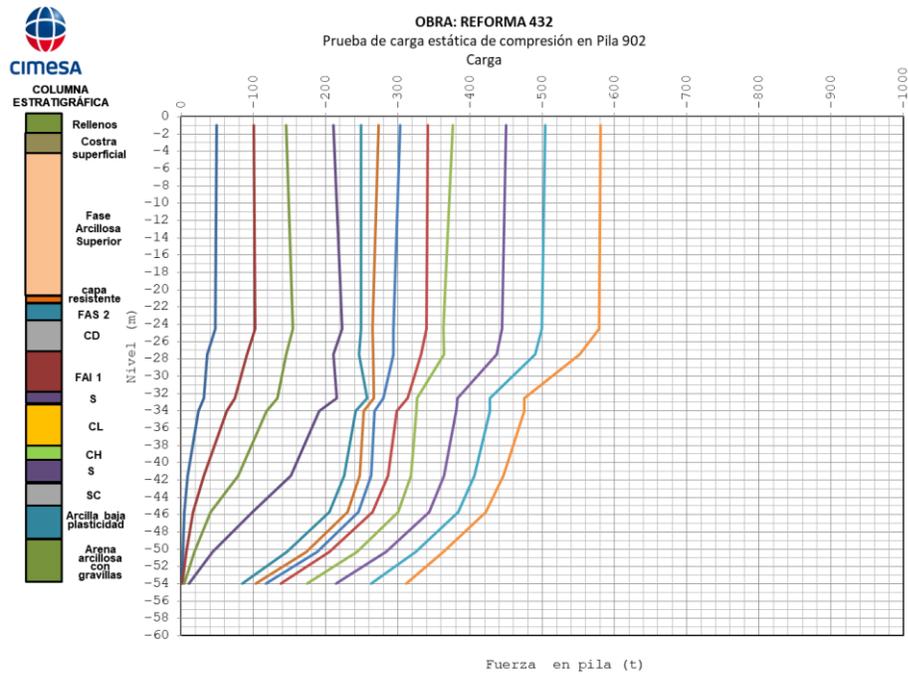


Figura 113.-Curva de distribución de carga en Pila 902 –prueba 1 (CIMESA).

Para la prueba 2 se dibujó también una curva de distribución de carga para cada incremento. Aquí no es hasta el cuarto incremento que corresponde a una carga de 724 t que comienza a tomarse carga por punta. Y no es sino por debajo del ademe metálico que se manifiesta la capacidad por fricción como una disminución de carga paulatina de la fuerza conforme se acerca a la punta. En el último incremento de carga (1190 t), la pila toma una carga de punta de 450 t. La figura 116 muestra la distribución de carga de la pila 902 en función de la profundidad de la prueba 2.

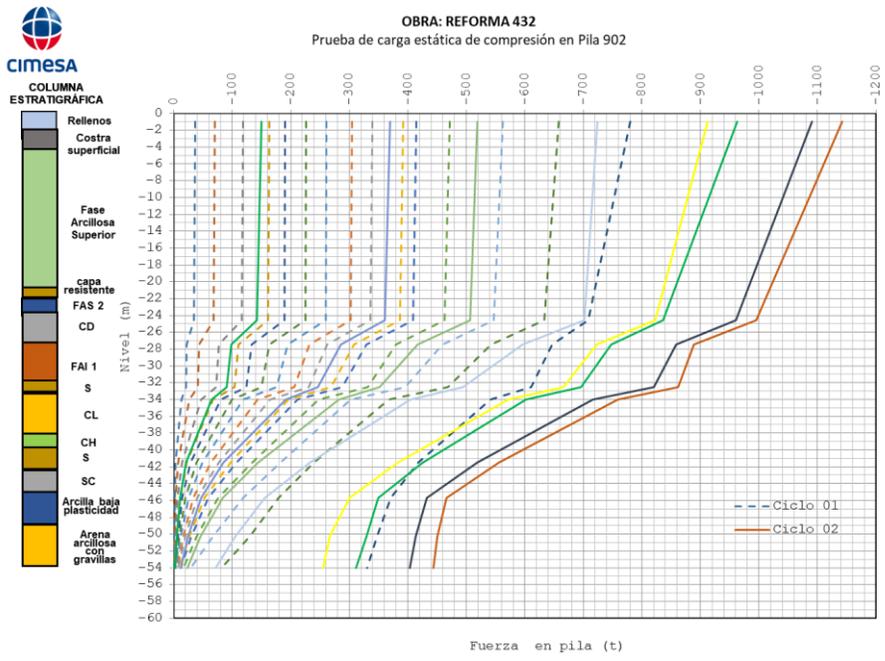


Figura 114.-Curva de distribución de carga en Pila 902 –prueba 2 (CIMESA).

Se graficó una curva descarga vs profundidad para cada decremento como valor inicial el día de la prueba. Se observa que la fricción desarrollada en el cuerpo de la pila, ahora trabaja en sentido opuesto en sentido al de la rama de carga, es suficiente para impedir que la reacción alcanzada por la punta se descargue manteniendo una carga de 150 t (figura 117).

“Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México”

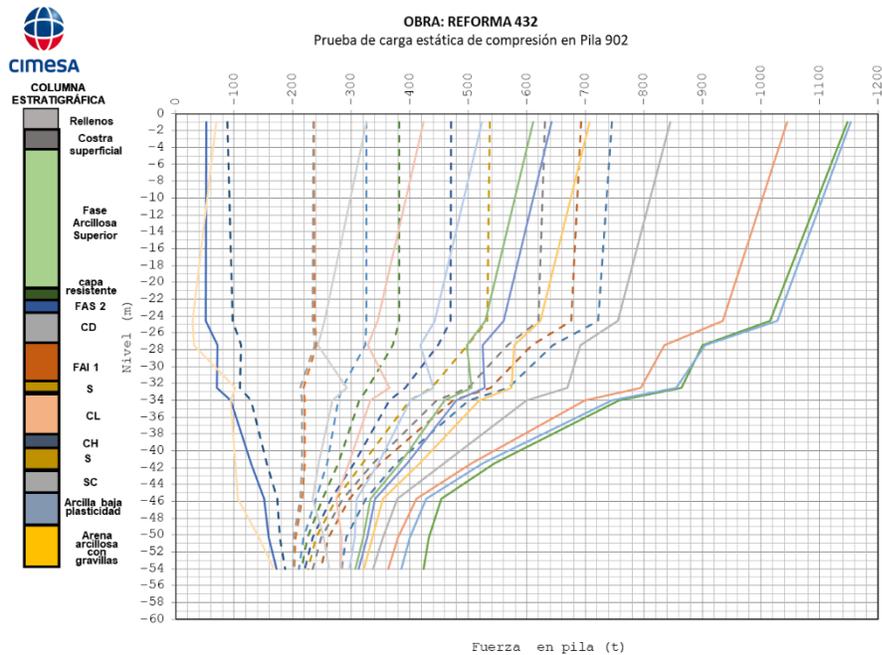


Figura 115.-Curva de descarga en Pila 902 –prueba 2 (CIMESA).

En la interacción pila-suelo con base a la distribución de carga con la profundidad, se determinó el esfuerzo cortante (f_s) desarrollado en el fuste del elemento entre secciones instrumentadas. Para los estratos arcillosos muestran un comportamiento elástico-plástico, mostrando su máximo aporte a los primeros incrementos de carga, llegando a su máximo aporte por fuste antes de llegar a la máxima carga de prueba (figura 118-124).

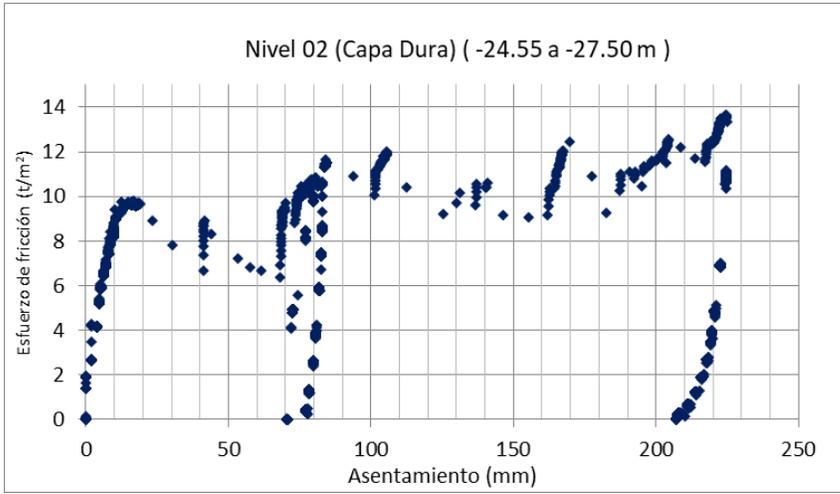


Figura 116.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Capa Dura Pila 902 (Ambos ciclos)

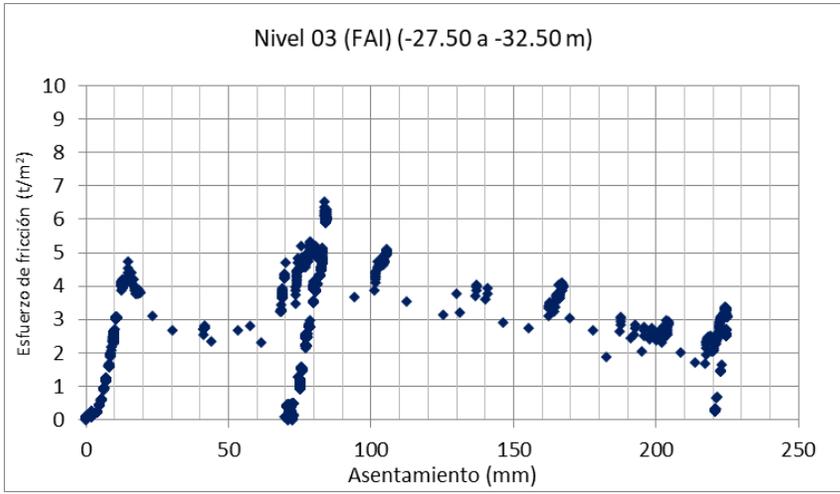


Figura 117.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Fase Arcillosa Inferior 902 (Ambos ciclos)

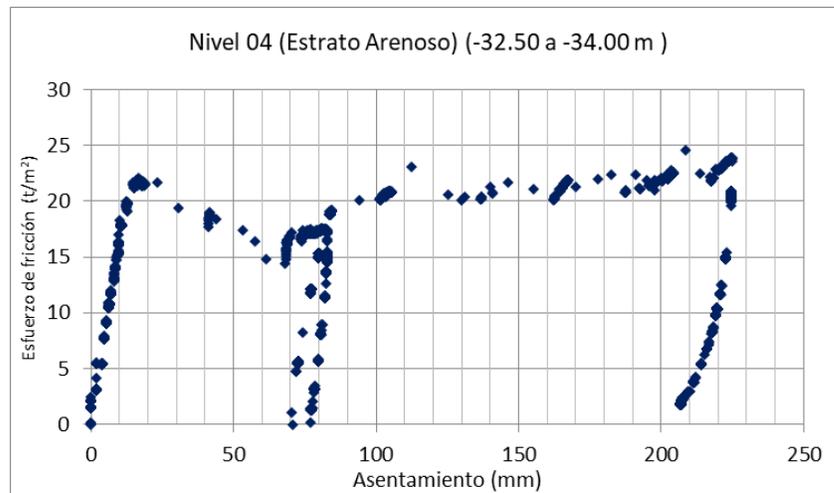


Figura 118.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Estrato Arenoso 902 (Ambos ciclos)

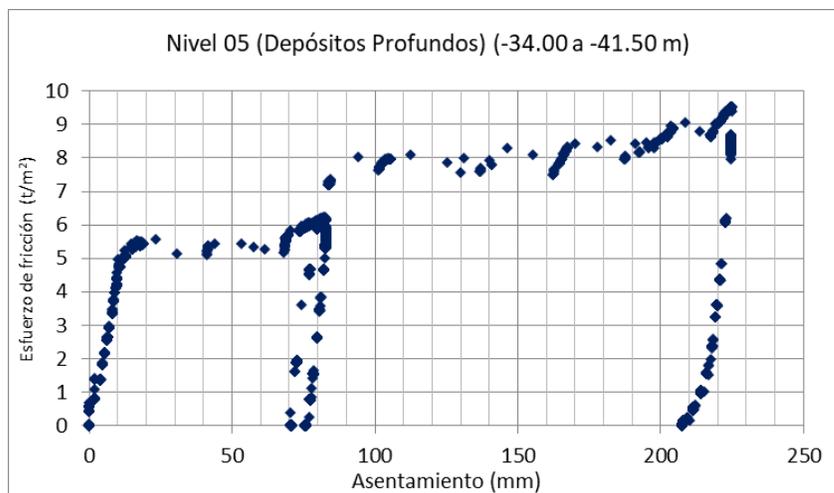


Figura 119.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos 902 (Ambos ciclos)

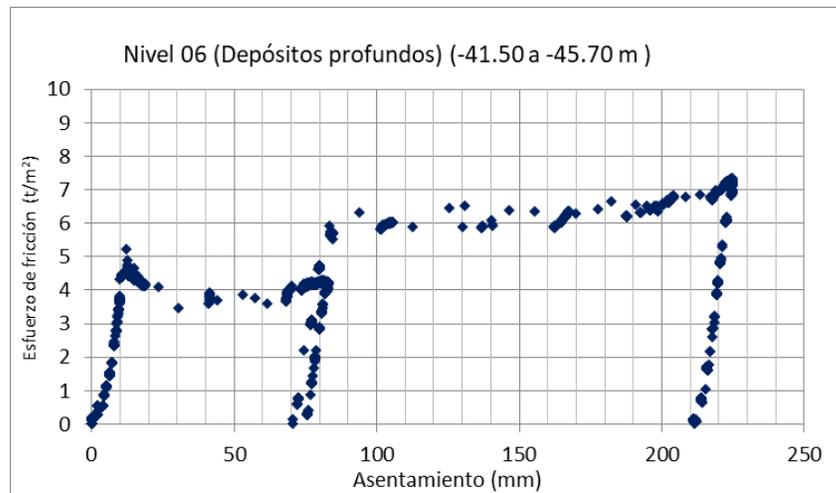


Figura 120.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos 902 (Ambos ciclos)

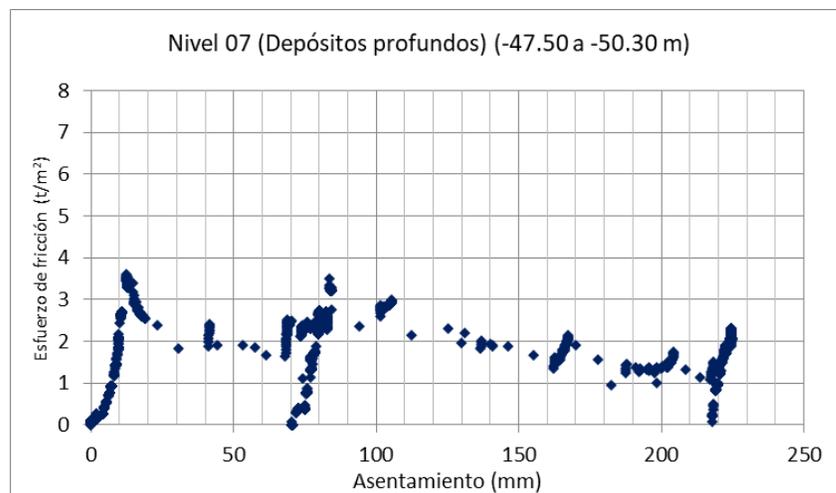


Figura 121.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos 902 (Ambos ciclos)

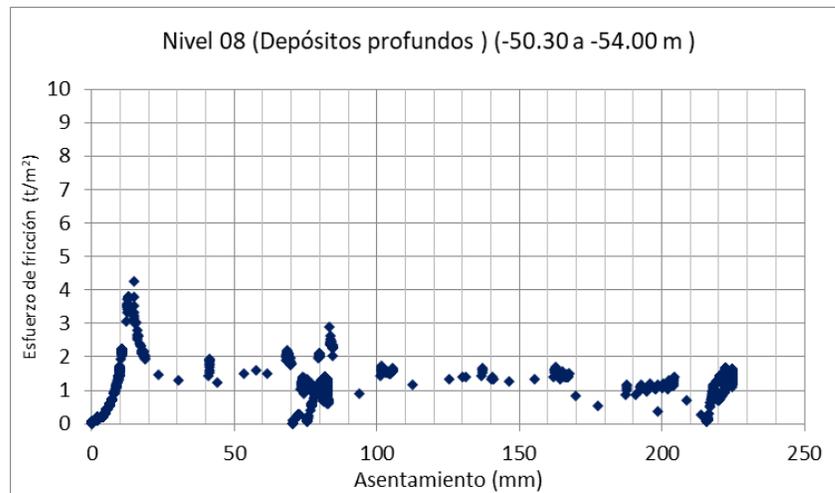


Figura 122.-Gráfica esfuerzo de fricción – asentamiento, Depósitos Profundos 902 (Ambos ciclos)

Estimación de la capacidad última

Se emplearon dos metodologías para estimar la capacidad última de las pilas de prueba. La primera debida a Chin (Fellenius 1980), en la cual se asume que la curva carga-asentamiento tiene una forma hiperbólica cuando la carga aplicada está próxima a la de falla. La segunda, basada el criterio de Brinch Hasen 90 % de la capacidad de carga ultima, en el cual se busca modelar el comportamiento carga-asentamiento. Pila 902 (prueba 1). No obstante, carece de un buen ajuste en la rama elástica, sobreestimando los asentamientos y subestimando la carga. La carga asintótica estaría alrededor de las 380 t, para un asentamiento de 250 mm. Pila 902 (prueba 2). Las curvas de estimación de carga-asentamiento para los métodos propuestos también dan resultados muy similares (figura 99). No obstante, también se carece de un buen ajuste en la rama elástica, sobreestimando los asentamientos y subestimando la carga. Posteriormente en la rama plástica se sobre estima la carga salvo en la cercanía a la carga asintótica, la cual estaría alrededor de las 1180 t, para un asentamiento de 250 mm (figura 125).



OBRA Reforma 432
Prueba de carga estática en Pila 902

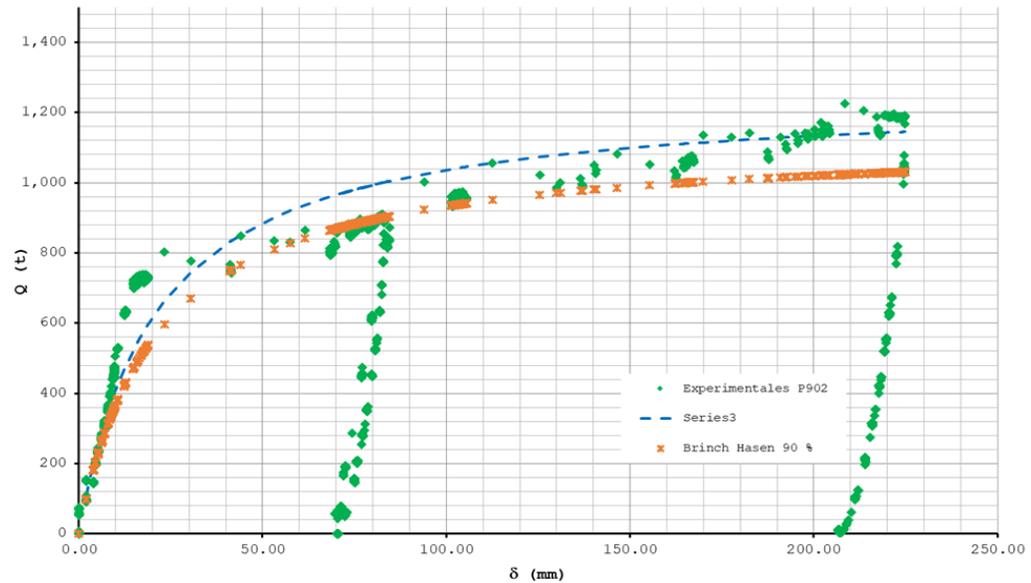


Figura 123.-Curva de estimación de Carga Última en Pila 902 ambos ciclos.

En la interacción pila-suelo con base a la distribución de carga con la profundidad, es posible determinar el esfuerzo cortante (f_s) desarrollado en el fuste del elemento entre secciones instrumentadas. La diferencia de carga obtenida entre dos secciones (Niveles de sensores) dividida entre el área lateral de la pila de prueba, es el esfuerzo cortante del fuste (figura 100).

Capítulo 5. Calculo de capacidad de carga por métodos analíticos y revisión aplicando el Reglamento de Construcciones para la Ciudad de México.

En esta sección se presentan el análisis de capacidad de carga por punta (C_p) y adherencia por fuste (C_f) para las diferentes pilas de prueba empleando los criterios de Zeevaert, Burland y Meyerhof.

Para el caso del cálculo de adherencia lateral, (C_f), para suelos cohesivos o friccionantes se realizó la revisión con los lineamientos descritos en las Normas técnicas Complementarias 2017 empleando las ecuaciones descritas en el capítulo tres. Para el cálculo de la fricción negativa generada en las pilas se desprecia ya que dichas pruebas se llevaron a su ejecución al segundo mes de verlas construido, por lo cual la fricción negativa generada al cabo de 60 días es mínima por lo cual se desprecia en el cálculo de este trabajo.

Para el caso del cálculo de resistencia por punta se optó por utilizar la ecuación de capacidad de carga para suelos friccionantes en ambos cálculos analíticos.

5.1. La Fragua

5.1.1. Calculo de capacidad de Capacidad de carga Be Grand

A continuación, se presenta el cálculo analítico de capacidad de carga en pilas empleando las propiedades geotécnicas del sitio, para el caso de Be Grand de acuerdo con las ecuaciones de capacidad de carga mencionadas en el capítulo tres mediante los criterios de Zeevaert, Burland y Meyerhof. Se empleo el método de Burland o método para el cálculo de fricción en el fuste.

Tabla 12.-Capacidad de carga por aporte en el fuste y punta empleando el cálculo analítico de Zeevaert, Burland y Meyerhof en pila desplantada a 70 m LT-1.

Criterio	Elemento	D (m)	C_p (Tn):	C_f (Tn)	Q_t (Tn)
Zeevaert	Pila LT-1	1.00	2372.13	2381.42	4753.55
Meyerhof	Pila LT-1	1.00	3890.19	3109.39	6999.58
Prueba de Carga	Pila LT-1	1.00	60	1330.6	1390.60

Tabla 13.- Capacidad de carga por aporte en el fuste y punta empleando el cálculo analítico de Zeevaert, Burland y Meyerhof en pila desplantada a 50 LT-2.

Criterio	Elemento	D (m)	Cp (Tn):	Cf (Tn)	Qt (Tn)
Zeevaert	Pila LT-2	1.00	1650.08	910.56	2560.64
Meyerhof	Pila LT-2	1.00	3024.29	1269.25	4293.54
Prueba de Carga	Pila LT-2	1.00	434.00	778.22	1212.22

Se realizó la revisión de capacidad de carga mediante el Reglamento de Construcción y sus Normas Técnicas Complementarias (NTCDCC 2017) se obtuvieron las siguientes capacidades las cuales fueron afectadas por un factor de reducción unitario ($F_r=1$) en pilas desplantadas a -70.0 m y -50.0 m de profundidad (tabla 14,15) empleando las ecuaciones de capacidad de carga por adherencia lateral en suelos cohesivos y capacidad por punta en suelos friccionantes.

Tabla 14.-Revisión de capacidad de carga axial mediante las NTCDCC 2017 en pila desplantada a 70 m de profundidad LT-1.

Criterio	Elemento	D (m)	Cp (Tn):	Cf (Tn)	Qt (Tn)
NTCDCC 2017	Pila LT-1	1.00	1107.08	1673.23	2780.31

Tabla 15.-Revisión de capacidad de carga axial mediante las NTCDCC 2017 en pila desplantada a 50 m de profundidad LT-2.

Criterio	Elemento	D (m)	Cp (Tn):	Cf (Tn)	Qt (Tn)
NTCDCC 2017	Pila LT-2	1.00	961.60	755.14	1716.74

Se puede observar en la tabla 12 que existe una importante diferencia entre la capacidad de carga obtenida en la prueba de carga a 70 m de profundidad de 1390 t y la obtenida mediante el empleo de los diferentes criterios. Esta importante diferencia es el resultado del aporte de capacidad en la punta (C_p) obtenido en la prueba de carga que fue de 60 t con una diferencia del empleo de los métodos empleados que van de hasta cuatro veces el resultado obtenido.

Para las capacidades de carga axial mostradas en la tabla 13 obtenidas de la prueba de carga a 50 m de profundidad de 1212.22 t y las obtenidas mediante Zeevaert la capacidad por fuste está muy cerca a la obtenida en la prueba de carga.

La revisión realizada para capacidad de carga por adherencia y punta empleando los lineamientos del Reglamento de Construcción y sus Normas Técnicas Complementarias 2017 no fue afectada por el factor de resistencia correspondiente, por lo cual faltaría realizar las sollicitaciones correspondientes.

5.2. Reforma 432

5.1.2. Cálculo de Capacidad de carga Reforma 432

A continuación, se presenta el cálculo analítico de capacidad de carga en pilas empleando las propiedades geotécnicas del sitio, para el caso de Reforma 432 de acuerdo con el cálculo analítico de capacidad de carga empleando las ecuaciones del capítulo tres por los diferentes criterios de Zeevaert, Burlad y Meyerhof.

Tabla 16.-Capacidad de carga por aporte en el fuste y punta empleando el cálculo analítico de Zeevaert, Burland y Meyerhof en pilas desplantadas a 55 m sin ademe metálico pila 802.

Criterio	Elemento	D (m)	Cp (Tn):	Cf (Tn)	Qt (Tn)
Zeevaert	Pila 802	1.00	1984.35	894.78	2879.13
Meyerhof	Pila 802	1.00	2831.19	1578.84	4410.03
Prueba de Carga	Pila 802	1.00	729.10	698.90	1428.00

Tabla 17.-Capacidad de carga por aporte en el fuste y punta empleando el cálculo analítico de Zeevaert, Burland y Meyerhof en pila desplantada a 55 m con ademe metálico pila 902.

Criterio	Elemento	D (m)	Cp (Tn):	Cf (Tn)	Qt (Tn)
Zeevaert	Pila 902	1.00	1984.35	790.84	2775.19
Meyerhof	Pila 902	1.00	2831.19	1304.88	4136.07
Prueba de Carga	Pila 902	1.00	443.33	636.67	1080.00

Se realizó la revisión de capacidad de carga mediante el Reglamento de Construcción y sus Normas Técnicas Complementarias (NTCDCC 2017) se obtuvieron las siguientes capacidades las cuales fueron afectadas por un factor de reducción unitario ($F_r=1$) en pilas desplantadas a -55 m de profundidad (tabla 18,19).

Tabla 18.-Revisión de capacidad carga axial por aporte en el fuste y punta en pila 802 desplantada a 55 m sin ademe metálico.

Criterio	Elemento	D (m)	Cp (Tn):	Cf (Tn)	Qt (Tn)
NTCDCC 2017	Pila 802	1.00	1565.45	801.83	2367.27

Tabla 19.-Revisión de capacidad de carga por aporte en el fuste y punta en pila 902 desplantada a 55 m de profundidad con ademe metálico.

Criterio	Elemento	D (m)	Cp (Tn):	Cf (Tn)	Qt (Tn)
NTCDCC 2017	Pila 902	1.00	1565.45	619.52	2184.96

En la tabla 16 se muestran las capacidades de carga axial obtenida en la prueba de carga de la pila 802 del orden de 1428 t, el aporte de capacidad en la punta (C_p) fue de 729 t,

existiendo una importante diferencia de aproximadamente tres veces con respecto a los criterios empleados en el cálculo analítico. Empleando el cálculo analítico de las normas se Revisión de capacidad de carga cabe mencionar que la capacidad de carga obtenida en esta prueba no se utilizó doble ademe metálico como en la pila 902, obteniendo una capacidad por adherencia lateral (C_f) de 182 t obtenida en los primeros estratos conformados por depósitos de arcilla. La capacidad de carga axial obtenida de la prueba de carga y NTCDCC 2017 existe una diferencia mínima entre un resultado u otro.

En la tabla 18 y 19 de se muestran las capacidades de carga axial de las pilas 802 y 902 empleando los lineamientos del Reglamento de Construcción y sus Normas Técnicas Complementarias 2017.

Capítulo 6. Impacto de pruebas de carga en el diseño de cimentaciones profundas.

En este capítulo se mencionan como los resultados obtenidos en prueba de carga son de importancia y tienen un impacto en el diseño final de la cimentación de proyectos. Hoy en día el diseño de cimentaciones de proyectos cierta envergadura se ven en la necesidad de minimizar cualquier tipo de riesgos por lo que se busca incluir en el diseño de las cimentaciones incluir cierto porcentaje de pruebas de carga y no esperar a encontrar un problema o buscar una alternativa de emergencia para implementar la ejecución de pruebas de carga estática axial. Los proyectos actuales de complejidad y envergadura se ven en la necesidad de absorber los costos generados por la implementación de pruebas de carga con el propósito de obtener información valiosa al proyectó y eliminar las hipótesis supuestas para el diseño completo de la cimentación.

6.1. La Fragua

6.1.1. Diseño de cimentación

El proyecto Be Grand “La Fragua” que se conformaba en un diseño preliminar de 50 niveles y ocho sótanos, un Muro Milán desplantado a 35 y 40 m de profundidad de 0.80 m de espesor, con barrettes de dimensiones diversas desplantados a 50 m y 70 m de profundidad empleando el sistema constructivo “Top-Down”. Con base al proceso constructivo empleado de dos pilas de prueba de carga llamadas LT-1 y LT2 y los resultados obtenidos de las pruebas, tuvo un impacto en el diseño final de la cimentación.

El método empleando de la norma ASTM 1143 cargas estáticas de compresión “método D” y el proceso constructivo empleado en la construcción de pilas de prueba de carga a 70 m y 50 m de profundidad, son factores que influyes directamente en los resultados obtenidos en la prueba de carga de ambas pilas.

Al analizar los resultados obtenidos teóricamente de capacidad de carga y los obtenidos en las pruebas se observó que ambas capacidades difieren uno del otro, como se observa en la tabla 20.

Tabla 20.-Capacidades de carga última esperada de proyecto y obtenida en pruebas de carga “La Fragua”

Capacidad de Carga Última Axial			
	Prueba de Carga LT-1	Prueba de Carga LT-2	Proyecto
C_p (Tn/m ²):	60.0	434.0	800.0
C_f (Tn/m ²)	34.00	42.00	12.50

Las diferencias de cargas esperadas de proyecto, se deben básicamente por 3 factores:

- 1.-Disminución de carga por posible esbeltez de pila con base a la profundidad de desplante (aumentar el diámetro de elementos desplantados a más de 60 m) de pila LT-1.
- 2.-Posible recarga de ademe interior a exterior por carga imputada en la cabeza de la pila.
- 3.-La fuerza remanente en el fuste de la pila generada en la etapa de post-inyección, impidió que la carga bajara paulatinamente hasta la punta pila, provocando que al octavo incremento la pila sufriera un asentamiento súbito impidiendo el aporte de carga en la punta.

El diseño final de la cimentación que cumple con la descarga de las diferentes cargas del edificio consiste en un nuevo desplante de los elementos de cimentación, manteniendo su geometría y aumentando su peralte efectivo. Se presenta a continuación las capacidades empleadas para el diseño final de elementos de cimentación (tabla 21);

Tabla 21.-Capacidades de carga admisibles para diseño

Capacidad de Carga Admisibles	
C_p (T/m ²):	280.0
C_f (T/m ²)	9.25

Con base a las capacidades de carga admisibles por adherencia lateral y punta para el diseño de elementos de cimentación, se presenta el diseño (desplante) de cimentación necesaria para cumplir con la descarga impuesta (tabla 22) y las capacidades de carga para cada elemento (figura 102, 103).

Las capacidades de carga por adherencia lateral obtenidas en las pruebas de carga llegan de ser del orden mayor a 40 t / m²; para el diseño final el aporte de fricción en el fuste es castigado en gran medida.

Tabla 22.-Profundidad de elementos de cimentación “La Fragua”

Profundidad de desplante (m)	Elemento
40	Muro Milán
35	Muro Milán
55	Barrettes
74	Barrettes

La cimentación consistirá en una excavación que albergará 7 sótanos de estacionamiento para una profundidad de excavación de 23.5 m dentro de un cajón formado por un muro diafragma estructural definitivo “llamado muro Milán” de 1.0 de espesor. La cimentación, estará formada por 42 pilas tipo “Barrettes” desplantadas a una profundidad de 55 m y 74 m por debajo del nivel calle (figura 124)

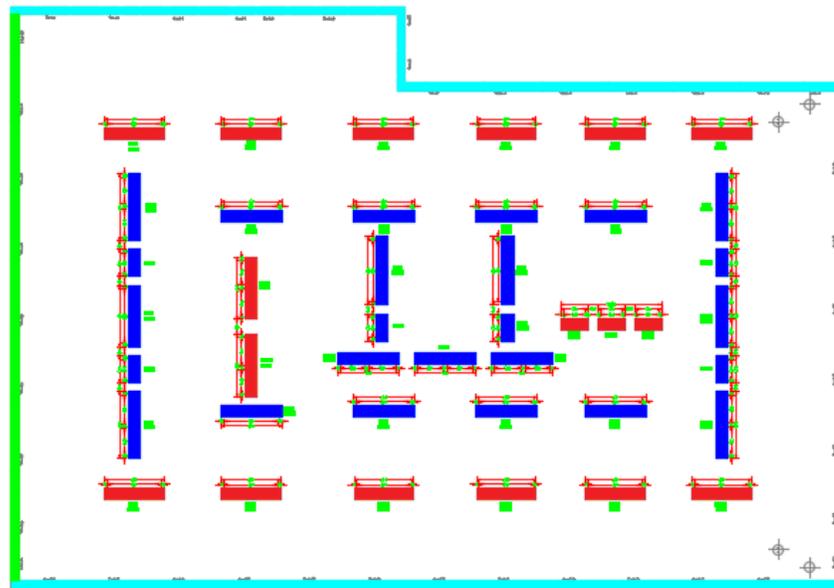


Figura 124.-Diseño final de cimentación "La Fragua"

6.2. Reforma 432

6.1.2. Diseño de cimentación

El proyecto reforma 432 que se consistía en una torre 254 m de altura (54 niveles), con una cimentación de 9 sótanos de estacionamiento para una profundidad de excavación de 35 m dentro de un cajón formado por un muro diafragma estructural definitivo “llamado muro Milán” de 1.0 y 1.20 de espesor desplantado a 42 m de profundidad, conformado por 102 pilas tipo “Barrettes” desplantadas a una profundidad de 68 m por debajo del nivel calle, empleando el sistema constructivo “Top-Down. Con base al proceso constructivo empleado de dos pilas de prueba de carga llamadas 802 y 902, así como los resultados obtenidos de las pruebas, tuvo un impacto en el diseño final de la cimentación.

La norma ASTM “método D” cargas estáticas de compresión y el proceso constructivo empleado en la construcción de pilas de prueba de carga a 55 m de profundidad, son factores que influyen directamente en los resultados de capacidad de carga y comportamiento carga-desplazamiento de ambas pilas.

Al analizar los resultados obtenidos teóricamente de capacidad de carga y los obtenidos en las pruebas de carga se observó que ambas capacidades difieren uno del otro en gran medida, como se observa en la tabla 23.

Tabla 23.- Capacidades de carga ultima esperada de proyecto y obtenida en pruebas de carga “Reforma 432”

Capacidad de Carga Última Axial			
	Prueba de Carga 802	Prueba de Carga 902	Proyecto
C_p (Tn/m ²):	729.0	443.0	2800.0
C_f (Tn/m ²)	22.00	25.00	12.00

Las grandes diferencias existentes entre capacidades de carga surgen a partir de 2 factores;

- 1.- Una capacidad de carga teórica muy optimista comparada con los parámetros de diseño comúnmente especificados en la zona (idealización estratigráfica).
- 2.-De acuerdo a los estudios realizados, es probable que la punta de la pila haya quedado asentado en el estrato identificado como arcilla Tarango, que se caracteriza por lentes de arena de baja capacidad de carga.

El diseño final de la cimentación que cumple con la descarga de las diferentes cargas del edificio consiste en un nuevo desplante de cimentación, manteniendo su geometría y aumentando su peralte efectivo. Se presenta a continuación las capacidades empleadas para el diseño final de elementos de cimentación (tabla 24);

Tabla 24.-Capacidades de carga admisibles para diseño "Reforma 432"

Capacidad de Carga Admisibles	
Cp (Tn/m ²):	320.0
Cf (Tn/m ²)	8.70

Con base a las capacidades de carga admisibles por adherencia lateral y punta para el diseño de elementos de cimentación, se presenta el diseño final de cimentación necesaria para cumplir con la descarga impuesta (tabla 25) y las capacidades de carga para cada elemento.

Las capacidades de carga por adherencia lateral obtenidas en las pruebas de carga llegan de ser del orden en algunos estratos de 25 t/m²; para el diseño final el aporte de fricción en el fuste es castigado en gran medida.

Tabla 25.-Profundidad de elementos de cimentación "Reforma 432"

Profundidad de desplante (m)	Elemento
34	Muro Milán
68	Muro Pila
68	Barrettes
57	Barrettes

La cimentación consistirá en una excavación que albergará 7 sótanos de estacionamiento para una profundidad de excavación de 23.5 m dentro de un cajón formado por un muro diafragma estructural definitivo "llamado Muro Milán" de 0.80 de espesor. La cimentación, estará formada por 102 pilas tipo "Barrettes" desplantadas a una profundidad de 57 m y 68 m por debajo del nivel calle, y muro pila desplantado a 68 m de profundidad (figura 125).

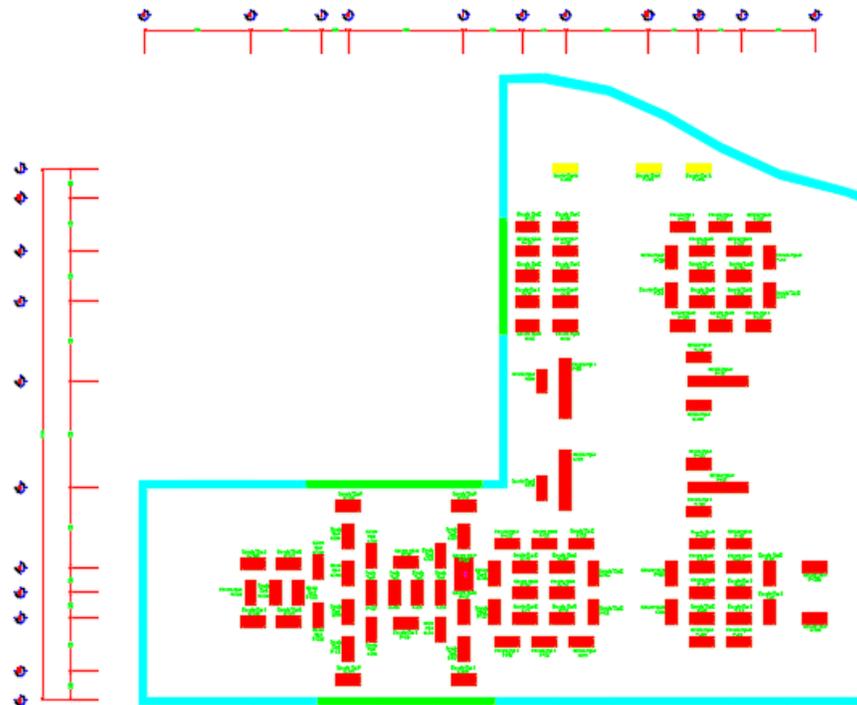


Figura 125.-Diseño preliminar de cimentación "Reforma 432"

Capítulo 7. Conclusiones generales y comentarios.

- ✚ En la primera parte se presenta una revisión bibliográfica de los distintos tipos de pruebas de carga estáticas o dinámicas, así como los procedimientos emplear en cada prueba y su instrumentación. Se realiza una revisión de las distintas normas y estándares establecidos para llevar a cabo la ejecución de pruebas de carga en pilas coladas in situ. Con respecto a la investigación bibliográfica efectuada, se puede decir que no se han efectuado pruebas de carga para proyectos de esta envergadura en el Valle de México.
- ✚ En el capítulo 3 abarca los distintos tipos de cimentaciones profundas empleadas en la Ciudad de México y en otros países, así como soluciones para el análisis y comportamiento de pruebas carga bajo diferentes condiciones estratigráficas.
- ✚ En el Capítulo 4 se presenta 2 casos de prueba de carga estática axial llevadas a cabo en proyectos reales en el Valle de México, el proceso de construcción de la pila de prueba y su comportamiento durante la ejecución de pruebas de carga.
- ✚ En el capítulo 5 se presenta una comparativa entre el cálculo analítico en el diseño de capacidad de carga de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones del 2017 (NTCDCC 2017) y los resultados obtenidos de pruebas de carga estática a compresión axial.
- ✚ En el capítulo 6 se presenta los resultados obtenidos, el comportamiento en cada prueba de carga y su impacto en el diseño final de cada uno de los proyectos de cimentación Relativas a pruebas de carga La Fragua

Se graficaron dos curvas para las pilas LT-1 y LT-2, la lineal tomando como valor inicial desde la etapa de post-inyección y la punteada valor del día de la prueba. Se observa las diferencias del comportamiento pila-suelo teniendo distintos valores iniciales para los incrementos de carga impuestos en la cabeza de la pila debido a la etapa de post-inyección.

Prueba de carga Pila LT-1

- En la pila de prueba LT-1 se obtuvo una carga última de 1390 t para un desplazamiento de 186 mm con lo cual se cumplió el criterio de falla equivalente al 15 % del diámetro de la pila con base a la norma ASTM-1143. Se observa que en la gráfica carga-desplazamiento se define claramente que para la carga máxima

aplicada de aproximadamente 1300 t con 26 mm de desplazamiento fue tomada por el fuste (figura 58).

- Se graficó una curva para la rama de descarga donde se observó que la reacción de carga generada en la pila fue suficientemente grande para impedir que la reacción alcanzada por la punta se descargara completamente, por lo que la punta queda precargada con 100 t. Después de retirar la carga por completo se tuvo un asentamiento residual de 173.0 mm, así como la punta tiene una nueva posición vertical (figura 64).
- Se puede observar en la pila de prueba LT-1 un comportamiento variable en la primera rama de carga, con un aporte de capacidad por fuste de hasta 40 t / m², mientras que en la segunda rama que corresponde a la capacidad de carga por punta movilizada no fue capaz de aportar gran capacidad de carga
- El tratamiento de post-inyección empleado en la pila prueba LT-1 generó una fuerza en la punta y fuste de la pila del orden de 400 t, ocasionando que con la carga impuesta en la pila rompiera la precarga generada en la etapa de post-inyección al noveno incremento de carga, provocando un asentamiento súbito de la pila sin tiempo suficiente para impedir el exceso de presión de poro generada a esta profundidad, tomando una carga por punta final de 100 t (figura 63).
- La curva lineal es tomando como valor inicial desde la etapa de post-inyección y la punteada valor del día de la prueba. Se observa en la curva lineal que, hasta el octavo incremento de carga correspondiente a una carga de 1222 t, prácticamente la totalidad es tomada por fricción en el fuste equivalente a un 92 % de la carga total (figura 63).

Prueba de carga Pila LT-2

En la pila de prueba LT-2 se obtuvo una carga última de 1180 t con un asentamiento de 168.4 mm con lo cual se cumplió el criterio de falla equivalente al 15 % del diámetro de la pila con base a la norma ASTM-1143. Se presentó un desplazamiento importante a partir de las 762 t, momento en que comienza a moverse la carga de punta, de tal forma que, para la carga máxima de prueba, la carga en la punta de la pila es de 434.46 t.

- Se graficaron dos curvas para la descarga de la pila, para cada decremento de carga se tomó como valor inicial la etapa de post-inyección (curva lineal) y curva punteada

valor del día de la prueba. Se observa que la fricción desarrollada en el cuerpo de la pila, ahora trabaja en sentido opuesto en sentido al de la rama de carga, es suficiente para impedir que la reacción alcanzada por la punta se descargue totalmente, quedando una precarga de 250 t en la punta y con una nueva posición vertical de la pila

- El tratamiento de post-inyección empleado en la pila prueba LT-2 generó una fuerza en la punta y fuste de la pila de aproximadamente 350 t, ocasionando que durante los incrementos de carga en la pila rompiera al tercer incremento de carga la fuerza remanente generada en el fuste, ocasionando una movilización de la punta de la pila de 90 mm, momento a partir del cual la punta de la pila inicia a tomar carga (figura 78).
- Se observa en la pila de prueba LT-2 un comportamiento rígido en la primera rama de carga de hasta $35 \text{ t} / \text{m}^2$ por fuste., mientras que en los depósitos profundos fue capaz de aportar hasta $15 \text{ t} / \text{m}^2$. Una vez movilizada la punta el aporte disminuyó a un 2 %.

7.2. Relativas a pruebas de carga Reforma 432

Prueba de carga Pila 802

- En la pila de prueba 802 se obtuvo una carga última de 1520 t con un asentamiento de 172 mm con lo cual se cumplió el criterio de falla equivalente al 15 % del diámetro de la pila con base a la norma ASTM-1143.
- En la pila 802 en el primer ciclo de carga-descarga se define claramente un comportamiento lineal hasta 1125 t con 50 mm de desplazamiento, aporte asociado a la capacidad del fuste. Se observa que en el primer ciclo de carga la resistencia por punta no alcanzó a moverse en su totalidad; presentando en la rama de descarga una tendencia similar a la rama de carga del primer ciclo. En el segundo ciclo de carga-descarga se presentó un tramo de carga inicial rígido hasta 1100 t momento en el cual la pendiente se vuelve menos pronunciada, indicando que la carga está siendo tomada por la punta cercanas a las 350 t (figura 96).
- Se puede observar en la pila de prueba 802 un aporte por fuste en el estrato de la CP y FAI variable con carga de $15 \text{ t} / \text{m}^2$ a $23 \text{ t} / \text{m}^2$.
- En la pila 802 en la rama de descarga, se puede apreciar que la carga generada en la pila es suficientemente grande para impedir que la reacción alcanzada por la

punta se descargue, por lo que la punta queda precargada aproximadamente con 550 t y un asentamiento residual de 158 mm indicando que la punta tiene una nueva posición vertical. (figura 101).

Prueba de carga Pila 902

- En la pila de prueba 902 se obtuvo una carga acumulada de 1190 t con un asentamiento de 223 mm con lo cual se cumplió el criterio de falla equivalente al 15 % del diámetro de la pila con base a la norma ASTM-1143.
- El ejecutar más de un ciclo de carga-descarga en una misma pila, es fundamental que los esfuerzos remanentes a la descarga del primer ciclo se deben de tomar como condición inicial de esfuerzos (esfuerzos residuales generados) del segundo ciclo de carga-descarga. El no tomar como nueva condición inicial los resultados de las curvas de distribución de carga o en la curva carga-asentamiento, se pueden llegar a conclusiones erróneas e interpretación de curvas deficientes.
- En la pila 902 la ejecución de la primera y segunda prueba con espacio de un mes, presento un notable incremento en capacidad de carga total. El aporte de capacidad se ve reducido por el remoldeo generado en la construcción de la pila o la generación de exceso de presión de poro. El incremento de carga es una muestra de que el tiempo ayudo a que el subsuelo recuperara sus propiedades mecánicas y de resistencia al esfuerzo cortante (figura 114).
- En la pila 902 en la rama de descarga se puede apreciar que la reacción de carga generada en la pila es suficientemente grande para impedir que la reacción alcanzada en la punta se descargue por completo, por lo que la punta queda precargada aproximadamente con 410 t y un asentamiento residual de 207 mm, así como la punta tiene una nueva posición vertical. (figura 115).

7.3. Relativas al cálculo analítico y las normas NTCDCC 2017

- Las capacidades carga axial total obtenidas mediante los diferentes criterios analíticos difieren en cierta medida a las obtenidas en las pruebas de carga, donde se ven influenciados de manera importante por los coeficientes de capacidad de carga, propiedades y estratigrafía dadas a cada estrato. En proyectos de cierta envergadura factores como realizar una campaña geotécnica más extensa, se verá

retribuido en una mejor idealización del subsuelo; teniendo un impacto en las capacidades de carga.

- Las capacidades de carga por punta obtenidas por el método de Zeevaert están por arriba a las obtenidas en las pruebas de carga. El aporte por fuste empleando el criterio de Meyerhof van al doble o hasta el triple a las obtenidas de las pruebas. La diferencia obtenida mediante el empleo de los distintos métodos da capacidades de carga de tres o cuatro veces las obtenidas en la prueba de carga, muestra que es fundamental el uso de dos o más metodologías para obtener un criterio de selección adecuado para la estimación de capacidad de carga.
- La revisión realizada para capacidad de carga por adherencia y punta empleando los lineamientos del Reglamento de Construcción y sus Normas Técnicas Complementarias 2017 no fue empleado los factores de resistencia y carga, por lo cual faltaría realizar las solicitudes correspondientes.

7.4. Relativas a Prueba de Carga.

La instrumentación en el cuerpo de la pila proporciona una fuente de información fundamental para la interpretación de la prueba; permite conocer el comportamiento de la pila durante todo el proceso de carga y descarga, fuerzas, deformaciones, así como datos útiles en el diseño final de la cimentación, como los mencionados a continuación;

1.-Curvas de distribución de carga con la profundidad

2.-Curva carga-asentamiento

3.-Contribución por estrato a la capacidad por fuste con base a la profundidad

4.-Resistencia por punta movilizada

5.-Capacidad de carga ultima.

6.-Obtención de carga vertical en cada sección de la pila.

7.-Obtención de la precarga inducida al realizar al segundo clico de carga.

- ✓ Es importante especificar la instrumentación en el cuerpo de la pila con base a los diferentes estratos competentes. Monitorear en todo momento los cambios presentados durante el proceso de ejecución de la prueba ayuda a obtener

parámetros en los estratos de interés con el propósito de caracterizar mejor el comportamiento del elemento-suelo.

- ✓ El empleo de un programa para adquisición de datos automatizados permite trabajar en tiempo real los datos para el cálculo de cargas y deformaciones, eliminando cualquier incertidumbre de obtener lecturas manuales poco confiables o erróneas que afecten la interpretación de resultados.
- ✓ El empleo de un doble ademe metálico permite eliminar el aporte de capacidad de carga por fuste en una zona determinada del elemento de prueba, para modelar el nivel máximo de excavación simulando los niveles de sótanos de dicho proyecto, eliminando un aporte por fuste que no existirá para la capacidad de carga final.
- ✓ En todos los aspectos es importante hacer registros de lecturas cero de los deformímetros empleados en la pila; ceros de gabinete, lectura en el armado de acero, antes del colado del elemento, lecturas después del colado, antes de la ejecución de la prueba; es fundamental para para la interpretación de resultados conocer de manera puntual el comportamiento del elemento con base al tiempo.
- ✓ El esfuerzo cortante generado (f_s) en los suelos predominantemente arcillosos muestra, en general, un comportamiento considerable; es de notar que existen estratos que alcanzan su máximo resistencia en la interfaz para etapas tempranas de la prueba, donde el aporte generado decrece con base a la duración prueba mostrando su capacidad total máxima. Mientras que, en otros estratos, principalmente depósitos profundos conformados por gravas compactas y arenas toman resistencia por fuste, ejerciendo un efecto de compensación por los estratos que reducen su resistencia cortante.
- ✓ Las pruebas de carga deben ser implementadas en los procesos de diseño de cimentaciones profundas y no como una verificación rápida al presentarse una eventualidad en la construcción de la cimentación. La ejecución de pruebas de carga *in situ* permite obtener grandes beneficios con respecto a la seguridad, así como el costo de ejecución se ve retribuido en un posible ahorro razonable, ya que al verificar los diseños se podrían evitar y corregir cargas optimistas o bien la optimización de proyectos conservadores.
- ✓ El comportamiento mecánico del subsuelo del Valle México es complejo, dar una predicción adecuada sobre el diseño de cimentación profunda a emplear en cualquier proyecto de cimentación debe realizarse un minucioso estudio que

garantice la seguridad de la estructura, por lo cual se recomienda comprender la correcta funcionalidad del elemento de cimentación con base a la ejecución de pruebas de carga y una completa exploración geotécnica ; como hacer un buen análisis e interpretación de resultados por distintas metodologías de pruebas de carga permite determinar una capacidad de carga ultima o admisible acertada que brinde en el ejercicio del diseño una mejor precisión.

- ✓ En las pruebas de carga ejecutadas se obtuvieron capacidades en el fuste de hasta 40 t / m². El aporte de capacidad en el fuste no se ve afectado en ninguna instancia por el uso de lodos como medio estabilizador en los suelos del Valle de México
- ✓ En la etapa de descarga de pilas es importante destacar la carga residual que permanece en las pilas ya que simula la precarga que tendrán las pilas al llegar al nivel máximo de excavación (pilas que con base a su proceso constructivo se ejecutan antes de iniciar la excavación del núcleo; preexisten a la excavación). con base a esto es fundamental no diseñar cimentaciones como si fueran elementos aislados de los cuales pretendemos que trabajen por punta al buscar a profundidad un material competente, criterios simplificados de diseño no representan las reales condiciones de servicio a las que estará sometida la cimentación, debemos tratar a la cimentación como un concepto global que no solo involucre a los barrettes también involucra el gran cajón “sótanos” y el proceso constructivo.
- ✓ Los recursos económicos empleados en la ejecución de pruebas de carga en proyectos de cierta envergadura, se ve retribuido con los resultados obtenidos para un mejor entendimiento de los suelos y su comportamiento suelo-estructura.
- ✓ El aporte de capacidad de carga total por punta en pilas de 1.00 m de diámetro llevo a ser de 35% a 45 % de la capacidad de carga total; se estima que en la práctica usual se tiende a despreciar en un 50 % esta contribución para el diseño final, siendo conservador el diseño final de cimentación.
- ✓ Los resultados obtenidos en una prueba de carga estática axial a compresión, se ven influenciados directamente en el proceso constructivo empleado. Es importante cuidar los valores como el uso de lodos y verticalidad, ya que el proceso constructivo tiene influencia directa en el comportamiento de la cimentación profunda. Se debe cuidar que los elementos de cimentación de prueba sean representativos de los elementos de cimentación de definitivos, para contar con resultados aplicables al diseño final del proyecto.

Como conclusión general; las pruebas de carga estáticas axial a compresión en elementos de cimentación profunda, son un método confiable para determinar la capacidad de carga transmitida por el peso de la estructura (carga-asentamiento) e información del procedimiento de construcción. Nos ayudan a dar certidumbre de las hipótesis empleadas en el diseño preliminar de cimentación e inclusive optimización los proyectos.

7.5. Recomendaciones sobre líneas futuras de investigación

- ◇ Con resultados obtenidos de una prueba de carga, se pueden emplear para calibrar un modelo geotécnico y realizar un análisis mediante el método de elementos finitos en tres dimensiones MEF3D, donde los resultados obtenidos ayuden minimizar las hipótesis supuestas, complementar las secciones de interés a instrumentar, así como hacer un diseño de cimentación partiendo de los resultados obtenidos (Back analysis).
- ◇ En el próximo Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México y sus Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones, propongo agregar una normativa u procedimiento para llevar a cabo la ejecución de pruebas de carga axial estática.
- ◇ La cantidad de pilas estudiadas no fue suficiente para un análisis estadístico más profundo, sin embargo, para proyectos de cierta envergadura, es importante destacar la necesidad que se tiene de analizar y desarrollar una experiencia regional; obtener diseños más precisos y apropiados a la localidad.
- ◇ Empleo de piezómetros durante el proceso de ejecución y la prueba misma. Es importante conocer las distintas variaciones de la presión poro durante las diferentes etapas de prueba de carga, así como fechas posteriores a la prueba; conocer si se mantiene o no una presión residual; interacción pila-suelo es sometida a grandes cargas, donde el tiempo es mínimo para poder disipar la presión de poro generada

Referencias y bibliografía

- Alva Hurtado, J. E., & Fic, C. (1993). CIMENTACIONES PROFUNDAS Universidad Nacional de Ingeniería. *Comité Peruano de Mecánica de Suelos, Fundaciones y Mecánica de Rocas*.
- ASTM D 3689. (2014). ASTM D 3689 /D3689 – 07Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Tensile Load 1, 07(Reapproved 2013), 1–15.
- ASTM D1143. (2007). *ASTM D 1143/D 1143M-07 Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Tensile Load. ASTM International* (Vol. 07).
- ASTM D3966, A. (2010). *Standard Test Methods for Deep Foundations Under Lateral Load. Annual Book of ASTM Standards*.
- Auvinet, G., Méndez, E., & Juárez, M. (2017). EL SUBSUELO DE LA CIUDAD DE MÉXICO. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería., II.
- Burland, J. B. (1973). Shaft friction of piles in clay-A simple fundamental approach. *Ground Engineering*, 6(September), 30–42.
- Crowther, C. L. (1988). *Load Testing of deep foundation. The planning desing and conduct of pile load tests* (Wiley-Inte).
- Fellenius, B. H. (2006). *Basics of Foundation Design*. Lulu.com, USA., 275.
- GOCM. (2017). Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. México.
- Gunaratne, M. (2006). *The foundation engineering handbook* (CRC Press).
- Handley, B., & Bullivant, R. (2006). *Federation of Piling Specialists Handbook on Pile Load Testing* (University).
- Hannigan, P. J., Rausche, F., Likins, G. E., Robinson, B. R., & Becker, M. L. (2016). Design and Construction of Driven Pile Foundations Reference Manual – Volume II. *Federal Highway Administration*.
- Hirany y Kulhawy. (1989). Interpretation of load test on drilled shaft.Part 1: Axial Compression. Proc., Foundation Engineering Congress Vol. 2, ASCE, Evanston.

- Holko, M., & Stacho, J. (2014). Comparison of Numerical Analyses with a Static Load Test of a Continuous Flight Auger Pile. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 22(4).
- Ibarra, E., Rangel, J., Holguín, E., & Flores-Eslava, R. (2017). Interpretación de pruebas de carga estática en pilas instrumentadas coladas in situ con ciclos de carga y descarga. *4 Th International Conference on Deep Foundations 4 o Simposio Internacional de Cimentaciones Profundas*.
- Kulhawy, F. H. (1991). Drilled shaft foundations, *Foundation Engineering Handbook*, 2nd ed. H. Y. Fang, Van Nostrand Reinhold, New York.
- M.J. Tomlinson. (1994). *Pile Design and Construction Practice* (University, Vol. Fourth edi).
- Melvin, E., & Paul F., C. (2008). Design Benefits of Bi-Directional Load Testing of Barrettes. *Fugro Load Test Ltd.*, 1–8.
- Mendoza, M. (n.d.). Pruebas de carga sobre pilas de cimentación del Distribuidor Vial San Antonio, México, D. F. In *XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica Noviembre 14 a 16, 2012*.
- Mendoza, M. J., Ibarra, E., Rufiar, M., & Paniagua, W. (2012). Pruebas de carga axial , y su previsión teórica , en pilas de cimentación instrumentadas del Viaducto Bicentenario , Estado de México. *XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*.
- Meyerhof, P. D. (1951). The Bearing Capacity of Foundations under Eccentric and Inclined Loads. *Struct. E., Building Research Station, England*.
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). *Pile foundation analysis and desing*. (Wiley).
- Prakash, S., & Sharma, H. D. (1990). *Pile foundations in Engineering Practice* (Wiley).
- SMMS. (1982). *Manual de Diseño y Contrucción de Pilas y Pilotes*. Sociedad Mexicana de ingeniería Geotécnica, A.C.
- SMMS. (2002). *Manual de Construccion Geotecnica Tomo I* (Sociedad M).
- SMMS. (2017a). *Ingeniería de Cimentaciones Profundas 2*. Sociedad Mexicana de ingeniería Geotécnica, A.C.

- SMMS, S. M. de M. de S. (2017b). *Ingeniería de Cimentaciones Profundas 1. Sociedad Mexicana de ingeniería Geotécnica, A.C. (SMMS).*
- Tamez Gonzáles, E. (2017). *Ingeniería de cimentaciones (TGC Geotec).*
- Tomlinson, M., & Woodward, J. (2008). *Pile Design and Construction Practice. Canadian Journal of Civil Engineering (CRC Press).*
- Wrana, B. (2015). Pile Load Capacity – Calculation Methods. *Civil Engineering Department, Studia Geotechnica et Mechanica, Vol 37(4), 31–155.*
- Zeevaert, L. (1972). *Foundation Engineering for difficult subsoil conditions. Van Nostrand Reinhold Company; New York; USA.*
- Zuievskaya, N., Zahoruiko, E., & Lozovyi, S. (2014). Plaxis Simulation of Static Pile Tests and Determination of Reaction Piles Influence, *Vol 24, 31–155.*

“Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México”

Anexo I.-Registro de carga - asentamiento

I.-Registros de prueba de carga LT-1

Incremento	Tiempo (min)	Fecha	Carga (t)	C1 (mm)	C2 (mm)	C prom (mm)	Cable 1 (mm)	Cable 2 (mm)	Cable Prom (mm)	Tell Tale 1 (mm)	Tell Tale 2 (mm)	Dif TellTall (T1-T2)
		16/07/2018 08:40	0	251	251	0	58	34	0	251	251	
1	inicio	16/07/2018 09:06	230.1119363	247	249	3	62	38	4	250	248	0
	5 min	16/07/2018 09:11	182.9422034	247	247	4	62	38	4	250	249	-1
	10 min	16/07/2018 09:16	182.2659615	247	247	4	62	38	4	250	249	-1
	20 min	16/07/2018 09:26	199.9293978	247	247	4	62	38	4	250	249	-1
	40 min	16/07/2018 09:46	196.7908334	247	247	4	62	38	4	250	249	-1
	60 min	16/07/2018 10:06	194.2033088	247	247	4	62	38	4	250	249	-1
	80 min	16/07/2018 10:26	192.5943736	246	246	5	62	38	4	250	248	0
	100 min	16/07/2018 10:46	225.9847275	246	246	5	62	38	4	250	248	0
	120 min	16/07/2018 11:06	223.6580833	246	246	5	63	38	4.5	250	248	0
	140 min	16/07/2018 11:26	222.5387628	246	246	5	63	38	4.5	250	248	0
	160 min	16/07/2018 11:46	221.548877	246	246	5	63	38	4.5	250	248	0
	180 min	16/07/2018 12:06	220.4352075	246	246	5	63	38	4.5	250	248	0
	2	inicio	16/07/2018 12:08	450.7481687	242	243	8.5	65	41	7	249	245
5 min		16/07/2018 12:13	444.8284074	242	243	8.5	65	41	7	249	245	2
10 min		16/07/2018 12:18	442.1727483	242	243	8.5	65	41	7	249	245	2
20 min		16/07/2018 12:28	439.0770166	242	243	8.5	65	41	7	249	245	2
40 min		16/07/2018 12:48	435.6856958	242	243	8.5	65	41	7	249	245	2
60 min		16/07/2018 13:08	445.1242918	242	243	8.5	65	41	7	249	245	2
80 min		16/07/2018 13:28	442.9431724	242	243	8.5	65	41	7	249	245	2
100 min		16/07/2018 13:48	443.1762949	242	243	8.5	65	41	7	249	245	2
120 min		16/07/2018 14:08	441.6058809	242	243	8.5	65	41	7	249	245	2
140 min		16/07/2018 14:28	439.7891255	242	243	8.5	65	41	7	249	245	2
160 min		16/07/2018 14:48	444.3383643	242	243	8.5	65	41	7	249	245	2
180 min		16/07/2018 15:08	443.6069499	242	243	8.5	65	41	7	249	245	2
3		inicio	16/07/2018 15:10	529.8073443	241	242	9.5	67	43	9	248	243
	5 min	16/07/2018 15:15	526.2687088	241	242	9.5	67	43	9	249	244	3
	10 min	16/07/2018 15:20	524.4624632	241	242	9.5	67	43	9	249	244	3
	20 min	16/07/2018 15:30	522.9022318	241	242	9.5	67	43	9	249	244	3
	40 min	16/07/2018 15:50	521.2525596	241	242	9.5	67	43	9	249	244	3
	60 min	16/07/2018 16:10	519.7577873	241	242	9.5	67	43	9	249	244	3
	80 min	16/07/2018 16:30	523.916163	241	242	9.5	67	43	9	249	244	3
	100 min	16/07/2018 16:50	523.782458	241	242	9.5	67	43	9	249	244	3
	120 min	16/07/2018 17:10	523.9985196	241	242	9.5	67	43	9	249	244	3
	140 min	16/07/2018 17:30	525.4312447	241	242	9.5	67	43	9	249	244	3
	160 min	16/07/2018 17:50	529.4494569	241	242	9.5	67	43	9	249	244	3
	180 min	16/07/2018 18:10	533.1744472	241	242	9.5	67	43	9	249	244	3
	4	inicio	16/07/2018 18:12	697.3548073	238	240	12	69	45	11	249	242
5 min		16/07/2018 18:17	692.9058147	238	240	12	69	45	11	249	242	5
10 min		16/07/2018 18:22	691.3958963	238	240	12	69	45	11	249	242	5
20 min		16/07/2018 18:32	690.1387083	238	240	12	69	45	11	249	242	5
40 min		16/07/2018 18:52	690.0587117	238	240	12	69	45	11	249	242	5
60 min		16/07/2018 19:12	690.351161	238	240	12	69	45	11	249	242	5
80 min		16/07/2018 19:32	689.1981588	238	240	12	69	45	11	249	242	5
100 min		16/07/2018 19:52	689.8604877	238	240	12	69	45	11	249	242	5
120 min		16/07/2018 20:12	689.5614677	238	240	12	69	45	11	249	242	5
140 min		16/07/2018 20:32	689.1693465	238	240	12	69	45	11	249	242	5
160 min		16/07/2018 20:52	693.7463621	238	240	12	70	46	12	249	242	5
180 min		16/07/2018 21:12	693.215426	239	240	11.5	70	46	12	249	242	5
5		inicio	16/07/2018 21:14	782.882056	237	240	12.5	71	46	12.5	249	240
	5 min	16/07/2018 21:19	782.7916119	237	240	12.5	71	46	12.5	249	240	7
	10 min	16/07/2018 21:24	781.2037954	237	240	12.5	71	46	12.5	249	240	7
	20 min	16/07/2018 21:34	779.5325724	237	240	12.5	71	46	12.5	249	240	7
	40 min	16/07/2018 21:54	778.3165769	237	240	12.5	71	46	12.5	249	240	7
	60 min	16/07/2018 22:14	777.0578409	237	240	12.5	71	46	12.5	249	240	7
	80 min	16/07/2018 22:34	775.9532363	237	240	12.5	71	46	12.5	249	240	7
	100 min	16/07/2018 22:54	775.0132192	237	240	12.5	71	46	12.5	249	240	7
	120 min	16/07/2018 23:14	777.6032867	237	240	12.5	71	46	12.5	249	240	7
	140 min	16/07/2018 23:34	779.1450174	237	240	12.5	71	46	12.5	249	240	7
	160 min	16/07/2018 23:54	777.9460205	237	240	12.5	71	46	12.5	249	240	7
	180 min	17/07/2018 00:14	777.1231127	237	240	12.5	71	46	12.5	249	240	7

“Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México”

6	inicio	17/07/2018 00:16	829.2443688	236	240	13	72	47	13.5	249	240	7	
	5 min	17/07/2018 00:21	827.7510427	236	240	13	72	47	13.5	249	240	7	
	10 min	17/07/2018 00:26	826.8908248	236	239	13.5	72	48	14	249	240	7	
	20 min	17/07/2018 00:36	825.6752035	236	239	13.5	72	48	14	249	240	7	
	40 min	17/07/2018 00:56	823.9621664	236	239	13.5	72	48	14	249	240	7	
	60 min	17/07/2018 01:16	822.6294643	236	239	13.5	72	48	14	249	240	7	
	80 min	17/07/2018 01:36	824.5843444	236	239	13.5	72	48	14	249	240	7	
	100 min	17/07/2018 01:56	823.4031146	236	239	13.5	72	48	14	249	240	7	
	120 min	17/07/2018 02:16	825.1227142	236	239	13.5	72	48	14	249	240	7	
	140 min	17/07/2018 02:36	824.1336834	236	239	13.5	72	48	14	249	240	7	
	160 min	17/07/2018 02:56	823.2192622	236	239	13.5	72	48	14	249	240	7	
	180 min	17/07/2018 03:16	826.6887437	236	239	13.5	72	48	14	249	240	7	
	200 min	17/07/2018 03:36	825.6975012	236	239	13.5	72	48	14	249	240	7	
	220 min	17/07/2018 03:56	824.8272792	236	239	13.5	72	48	14	249	240	7	
	240 min	17/07/2018 04:16	824.4331483	236	239	13.5	72	48	14	249	240	7	
	260 min	17/07/2018 04:36	824.1930663	236	239	13.5	72	48	14	249	240	7	
	280 min	17/07/2018 04:56	827.3256272	236	239	13.5	72	48	14	249	240	7	
	300 min	17/07/2018 05:16	826.5541997	236	239	13.5	72	48	14	249	240	7	
	320 min	17/07/2018 05:36	826.0745361	236	239	13.5	72	49	14.5	249	240	7	
	340 min	17/07/2018 05:56	825.5199148	236	239	13.5	72	49	14.5	249	240	7	
	360 min	17/07/2018 06:16	824.9102164	236	239	13.5	72	49	14.5	249	240	7	
	380 min	17/07/2018 06:36	824.4230124	236	239	13.5	72	49	14.5	249	240	7	
	400 min	17/07/2018 06:56	823.8729186	236	239	13.5	72	49	14.5	249	240	7	
	420 min	17/07/2018 07:16	826.5860403	236	239	13.5	72	49	14.5	249	240	7	
	440 min	17/07/2018 07:36	825.4830371	236	239	13.5	72	49	14.5	249	240	7	
	460 min	17/07/2018 07:56	824.5962096	236	239	13.5	72	49	14.5	249	240	7	
	480 min	17/07/2018 08:16	823.4472515	236	239	13.5	72	49	14.5	249	240	7	
	500 min	17/07/2018 08:36	829.0515027	236	239	13.5	72	49	14.5	249	240	7	
	520 min	17/07/2018 08:56	827.9769771	236	239	13.5	72	49	14.5	249	240	7	
	540 min	17/07/2018 09:16	826.7785244	236	239	13.5	72	49	14.5	249	240	7	
	7	inicio	17/07/2018 09:18	1011.263923	233	236	16.5	75	50	16.5	249	237	10
		5 min	17/07/2018 09:23	1004.811192	233	236	16.5	75	50	16.5	249	237	10
		10 min	17/07/2018 09:28	1002.192342	233	236	16.5	75	50	16.5	249	237	10
		20 min	17/07/2018 09:38	999.0962241	233	236	16.5	75	50	16.5	249	237	10
		40 min	17/07/2018 09:58	994.8897935	233	236	16.5	75	50	16.5	249	237	10
		60 min	17/07/2018 10:18	993.4640131	233	236	16.5	75	50	16.5	249	237	10
80 min		17/07/2018 10:38	990.3335666	233	236	16.5	75	50	16.5	249	237	10	
100 min		17/07/2018 10:58	992.886007	233	236	16.5	75	50	16.5	249	237	10	
120 min		17/07/2018 11:18	990.5954598	233	236	16.5	75	50	16.5	249	237	10	
140 min		17/07/2018 11:38	988.0142104	233	236	16.5	75	50	16.5	248	237	9	
160 min		17/07/2018 11:58	986.4265454	233	235	17	75	50	16.5	248	237	9	
180 min		17/07/2018 12:18	984.7604551	233	235	17	75	50	16.5	248	237	9	
8	inicio	17/07/2018 12:20	1085.9084	230	234	19	76	52	18	248	235	11	
	5 min	17/07/2018 12:25	1081.183513	230	234	19	76	52	18	248	235	11	
	10 min	17/07/2018 12:30	1078.921869	230	234	19	76	52	18	248	235	11	
	20 min	17/07/2018 12:40	1087.458872	230	234	19	76	52	18	248	235	11	
	40 min	17/07/2018 13:00	1082.24754	230	234	19	77	52	18.5	248	235	11	
	60 min	17/07/2018 13:20	1081.901212	230	234	19	77	52	18.5	248	235	11	
	80 min	17/07/2018 13:40	1079.134844	230	234	19	77	52	18.5	248	235	11	
	100 min	17/07/2018 14:00	1079.47388	230	234	19	77	52	18.5	248	235	11	
	120 min	17/07/2018 14:20	1079.733524	230	234	19	77	52	18.5	248	235	11	
	140 min	17/07/2018 14:40	1077.03336	230	234	19	77	52	18.5	248	235	11	
	160 min	17/07/2018 15:00	1089.575103	230	234	19	77	52	18.5	248	235	11	
	180 min	17/07/2018 15:20	1090.108372	230	234	19	77	52	18.5	247	235	10	
9	inicio	17/07/2018 15:22	1232.074784	227	232	21.5	79	55	21	249	233	14	
	5 min	17/07/2018 15:27	1220.770299	227	232	21.5	79	55	21	248	233	13	
	10 min	17/07/2018 15:32	1216.574169	227	232	21.5	79	55	21	248	233	13	
	20 min	17/07/2018 15:42	1212.995627	227	232	21.5	79	55	21	248	233	13	
	40 min	17/07/2018 16:02	1212.260648	227	232	21.5	79	55	21	248	233	13	
	60 min	17/07/2018 16:22	1211.768419	227	232	21.5	79	55	21	248	233	13	
	80 min	17/07/2018 16:42	1212.422957	227	232	21.5	79	55	21	248	233	13	
	100 min	17/07/2018 17:02	1214.687755	227	232	21.5	79	55	21	248	233	13	
	120 min	17/07/2018 17:22	1219.072681	227	232	21.5	79	55	21	248	233	13	
	140 min	17/07/2018 17:42	1219.61942	227	232	21.5	79	55	21	248	233	13	
	160 min	17/07/2018 18:02	1223.209318	227	232	21.5	79	55	21	248	233	13	
	180 min	17/07/2018 18:22	1222.851612	227	232	21.5	79	55	21	248	233	13	
10	inicio	17/07/2018 18:24	1380.37657	223	227	26	83	58	24.5	247	229	16	
	10 min	17/07/2018 18:29	1351.509997	223	227	26	84	59	25.5	247	229	16	
	20 min	17/07/2018 18:34	1346.09961	223	227	26	84	59	25.5	247	229	16	
	202 min	17/07/2018 18:44	882.2683308	198	202	51	108	85	50.5	125	103	20	
Carga Sostenida	222 min	17/07/2018 19:04	659.6676766	89	92	160.5	215	194	158.5	103	93	8	
	inicio	17/07/2018 19:08	731.9277276	62	66	187	238	220	183	77	66	9	
	5 min	17/07/2018 19:13	724.7616698	66	67	184.5	245	220	186.5	77	66	9	
	10 min	17/07/2018 19:18	724.31618	66	62	187	245	220	186.5	77	66	9	
	20 min	17/07/2018 19:28	723.5432957	67	66	184.5	245	220	186.5	77	66	9	
	40 min	17/07/2018 19:48	722.0553393	62	66	187	246	220	187	77	67	8	
	60 min	17/07/2018 20:08	721.3676839	62	66	187	245	220	186.5	77	67	8	
	80 min	17/07/2018 20:28	721.0685909	62	66	187	245	220	186.5	77	67	8	
	100 min	17/07/2018 20:48	720.7007639	62	66	187	245	221	187	77	67	8	
	120 min	17/07/2018 21:08	720.7957507	66	66	185	245	221	187	77	67	8	
	140 min	17/07/2018 21:28	720.9401212	63	66	186.5	245	221	187	77	67	8	
	160 min	17/07/2018 21:48	720.6589842	62	66	187	245	221	187	77	67	8	
180 min	17/07/2018 22:08	677.3062391	63	66	186.5	245	221	187	77	67	8		

“Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México”

Descarga 1	inicio	17/07/2018 22:08	677.3062391	63	66	186.5	245	221	187	77	67	8
	5 min	17/07/2018 22:13	677.8474403	63	66	186.5	245	221	187	77	67	8
	10 min	17/07/2018 22:18	678.0505812	63	66	186.5	245	221	187	77	67	8
	20 min	17/07/2018 22:28	678.1496565	63	67	186	245	221	187	77	67	8
	40 min	17/07/2018 22:48	677.9939054	63	67	186	245	221	187	77	67	8
	60 min	17/07/2018 23:08	677.5218322	63	67	186	245	221	187	77	67	8
	80 min	17/07/2018 23:28	676.9020174	63	67	186	245	221	187	77	67	8
	100 min	17/07/2018 23:48	676.188859	63	67	186	245	221	187	77	67	8
	120 min	18/07/2018 00:08	675.4711901	63	67	186	245	221	187	77	67	8
	inicio	18/07/2018 00:24	585.3988509	65	68	184.5	242	219	184.5	77	68	7
	5 min	18/07/2018 00:29	586.5222393	65	68	184.5	242	219	184.5	77	68	7
	10 min	18/07/2018 00:34	586.9582521	65	67	185	242	219	184.5	77	68	7
20 min	18/07/2018 00:44	587.447031	65	67	185	242	219	184.5	77	68	7	
40 min	18/07/2018 01:04	587.6362012	65	67	185	242	219	184.5	77	68	7	
60 min	18/07/2018 01:24	587.5548627	65	67	185	242	219	184.5	77	68	7	
80 min	18/07/2018 01:44	587.3557492	65	68	184.5	242	219	184.5	78	69	7	
100 min	18/07/2018 02:04	587.0222619	65	68	184.5	242	219	184.5	78	69	7	
120 min	18/07/2018 02:24	586.6075601	65	68	184.5	242	219	184.5	78	69	7	
inicio	18/07/2018 02:33	437.9665685	70	67	182.5	240	217	182.5	78	70	6	
5 min	18/07/2018 02:38	440.2471759	67	70	182.5	240	217	182.5	77	70	5	
10 min	18/07/2018 02:43	441.0072722	67	70	182.5	240	217	182.5	78	70	6	
20 min	18/07/2018 02:53	441.8375023	67	70	182.5	240	217	182.5	78	70	6	
40 min	18/07/2018 03:13	442.5934367	68	70	182	240	217	182.5	78	70	6	
60 min	18/07/2018 03:33	442.9258694	67	70	182.5	240	217	182.5	78	70	6	
80 min	18/07/2018 03:53	442.9849024	68	70	182	240	217	182.5	78	71	5	
100 min	18/07/2018 04:13	442.9034909	67	70	182.5	240	217	182.5	78	71	5	
120 min	18/07/2018 04:33	442.7622256	68	70	182	240	217	182.5	78	71	5	
inicio	18/07/2018 04:46	299.297276	70	71	180.5	238	215	180.5	77	73	2	
5 min	18/07/2018 04:51	443.0079681	70	71	180.5	238	215	180.5	78	72	4	
10 min	18/07/2018 04:56	442.9819007	70	71	180.5	237	215	180	78	73	3	
20 min	18/07/2018 05:06	301.9013932	70	71	180.5	237	215	180	78	73	3	
40 min	18/07/2018 05:26	302.6848189	70	71	180.5	237	215	180	78	73	3	
60 min	18/07/2018 05:46	303.0555891	69	71	181	237	215	180	79	73	4	
80 min	18/07/2018 06:06	303.2539592	70	71	180.5	237	215	180	78	73	3	
100 min	18/07/2018 06:26	303.2872192	70	71	180.5	239	215	181	78	73	3	
120 min	18/07/2018 06:46	303.2181525	70	71	180.5	239	215	181	78	73	3	
inicio	18/07/2018 07:00	115.895658	74	73	177.5	230	212	175	78	75	1	
5 min	18/07/2018 07:05	117.6147925	74	74	177	230	211	174.5	78	75	1	
10 min	18/07/2018 07:10	118.4060161	74	74	177	235	211	177	78	75	1	
20 min	18/07/2018 07:20	119.2825707	74	74	177	235	211	177	78	75	1	
40 min	18/07/2018 07:40	120.2173221	74	74	177	235	211	177	78	75	1	
60 min	18/07/2018 08:00	120.6875793	74	74	177	235	211	177	78	75	1	
80 min	18/07/2018 08:20	121.183908	74	74	177	235	212	177.5	78	75	1	
100 min	18/07/2018 08:40	121.2466607	74	74	177	235	212	177.5	78	75	1	
120 min	18/07/2018 09:00	119.2344747	74	74	177	235	212	177.5	78	75	1	
inicio	18/07/2018 09:01	60.91204985	76	75	175.5	234	209	175.5	78	77	-1	
5 min	18/07/2018 09:06	2.806110132	77	75	175	233	208	174.5	78	77	-1	
10 min	18/07/2018 09:11	2.100926261	78	75	174.5	233	208	174.5	78	77	-1	
20 min	18/07/2018 09:21	2.055779627	78	75	174.5	232	208	174	78	77	-1	
40 min	18/07/2018 09:41	2.049726034	78	75	174.5	232	208	174	78	77	-1	
60 min	18/07/2018 10:01	2.058536297	78	75	174.5	232	208	174	78	77	-1	
80 min	18/07/2018 10:21	2.082422161	78	75	174.5	231	208	173.5	78	77	-1	
100 min	18/07/2018 10:41	2.082422161	78	75	174.5	230	208	173	78	77	-1	
120 min	18/07/2018 11:01	2.082422161	77	74	175.5	230	208	173	78	77	-1	

"Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México"

II.-Registros de prueba LT-2

Incremento	Tiempo (min)	Fecha	Carga (t)	C1 (mm)	C2 (mm)	C prom (mm)	Cable 1 (mm)	Cable 2 (mm)	Cable Prom (mm)	Tell Tale 1 (mm)	Tell Tale 2 (mm)	Dif TellTall (T1-T2)
1	inicio	06/07/2018 10:01	0	251	250	0	202	195	0	300	300	0
	5 min	06/07/2018 10:15	169.3625841	251	250	0	202	194	0.5	297	299	2
	10 min	06/07/2018 10:25	202.6683406	250	250	0.5	202	193	1	297	299	2
	20 min	06/07/2018 10:35	199.078496	250	250	0.5	202	193	1	297	299	2
	30 min	06/07/2018 10:45	197.4761115	250	250	0.5	202	193	1	297	299	2
2	inicio	06/07/2018 10:51	465.5371749	246	246	4.5	201	189	3.5	297	299	2
	5 min	06/07/2018 10:56	458.9993995	246	246	4.5	201	189	3.5	295	298	3
	10 min	06/07/2018 11:01	455.361449	246	246	4.5	201	189	3.5	295	298	3
	20 min	06/07/2018 11:11	450.9826916	246	246	4.5	201	189	3.5	295	298	3
	30 min	06/07/2018 11:21	447.7944706	246	246	4.5	201	189	3.5	295	298	3
3	inicio	06/07/2018 11:28	695.6712466	241	241	9.5	196	184	8.5	295	298	3
	5 min	06/07/2018 11:33	638.0815794	241	241	9.5	196	184	8.5	289	295	6
	10 min	06/07/2018 11:38	628.7421408	240	241	10	196	184	8.5	289	295	6
	20 min	06/07/2018 11:48	622.9485898	240	241	10	195	183	9.5	288	295	7
	30 min	06/07/2018 11:58	620.2733422	240	241	10	195	183	9.5	288	295	7
4	inicio	06/07/2018 12:08	786.6914404	182	183	68	140	125	66	288	295	7
	5 min	06/07/2018 12:13	784.8120018	181	181	69.5	140	125	66	230	238	8
	10 min	06/07/2018 12:18	791.6379048	181	181	69.5	140	125	66	229	237	8
	20 min	06/07/2018 12:28	800.442574	180	181	70	133	123	70.5	229	237	8
	30 min	06/07/2018 12:38	801.7327387	179	180	71	132	122	71.5	228	237	9
5	inicio	06/07/2018 12:42	843.5693386	147	148	103	105	90	101	228	236	8
	5 min	06/07/2018 12:47	904.2632442	146	147	104	102	90	102.5	196	205	9
	10 min	06/07/2018 12:52	889.2725758	145	147	104.5	102	89	103	195	205	10
	20 min	06/07/2018 13:02	932.7785596	145	147	104.5	102	89	103	194	204	10
	30 min	06/07/2018 13:12	920.6003822	145	146	105	102	89	103	194	204	10
6	inicio	06/07/2018 13:20	1051.396537	114	115	136	72	55	135	194	204	10
	5 min	06/07/2018 13:25	1033.154356	113	114	137	72	55	135	163	174	11
	10 min	06/07/2018 13:30	1021.388634	113	114	137	72	55	135	162	174	12
	20 min	06/07/2018 13:40	1010.612516	113	114	137	72	55	135	162	174	12
	30 min	06/07/2018 13:50	1003.699739	113	114	137	72	55	135	162	173	11
10	inicio	06/07/2018 13:55	1176.861828	86	88	163.5	46	30	160.5	162	173	11
	5 min	06/07/2018 14:00	1153.491155	86	88	163.5	46	30	160.5	136	149	13
	10 min	06/07/2018 14:05	1140.063919	86	88	163.5	45	30	161	136	149	13
	20 min	06/07/2018 14:15	1128.028192	85	87	164.5	45	30	161	135	148	13
	40 min	06/07/2018 14:35	1163.636824	84	86	165.5	45	30	161	135	148	13
Carga Sostenida	60 min	06/07/2018 14:55	1148.293728	84	86	165.5	43	30	162	134	147	13
	80 min	06/07/2018 15:15	1137.427818	84	86	165.5	42	30	162.5	133	147	14
	100 min	06/07/2018 15:35	1128.540303	84	86	165.5	40	29	164	133	146	13
	120 min	06/07/2018 15:55	1151.535257	83	85	166.5	38	28	165.5	133	146	13
Descarga 1	io(colocar h	06/07/2018 16:24	1072.913892	83	85	166.5	38	29	165	132	145	13
	20 min	06/07/2018 16:44	1072.016848	84	85	166	38	30	164.5	132	145	13
	20 min	06/07/2018 17:04	1073.799859	84	85	166	38	30	164.5	132	145	13
	20 min	06/07/2018 17:24	1074.971632	83	85	166.5	38	30	164.5	132	145	13
Descarga 2	io(colocar h	06/07/2018 17:35	963.5081105	85	85	165.5	38	30	164.5	132	145	13
	20 min	06/07/2018 17:55	966.8514525	85	86	165	38	30	164.5	134	146	12
	20 min	06/07/2018 18:15	968.1256076	84	86	165.5	38	30	164.5	134	146	12
	20 min	06/07/2018 18:35	969.421562	85	86	165	38	30	164.5	134	146	12
Descarga 3	io(colocar h	06/07/2018 18:37	833.3149607	86	88	163.5	38	30	164.5	134	146	12
	20 min	06/07/2018 18:57	839.0948944	86	88	163.5	38	30	164.5	135	146	11
	20 min	06/07/2018 19:17	840.8839242	86	88	163.5	38	30	164.5	135	146	11
	20 min	06/07/2018 19:37	841.9118573	86	88	163.5	38	30	164.5	135	146	11
Descarga 4	io(colocar h	06/07/2018 19:40	763.2536969	88	89	162	37	30	165	135	146	11
	20 min	06/07/2018 20:00	766.7117403	87	88	163	37	30	165	136	146	10
	20 min	06/07/2018 20:20	767.9896449	88	88	162.5	37	30	165	136	146	10
	20 min	06/07/2018 20:40	768.9557181	88	88	162.5	37	30	165	136	146	10

“Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México”

Descarga 5	inicio	06/07/2018 20:43	614.8213452	90	90	160.5	37	32	164	136	146	10
	20 min	06/07/2018 21:03	621.2176271	90	90	160.5	37	32	164	138	147	9
	20 min	06/07/2018 21:23	622.8134159	90	91	160	37	33	163.5	138	147	9
	20 min	06/07/2018 21:43	623.823461	90	90	160.5	37	33	163.5	138	147	9
Descarga 6	inicio	06/07/2018 21:46	531.7755472	91	92	159	37	33	163.5	138	147	9
	20 min	06/07/2018 22:06	536.3884134	91	92	159	37	33	163.5	140	147	7
	20 min	06/07/2018 22:26	537.8749793	91	92	159	37	35	162.5	140	147	7
	20 min	06/07/2018 22:46	538.8205253	91	92	159	37	34	163	140	147	7
Descarga 7	inicio	06/07/2018 22:49	387.0327799	94	94	156.5	38	36	161.5	140	147	7
	20 min	06/07/2018 23:09	393.4519793	94	94	156.5	40	37	160	142	147	5
	20 min	06/07/2018 23:29	395.1750518	94	94	156.5	40	37	160	142	147	5
	20 min	06/07/2018 23:49	396.1143452	93	94	157	40	37	160	142	147	5
Descarga 8	inicio	06/07/2018 23:51	285.9775124	95	95	155.5	40	39	159	142	147	5
	20 min	07/07/2018 00:11	289.7009278	95	95	155.5	40	39	159	143	147	4
	20 min	07/07/2018 00:31	291.1776514	95	95	155.5	40	39	159	144	147	3
	20 min	07/07/2018 00:51	291.9585898	95	95	155.5	40	39	159	144	147	3
Descarga 9	inicio	07/07/2018 00:55	160.3026792	96	97	154	43	41	156.5	143	147	4
	20 min	07/07/2018 01:15	164.4343594	97	97	153.5	44	41	156	145	148	3
	20 min	07/07/2018 01:35	165.6690143	97	97	153.5	44	41	156	145	148	3
	20 min	07/07/2018 01:55	166.2346391	97	97	153.5	44	41	156	145	148	3
Descarga 10	inicio	43288.08333	0	99	99	151.5	45	45	153.5	145	148	3
	20 min	43288.58542	0	100	101	150	46	48	151.5	146	150	4

“Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México”

III.-Registros de prueba de carga Pila 802

Fecha	Carga (t)	C1 (mm)	C2(mm)	C Promedio	Cable 1	Cable 2	ble Promed	Telltale 01	Telltale 02	Dif TellTall(T1-T2)
29/03/2017 08:10	1.0	100	100	0	210	150	0	100	100	0
29/03/2017 08:41	94.5	101	104	2.5	210	143	3.5	100	101	1
29/03/2017 08:46	92.9	104	102	3	210	143	3.5	100	101	1
29/03/2017 08:51	92.1	104	104	4	210	143	3.5	100	101	1
29/03/2017 09:01	112.5	104	104	4	210	142	4	100	101	1
29/03/2017 09:11	110.0	104	104	4	209	141	5	101	101	0
29/03/2017 09:13	197.7	106	106	6	208	138	7	106	102	-4
29/03/2017 09:18	192.8	106	106	6	208	138	7	106	102	-4
29/03/2017 09:23	191.0	106	106	6	208	138	7	105	103	-2
29/03/2017 09:33	205.6	106	106	6	208	138	7	105	103	-2
29/03/2017 09:43	202.7	106	106	6	207	137	8	105	102	-3
29/03/2017 09:45	304.6	109	108	8.5	205	135	10	104	104	0
29/03/2017 09:50	293.1	109	108	8.5	205	135	10	104	104	0
29/03/2017 09:55	290.1	109	108	8.5	205	135	10	103	104	1
29/03/2017 10:05	304.1	109	108	8.5	205	135	10	103	104	1
29/03/2017 10:15	301.1	109	108	8.5	205	135	10	103	104	1
29/03/2017 10:17	398.9	111	110	10.5	203	132	12.5	103	106	3
29/03/2017 10:22	383.6	111	110	10.5	203	132	12.5	103	106	3
29/03/2017 10:27	392.9	111	110	10.5	203	132	12.5	103	106	3
29/03/2017 10:37	387.2	111	110	10.5	203	132	12.5	103	106	3
29/03/2017 10:47	400.2	111	110	10.5	203	132	12.5	103	106	3
29/03/2017 10:49	522.7	114	113	13.5	200	130	15	103	108	5
29/03/2017 10:54	492.0	114	113	13.5	200	130	15	103	108	5
29/03/2017 10:59	503.4	114	113	13.5	200	130	15	103	108	5
29/03/2017 11:09	494.3	114	113	13.5	200	130	15	103	108	5
29/03/2017 11:19	512.0	114	113	13.5	199	129	16	103	109	6
29/03/2017 11:22	653.9	117	116	16.5	197	126	18.5	103	114	11
29/03/2017 11:27	631.2	117	116	16.5	197	126	18.5	103	114	11
29/03/2017 11:32	656.6	118	117	17.5	196	126	19	103	114	11
29/03/2017 11:42	637.4	118	117	17.5	196	126	19	103	114	11
29/03/2017 11:52	653.2	118	117	17.5	196	126	19	103	113	10
29/03/2017 11:55	712.6	119	118	18.5	195	125	20	103	113	10
29/03/2017 12:00	686.9	119	118	18.5	195	125	20	104	113	9
29/03/2017 12:05	697.2	120	119	19.5	194	124	21	104	114	10
29/03/2017 12:15	695.3	120	119	19.5	194	124	21	104	115	11
29/03/2017 12:25	700.6	121	120	20.5	193	123	22	104	114	10
29/03/2017 12:31	773.9	133	132	32.5	181	110	34.5	114	125	11
29/03/2017 12:36	755.1	133	132	32.5	181	110	34.5	115	126	11
29/03/2017 12:41	793.3	134	133	33.5	180	110	35	115	126	11
29/03/2017 12:51	776.3	134	133	33.5	180	110	35	115	128	13
29/03/2017 13:01	784.2	134	133	33.5	180	110	35	115	128	13
29/03/2017 13:08	883.8	138	137	37.5	175	105	40	119	132	13
29/03/2017 13:13	855.1	138	137	37.5	175	105	40	119	132	13
29/03/2017 13:18	859.1	138	137	37.5	175	105	40	119	132	13
29/03/2017 13:28	869.4	139	138	38.5	174	105	40.5	120	133	13
29/03/2017 13:38	871.8	139	138	38.5	174	105	40.5	120	133	13
29/03/2017 13:43	966.7	146	145	45.5	167	98	47.5	125	140	15
29/03/2017 13:48	941.6	146	145	45.5	167	98	47.5	125	140	15
29/03/2017 13:53	957.0	147	145	46	166	97	48.5	125	140	15
29/03/2017 14:03	960.8	147	146	46.5	166	96	49	126	141	15
29/03/2017 14:13	951.5	147	146	46.5	166	96	49	126	141	15
29/03/2017 14:19	1088.0	152	151	51.5	161	92	53.5	130	146	16
29/03/2017 14:24	1052.1	152	151	51.5	161	92	53.5	130	146	16
29/03/2017 14:29	1084.3	153	152	52.5	160	91	54.5	130	146	16
29/03/2017 14:39	1069.2	153	152	52.5	160	91	54.5	131	147	16
29/03/2017 14:49	1081.4	152	153	52.5	160	90	55	131	147	16
29/03/2017 14:56	1200.1	160	159	59.5	153	84	61.5	137	154	17
29/03/2017 15:01	1161.7	160	159	59.5	152	84	62	137	154	17
29/03/2017 15:06	1192.6	161	161	61	151	82	63.5	138	155	17
29/03/2017 15:16	1172.1	161	161	61	151	82	63.5	138	155	17
29/03/2017 15:26	1207.4	163	162	62.5	150	81	64.5	139	156	17
29/03/2017 15:35	1277.1	176	175	75.5	137	68	77.5	151	170	19
29/03/2017 15:40	1260.7	176	175	75.5	137	67	78	151	170	19
29/03/2017 15:45	1304.4	177	176	76.5	135	66	79.5	152	171	19
29/03/2017 15:55	1284.1	178	176	77	135	66	79.5	152	171	19
29/03/2017 16:05	1303.5	178	177	77.5	135	66	79.5	153	171	18
29/03/2017 16:11	1404.4	182	181	81.5	130	61	84.5	156	176	20
29/03/2017 16:16	1355.6	182	182	82	130	61	84.5	156	176	20

“Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México”

29/03/2017 16:21	1380.2	184	182	83	130	61	84.5	156	177	21
29/03/2017 16:31	1376.8	184	183	83.5	128	60	86	156	177	21
29/03/2017 16:41	1387.1	185	184	84.5	127	60	86.5	158	178	20
29/03/2017 16:58	1370.4	185	184	84.5	127	60	86.5	158	178	20
29/03/2017 17:12	1363.4	185	184	84.5	127	60	86.5	158	178	20
29/03/2017 17:32	1356.5	185	184	84.5	127	60	86.5	158	178	20
29/03/2017 17:41	1354.2	185	184	84.5	127	60	86.5	158	178	20
29/03/2017 17:48	1343.7	185	184	84.5	127	60	86.5	158	178	20
29/03/2017 17:54	1259.6	185	174	79.5	128	61	85.5	158	178	20
29/03/2017 18:14	1262.1	184	183	83.5	128	61	85.5	158	178	20
29/03/2017 18:34	1262.4	184	183	83.5	128	61	85.5	158	178	20
29/03/2017 18:54	1262.7	184	184	84	128	62	85	158	178	20
29/03/2017 19:00	1087.5	183	182	82.5	131	63	83	158	176	18
29/03/2017 19:20	1092.8	183	182	82.5	131	63	83	158	176	18
29/03/2017 19:40	1094.5	183	182	82.5	131	63	83	158	176	18
29/03/2017 20:00	1095.7	183	182	82.5	131	63	83	158	176	18
29/03/2017 20:12	886.0	181	180	80.5	133	65	81	158	175	17
29/03/2017 20:32	893.8	181	180	80.5	133	65	81	158	175	17
29/03/2017 20:52	896.2	181	180	80.5	133	65	81	158	175	17
29/03/2017 21:12	897.9	181	180	80.5	133	65	81	158	175	17
29/03/2017 21:16	590.1	178	176	77	136	68	78	157	171	14
29/03/2017 21:36	581.9	177	176	76.5	137	68	77.5	157	171	14
29/03/2017 21:56	586.1	177	176	76.5	137	68	77.5	157	171	14
29/03/2017 22:16	588.5	178	176	77	137	68	77.5	157	171	14
29/03/2017 22:22	429.9	176	174	75	140	71	74.5	157	169	12
29/03/2017 22:42	440.1	176	174	75	140	71	74.5	157	169	12
29/03/2017 23:02	423.4	175	173	74	140	71	74.5	157	169	12
29/03/2017 23:22	425.5	175	174	74.5	140	71	74.5	157	169	12
29/03/2017 23:27	217.1	173	171	72	143	75	71	157	166	9
29/03/2017 23:47	234.7	172	170	71	143	75	71	157	166	9
30/03/2017 00:07	238.2	172	170	71	143	75	71	157	166	9
30/03/2017 00:27	240.2	172	170	71	143	75	71	157	166	9
30/03/2017 00:35	7.9	169	167	68	150	80	65	157	164	7
30/03/2017 00:55	7.1	169	167	68	150	80	65	157	164	7
30/03/2017 01:15	7.1	169	167	68	150	80	65	157	164	7
30/03/2017 01:35	6.9	169	167	68	150	80	65	157	164	7
31/03/2017 08:35	5.8	100	100	68	148	125	65	100	100	7
31/03/2017 08:41	197.7	104	102	71	144	130	69.5	100	102	9
31/03/2017 08:46	194.6	104	102	71	143	130	70	100	102	9
31/03/2017 08:51	193.2	104	102	71	143	130	70	100	102	9
31/03/2017 09:01	192.3	104	102	71	143	130	70	100	102	9
31/03/2017 09:11	191.3	104	102	71	143	130	70	100	102	9
31/03/2017 09:16	385.4	107	106	74.5	138	134	74.5	101	105	11
31/03/2017 09:21	380.9	107	106	74.5	138	134	74.5	101	105	11
31/03/2017 09:26	378.3	107	106	74.5	138	134	74.5	101	105	11
31/03/2017 09:36	382.5	107	106	74.5	138	134	74.5	101	106	12
31/03/2017 09:46	379.6	107	106	74.5	138	134	74.5	101	106	12
31/03/2017 09:49	673.1	111	111	79	134	138	78.5	101	110	16
31/03/2017 09:54	667.2	111	111	79	134	138	78.5	101	110	16
31/03/2017 09:59	664.7	111	111	79	134	138	78.5	101	110	16
31/03/2017 10:09	660.7	111	111	79	133	138	79	101	110	16
31/03/2017 10:19	663.3	111	112	79.5	133	138	79	101	110	16
31/03/2017 10:23	858.4	114	114	82	130	140	81.5	101	113	19
31/03/2017 10:28	853.4	114	114	82	130	140	81.5	101	113	19
31/03/2017 10:33	849.5	114	114	82	130	140	81.5	101	113	19
31/03/2017 10:43	847.4	114	114	82	130	140	81.5	101	113	19
31/03/2017 10:53	845.7	114	114	82	130	140	81.5	101	113	19
31/03/2017 10:56	911.5	115	116	83.5	129	141	82.5	101	113	19
31/03/2017 11:01	906.3	115	115	83	129	141	82.5	101	113	19
31/03/2017 11:06	903.8	115	115	83	129	141	82.5	101	113	19
31/03/2017 11:16	899.1	115	115	83	129	141	82.5	101	113	19
31/03/2017 11:26	904.1	115	116	83.5	129	141	82.5	101	113	19
31/03/2017 11:30	1028.2	117	118	85.5	127	143	84.5	102	116	21
31/03/2017 11:35	1017.3	117	118	85.5	127	143	84.5	102	116	21
31/03/2017 11:40	1013.3	117	118	85.5	127	143	84.5	102	116	21
31/03/2017 11:50	1011.4	117	118	85.5	127	144	85	102	116	21
31/03/2017 12:00	1012.8	117	118	85.5	126	144	85.5	102	116	21
31/03/2017 12:07	1126.1	120	121	88.5	123	147	88.5	103	119	23
31/03/2017 12:12	1106.7	120	121	88.5	123	147	88.5	103	119	23
31/03/2017 12:17	1101.9	120	122	89	123	146	88	103	120	24

“Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México”

31/03/2017 12:27	1095.7	120	122	89	123	146	88	104	120	23
31/03/2017 12:37	1109.8	120	122	89	123	146	88	104	120	23
31/03/2017 12:46	1210.5	133	134	101.5	110	159	101	114	132	25
31/03/2017 12:51	1163.4	133	134	101.5	110	159	101	115	132	24
31/03/2017 12:56	1158.0	133	134	101.5	110	159	101	115	132	24
31/03/2017 13:06	1195.2	134	135	102.5	110	160	101.5	116	133	24
31/03/2017 13:16	1185.9	134	136	103	110	160	101.5	116	133	24
31/03/2017 13:27	1202.8	152	153	120.5	91	179	120.5	134	152	25
31/03/2017 13:52	1216.3	153	154	121.5	91	179	120.5	134	152	25
31/03/2017 13:57	1210.0	153	154	121.5	91	179	120.5	134	152	25
31/03/2017 14:02	1206.2	153	154	121.5	91	179	120.5	134	152	25
31/03/2017 14:12	1200.5	153	154	121.5	91	179	120.5	134	152	25
31/03/2017 14:22	1197.3	153	154	121.5	91	179	120.5	134	152	25
31/03/2017 14:29	1299.4	158	160	127	85	184	126	138	157	26
31/03/2017 14:34	1275.4	158	160	127	85	184	126	138	157	26
31/03/2017 14:39	1269.1	158	160	127	85	184	126	138	157	26
31/03/2017 14:49	1299.3	159	161	128	84	185	127	139	158	26
31/03/2017 14:59	1289.1	159	161	128	84	185	127	139	158	26
31/03/2017 15:07	1356.9	173	175	142	70	198	140.5	152	172	27
31/03/2017 15:12	1327.2	173	175	142	70	198	140.5	152	172	27
31/03/2017 15:17	1321.3	173	175	142	70	198	140.5	152	172	27
31/03/2017 15:27	1313.4	173	175	142	70	198	140.5	152	172	27
31/03/2017 15:37	1358.4	173	175	142	69	200	142	154	174	27
31/03/2017 15:48	1373.4	183	185	152	60	210	151.5	162	183	28
31/03/2017 15:53	1351.7	183	185	152	60	210	151.5	162	183	28
31/03/2017 15:58	1347.1	184	185	152.5	60	210	151.5	162	183	28
31/03/2017 16:08	1392.4	185	188	154.5	57	211	153.5	164	185	28
31/03/2017 16:18	1381.6	185	188	154.5	57	211	153.5	164	185	28
31/03/2017 16:24	1416.3	196	198	165	47	221	163.5	174	195	28
31/03/2017 16:29	1378.0	196	198	165	47	221	163.5	174	195	28
31/03/2017 16:34	1427.2	197	199	166	47	221	163.5	175	197	29
31/03/2017 16:44	1407.1	197	199	166	45	225	166.5	176	197	28
31/03/2017 16:54	1399.1	197	200	166.5	45	225	166.5	176	197	28
31/03/2017 17:00	1456.0	204	206	173	38	230	172.5	182	204	29
31/03/2017 17:05	1426.9	204	207	173.5	38	230	172.5	182	204	29
31/03/2017 17:10	1420.8	204	207	173.5	38	230	172.5	182	204	29
31/03/2017 17:20	1450.5	207	209	176	35	233	175.5	184	206	29
31/03/2017 17:30	1439.8	207	209	176	35	233	175.5	185	207	29
31/03/2017 17:40	1471.1	209	211	178	33	234	177	186	208	29
31/03/2017 17:50	1455.1	209	211	178	33	234	177	186	209	30
31/03/2017 18:00	1446.6	209	211	178	33	235	177.5	186	209	30
31/03/2017 18:10	1439.6	209	212	178.5	33	235	177.5	187	209	29
31/03/2017 18:22	1238.3	207	211	177	36	235	176	186	207	28
31/03/2017 18:42	1243.3	207	211	177	36	235	176	186	207	28
31/03/2017 19:02	1244.2	207	210	176.5	36	235	176	186	207	28
31/03/2017 19:22	1244.2	207	210	176.5	36	235	176	186	207	28
31/03/2017 19:28	1040.5	207	210	176.5	39	230	172	186	207	28
31/03/2017 19:48	1018.1	205	207	174	39	230	172	186	205	26
31/03/2017 20:08	1019.2	205	207	174	39	230	172	186	204	25
31/03/2017 20:28	1020.6	205	207	174	39	230	172	186	204	25
31/03/2017 20:33	770.2	203	204	171.5	43	227	168.5	186	202	23
31/03/2017 20:53	778.6	202	204	171	43	227	168.5	186	202	23
31/03/2017 21:13	780.5	202	204	171	43	227	168.5	186	202	23
31/03/2017 21:33	781.5	202	204	171	43	227	168.5	186	202	23
31/03/2017 21:38	620.2	200	201	168.5	45	225	166.5	187	200	20
31/03/2017 21:58	628.8	200	201	168.5	45	225	166.5	187	200	20
31/03/2017 22:18	631.4	201	201	169	45	225	166.5	186	199	20
31/03/2017 22:38	632.2	201	201	169	45	225	166.5	186	199	20
31/03/2017 22:42	410.4	198	198	166	49	222	163	186	196	17
31/03/2017 23:02	421.0	198	197	165.5	49	222	163	186	196	17
31/03/2017 23:22	423.2	198	197	165.5	49	222	163	186	196	17
31/03/2017 23:42	424.9	198	197	165.5	49	222	163	186	196	17
31/03/2017 23:46	245.3	194	194	162	53	218	159	186	193	14
01/04/2017 00:06	255.8	194	194	162	53	218	159	186	193	14
01/04/2017 00:26	258.2	194	194	162	53	218	159	186	193	14
01/04/2017 00:46	259.8	194	194	162	53	218	159	186	193	14
01/04/2017 00:57	9.6	189	199	162	61	212	152	186	189	10
01/04/2017 01:17	9.2	189	199	162	61	212	152	186	189	10
01/04/2017 01:37	9.1	189	199	162	61	212	152	186	189	10
01/04/2017 01:57	8.8	189	189	157	61	212	152	186	189	10

“Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México”

IV.-Registros de prueba de carga Pila 902

Fecha	Carga (t)	C1 (mm)	C2 (mm)	C Promedio	Cable 1	Cable 2	Cable Promedio	Telltale 01	Telltale 02	Dif TellTall(T1-
29/06/2017 12:09	56.62574122	151	150	0	160	206	0	150	151	1
29/06/2017 12:14	54.50064233	152	150	0.5	159	206	0.5	150	151	1
29/06/2017 12:19	53.38158188	152	150	0.5	159	206	0.5	150	151	1
29/06/2017 12:29	71.24451242	153	150		159	205	1	150	151	1
29/06/2017 12:39	69.5286015	153	150	1	159	205	1	150	151	1
29/06/2017 12:42	99.44918088	154	150	1.5	159	205	1	150	151	1
29/06/2017 12:47	94.92181713	154	150	1.5	158	205	1.5	150	151	1
29/06/2017 12:52	93.67343144	154	150	1.5	158	205	1.5	150	151	1
29/06/2017 13:02	92.19873575	154	150	1.5	157	205	2	150	151	1
29/06/2017 13:12	91.50433509	154	150	1.5	157	205	2	150	151	1
29/06/2017 13:18	155.405768	155	151	2.5	157	205	2	150	152	2
29/06/2017 13:23	149.2046693	155	151	2.5	157	205	2	150	152	2
29/06/2017 13:28	147.2805071	155	151	2.5	156	204	3	150	152	2
29/06/2017 13:38	145.0720461	155	151	2.5	156	204	3	150	152	2
29/06/2017 13:48	144.1888623	155	151	2.5	155	204	3.5	150	152	2
29/06/2017 13:52	210.6043155	157	152	4	154	204	4	150	153	3
29/06/2017 13:57	201.0048171	157	152	4	154	204	4	150	153	3
29/06/2017 14:02	198.6778275	157	152	4	154	204	4	150	153	3
29/06/2017 14:12	196.3327518	157	152	4	154	204	4	150	153	3
29/06/2017 14:22	194.968894	157	152	4	154	204	4	150	153	3
29/06/2017 14:24	244.3042301	158	153	5	154	204	4	150	153	3
29/06/2017 14:29	233.2038218	158	153	5	154	204	4	150	153	3
29/06/2017 14:34	230.2801868	158	153	5	154	204	4	150	153	3
29/06/2017 14:44	234.3436198	158	153	5	154	204	4	150	153	3
29/06/2017 14:54	232.802532	158	153	5	154	204	4	150	153	3
29/06/2017 14:57	283.9627609	159	154	6	153	204	4.5	150	153	3
29/06/2017 15:02	272.0566863	159	154	6	153	204	4.5	150	154	4
29/06/2017 15:07	268.9681042	159	154	6	153	204	4.5	150	154	4
29/06/2017 15:17	282.0222543	159	154	6	153	204	4.5	150	154	4
29/06/2017 15:27	276.9892793	159	154	6	153	204	4.5	150	154	4
29/06/2017 15:30	322.248415	160	155	7	152	204	5	150	154	4
29/06/2017 15:35	310.4217471	160	155	7	152	204	5	150	154	4
29/06/2017 15:40	307.1723747	160	155	7	152	204	5	150	154	4
29/06/2017 15:50	303.6766082	160	155	7	152	204	5	150	154	4
29/06/2017 16:00	302.1607944	160	155	7	152	204	5	150	154	4
29/06/2017 16:44	366.6464778	161	156	8	150	203	6.5	150	155	5
29/06/2017 16:49	355.5357082	161	156	8	150	203	6.5	150	155	5
29/06/2017 16:54	351.9699488	161	156	8	150	203	6.5	150	155	5
29/06/2017 17:04	348.4323421	161	156	8	150	203	6.5	150	155	5
29/06/2017 17:14	346.627495	161	156	8	150	203	6.5	150	155	5
29/06/2017 17:19	400.4069656	162	156	8.5	150	203	6.5	150	156	6
29/06/2017 17:24	393.4860812	162	156	8.5	150	203	6.5	150	156	6
29/06/2017 17:29	390.3871361	162	156	8.5	149	203	7	150	156	6
29/06/2017 17:39	395.200071	162	156	8.5	149	203	7	150	156	6
29/06/2017 17:49	392.7131536	162	156	8.5	149	203	7	150	156	6
29/06/2017 17:57	455.7787941	163	156	9	149	203	7	151	156	5
29/06/2017 18:02	450.831021	163	156	9	149	203	7	151	156	5
29/06/2017 18:07	448.5167538	163	156	9	149	203	7	151	156	5
29/06/2017 18:17	445.7520877	163	156	9	149	203	7	151	156	5
29/06/2017 18:27	444.6630177	163	156	9	149	203	7	151	156	5
29/06/2017 18:33	477.0304506	164	156	9.5	149	203	7	151	156	5
29/06/2017 18:38	476.1082536	164	156	9.5	149	203	7	151	156	5
29/06/2017 18:43	475.4142312	164	156	9.5	148	203	7.5	151	156	5
29/06/2017 18:53	473.1289812	164	156	9.5	148	203	7.5	151	156	5
29/06/2017 19:03	471.3816439	164	156	9.5	148	203	7.5	151	155	4
29/06/2017 21:35	528.3649952	165	157	10.5	145	202	9.5	151	156	5

“Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México”

29/06/2017 21:40	525.834719	165	157	10.5	145	202	9.5	151	156	5
29/06/2017 21:45	525.2607529	165	157	10.5	145	202	9.5	151	156	5
29/06/2017 21:55	529.6095478	165	157	10.5	145	202	9.5	151	157	6
29/06/2017 22:05	528.8509509	165	157	10.5	145	202	9.5	151	157	6
29/06/2017 22:10	628.7021251	167	159	12.5	143	201	11	151	158	7
29/06/2017 22:15	624.3032215	167	159	12.5	143	201	11	151	157	6
29/06/2017 22:20	636.6428849	167	159	12.5	143	201	11	151	157	6
29/06/2017 22:30	633.38289	167	159	12.5	143	201	11	151	157	6
29/06/2017 22:40	630.295174	167	159	12.5	143	201	11	151	158	7
29/06/2017 22:44	723.2013397	170	161	15	140	201	12.5	152	161	9
29/06/2017 22:49	702.7890006	170	161	15	140	201	12.5	152	161	9
29/06/2017 22:54	721.9108484	171	162	16	138	197	15.5	152	161	9
29/06/2017 23:04	721.1311831	173	164	18	137	197	16	154	163	9
29/06/2017 23:14	735.8808697	174	166	19.5	136	193	18.5	154	163	9
29/06/2017 23:33	864.7983895	225	217	70.5	85	140	70.5	203	226	23
29/06/2017 23:38	797.6522629	225	217	70.5	85	140	70.5	203	215	12
29/06/2017 23:43	810.1373891	226	218	71.5	84	141	70.5	204	215	11
29/06/2017 23:53	800.272017	226	218	71.5	84	141	70.5	204	215	11
30/06/2017 00:03	824.382043	227	219	72.5	84	141	70.5	205	217	12
30/06/2017 00:10	883.1790257	231	223	76.5	80	140	73	209	221	12
30/06/2017 00:15	854.9876976	231	223	76.5	80	139	73.5	209	221	12
30/06/2017 00:20	848.4373349	231	223	76.5	80	139	73.5	209	221	12
30/06/2017 00:30	879.1125637	233	224	78	77	135	77	210	221	11
30/06/2017 00:50	879.8571074	234	226	79.5	76	134	78	212	224	12
30/06/2017 01:10	873.9039286	236	227	81	74	134	79	213	225	12
30/06/2017 01:30	875.3053127	236	228	81.5	74	134	79	214	226	12
30/06/2017 01:50	885.4068798	238	230	83.5	72	132	81	215	227	12
30/06/2017 02:10	899.7877215	239	232	85	70	129	83.5	218	230	12
30/06/2017 02:24	774.6562413	239	232	85	70	129	83.5	217	229	12
30/06/2017 02:44	775.9151658	239	232	85	71	130	82.5	217	229	12
30/06/2017 03:04	775.0746419	239	232	85	71	130	82.5	217	229	12
30/06/2017 03:24	772.9740604	239	231	84.5	71	129	83	217	229	12
30/06/2017 03:29	707.298773	239	231	84.5	71	129	83	217	228	11
30/06/2017 03:49	709.3727115	239	231	84.5	72	128	83	217	228	11
30/06/2017 04:09	709.1285069	239	230	84	72	130	82	217	228	11
30/06/2017 04:29	708.8770702	239	230	84	71	129	83	217	229	12
30/06/2017 04:35	631.0981865	238	230	83.5	72	128	83	217	228	11
30/06/2017 04:55	634.0912305	238	230	83.5	72	129	82.5	217	227	10
30/06/2017 05:15	634.5808837	238	230	83.5	72	130	82	217	227	10
30/06/2017 05:35	634.867125	238	230	83.5	72	130	82	217	227	10
30/06/2017 05:44	521.1067621	236	228	81.5	74	131	80.5	217	226	9
30/06/2017 06:04	525.5108721	236	228	81.5	75	131	80	217	226	9
30/06/2017 06:24	526.4379714	236	228	81.5	74	132	80	217	226	9
30/06/2017 06:44	526.79106	236	228	81.5	74	131	80.5	217	226	9
30/06/2017 06:50	447.530863	235	227	80.5	75	132	79.5	217	226	9
30/06/2017 07:10	452.6691714	235	227	80.5	75	132	79.5	217	226	9
30/06/2017 07:30	453.5606021	235	227	80.5	76	132	79	217	226	9
30/06/2017 07:50	454.1093666	235	227	80.5	75	132	79.5	217	226	9
30/06/2017 07:55	348.1881377	235	227	80.5	75	134	78.5	217	224	7
30/06/2017 08:15	353.9863793	233	225	78.5	77	134	77.5	217	224	7
30/06/2017 08:35	355.0306756	233	225	78.5	77	134	77.5	217	224	7
30/06/2017 08:55	355.4019177	233	225	78.5	77	134	77.5	217	224	7
30/06/2017 09:01	295.4827006	233	225	78.5	79	135	76	216	223	7
30/06/2017 09:21	282.1206809	233	225	78.5	79	135	76	216	223	7
30/06/2017 09:41	283.2230926	233	222	77	79	135	76	216	223	7
30/06/2017 10:01	283.7454461	233	222	77	79	135	76	216	223	7
30/06/2017 10:10	201.5562855	233	222	77	79	135	76	216	223	7
30/06/2017 10:30	206.2734623	233	222	77	79	135	76	216	223	7
30/06/2017 10:50	207.3866429	233	222	77	79	135	76	216	223	7
30/06/2017 11:10	207.4747718	229	221	74.5	79	135	76	216	223	7
30/06/2017 11:27	147.7560795	229	221	74.5	82	135	74.5	216	221	5
30/06/2017 11:47	153.9188704	229	221	74.5	79	135	76	216	221	5
30/06/2017 12:07	155.5304823	229	221	74.5	79	135	76	216	221	5
30/06/2017 12:27	156.7409524	229	221	74.5	81	136	74.5	216	221	5
30/06/2017 12:35	60.76782754	226	219	72	85	140	70.5	216	219	3
30/06/2017 12:55	52.46463531	226	219	72	85	140	70.5	216	219	3
30/06/2017 13:15	52.46463531	226	219	72	85	140	70.5	216	219	3
30/06/2017 13:35	52.46463531	226	219	72	85	140	70.5	216	219	3
05/07/2017 09:01	0.088784604	150	151	0	85	105	88	200	150	3
05/07/2017 09:35	192.3202525	150	151	0	83	103	90	201	152	4

“Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México”

05/07/2017 09:40	188.5516066	150	153	1	83	103	90	201	152	4
05/07/2017 09:45	193.1798474	155	153	3.5	83	103	90	201	152	4
05/07/2017 09:55	190.5048044	155	153	3.5	83	103	90	201	152	4
05/07/2017 10:05	189.2022165	155	153	3.5	82	102	91	201	152	4
05/07/2017 10:09	452.972879	160	157	8	76	96	97	201	155	7
05/07/2017 10:14	445.8284133	160	157	8	76	96	97	201	155	7
05/07/2017 10:19	456.4483423	160	158	8.5	76	96	97	202	155	6
05/07/2017 10:29	452.421404	160	158	8.5	76	96	97	202	155	6
05/07/2017 10:39	449.9560611	160	158	8.5	76	96	97	202	155	6
05/07/2017 10:42	622.126735	163	160	11	73	93	100	202	157	8
05/07/2017 10:47	611.7761221	163	160	11	73	93	100	202	157	8
05/07/2017 10:52	608.8878789	163	160	11	73	93	100	202	157	8
05/07/2017 11:02	619.8854493	163	161	11.5	73	93	100	202	158	9
05/07/2017 11:12	614.3185188	163	161	11.5	73	93	100	202	158	9
05/07/2017 11:14	829.2232007	167	164	15	69	90	103.5	202	161	12
05/07/2017 11:19	826.2247431	167	164	15	69	90	103.5	202	161	12
05/07/2017 11:24	819.8010311	167	164	15	69	90	103.5	202	161	12
05/07/2017 11:34	814.4509478	167	164	15	69	90	103.5	202	161	12
05/07/2017 11:44	835.4197198	167	165	15.5	69	90	103.5	203	162	12
05/07/2017 11:46	1002.659382	185	183	33.5	51	71	122	217	179	15
05/07/2017 11:51	937.3422809	185	183	33.5	51	71	122	217	179	15
05/07/2017 11:56	958.9210371	185	183	33.5	50	70	123	217	180	16
05/07/2017 12:06	969.6984385	187	185	35.5	49	70	123.5	220	182	15
05/07/2017 12:16	964.7071091	188	186	36.5	49	69	124	221	183	15
05/07/2017 12:44	1016.543784	246	244	94.5	-11	5	186	276	241	18
05/07/2017 12:49	1062.001661	249	246	97	-13	4	187.5	279	243	17
05/07/2017 12:54	1051.120901	249	247	97.5	-15	2	189.5	280	244	17
05/07/2017 13:04	1076.638751	251	249	99.5	-16	1	190.5	281	245	17
05/07/2017 13:14	1064.593532	251	249	99.5	-17	0	191.5	281	246	18
05/07/2017 13:28	1129.563419	278	275	126	-41	-20	213.5	306	272	19
05/07/2017 13:33	1122.187739	281	279	129.5	-45	-21	216	304	276	25
05/07/2017 13:38	1132.875515	283	282	132	-48	-25	219.5	308	278	23
05/07/2017 13:48	1133.835332	287	285	135.5	-51	-30	223.5	316	282	19
05/07/2017 13:58	1148.421033	289	287	137.5	-53	-31	225	317	284	20
05/07/2017 14:07	1187.659543	303	301	151.5	-68	-47	240.5	330	298	21
05/07/2017 14:27	1191.464214	308	305	156	-70	-50	243	334	301	20
05/07/2017 14:47	1187.819376	309	306	157	-72	-50	244	335	302	20
05/07/2017 15:07	1186.563634	309	306	157	-73	-51	245	335	304	22
05/07/2017 15:27	1184.978906	309	306	157	-75	-53	247	337	304	20
05/07/2017 15:47	1182.625264	310	306	157.5	-75	-53	247	337	304	20
05/07/2017 16:07	1190.542437	310	307	158	-75	-53	247	337	305	21
05/07/2017 16:18	1024.564532	308	305	156	-74	-50	245	337	303	19
05/07/2017 16:38	1039.843532	308	305	156	-74	-50	245	337	303	19
05/07/2017 16:58	1045.421397	308	305	156	-74	-50	245	337	303	19
05/07/2017 17:18	1043.215932	309	306	157	-74	-50	245	337	303	19
05/07/2017 17:22	793.7780967	306	303	154	-70	-50	243	337	301	17
05/07/2017 17:42	791.7542593	306	303	154	-70	-50	243	337	301	17
05/07/2017 18:02	792.5250335	306	303	154	-70	-50	243	337	301	17
05/07/2017 18:22	792.6001489	306	303	154	-70	-50	243	337	301	17
05/07/2017 18:34	625.920375	303	301	151.5	-61	-51	239	336	299	16
05/07/2017 18:54	629.8213679	303	301	151.5	-61	-51	239	336	299	16
05/07/2017 19:14	630.3699141	303	301	151.5	-61	-51	239	336	299	16
05/07/2017 19:34	630.2936066	303	301	151.5	-61	-51	239	336	299	16
05/07/2017 19:39	551.9130323	302	299	150	-59	-49	237	336	298	15
05/07/2017 19:59	555.6881486	302	299	150	-59	-49	237	336	298	15
05/07/2017 20:19	556.2274925	302	299	150	-59	-49	237	336	298	15
05/07/2017 20:39	556.0966563	302	299	150	-59	-49	237	336	298	15
05/07/2017 20:43	517.6871288	302	299	150	-59	-49	237	336	297	14
05/07/2017 21:03	520.4606639	302	299	150	-59	-49	237	336	297	14
05/07/2017 21:23	520.6579641	302	298	149.5	-59	-49	237	336	297	14
05/07/2017 21:43	520.6254968	302	298	149.5	-59	-49	237	336	297	14
05/07/2017 21:54	416.1905761	301	296	148	-58	-48	236	336	296	13
05/07/2017 22:14	421.5300365	301	296	148	-58	-48	236	336	296	13
05/07/2017 22:34	422.577629	301	295	147.5	-58	-48	236	336	296	13
05/07/2017 22:54	422.8938996	301	295	147.5	-57	-48	235.5	336	296	13
05/07/2017 23:05	307.5170881	298	294	145.5	-55	-45	233	336	294	11
05/07/2017 23:25	314.1420008	298	294	145.5	-55	-45	233	336	294	11
05/07/2017 23:45	315.4296552	298	294	145.5	-55	-45	233	336	294	11
06/07/2017 00:05	315.9797489	298	294	145.5	-55	-45	233	336	294	11
06/07/2017 00:13	205.9475185	295	294	144	-54	-44	232	336	293	10

“Interpretación de pruebas de carga axial estáticas en pilas de cimentación y su impacto en el diseño de las cimentaciones en el Valle de México”

06/07/2017 00:33	214.7596871	295	294	144	-54	-44	232	336	293	10
06/07/2017 00:53	216.1648962	295	294	144	-54	-44	232	336	293	10
06/07/2017 01:13	216.6193128	295	294	144	-54	-44	232	336	293	10
06/07/2017 01:26	96.77626124	292	292	141.5	-52	-41	229.5	335	292	10
06/07/2017 01:46	102.9393951	292	291	141	-52	-41	229.5	335	292	10
06/07/2017 02:06	104.2199888	292	290	140.5	-52	-41	229.5	335	292	10
06/07/2017 02:26	104.879352	292	290	140.5	-52	-41	229.5	335	292	10
06/07/2017 02:29	30.70258483	289	289	138.5	-49	-39	227	335	289	7
06/07/2017 02:49	7.835818826	287	288	137	-49	-38	226.5	335	289	7
06/07/2017 03:09	8.152513069	287	288	137	-48	-37	225.5	335	288	6
06/07/2017 03:29	8.287239236	287	288	137	-48	-37	225.5	335	288	6
06/07/2017 15:29	10.23183171	287	287	136.5	-48	-36	225	335	288	6