



Proyecto de Investigación Aplicada

MODELOS A ESCALA DE PILOTES DE ACERO TIPO IR BAJO CARGA AXIAL

Flores López, Francisco Alonso¹
Janeth Ramos de Lara²

Reporte N° 2020.IGM.INV.002.001

ENERO 2022

¹Presidente, IGM SC

²Becaria, IGM SC.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Objetivo.....	8
1.2. Alcances	8
2. MODELOS A ESCALA.....	9
2.1. Introducción	9
2.2. Similitud	9
2.2.1. Teorema de Buckingham.....	12
2.2.2. Similitud de modelos a escala aplicados a la mecánica de suelos.....	15
2.3. Diseño de los pilotes para los modelos a escala	18
3. ANTECEDENTES DE MODELOS DE PILOTES A ESCALA.....	22
3.1. Ibarra E. (2013). Transferencia de carga axial por fricción de pilas coladas <i>In Situ</i> al subsuelo granular	22
3.2. Cruz E. (2003), Efecto del envejecimiento en la capacidad de carga a extracción de modelos de pilote en arcilla marina.....	25
3.3. Luna O. (2002), Diseño, construcción y puesta en operación de modelos de pilotes de fricción bajo cargas axiales estáticas y cíclicas	27
3.4. Bilal <i>et al.</i> , (2019), Effect of Pile Spacing on Group Efficiency in Gypseous Soil.....	31
4. DESARROLLO DEL SISTEMA FÍSICO PARA LAS PRUEBAS DE CARGA	36
4.1. Fabricación de los pilotes a escala.....	36
4.2. Contenedores de suelo	36
4.3. Marco de carga.....	44
4.4. Descripción del suelo.	46
4.5. Hincado de pilotes.	53
5. EJECUCIÓN DE PRUEBAS DE CARGA.....	57
5.1. Contenedor 24X55.	59
5.2. Contenedor 18X35.	61
5.3. Contenedor 10X17.	63
6. RESULTADOS.....	63

7. CONCLUSIONES	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXOS	75
Anexo A. Especificaciones de los equipos de medición y aplicación de carga	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Similitud de las curvas esfuerzo-deformación para el prototipo y el modelo. Ciclos de carga y descarga (Rocha, 1957)	16
Figura 2. Concepto del estado crítico de mecánica de suelos de rutas de esfuerzos geométricamente similares para el prototipo A₁Z₁ y el modelo A₂Z₂ (Modificado de Roscoe, 1968)	17
Figura 3. Formulación de módulos tangentes en modelos a escala para revisar el comportamiento constitutivo de suelos del prototipo A₁Z₁ y el modelo A₂Z₂ (Después de Iai, 1989)	18
Figura 4. Perfiles de acero prototipo y a escala considerados en los análisis a partir del uso de las relaciones de Similitud	21
Figura 5. Medición de la rugosidad del pilote con escáner 3D (Ibarra, 2013).	23
Figura 6. Esquema y vista de marco de carga para la aplicación de cargas de extracción, Ibarra E. (2013).	23
Figura 7. Curva carga-desplazamiento para la serie M6 con 60% de grava, Ibarra E. (2013). .	24
Figura 8. Curva carga-desplazamiento para la serie M1 con 30% de grava, Ibarra E. (2013). .	24
Figura 9. Curva carga-tiempo para la serie M6 con 60% de grava, Ibarra E. (2013).	24
Figura 10. Resumen de resistencias unitarias en el fuste medidas en los ensayos (Ibarra, 2013).	24
Figura 11. Esquema de funcionamiento del Sistema de Aplicación de Cargas (SAC), (Luna, 2002).	26
Figura 12. Esquema de marco de carga, (Luna, 2002).	26
Figura 13. Registro de hincado de los pilotes a escala (Ibarra, 2013).	26
Figura 14. Ensayos de extracción preliminares para conocer la evolución de la capacidad de carga por fuste. Pilote 1, Cruz E. (2003).	26
Figura 15. Ensayos de extracción definitivos para conocer la evolución en la capacidad de carga por fuste en modelos de pilotes distintos, Cruz E. (2003).	26
Figura 16. Determinación de la capacidad de carga en la falla de pico y desplazamiento a la falla en ensayos de extracción con rehincado, Cruz E. (2003).	27
Figura 17. Celda de carga axial junto con el esquema de puente completo (Luna O., (2002).	28
Figura 18. Relaciones de escala entre prototipo y modelo (Luna O., 2002).	28
Figura 19. Detalles de pilote instrumentado (Luna O., 2002)	29
Figura 20. Distribución de cargas axiales internas en el modelo de pilote (Luna O., 2002) 30	30
Figura 21. Esquema del equipo de prueba fabricado, Bilal et al., (2019).	31

Figura 22. Equipo de laboratorio para evaluar la eficiencia de grupo de pilotes (Bilal et al., 2019).	32
Figura 23. Dimensiones de la tapa y configuración y arreglo de grupos de pilotes ensayados (Bilal et al., 2019).	32
Figura 24. Influencia del efecto de grupo en pilas carga-asesamiento, a) S1 estado seco, b) S2 estado seco, c) S1 estado húmedo, d) S2 estado húmedo, Bilal et al., (2019).	33
Figura 25. Zona de reacomodo del material por efecto del hincado del pilote (Bilal et al., 2019).	34
Figura 26. Relación entre la capacidad de carga última de los pilotes y la relación S/D (Separación/Diámetro), (Bilal et al., 2019).	34
Figura 27. Relación entre la eficiencia de grupo de los pilotes y la relación S/D (Separación/Diámetro), (Bilal et al., 2019).	34
Figura 28. Proceso de fabricación de los pilotes a escala.	37
Figura 29. Fotografía de los 18 pilotes a escala tipo IR pintados con pintura anticorrosiva y marcados a cada 1 cm para llevar un registro del número de golpes con la profundidad. ..	38
Figura 30. Distribución de grupos de pilotes en los modelos a escala con separaciones de 3 veces el ancho d.	38
Figura 31. Proceso de fabricación del contenedor para pilotes W24x55.	39
Figura 32. Proceso de fabricación del contenedor para pilotes W18x35.	40
Figura 33. Proceso de fabricación del contenedor para pilotes W10x17.	41
Figura 34. Contenedor para pilotes W24x55.	42
Figura 35. Contenedor para pilotes W18x35.	42
Figura 36. Contenedor para pilotes W10x17.	43
Figura 37. Sistema de compresión axial estática.	44
Figura 38. Sistema de extracción axial estática.	45
Figura 39. Sistema de hincado del contenedor 24X55. Figura 40. Sistema de hincado de los contenedores 10X17 y 18X35.	45
	45
Figura 41. Proceso de extracción de muestra.	47
Figura 42. Proceso de llenado de contenedor 10X17 y pruebas mecánicas ejecutadas.	48
Figura 43. Perfil estratigráfico del contenedor 10X17.	50
Figura 44. Resultados de pruebas mecánicas.....	52
Figura 45. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas TxUU.....	53
Figura 46. Acomodo de pilotes por contenedor.	54
Figura 47. Placa guía para hincado de pilotes.	54
Figura 48. Acomodo, verificación de verticalidad e hincado de los pilotes.	55
Figura 49. Número de golpes y altura de caída en el hincado.	56

Figura 50. Prueba de compresión y tensión axial.	58
Figura 51. Curvas carga-desplazamiento de las pruebas de compresión para el grupo de cuatro pilotes y para el pilote individual, W24X55.	59
Figura 52. Curva de carga y desplazamiento de la prueba de carga axial a compresión para el contenedor W24X55 a los 30 días.	60
Figura 53. Comparación de las curvas de carga y desplazamiento de las pruebas de carga axial a compresión en grupo de pilotes.	60
Figura 54. Curvas de carga y desplazamiento de las pruebas de carga extracción axial, W24X55.	61
Figura 55. Curvas de carga y desplazamiento de la prueba de carga axial a compresión para el contenedor W18X35 a los 30 días.	62
Figura 56. Curvas de carga y desplazamiento de las pruebas de carga extracción axial, W18X35.	62
Figura 57. Curva de carga y desplazamiento de las pruebas de carga axial a compresión para el contenedor W10X17 a los 14 y 30 días.	63
Figura 58. Comparación de las curvas de carga y desplazamiento de las pruebas de carga axial a compresión en pilote individual y grupo de pilotes dividido entre 4.	64
Figura 59. Comparación de las curvas de un pilote de grupo y el pilote individual, W18X35.	65
Figura 60. Comparación de las curvas carga-desplazamiento de las pruebas de compresión a los distintos grupos de pilotes.	66
Figura 61. Comparación de las curvas a tensión de un pilote de grupo y el pilote individual, W24X55.	67
Figura 62. Comparación de las curvas a tensión de un pilote de grupo y el pilote individual, W18X35.	67
Figura 63. Comparación de curvas carga y desplazamiento de las pruebas de carga extracción axial para los grupos de pilotes W24X55 y W18X35.	68
Figura 64. Comparación de curvas carga y desplazamiento de las pruebas de carga extracción axial para pilotes individuales W24X55 y W18X35.	68
Figura 65. Fotografías de suelo adherido al pilote al extraerlo después de la prueba de carga a tensión.	70
Figura 66. Fotografías de suelo adherido al pilote al extraerlo después de la prueba de carga a tensión.	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cantidades físicas y sus dimensiones (Modificado de Moncarz y Krawinkler, 1981)...	11
Tabla 2. Leyes de similitud (Tomado de Moncarz y Krawinkler, 1981).....	14
Tabla 3. Características de los perfiles de acero empleados	19
Tabla 4. Factores de escala y características de los pilotes empleados en los modelos a escala..	20
Tabla 5. Relaciones de similitud entre prototipo y modelo a escala de los pilotes empleados	20
Tabla 6. Resumen de algunas investigaciones sobre datos de pruebas del efecto de grupo en pilas (Bilal et al, 2019)	35
Tabla 7. Resultados de pruebas índice.	49
Tabla 8. Resultados de pruebas de Consolidaciones Unidimensionales.....	51
Tabla 9. Resultados de pruebas Triaxiales No consolidadas No drenadas	51
Tabla 10. Pruebas de carga ejecutadas.....	58
Tabla 11. Resumen de resultados de pruebas de carga axial a compresión.....	64
Tabla 12. Resumen de resultados de pruebas de carga axial a tensión.....	64

1. INTRODUCCIÓN

De julio de 2018 a la fecha hemos hincado 2470 ml de perfiles de acero tipo IR que trabajan como pilotes. La necesidad de contar con un conocimiento más profundo en el uso de perfiles de acero tipo IR como elementos de cimentación en suelos del territorio nacional, más aún, en la Ciudad de México donde hemos mostrado su aplicabilidad para re-cimentar estructuras y cimentaciones nuevas en espacios reducidos nos ha llevado a proponer esta primera investigación respecto a la obtención de la capacidad de carga axial de pilotes a escala. Además de los altos costos que implica la ejecución de pruebas de pilotes a escala real, comparado con los modelos a escala.

1.1.Objetivo

Los objetivos de este trabajo incluyen la elaboración y ejecución en el laboratorio de modelos a escala de pilotes de acero tipo IR para medir su capacidad de carga axial a compresión y tensión. Así como la medición de la capacidad de carga de fuste y punta de pilotes individuales con diferentes relaciones de aspecto longitud y ancho de perfil, L/B.

1.2.Alcances

- I. Construir y ensayar modelos a escala de pilotes de acero tipo IR para medir su capacidad de carga axial a compresión y tensión,
- II. Medir la capacidad de carga de pilotes individuales con diferentes relaciones de aspecto longitud y ancho de perfil, L/B,
- III. Simular el proceso de hincado de los pilotes IR,
- IV. Evaluar el efecto de grupo en la capacidad de carga axial mediante arreglos de pilotes con diferentes separaciones, S,
- V. Modelos de pilotes en suelo de la zona de lago de la CDMX.

2. MODELOS A ESCALA

2.1. Introducción

El uso de modelos a escala en geotecnia ofrece la ventaja de simular sistemas complejos bajo condiciones controladas, y da la oportunidad de ampliar el conocimiento de los mecanismos fundamentales que operan en estos sistemas (Meymand, 1998). En muchas circunstancias (e.g. pruebas de carga axial y lateral en pilotes), los modelos a escala pueden ofrecer alternativas más económicas que los correspondientes modelos a escala real. Para otras investigaciones (e.g. interacción suelo-pilote-estructura o efectos de grupo de pilotes), los modelos a escala permiten la posibilidad de simular fenómenos que no se pueden lograr “a voluntad” en el prototipo.

La práctica de realizar estudios de parámetros con modelos a escala puede ser usada para explorar áreas donde los casos historia y/o pruebas a escala real son escasos, como lo puede ser en las pruebas de carga en pilotes de acero tipo IR. Además de la interpretación cualitativa, los resultados de pruebas a escala se utilizan a menudo como puntos de referencia para calibrar métodos analíticos o numéricos, o realizar predicciones cuantitativas de la respuesta de pilotes a escala real. Para estas aplicaciones, es necesario contar con un conjunto de relaciones o leyes de escala que relacionen el modelo observado y el comportamiento previsto del prototipo.

En este capítulo se describe las teorías de similitud del modelo a escala y el prototipo, y se aplicarán y desarrollarán los criterios a seguir en el diseño de los modelos del suelo y de los pilotes a usarse en el programa de pruebas en modelos a escala 1-G.

2.2. Similitud

Las relaciones entre los modelos a escala y el correspondiente prototipo son descritas mediante la teoría de similitudes de modelos a escala. Kline (1965) definió tres métodos para incrementar la complejidad y la potencia de aplicación de los modelos a escala, estos incluyen los análisis dimensionales, la teoría de similitudes y el método de ecuaciones gobernantes. El análisis dimensional consiste en la conversión de una ecuación dimensionalmente homogénea, que contiene cantidades físicas y describe un fenómeno físico, en una ecuación equivalente que consiste en productos adimensionales de potencia de cantidades físicas. El análisis dimensional se

puede usar exclusivamente para comprender la forma de la solución sin aplicación al modelo a escala. La teoría de la similitud identifica las fuerzas que operan en el sistema y utiliza el análisis dimensional para construir e igualar en términos adimensionales el modelo a escala y el prototipo. Las relaciones de escala entre el modelo y el prototipo también se conocen como ecuaciones predictivas. El método que gobierna las ecuaciones involucra la transformación de la ecuación diferencial que describe el proceso de una forma no dimensional, y la formulación de variables de similitud que relacionan el modelo y el prototipo. Las variables de similitud deben ser determinadas para las condiciones de frontera e iniciales que operan el sistema.

Los modelos a escala pueden definirse por tener medio de tres aspectos diferentes relacionados con el prototipo, esto es, similitud geométrica, cinemática o dinámica (Langhaar, 1951). La similitud geométrica se define mediante las dimensiones física homologas del modelo y del prototipo. La similitud cinemática se refiere al movimiento de partículas homólogas entre el modelo y el prototipo en tiempos homólogos. La similitud dinámica describe una condición en la cual las partes homólogas del modelo y el prototipo experimenten fuerzas netas homólogas. Los modelos a escala pueden cumplir los requisitos de similitud en diferentes grados. Moncarz y Krawinkler (1981) indica que distintos investigadores han indicado diferentes categorías a los modelos, estos son “*verdadero o real*”, “*adecuado*” y “*distorsionado*”. Un modelo real cumple todos los requisitos de similitud por lo que es las pruebas de carga axial a compresión, tensión y lateral a escala real. Un modelo *adecuado* toma en cuenta correctamente las principales características del problema, permitiendo que las características secundarias no tomen un papel principal, y las ecuaciones predictivas no se vean afectadas significativamente. Los modelos *distorsionados* se refieren a aquellos casos en los que la desviación de los requisitos de similitud distorsiona la ecuación predictiva en los que se introducen distorsiones de compensación en otros productos adimensionales para poder preservar la ecuación predictiva.

El análisis dimensional en su forma más simple propone reducir un parámetro ingenieril a sus medidas “básicas” o unidades de medición fundamentales de Masa-Longitud-Tiempo mientras se desarrollan factores de escala para cada una de las tres cantidades. Por ejemplo, el módulo de elasticidad es una medida de esfuerzo con unidades de fuerza / área y sus dimensiones son ML^{-2}

$1/T^{-2}$, por lo que los factores de escala de masa μ , longitud λ , y tiempo τ se combinan para formar una relación de escala $\mu\lambda^{-1}\tau^{-2}$ que relacionan el modelo y el prototipo para su respuesta en esfuerzos. La Tabla 1 presenta un listado de cantidades comunes utilizadas en ingeniería y su descripción dimensional en el sistema de Masa-Longitud-Tiempo (MLT) y Fuerza-Longitud-Tiempo (FLT). Debe notarse que varias cantidades de esta tabla son dimensionalmente equivalentes, como la presión, los esfuerzos y el módulo de elasticidad.

Tabla 1. Cantidades físicas y sus dimensiones (Modificado de Moncarz y Krawinkler, 1981)

Cantidad física	Símbolo	Descripción en términos de otras cantidades físicas	Dimensiones en el sistema FLT			Dimensiones en el sistema MLT		
			F	L	T	M	L	T
Ángulo	ϕ		0	0	0	0	0	0
Deformación	ϵ	σ/E	0	0	0	0	0	0
Relación de Poisson	ν		0	0	0	0	0	0
Coeficiente de Fricción	μ_F	F_F/F	0	0	0	0	0	0
Longitud	ℓ		0	1	0	0	1	0
Tiempo	t		0	0	1	0	0	1
Frecuencia	ω	$(K/m)^{1/2}$	0	0	-1	0	0	-1
Fuerza resistente elástica	F_E	$K\delta, \sigma\ell^2, \epsilon E\ell^2$	1 0 0			1 1 -2		
Fuerza Gravitacional	F_G	$\gamma\ell^3, \rho g\ell^3$	1 -2 0			1 -1 -2		
Fuerza de inercia	F_I	$ma, \rho\ell^3a$	0 1 0			0 1 0		
Fuerza de amortiguación viscosa	F_D	cV	0 3 0			0 3 0		
Fuerza de fricción Coulomb	F_F	$\mu_F F$	0 4 0			0 4 0		
Módulo de Elasticidad	E	$\sigma/\epsilon, F_E/\epsilon\ell^2$	1 -1 0			1 0 -2		
Módulo de Corte	G	$E/2(1+\nu)$	0 0 1			0 0 1		
Esfuerzo	σ	$\epsilon E, F_E/\ell^2$	0 0 -1			0 0 -1		
Presión	p	F/ℓ^2	0 0 0			0 0 0		
Desplazamiento	δ	$\epsilon\ell, F_E/E\ell$	0 0 0			0 0 0		
Primer momento del área	Q		0 0 0			0 0 0		
Segundo momento del área	I		0 0 0			0 0 0		
Rigidez Elástica	K	$\epsilon E\ell, F_E/\delta$	0 0 0			0 0 0		
Rigidez Axial	K_a	AE/ℓ	0 0 0			0 0 0		
Rigidez de Corte	k_s	$A_s G/\ell$	0 0 0			0 0 0		
Rigidez a flexión	k_f	EI/ℓ^3	0 0 0			0 0 0		

Cantidad física	Símbolo	Descripción en términos de otras cantidades físicas	Dimensiones en el sistema FLT			Dimensiones en el sistema MLT		
			F	L	T	M	L	T
Momento	m	$F\ell$	1	1	0	1	2	-2
Peso Específico	γ	$\rho g, F_G/\ell^3$	1	-3	0	1	-2	-2
Densidad de masa	ρ	$\gamma/g, F_G/g\ell^3$	1	-4	2	1	-3	0
Masa	m	$\rho\ell^3, F_G/g$	1	-1	2	1	0	0
Momento de inercia	I_m	$m\ell^2$	1	1	2	1	2	0
Velocidad	v		0	1	-1	0	1	-1
Velocidad de onda S	v_s	$[E/2(1+v)\rho]^{1/2}$	0	0	-1	0	0	-1
Velocidad de onda P	v_p	$[(1-v)E/(1-v-2v^2)\rho]^{1/2}$	0	1	-2	0	1	-2
Velocidad angular	θ'		0	0	-2	0	0	-2
Aceleración	a		1	1	0	1	2	-2
Aceleración de la gravedad	g							
Aceleración angular	θ''							
Energía cinemática	KE	mv^2						
Energía potencial	PE	$F\delta$						
Energía de amortiguamiento	DE	cv^2t						
Energía histerética	HE	$\sigma\epsilon\ell^3$						
Energía de deformación recuperable	RSE	$\sigma\epsilon\ell^3, K\delta^2$						

2.2.1. Teorema de Buckingham

Un análisis dimensional adecuado involucra la aplicación del teorema Pi de Buckingham, que establece que cualquier ecuación dimensionalmente homogénea que involucre ciertas cantidades físicas puede reducirse a una ecuación equivalente que incluya un conjunto completo de productos adimensionales.

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$$

2.1

Puede ser expresado de la siguiente forma:

$$G(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m) = 0 \quad 2.2$$

Donde π términos son productos adimensionales independientes de las cantidades físicas X_1, X_2, \dots, X_n . El número de productos adimensionales (m) es igual al número de variables físicas (n) menos el número de medidas fundamentales involucradas (N). Los términos π individuales se forman agrupando las variables físicas en términos adimensionales; además se deben incluir todas las variables y los términos m deben ser independientes. En teoría, no existe un conjunto único de términos π para un problema en particular, pero para los problemas de modelado a escala es esencial que se identifiquen las variables correctas y que los términos π se formen adecuadamente. Las relaciones de escala se pueden determinar igualando el modelo y los términos de π del prototipo correspondiente, es decir que π_m sea igual a π_p . Una condición suficiente para completar la similitud está dada por las siguientes ecuaciones:

$$(\pi_1)_m = (\pi_1)_p \quad 2.3$$

$$\begin{aligned} (\pi_2)_m &= (\pi_2)_p \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ (\pi_{n-N})_m &= (\pi_{n-N})_p \end{aligned} \quad 2.4$$

La ecuación 2.3 es referida como la ecuación de predicción y la ecuación 2.4 indica las condiciones de diseño del modelo. La teoría de similitudes intenta describir el problema de forma más racional al fundamentar la formación de los términos π en las fuerzas que prevalecen en el sistema (Meymand, 1998). La relación entre la velocidad de onda de cortante del modelo y el prototipo es conocida como condición de Cauchy:

$$\frac{(V_s)_p}{(V_s)_m} = \sqrt{\lambda} \quad 2.5$$

Moncarz y Krawinkler (1981) muestran que la condición de Cauchy es un requisito necesario para replicar de manera simultánea las fuerzas resistentes, fuerzas iniciales y las fuerzas

gravitacionales en un sistema de modelo dinámico. La dificultad de diseñar modelos a escala “*verdaderos o reales*” radica en la dificultad de seleccionar materiales del modelo que tengan una combinación de módulo pequeño y densidad de masa grande para cumplir con la condición de Cauchy. Existen dos alternativas hacia donde conducir las pruebas en modelos a escala, una se denomina “simulación de masa artificial” y la segunda “efectos de la gravedad ignorados”. La Tabla 2 muestra las leyes de similitud para algunas cantidades físicas para modelos a escala mencionados en este párrafo. Como se mencionó, replicar un modelo a escala real o verdadera es extremadamente difícil de realizar debido a problemas de simulación de los materiales. Sin embargo, para determinados factores de escala de longitud, pueden encontrarse materiales adecuados para modelar estructuras metálicas y generar un programa de pruebas piloto mediante modelos simples.

Tabla 2. Leyes de similitud (Tomado de Moncarz y Krawinkler, 1981)

Parámetros de escala	Tipo de modelo	Replica real	Simulación de masa artificial	Fuerzas gravitacionales ignoradas*		Distorsión por deformación
				Cualquier material	Material prototipo	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	
Longitud	ℓ_r	$\underline{\ell}_r$	$\underline{\ell}_r$	$\underline{\ell}_r$	$\underline{\ell}_r$	$\underline{\ell}_r$
Tiempo	t_r	$\ell_r^{1/2}$	$\ell_r^{1/2}$	$\ell_r(\varepsilon/\rho)_r^{-1/2}$	ℓ_r	$(\varepsilon_r \ell_r)^{1/2}$
Frecuencia	ω_r	$\ell_r^{-1/2}$	$\ell_r^{-1/2}$	$\ell_r^{-1}(E/\rho)_r^{-1/2}$	ℓ_r^{-1}	$(\varepsilon_r \ell_r)^{-1/2}$
Velocidad	v_r	$\ell_r^{1/2}$	$\ell_r^{1/2}$	$(E/\rho)^{1/2}$	1	$(\varepsilon_r \ell_r)^{1/2}$
Aceleración Gravitacional	g_r	<u>1</u>	<u>1</u>	Ignorado	Ignorado	<u>1</u>
Aceleración	a_r	1	1	$\ell_r^{-1}(E/\rho)_r$	ℓ_r^{-1}	1
Densidad de masa	ρ_r	E_r/ℓ_r	-	$\underline{\rho}_r$	<u>1</u>	$\varepsilon_r E_r \ell_r^{-1}$
Deformación	ε_r	1	1	1	1	<u>ε_r</u>
Módulo de elasticidad	E_r	E_r	E_r	E_r	1	$E_r \varepsilon_r$
Rigidez específica	$(E/\rho)_r$	\underline{E}_r	-	$(E/\rho)_r$	1	\underline{E}_r
Desplazamiento	δ_r	$\underline{\ell}_r$	$\underline{\ell}_r$	$\underline{\ell}_r$	$\underline{\ell}_r$	$\ell_r \varepsilon_r$
Fuerza	F_r	$E_r^{\ell_r 2}$	$E_r^{\ell_r 2}$	$E_r^{\ell_r 2}$	ℓ_r^2	$E_r^{\ell_r 2} \varepsilon_r$
Energía	$(EN)_r$	$E_r^{\ell_r 3}$	$E_r^{\ell_r 3}$	$E_r^{\ell_r 3}$	ℓ_r^3	$E_r^{\ell_r 3} \varepsilon_r^2$

* Siempre se puede utilizar para modelos elásticos lineales.

Tipo de modelo	Replica real	Simulación de masa artificial	Fuerzas gravitacionales ignoradas*		Distorsión por deformación
			Cualquier material	Material prototipo	
Parámetros de escala	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

La relación de escala subrayada es elegida por el investigador.

2.2.2. Similitud de modelos a escala aplicados a la mecánica de suelos

Rocha (1957) fue el primer investigador que describió sistemáticamente el modelado a escala en problemas de mecánica de suelos. Realizó una diferenciación entre las condiciones de esfuerzos totales y esfuerzos efectivos, para poder derivar relaciones de similitud separadas para cada caso. Para tener presente el régimen de esfuerzos diferentes en el prototipo respecto al modelo a escala 1-G, Rocha propone que el comportamiento constitutivo del suelo puede ser escalado y por lo tanto, asume que los esfuerzos y las deformaciones tienen una relación lineal entre el prototipo y el modelo. En la **Figura 1** se muestra este concepto, donde α es el factor de escalado de los esfuerzos y β es el factor de escalado de las deformaciones. Este autor, limitó sus derivaciones a deformaciones elásticas y opinó que el análisis presenta 2 complicaciones “*insuperables*” cuando se considera la respuesta no lineal del suelo.

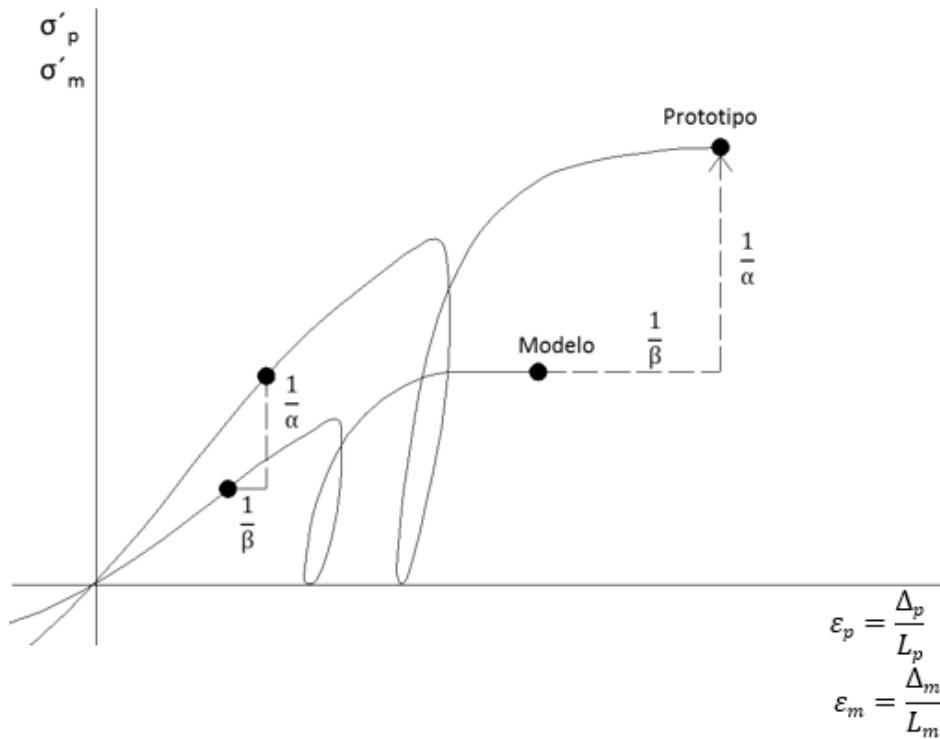


Figura 1. Similitud de las curvas esfuerzo-deformación para el prototipo y el modelo. Ciclos de carga y descarga (Rocha, 1957)

Roscoe (1957) investigó la dificultad de los modelos a escala al replicar el comportamiento constitutivo de prototipos de suelos en los que la respuesta depende del peso propio del material, *e.i.* esfuerzo de confinamiento. Este autor, extendió la hipótesis de Rocha y la reformuló en la forma de la teoría del estado crítico en suelos, afirmando que los comportamientos de dos elementos de suelo solo serán idénticos cuando los dos elementos estén sujetos a dos rutas de esfuerzos geométricamente similares y sus estados iniciales en una gráfica *e*-*ln σ'* sean equidistantes a la línea de estado crítico. Esta teoría se muestra en la **Figura 2**, la cual menciona Meymand (1998) fue corroborada con algunas pruebas de laboratorio limitadas. También observó que las pruebas en centrífuga pueden ser una alternativa potencialmente viable para dicho enfoque, sin embargo, debido al costo elevado de estas pruebas y a la poca disponibilidad para proyectos de la práctica muchas veces no se puede lograr usar este enfoque.

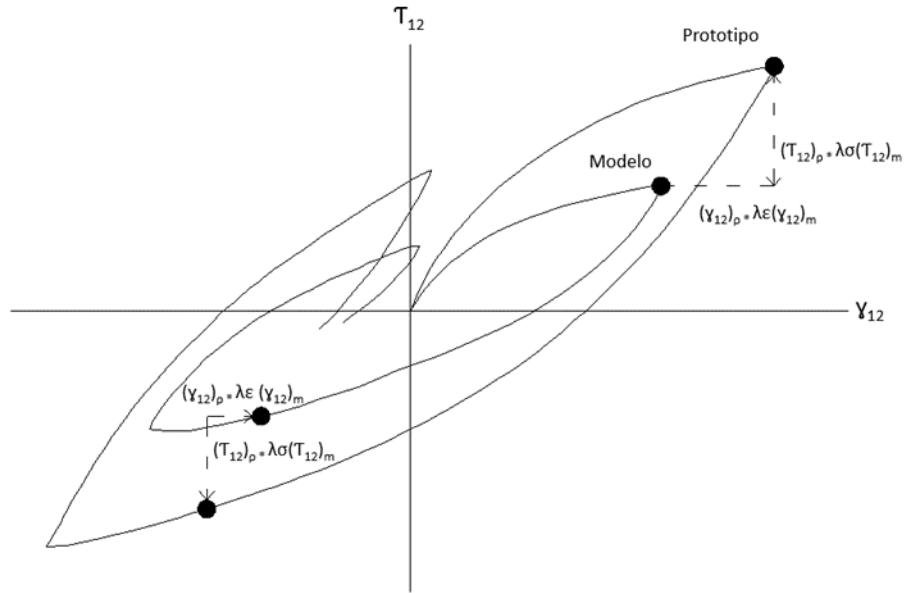


Figura 2. Concepto del estado crítico de mecánica de suelos de rutas de esfuerzos geométricamente similares para el prototipo A₁Z₁ y el modelo A₂Z₂ (Modificado de Roscoe, 1968)

Kana *et al.* (1986) describe la aplicación del teorema Pi de Buckingham al problema de modelos a escala durante la simulación de la interacción dinámica de un pilote instalado en arcillas. Estos autores indican la siguiente ecuación adimensional:

$$\frac{x}{D} = \left(\frac{y}{D}, \frac{M_c}{DM}, \frac{J_c}{D^3 M}, \frac{M}{\rho D^2}, \frac{EI}{E_r D^4}, \frac{EI}{E_l D^4}, \frac{FD^2}{EI}, \frac{MD^4 \omega^2}{EI}, \omega T_o, \frac{\omega^2 D}{g} \right) \quad 2.6$$

Donde x es la deflexión lateral del pilote, D es el diámetro del pilote, M_c es la masa en la cabeza del pilote, M es la masa del pilote por unidad de longitud, J_c es el momento de inercia en la cabeza del pilote, ρ es la densidad del suelo, E es el módulo de elasticidad del pilote, I es el momento de inercia de la sección transversal del pilote, E_r es el módulo de elasticidad inicial del suelo, E_l es el módulo de elasticidad final del suelo, F es la carga lateral aplicada, ω es la frecuencia de oscilación, T_o es la duración del barrido de frecuencias lineales, g es la aceleración de la gravedad.

Basado en el trabajo de Rocha, Iai en 1989 consideró un enfoque de módulo de tangente para simular el comportamiento constitutivo de suelos saturados en modelos a escala, como se muestra en la **Figura 3**. Este autor, derivó un conjunto completo de relaciones de escala para un sistema suelo-estructura-fluido bajo carga dinámica y definió el problema en términos de factores de escala geométricos, de densidad y deformaciones. Finalmente, estos factores fueron asociados a las velocidades de onda de cortante del prototipo y del modelo a escala.

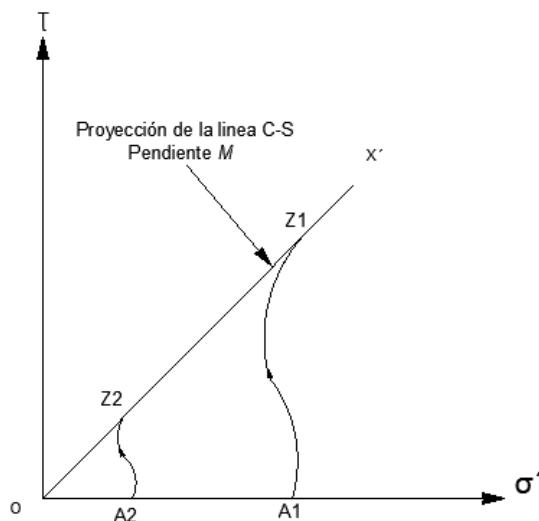


Figura 3. Formulación de módulos tangentes en modelos a escala para revisar el comportamiento constitutivo de suelos del prototipo A_1Z_1 y el modelo A_2Z_2 (Después de Iai, 1989)

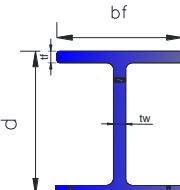
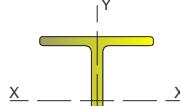
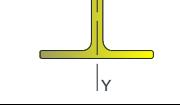
Está claro que no se puede escribir una ecuación gobernante que describa la totalidad de un sistema, ni el análisis dimensional o la teoría de similitudes puede ser aplicado directamente a un sistema complejo que permita construir un modelo “*verdadero o real*” (Meynard, 1998). El enfoque considerando un modelo viable para ser aplicable, consiste en identificar y modelar las fuerzas y procesos primarios mientras se suprime los efectos secundarios obteniendo así un modelo a escala “*adecuado*”. Este enfoque es el que se emplea en esta investigación.

2.3. Diseño de los pilotes para los modelos a escala

Los pilotes que se emplean en esta investigación corresponden a perfiles de acero tipo IR. De acuerdo con nuestra experiencia en el uso de estos pilotes como elementos de cimentación de

edificaciones de 3 a 7 niveles en arcillas de la CDMX, en la Tabla 3 se muestran tres tipos de perfiles. En todos los casos para los pilotes se consideró un peso volumétrico γ_m de 7850 kg/m³, un módulo de elasticidad de 2.1×10^6 kg/cm² y un esfuerzo de fluencia f_y de 3515 kg/cm².

Tabla 3. Características de los perfiles de acero empleados

Simbología	ID	M [kg/m]	d [mm]	tw [mm]	bf [mm]	tf [mm]	Pp [M]	Ap [cm ²]	I _x [cm ⁴]	I _y [cm ⁴]
	W10x17	25.30	257	6.1	102	8.4	909.8	32.2	3,409	148
	W18x35	52.20	450	7.6	152	10.8	1492.8	66.5	21,228	637
	W24x55	82.00	599	10	178	12.8	1890	104.5	56,191	1,211

M: Masa por unidad de longitud, d: peralte, tw: espesor del alma, bf: ancho del patín, tf: espesor del patín, Pp: perímetro del pilote, Ap: área transversal del pilote, I_x: momento de inercia con respecto al eje X, I_y: momento de inercia con respecto al eje Y.

El uso de los factores de escala para cumplir las leyes de similitud mencionadas anteriores, ayuda a poder extrapolar resultados de los modelos a escala a pilotes a escala real. Sin embargo, también se ha dicho que es difícil de cumplir estas leyes en los modelos 1-G. En este trabajo se realizó un análisis para poder obtener las dimensiones y masas de pilotes a escala de los tres prototipos de pilotes de la Tabla 3 de acuerdo con las ecuaciones de similitud 2.3 y 2.4. La Tabla 4 muestra las dimensiones de los pilotes y los factores de escala empleados para los 3 prototipos de perfiles de acero. Para el caso de los perfiles W10x17 y W18x35 los factores de escala del peralte, d, y el espesor del alma bf son de 8, para el perfil W24x55 los factores de escala son de 7, para los mismos

parámetros. Los factores de las masas por unidad de longitud, M , son de 14.50, 4.27 y 13.00kg/m para los perfiles W10x17, W18x35 y W24x55, respectivamente. La Tabla 4 presenta los datos y dimensiones de los diferentes parámetros empleados para fabricar los pilotes a escala. Las relaciones de peralte-longitud de los pilotes tanto del prototipo como de los modelos a escala son de 19, 11 y 8 para los perfiles W10x17, W18x35 y W24x55, respectivamente. La Tabla 5 presenta las relaciones de similitud calculadas para los tres perfiles de acero estudiados de los prototipos y los modelos a escala. La **Figura 4** presenta los esquemas con las dimensiones de los perfiles prototipo (color azul) y los modelos a escala (color rojo) que serán fabricados.

Tabla 4. Factores de escala y características de los pilotes empleados en los modelos a escala

ID del pilote Variable	Unidades	W10x17			W18x35			W24x55		
		Prototipo	Modelo	Factor de escala	Prototipo	Modelo	Factor de escala	Prototipo	Modelo	Factor de escala
d [mm]		257	32.13	8	450	56.25	8	599	85.57	7
bf [mm]		102	12.75	8	148	18.50	8	178	25.43	7
Mc [kg]		232.648	2	116.324	195.597	2	97.7985	181.36	2	90.68
M [kg/m]		25.3	1.74	14.5	52.2	4.27	12.2	82	6.33	13.0
Ep [kg/cm ²]		2.10E+06	2.10E+06	1	2.10E+06	2.10E+06	1	2.10E+06	2.10E+06	1
Es [kg/cm ²]										
Ix [cm ⁴]		3,409	2.822	1208.0	21,228	17.133	1239.0	56,191	62.901	893.3
Iy [cm ⁴]		148	0.196	755.1	637	0.610	3250.0	1,211	1.506	804.1
L [mm]		5000	625	8	5000	625	8	5000	714.3	7
d/L	-	19	19	1	11	11	1	8	8	1

Tabla 5. Relaciones de similitud entre prototipo y modelo a escala de los pilotes empleados

ID del pilote		W10x17		W18x35		W24x55	
Similitud $\pi_p = \pi_m$	Prototipo	Modelo	Prototipo	Modelo	Prototipo	Modelo	
$(Mc/DM)_p = (Mc/DM)_m$	0.035780	0.035780	0.00832682	0.00832683	0.003692	0.003692	

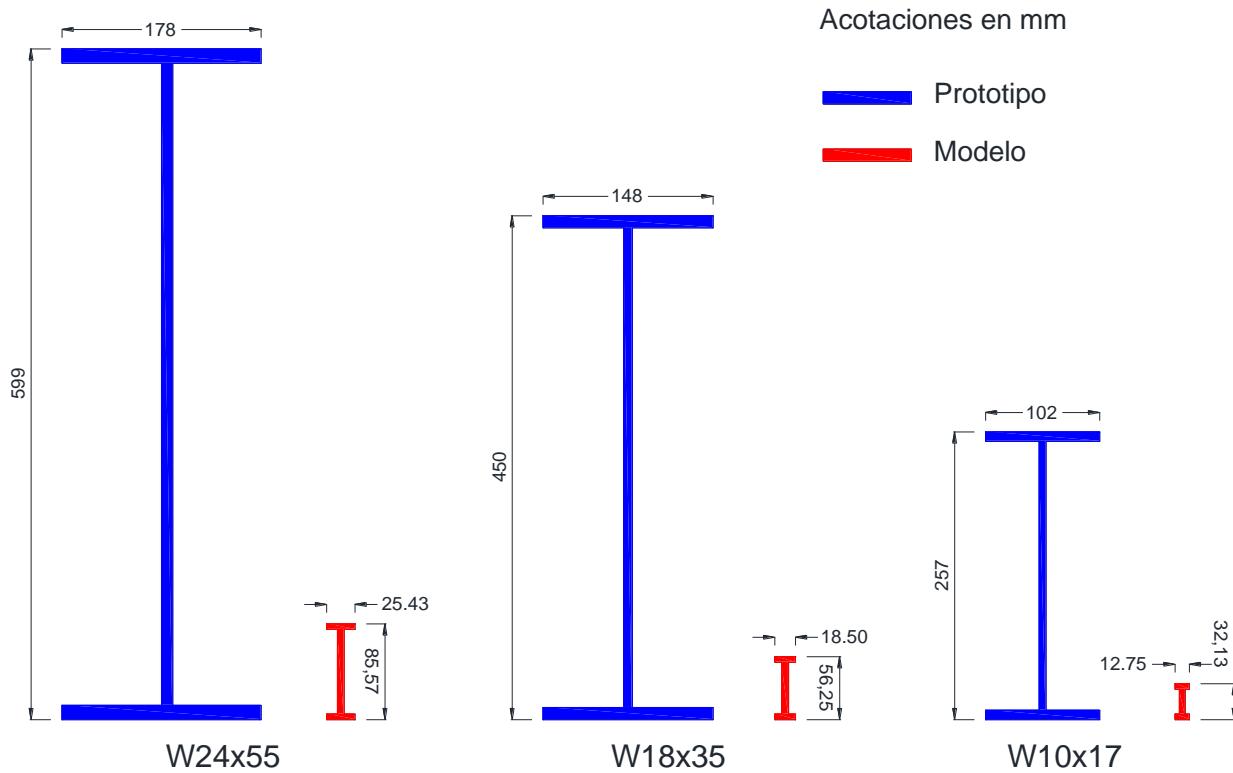


Figura 4. Perfiles de acero prototipo y a escala considerados en los análisis a partir del uso de las relaciones de Similitud

3. ANTECEDENTES DE MODELOS DE PILOTES A ESCALA

Los modelos a escala han sido empleados a nivel internacional para poder evaluar diferentes factores que intervienen en la capacidad de carga de un material. En México se ha realizado modelos a escala de pilas coladas *in situ*, y pilotes de acero tubulares. En los siguientes subcapítulos se muestra brevemente algunos trabajos desarrollados de pilotes a escala.

3.1. Ibarra E. (2013). Transferencia de carga axial por fricción de pilas coladas *In Situ* al subsuelo granular

Para este trabajo de investigación se realizaron pruebas de carga axial en el Laboratorio de Enrocamientos del Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM) en modelos de pilas de dimensiones reducidas que van desde los 13 a los 15 cm de diámetro y longitudes variables de entre 57 y 66 cm las cuales fueron coladas *in situ* en diferentes tipos de suelos granulares compactados en capas de 20 cm de espesor depositados dentro de un cubo triaxial de un metro de lado. El cubo triaxial corresponde al desarrollado por el Profesor Raúl J. Marsal en los años 70 (Marsal. 1972), con el objetivo de evaluar el comportamiento de suelos granulares bajo estados de esfuerzos triaxiales.

En este experimento se estudiaron cuatro granulometrías diferente con un contenido de gravas del 30%, 40%, 60% y 80% que se consideran como series de M1, M2, M6 y M8, respectivamente, estos suelos granulares variaron desde arenas arcillosas bien graduadas con gravas (SW-SC) hasta gravas mal graduadas con pocos finos (GP). El experimento consistió en la aplicación gradual de carga creciente a extracción, hasta la falla, tomando registros de la carga aplicada, desplazamientos y el tiempo. Al término del ensayo se descubrieron las pilas para poder observar el estado de rugosidad del colado en la superficie del fuste. Se utilizó un escaneo laser tridimensional (ver **Figura 5**), asimismo se realizó un registro fotográfico y geométrico para el análisis de dicho fenómeno.

Sistema de aplicación de cargas y sistema de adquisición de datos

Se diseñó y construyó un marco de carga con perfiles de acero estructural IPR de 5 pulgadas como columnas, y un travesaño formado por dos canales de 6 pulgadas. Este marco tiene capacidad para la aplicación de cargas de extracción o compresión de hasta 10t (98.1 kN), con deformaciones máximas de 2mm (ver **Figura 6**).

Los ensayos de extracción se realizaron con carga creciente gradual aplicada mediante un gato hidráulico Enerpac modelo Hlly-O-Cylinder de 300 kN, aproximadamente. Para el registro de desplazamientos se utilizaron transductores de desplazamientos colocados sobre la pila colada o bien sobre la celda de carga tal como se muestra en la **Figura 6**.

La carga de extracción se fue registrando mediante la bomba con manómetro previamente calibrado, aunado a este también se utilizó una celda de carga tipo S (**Figura 6**), en el caso de la serie M8 al sobrepasar la capacidad de carga de extracción a la falla de dicha celda, se reemplazó por una celda hueca montada sobre el gato hidráulico.

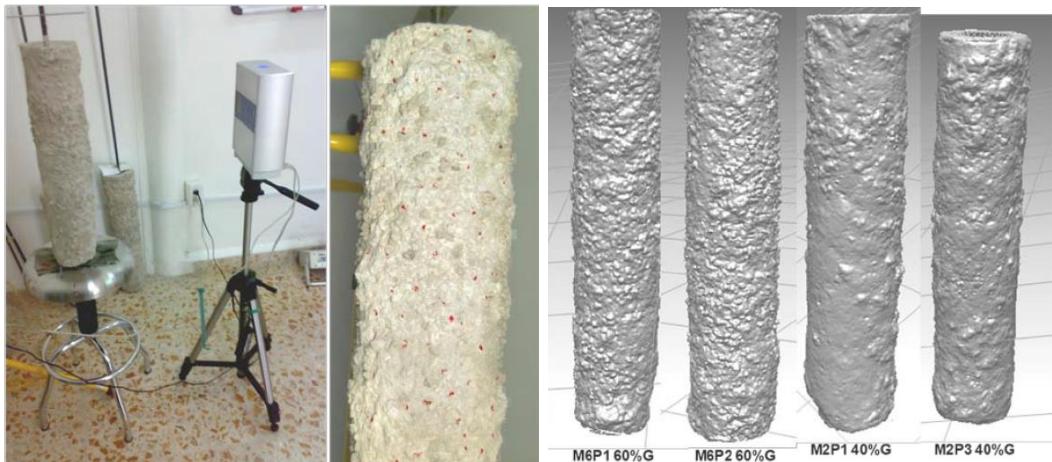


Figura 5. Medición de la rugosidad del pilote con escáner 3D (Ibarra, 2013).

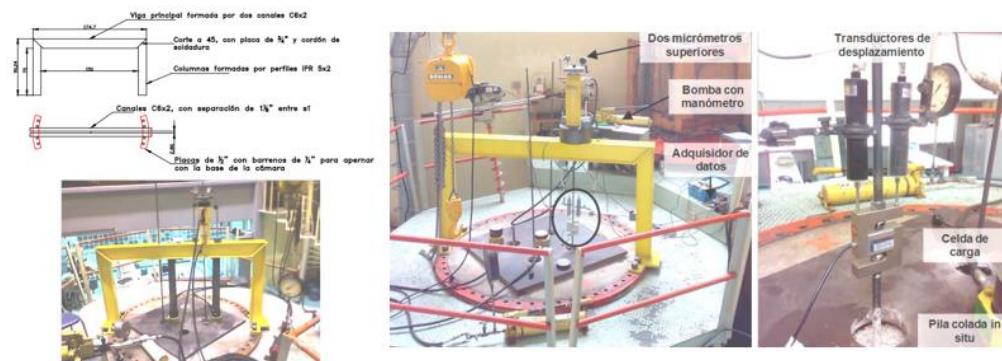


Figura 6. Esquema y vista de marco de carga para la aplicación de cargas de extracción, Ibarra E. (2013).

Resultados

En la **Figura 7** a la **Figura 9** se muestran ejemplos de las gráficas carga-desplazamientos y carga-tiempo de los ensayos de carga a extracción obtenidos por Ibarra en 2013. En estas figuras se puede observar comportamientos de las gráficas similares a resultados de pruebas a escala real. La **Figura 10** muestra un resumen de resistencias unitarias en el fuste medidas en los ensayos, con resistencias que van desde los 17 kN a los 65 kN.

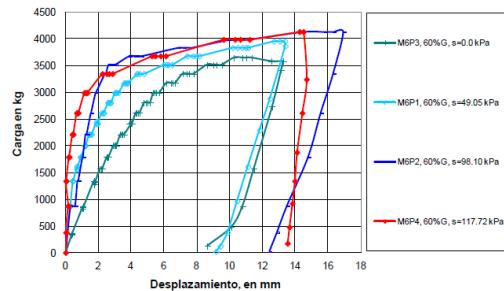


Figura 7. Curva carga-desplazamiento para la serie M6 con 60% de grava, Ibarra E. (2013).

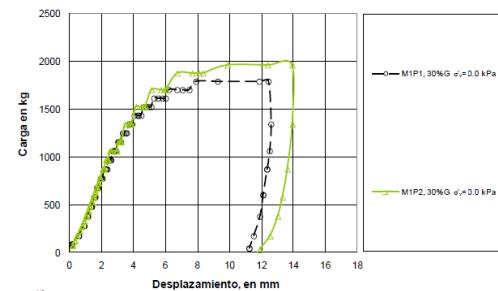


Figura 8. Curva carga-desplazamiento para la serie M1 con 30% de grava, Ibarra E. (2013).

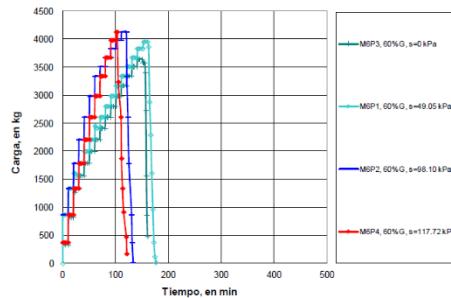


Figura 9. Curva carga-tiempo para la serie M6 con 60% de grava, Ibarra E. (2013).

Tabla 3.9 Resumen de resistencias unitarias en el fuste, f_s , medidas en los ensayos

Modelo de pila	G(%)	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	σ'_v (kPa)	Q_{st} máxima (kN)	f_s (kPa)
M1P1	30	15.68	59.3	0.00	17.57	60.2
M1P2		15.65	57.2	0.00	19.26	68.5
M2P1		14.48	61.0	0.00	18.42	66.4
M2P2	40	13.98	58.7	49.05	32.51	126.2
M2P3		13.80	59.7	98.10	33.84	130.8
M2P4		13.60	57.4	117.72	34.50	140.8
M6P3		13.58	66.0	0.00	35.79	127.1
M6P1	60	13.68	65.3	49.05	38.84	138.5
M6P2		14.25	63.7	98.10	40.55	142.3
M6P4		13.25	64.4	117.72	41.93	156.3
M8P1	80	15.50	60.0	0.00	61.96	212.1
M8P3		14.00	62.0	49.05	64.60	236.9

Figura 10. Resumen de resistencias unitarias en el fuste medidas en los ensayos (Ibarra, 2013).

3.2. Cruz E. (2003), Efecto del envejecimiento en la capacidad de carga a extracción de modelos de pilote en arcilla marina

El diseño experimental de este estudio se llevó a cabo sustituyendo una gran muestra de suelo marino trasladado desde la Sonda de Campeche y el cual fue alojado en un odómetro de acero con altura de 122 cm diseñado y fabricado para el ensaye del modelo de pilas denominado O-97-5, igualmente se fabricaron dos extensiones cilíndricas: una intermedia de acero de 81cm de altura y una superior de fibra de vidrio de 80cm de altura, las cuales se fueron retirando de acuerdo con el nivel de suelo que se tenía durante los procesos de sedimentación, consolidación por peso propio, por presión neumática y finalmente por presión hidráulica.

Se diseñó un modelo de pilote de fricción instrumentado, que cuenta con 21 sensores en su cuerpo, estructurados de la siguiente manera: 4 sensores de carga axial, 4 de presión total, 4 de presión de poro y 9 de flexión. Para el caso de las pilas coladas in situ, se elaboraron 4 modelos no instrumentados para poder analizar la carga de extracción después del hincado en el suelo marino reconstituido y poder observar el efecto de envejecimiento en la capacidad de carga.

Se realizaron dos tipos de ensayos, primeramente, un ensaye preliminar en el cual el modelo de pilote de fricción instrumentado se hincó en un suelo artificial (mezcla de caolín, bentonita, cemento y agua), realizándose pruebas bajo carga axial estática y cíclica (Luna, 2002). Para el modelo de pilas no instrumentados, se hincaron en la muestra de suelo arcilloso marino alojado dentro del odómetro O-97-H, se realizaron pruebas ante carga axial estática y cíclica con deformación controlada. Posteriormente se realizaron los ensayos definitivos que establece la observación del efecto del envejecimiento en la capacidad de carga por fuste, de los modelos de pilotes sin instrumentación. En el caso del modelo del pilote instrumentado se analizan los fenómenos asociados a la capacidad de carga axial y lateral estática, cíclica y dinámica.

Sistemas auxiliares para la ejecución de ensayos con modelos de pilote

Se utilizó un Sistema electroneumático de Aplicación biaxial de Cargas (SAC) para poder realizar pruebas bajo carga o deformación controlada en ciclo cerrado, asimismo como la aplicación conjunta de cargas axiales y laterales (**Figura 11**).

Marco de carga e hincado de pilotes

Esta pieza sirve de reacción a los actuadores neumáticos y está conformado por dos columnas, una trabe inferior y una superior de perfiles de acero estructural, esto con el fin de evitar la deformación del marco generada por las cargas actuantes durante el ensaye (**Figura 12**). Se simuló el proceso de hincado mediante una masa que se levantaba manualmente y se deja caer por gravedad. La **Figura 13** muestra un registro de hincado obtenido al ejecutar estas pruebas.

MODELOS A ESCALA DE PILOTES DE ACERO TIPO IR BAJO CARGA AXIAL

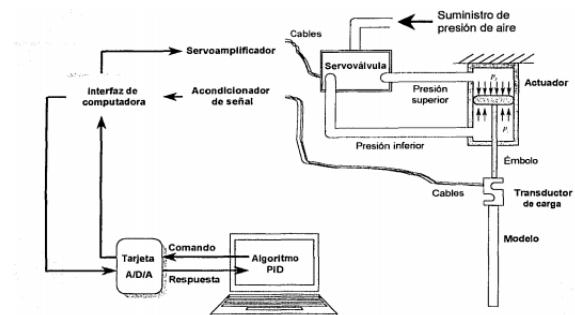


Figura 11. Esquema de funcionamiento del Sistema de Aplicación de Cargas (SAC), (Luna, 2002).

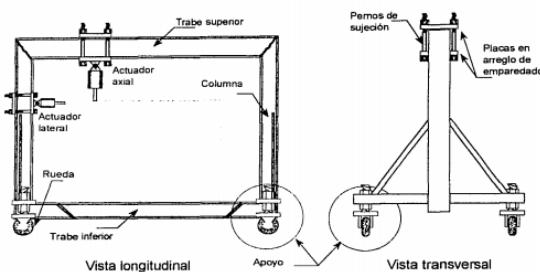


Figura 12. Esquema de marco de carga, (Luna, 2002).

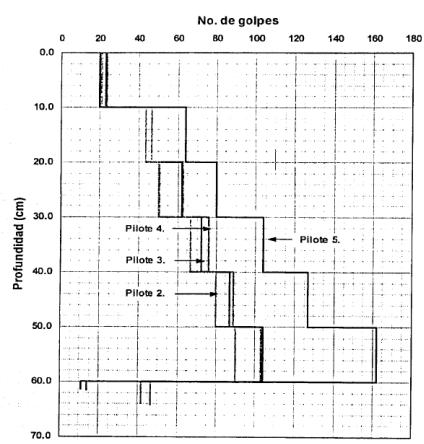


Figura 3.42. Gráfica del hincado de los modelos de pilote

Tabla 3.6. Registro de hincado: Ensaye preliminar

No. Golpes N	Despl. δ (cm)	Altura caída (cm)	Masa utilizada (kg)	Hincado (cm/golpe)
107	7.60	3		0.075
10	2.30	20		0.230
10	3.20	30		0.320
10	6.80	12		0.680
13	12.50	20	8.790	0.962
11	9.00	20		0.818

Fecha de hincado: 15/Oct/02

Figura 13. Registro de hincado de los pilotes a escala (Ibarra, 2013).

Resultados

En la Figura 14 se puede observar la curva de carga-desplazamiento del pilote 1, asimismo se muestra la evolución de la resistencia con el tiempo.

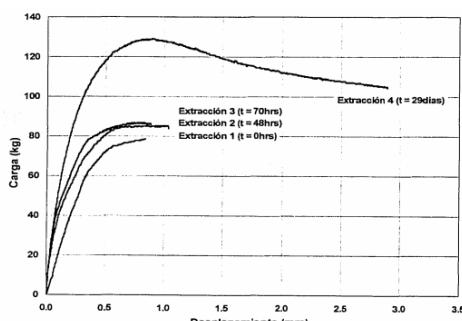


Figura 14. Ensayos de extracción preliminares para conocer la evolución de la capacidad de carga por fuste. Pilote 1, Cruz E. (2003).

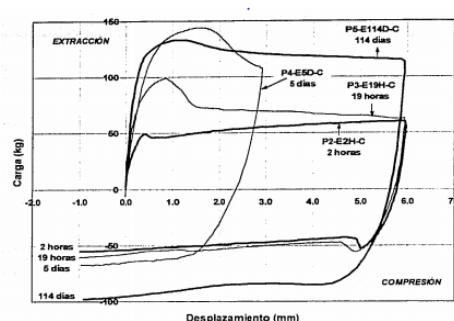


Figura 15. Ensayos de extracción definitivos para conocer la evolución en la capacidad de carga por fuste en modelos de pilotes distintos, Cruz E. (2003).

En la **Figura 15** se presentan las curvas carga-desplazamiento de las pruebas de extracción con distintos tiempos después del hincado y su descarga respectiva en el sentido de la compresión.

La capacidad de carga en falla de pico, el desplazamiento requerido para alcanzarla, así como los módulos tangentes iniciales y secante, correspondientes a los ensayos definitivos se presentan en la **Figura 16**, Cruz E. (2003).

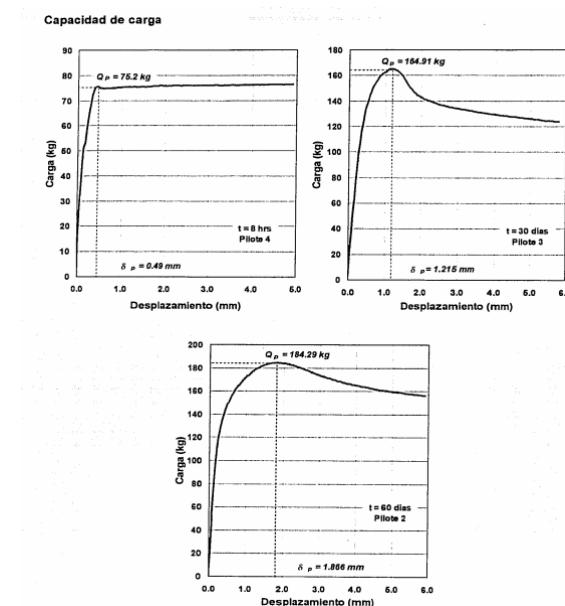


Figura 16. Determinación de la capacidad de carga en la falla de pico y desplazamiento a la falla en ensayos de extracción con rehincado, Cruz E. (2003).

3.3. Luna O. (2002), Diseño, construcción y puesta en operación de modelos de pilotes de fricción bajo cargas axiales estáticas y cíclicas

Para este trabajo de investigación se diseñó, construyó y calibró un modelo de pilote de fricción instrumentado de 90cm de longitud y 2.64 cm de diámetro exterior, que cuenta con 21 sensores en su cuerpo estructurados de la siguiente manera: 4 sensores de carga axial, 4 de presión total, 4 de presión de poro y 9 de flexión (Luna 2002).

El diseño experimental de este estudio se llevó a cabo sustituyendo una gran muestra de suelo marino trasladado desde la Sonda de Campeche y el cual fue alojado en un odómetro de acero con altura de 122cm diseñado y fabricado para el ensayo del modelo de pilote denominado O-97-5, igualmente se fabricaron dos extensiones cilíndricas: una intermedia de acero de 81cm de altura y una superior de fibra de vidrio de 80cm de altura, las cuales se fueron retirando de acuerdo con el nivel de suelo que se tenía durante los procesos de sedimentación, consolidación por peso muerto,

por presión neumática y finalmente por presión hidráulica. Para conocer la resistencia de fuste generada a lo largo del pilote se diseñaron celdas de carga, se utilizó el SG tipo N2A-13S064L-350, utilizando un espesor reducido en el tubo de duraluminio, teniendo buena resolución de medición para los ensayos estáticos y cíclicos con sobrepresión baja **Figura 17**.

La **Figura 18** muestra las relaciones de escala en entre un modelo de pilote de escala real y un pilote a escala. Estas relaciones son muy importantes y deben tomarse en cuenta a la hora de fabricar los pilotes.

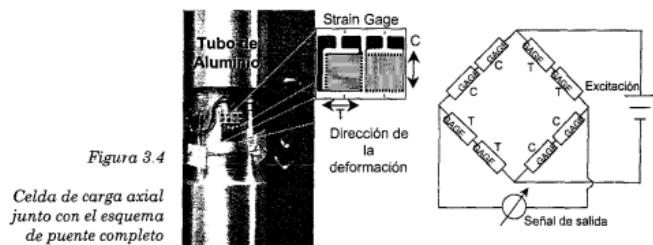


Figura 17. Celda de carga axial junto con el esquema de puente completo (Luna O., 2002).

Variable	Descripción	Prototipo	Modelo	Unidades
M_c	Masa en la cabeza del pilote	429.3	0.183	$\frac{lb}{ft}$
M	Masa del pilote por unidad de longitud	1.338	0.00615	$\frac{lb s^2}{ft}$
D	Diámetro del pilote	0.896	0.0833	ft

y los subíndices en la expresión indican con p al prototipo y m al modelo.

Así tenemos que el valor numérico de la sustitución de las variables es:

$$\frac{M_c p}{D_p M_p} = 358\,094 \quad \frac{M_c m}{D_m M_m} = 358\,094$$

Figura 18. Relaciones de escala entre prototipo y modelo (Luna O., 2002).

También se diseñaron celdas para medir la presión total normal de la pared del fuste, se colocaron transductores de presión de poro, en el mismo eje en cuatro profundidades, uno seguido del otro, para obtener la diferencia del esfuerzo normal efectivo actuante. Además, se diseñaron celdas de flexión, a tres profundidades, con el objetivo de determinar la flexión que se presenta en el pilote en ensayos bajo cargas axiales y laterales, estáticas y cíclicas. La **Figura 19** muestra los detalles del pilote instrumentado, tanto en el fuste como la punta.

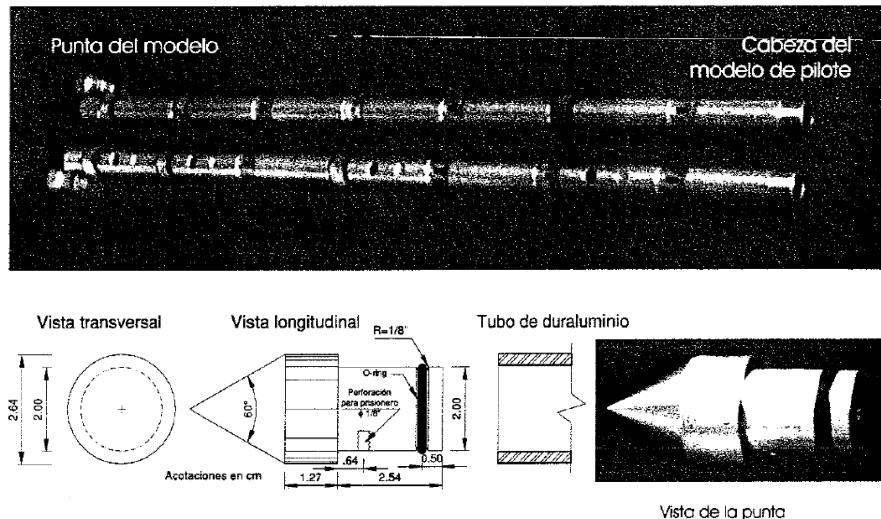


Figura 19. Detalles de pilote instrumentado (Luna O., 2002)

Sistemas auxiliares para la ejecución de ensayos con modelos de pilote

El sistema electroneumático y marco de carga utilizados fueron los mismos mencionados en la sección 3.2 (**Figura 11** y **Figura 12**). Con la finalidad de poder realizar pruebas bajo carga o deformación controlada en ciclo cerrado, y la aplicación conjunta de cargas axiales y laterales.

Resultados

En la **Figura 23**, se grafican los valores de los sensores CC a diferentes niveles de carga externa aplicada con sus correspondientes desplazamientos, al principio del ensayo el pilote presenta una ligera tensión efecto del hincado y retiro del martillo. A medida que la carga aumenta, se refleja una disminución de carga con respecto a la profundidad. En este ensayo se obtuvo una capacidad por punta de 38kg y una capacidad por fricción de 25kg, esto habla de la gran aportación de la punta por el efecto de fronteras cercanas a ésta, Luna O. (2002).

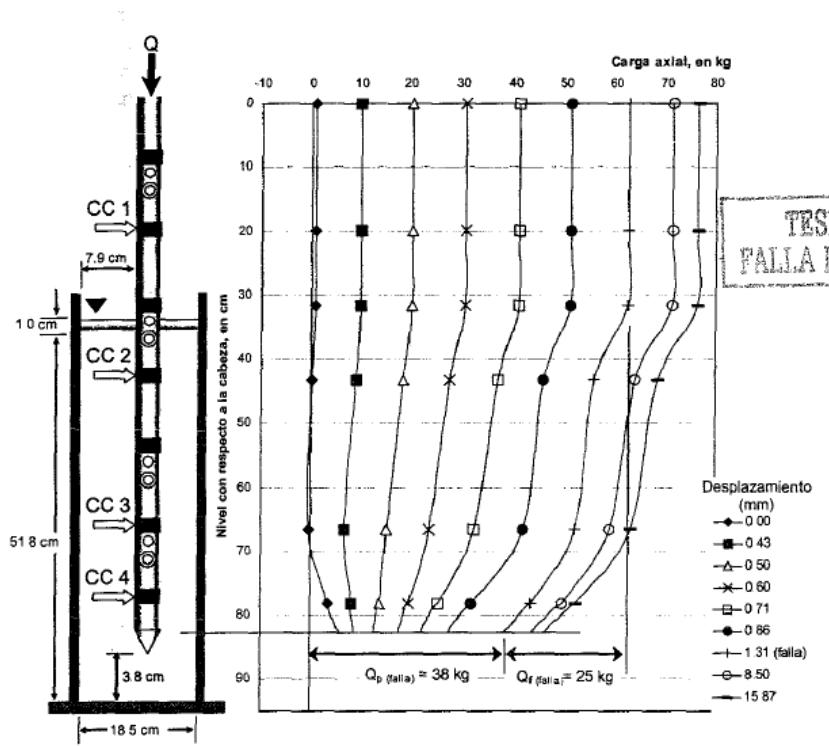


Figura 20. Distribución de cargas axiales internas en el modelo de pilote (Luna O., 2002)

3.4.Bilal *et al.*, (2019), Effect of Pile Spacing on Group Efficiency in Gypseous Soil

Este trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de Diyala University con la finalidad de analizar el efecto de grupo de pilas sujetas a carga axial. La muestra de suelo que se utilizó se obtuvo del centro de la ciudad de Tikrit al norte de la ciudad de Baghdad (Iraq) con un contenido de gravas de “Gypsum” (G.C. 30% y G.C 61%). El suelo se dividió en 10 estratos, cada uno con dimensiones de 5 cm de profundidad, esta muestra de suelo fue alojada dentro de un tanque o contenedor cuadrado diseñado y fabricado a base de placas de acero de 0.4 cm de grosor con un ancho igual a 50cm y una altura de 65cm, la cara interna del contenedor fue pintada para así reducir la fricción. (Figura 21 y Figura 22). El modelo de pilote que se diseñó y fabricó está hecho de un cilindro de acero de 1.5 cm de diámetro exterior, 1.2 cm de diámetro interior y una longitud de 35 cm.

Se empleó una lámina de acero rígida de 1cm de espesor como tapa en la superficie de los pilotes, esto con el fin de mantener una carga transferida gradual en cada pilote. La tapa está separada 5cm del suelo y mantiene una distancia mínima de 2D desde la cabeza de los pilotes como se muestra en la Figura 23.

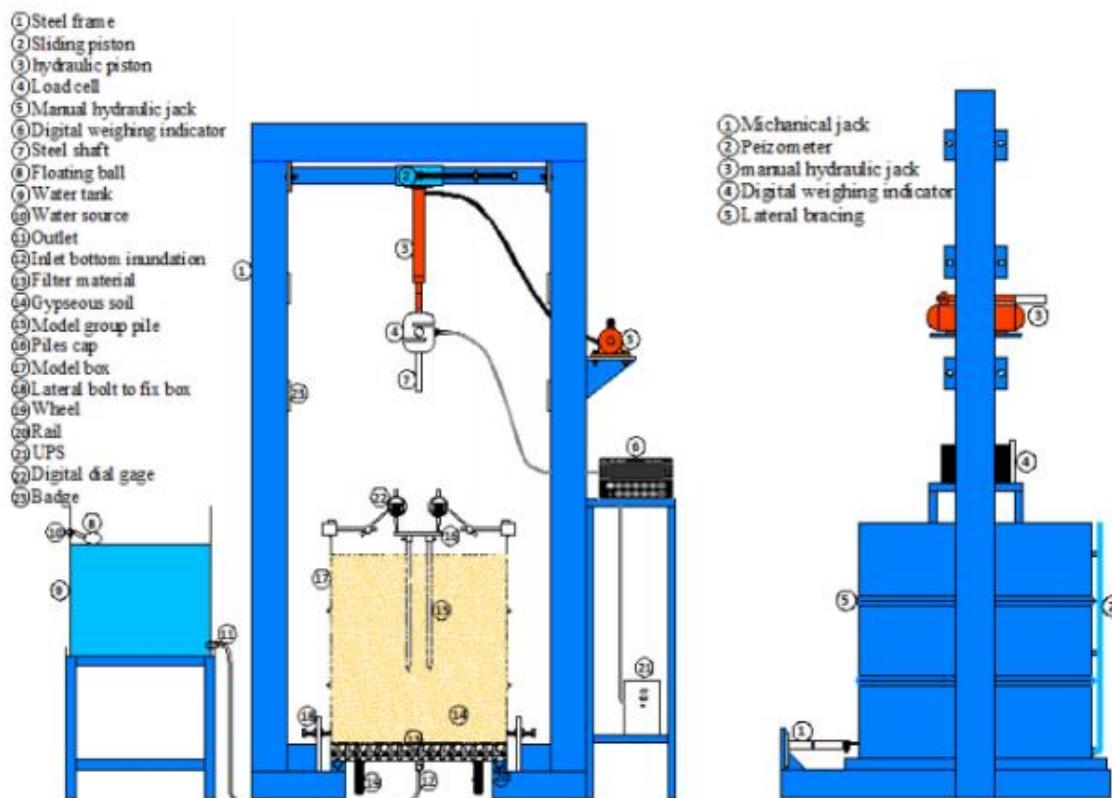


Figura 21. Esquema del equipo de prueba fabricado, Bilal *et al.*, (2019).



Figura 22. Equipo de laboratorio para evaluar la eficiencia de grupo de pilotes (Bilal et al., 2019).

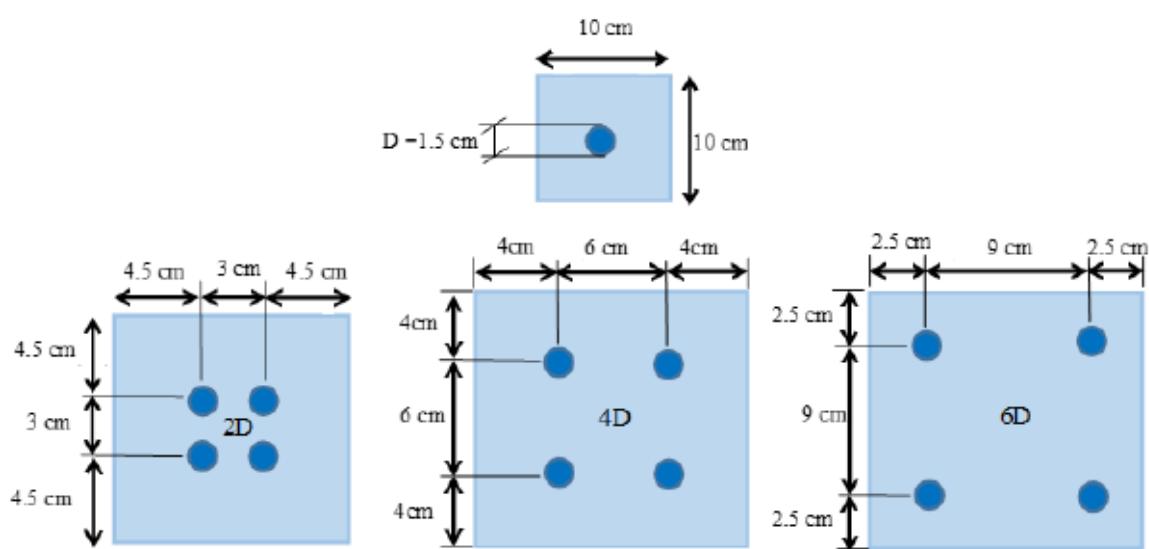


Figura 23. Dimensiones de la tapa y configuración y arreglo de grupos de pilotes ensayados (Bilal et al., 2019).

Una vez lista la muestra de suelo alojada en el contenedor cuadrado de acero se procedió a instalarlo en el marco de acero. El soporte se instala mediante un perno en los bordes superiores de la caja de prueba, los pilotes se colocan en una forma vertical a través del orificio central del soporte o placa. El hincado de pilotes se realiza mediante la carga de compresión (S) que se instala en la parte inferior del pistón del gato hidráulico, se baja utilizando la manija manual del gato hasta que esté en contacto con los pilotes. La carga es aplicada sobre los pilotes dando como resultado un movimiento de carga axial para hincar el pilote en la muestra de suelo. La carga es medida mediante un indicador el cual está instalada en la celda de carga, el asentamiento al centro de uno o varios pilotes es leído por dos micrómetros digitales con una sensibilidad de 0.001mm, y la presión en el pilote se lee con la celda de carga.

Resultados

Se realizaron una serie de dieciocho pruebas en dos muestras de suelo (S1 y S2) para diferentes efectos de grupo (2D, 4D y 6D) en dos condiciones (seco y húmedo). Curvas de carga-asentamiento, se muestran en la **Figura 24** para ambas condiciones de suelo. También se muestra la zona de reacomodo del suelo alrededor de los pilotes (**Figura 25**). La **Figura 26** y **Figura 27** presentan los resultados de la relación entre la capacidad de carga y la eficiencia de grupo de los diferentes arreglos de pilotes, respectivamente.

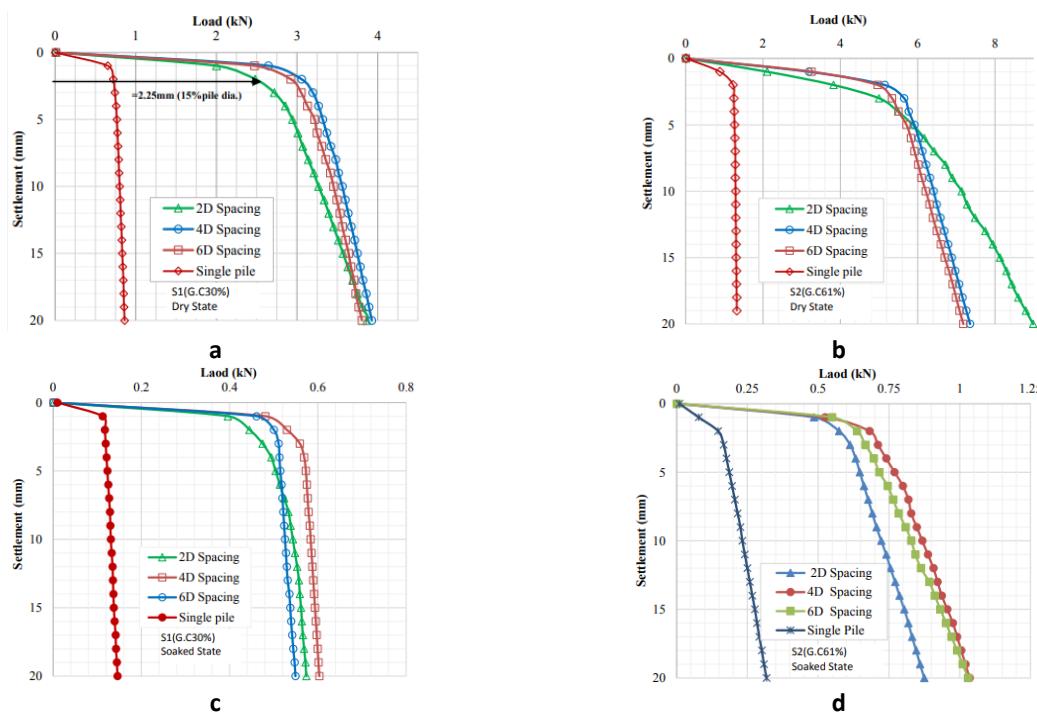


Figura 24. Influencia del efecto de grupo en pilas carga-asentamiento, a) S1 estado seco, b) S2 estado seco, c)

S1 estado húmedo, d) S2 estado húmedo, Bilal et al., (2019).

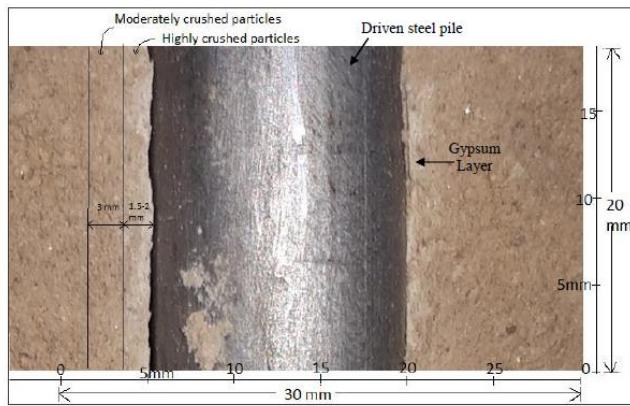


Figure 12. Close up image of soil-pile interface of a model driven pile in gypseous soil

Figura 25. Zona de reacomodo del material por efecto del hincado del pilote (Bilal et al., 2019).

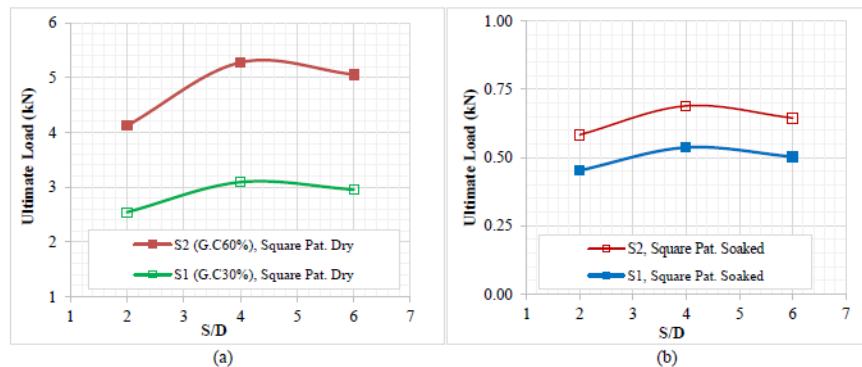


Figure 10. The relation between ultimate load versus (Spacing/Diameter) ratio for S1 and S2, a) At dry State, b) At soaked state

Figura 26. Relación entre la capacidad de carga última de los pilotes y la relación S/D (Separación/Diámetro), (Bilal et al., 2019).

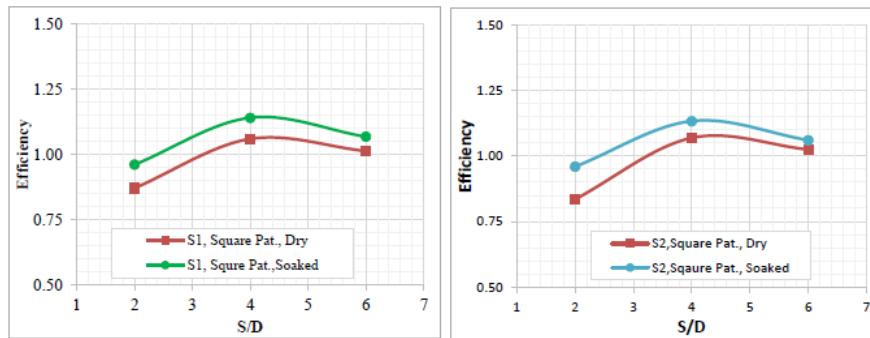


Figura 27. Relación entre la eficiencia de grupo de los pilotes y la relación S/D (Separación/Diámetro), (Bilal et al., 2019).

Finalmente, la Tabla 6 la muestra un resumen de algunas investigaciones del efecto de grupo en pilotes desarrollado en diferentes partes del mundo, incluyendo análisis numéricos, soluciones semi-analíticas y modelos experimentales.

Tabla 6. Resumen de algunas investigaciones sobre datos de pruebas del efecto de grupo en pilas (Bilal et al, 2019)

Referencia	Tamaño de grupo	Espaciado de la pila	η	Tipo de prueba	Tipo de pila	Tipo de suelo	Deflexión
							Diámetro
Comodromos et al. (2003)	3x3	3D	0.94	Análisis numérico	1.5 m en diámetro, pila perforada de concreto.	Estratos de suelo arcilloso, limoso, estrato resistente de grava y arena.	0.1D
	3x3	4.5D	1.02				
	3x3	6D	1.17				
Lee and Chung (2005)	3x3	2D	1.20	Ensaye de modelo experimental	32 cm en diámetro, pila de tubería de aluminio.	Dr=70% arena	0.15D
	3x3	3D	1.34				
	3x3	4D	1.06				
	3x3	5D	1.05				
Gogoi et al. (2014)	2x2	2D	0.91	Ensaye de modelo experimental	1.2 cm en diámetro, cabeza libre de pila de tubería de acero (L/D=30).	Dr=50% Sp	Método de las tangentes
	2x2	4D	0.97				
	2x2	6D	0.98				
Zhang et al. (2015)	2x2	3D	0.86	Modelo hiperbólico no-lineal	0.3 m en diámetro, cabeza libre de pila de tubería de acero.	Estratificado, suelos limo arenoso y arcillo limoso.	0.13D
	2x2	4D	0.87				
	2x2	6D	0.89				
	2x2	10D	0.93				
Tehrani et al. (2015)	3x3	2D	0.28	Solución semi-analítica	0.5 m en diámetro, cabeza libre	Suelo denso, estratificado.	No reportado
	3x3	4D	0.35				
	3x3	6D	0.40				
	3x3	8D	0.45				
	3x3	10D	0.50				
Tuan (2016)	3x3	1.5D	0.52	Análisis numérico	0.6 m en diámetro, cabeza libre	Arena fina, estratificado.	0.05D
	3x3	2D	0.63				
	3x3	3D	0.75				
	3x3	6D	0.95				
	3x3	8D	1.00				
Choi et al. (2017)	2x2	2D	1.10	Estudio experimental	30 mm en diámetro, hincado de pila de acero	Dr=59% SP Densa media	0.15D
	2x2	3D	1.12				
	2x2	4D	1.07				
Sales et al. (2017)	2x2	2D	1.10	Estudio experimental	30 mm en diámetro, hincado de pila de acero	Arena media densa	0.15D
	2x2	3D	1.13				
	2x2	4D	1.02				
Gowthaman and Nasvi (2018)	2x2	2D	0.73	Simulación numérica	1.5 m en diámetro, sección circular perforada	Estratificado, arena limosa muy densa y media densa	0.1D
	2x2	4D	0.87				
	2x2	8D	0.93				
Sharma et al. (2019)	2x2	2D	0.88	Estudio experimental	1.5 mm en diámetro, pila de concreto perforada	Dr=50% arena	Método de las tangentes
	2x2	4D	1.05				
	2x2	6D	0.99				

4. DESARROLLO DEL SISTEMA FÍSICO PARA LAS PRUEBAS DE CARGA

En este capítulo se presenta la fabricación de los pilotes, el diseño y construcción del marco de carga, el sistema de aplicación de carga y de mediciones, así como los contenedores para depositar el suelo y los accesorios para la ejecución de pruebas en grupos de pilotes.

4.1. Fabricación de los pilotes a escala

El uso de las relaciones de similitud indicadas en el capítulo 2 permitió determinar las dimensiones de los pilotes a escala. Se emplearon soleras de acero de diferentes anchos y espesores con los cuales se fabricaron los pilotes. Para cumplir con las medidas requeridas se realizaron cortes y uniones entre las soleras. La **Figura 28** muestra el proceso de fabricación que incluye cortes, ajustes y soldadura de las piezas que constituyen los pilotes correspondientes a los tres tipos. Se fabricaron 6 piezas de cada pilote a escala con las dimensiones de la tabla 4; a las longitudes indicadas en esta tabla, se le agregaron 5 cm para que sobresalgan del nivel de suelo. Una vez soldadas las piezas, se les colocó pintura anticorrosiva y se marcaron a cada 1 cm (ver **Figura 29**) para poder llevar el registro del número de golpes durante el hincado. En la cabeza de los pilotes se realizó una ranura para atravesar tornillos y con esto ligarla al sistema y poder desarrollar las pruebas a tensión.

4.2. Contenedores de suelo

Las dimensiones del contenedor de suelo deben ser tal que las paredes y la base no influyan en los resultados de las pruebas de carga. Para ello, se consideró un arreglo de 4 pilotes separados 3 veces el peralte de los perfiles (d), centro a centro de cada pilote. La separación entre estos pilotes y las paredes del contenedor también es de mínimo 3 veces. Los esquemas de los contenedores para cada tipo de pilotes se presentan en la **Figura 30**, siendo el contenedor para los pilotes W24x55 de mayores dimensiones, 77 cm x 77 cm en planta y una altura de 100 cm.

Los contenedores se fabricaron con lámina de acero de 3 mm de espesor para las paredes y placa de acero de 95 mm de espesor. Internamente, se colocaron varillas cuadradas de 9.5 de grosor, a cada 10 cm con la finalidad de ser guías de referencia y para enraizar el material conforme se valla colocando. Una vez, cortadas las placas con las dimensiones mencionadas, se soldaron a la placa base. El proceso de fabricación de los contenedores se muestra en la **Figura 31**, la **Figura 32** y la **Figura 33** para los pilotes W24x55, W18x35 y W10x17, respectivamente. Finalmente, los contenedores construidos al 100% se muestran en la **Figura 34** a la **Figura 36**, para los diferentes pilotes mencionados.

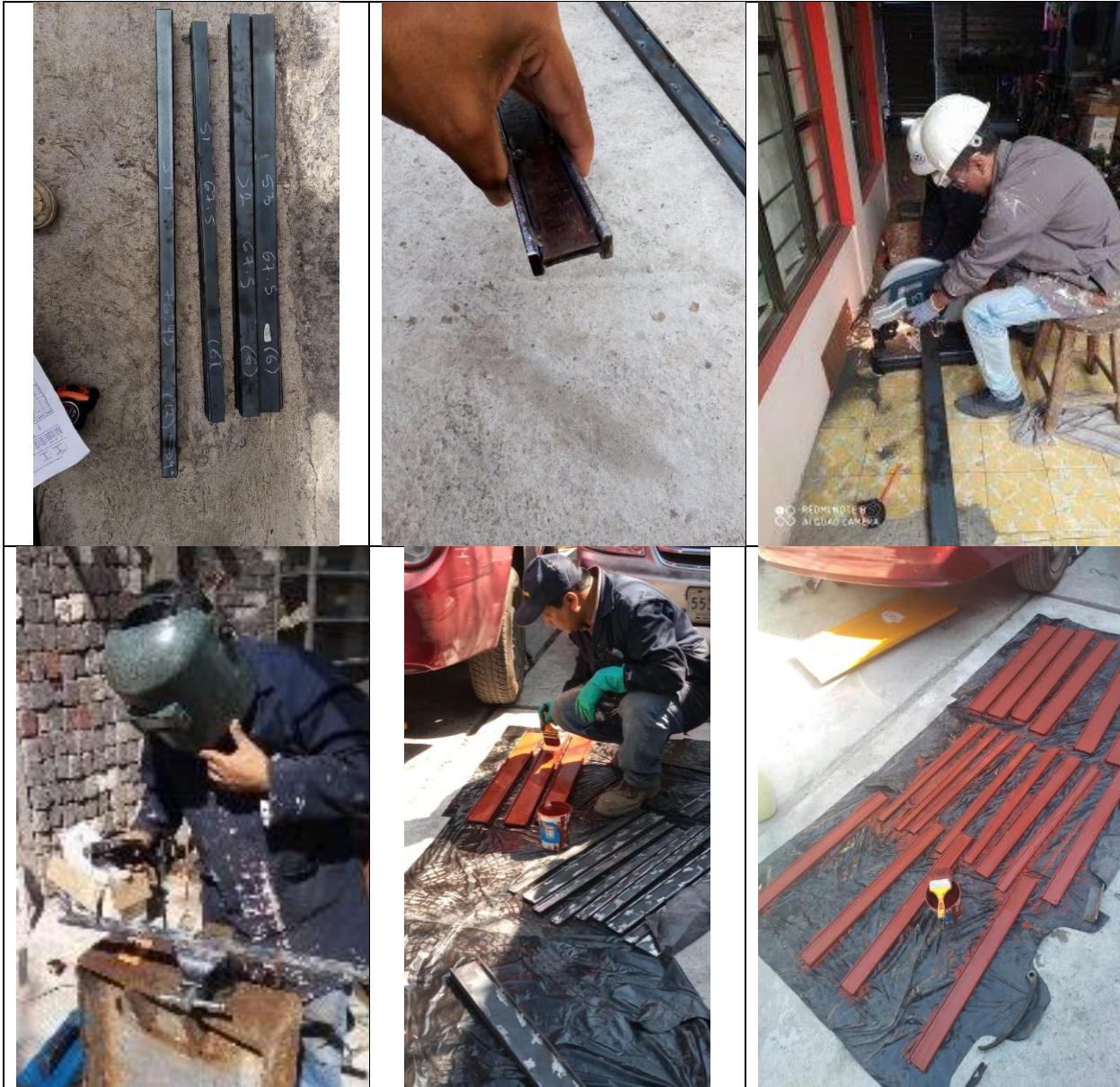


Figura 28. Proceso de fabricación de los pilotes a escala.



Figura 29. Fotografía de los 18 pilotes a escala tipo IR pintados con pintura anticorrosiva y marcados a cada 1 cm para llevar un registro del número de golpes con la profundidad.

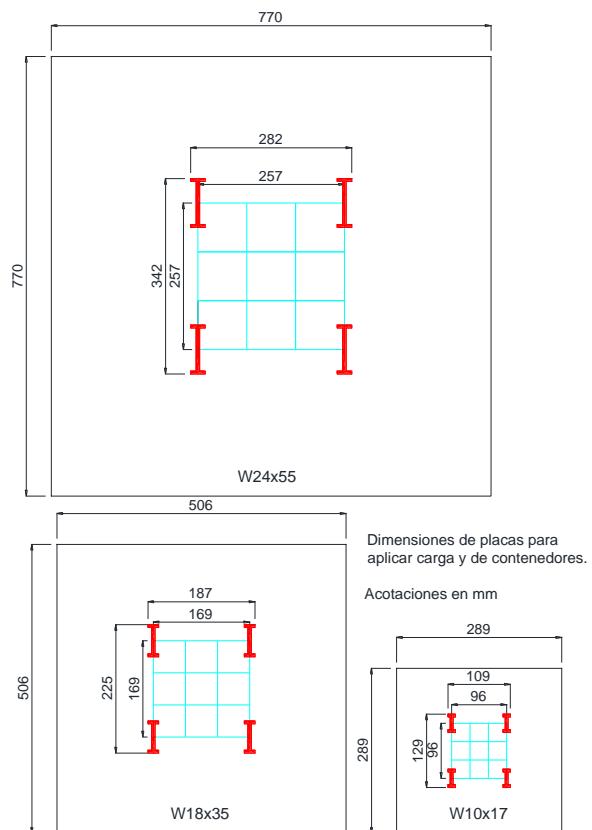


Figura 30. Distribución de grupos de pilotes en los modelos a escala con separaciones de 3 veces el ancho d.



Figura 31. Proceso de fabricación del contenedor para pilotes W24x55.



Figura 32. Proceso de fabricación del contenedor para pilotes W18x35.



Figura 33. Proceso de fabricación del contenedor para pilotes W10x17.



Figura 34. Contenedor para pilotes W24x55.



Figura 35. Contenedor para pilotes W18x35.



Figura 36. Contenedor para pilotes W10x17.

4.3. Marco de carga

El marco de carga fue construido con perfiles de acero estructural de 4 pulgadas de peralte, y se fabricó de tal manera que se pueda ensamblar mediante tornillería para que pueda aumentar o disminuir su tamaño de acuerdo con los requerimientos. Cuenta con dos columnas y una trabe donde se coloca el cilindro de émbolo hueco, para aplicar la carga axial como se presenta en la **Figura 37**. Para la prueba de extracción axial el cilindro de émbolo hueco se coloca de forma inversa, y se le añadieron dos placas con 6 espárragos que ayudan a la extracción, ver **Figura 38**. En la base se colocaron unas extensiones para que descansen los contenedores y sirvan de contrapeso durante las pruebas dichas extensiones. Puede montarse y desmontar unas extensiones en las columnas para tener una altura suficiente para realizar el hincado y pruebas de compresión y extracción axial de los pilotes. El sistema para aplicar las cargas a compresión y tensión consta de una bomba hidráulica, un cilindro de émbolo hueco de 30 ton y carrera de 2 pulgadas.

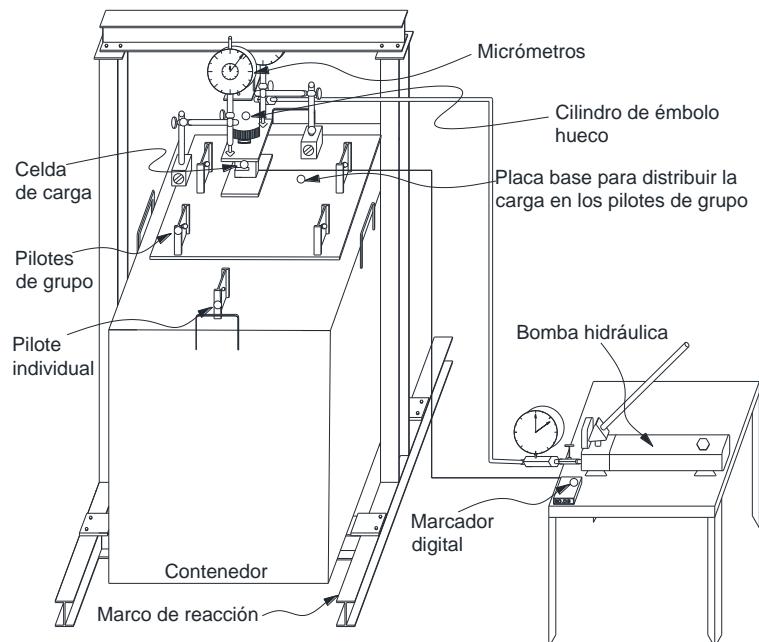


Figura 37. Sistema de compresión axial estática.

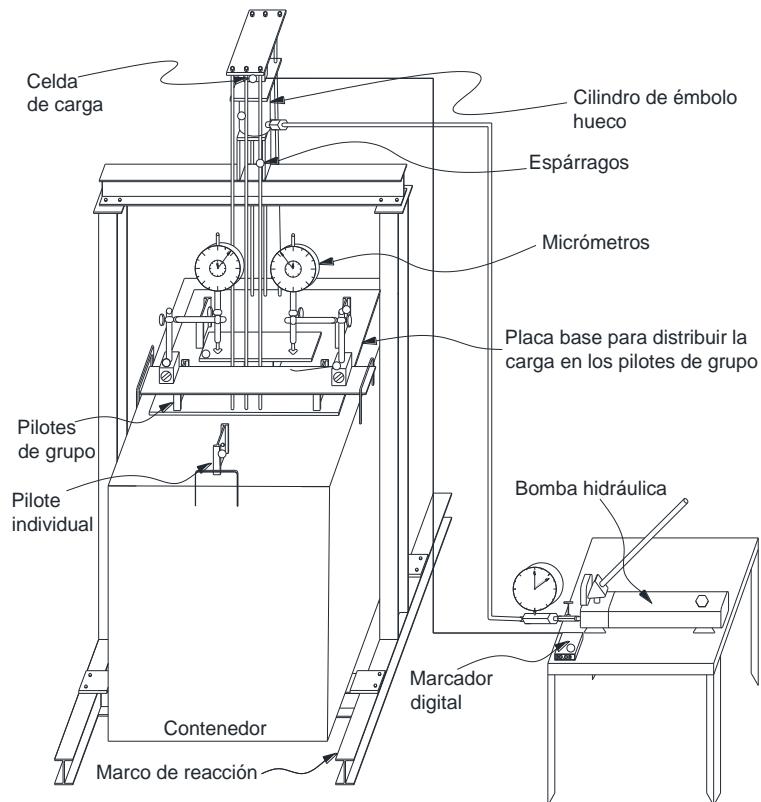


Figura 38. Sistema de extracción axial estática.

Para el contenedor 24X55 se construyeron unas extensiones que ayudan a colocar la polea la cual sirve de apoyo para dar los golpes como se muestra en la **Figura 39**. Con relación a los contenedores 10X17 y 18X35 al sistema de hincado se le agregó un trípode, el cual sirve para dar los golpes a la altura deseada y un manejo más sencillo, como se muestra en la **Figura 40**.



Figura 39. Sistema de hincado del contenedor 24X55.

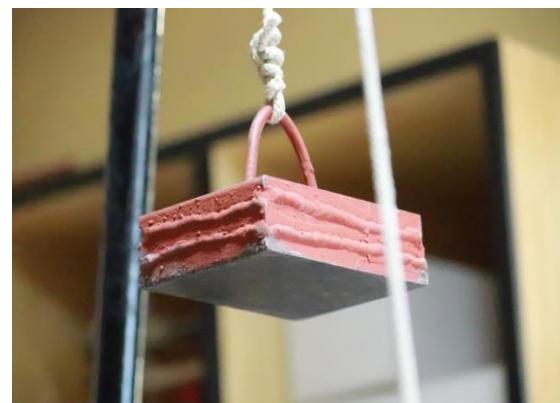


Figura 40. Sistema de hincado de los contenedores 10X17 y 18X35.

4.4. Descripción del suelo.

Como trabajos de campo se realizó un pozo a cielo abierto, del cual se extrajeron muestras de tipo alteradas para ejecución de pruebas índice, mecánicas y suelo para llenar los contenedores como se muestra en la **Figura 41**.

Una vez recolectado el material se procedió a llenar los contenedores con el material que se recolectó, con capas de 10 cm en 10 cm. En cada capa se ejecutaron pruebas de penetrómetro, de veleta miniatura y torcómetro como se presenta en la **Figura 42**.

Con relación a las pruebas índice ejecutadas se obtuvieron valores de contenido de agua que oscilan entre 70 y 130%, así como un porcentaje de finos entre 85 y 95%. De acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) se tienen materiales de tipo limo-arcillosos de alta plasticidad (MH-CH), con valores de índice de plasticidad estimados entre 40 a 70%. La densidad relativa de los sólidos los materiales presentan valores entre 2.2 y 2.5, ver resultados en **Tabla 7**.

Una vez que se obtuvieron los resultados de laboratorio se realizó un perfil estratigráfico a cada contenedor, los perfiles estratigráficos de los contenedores se muestran en la **Figura 43**.



Figura 41. Proceso de extracción de muestra.

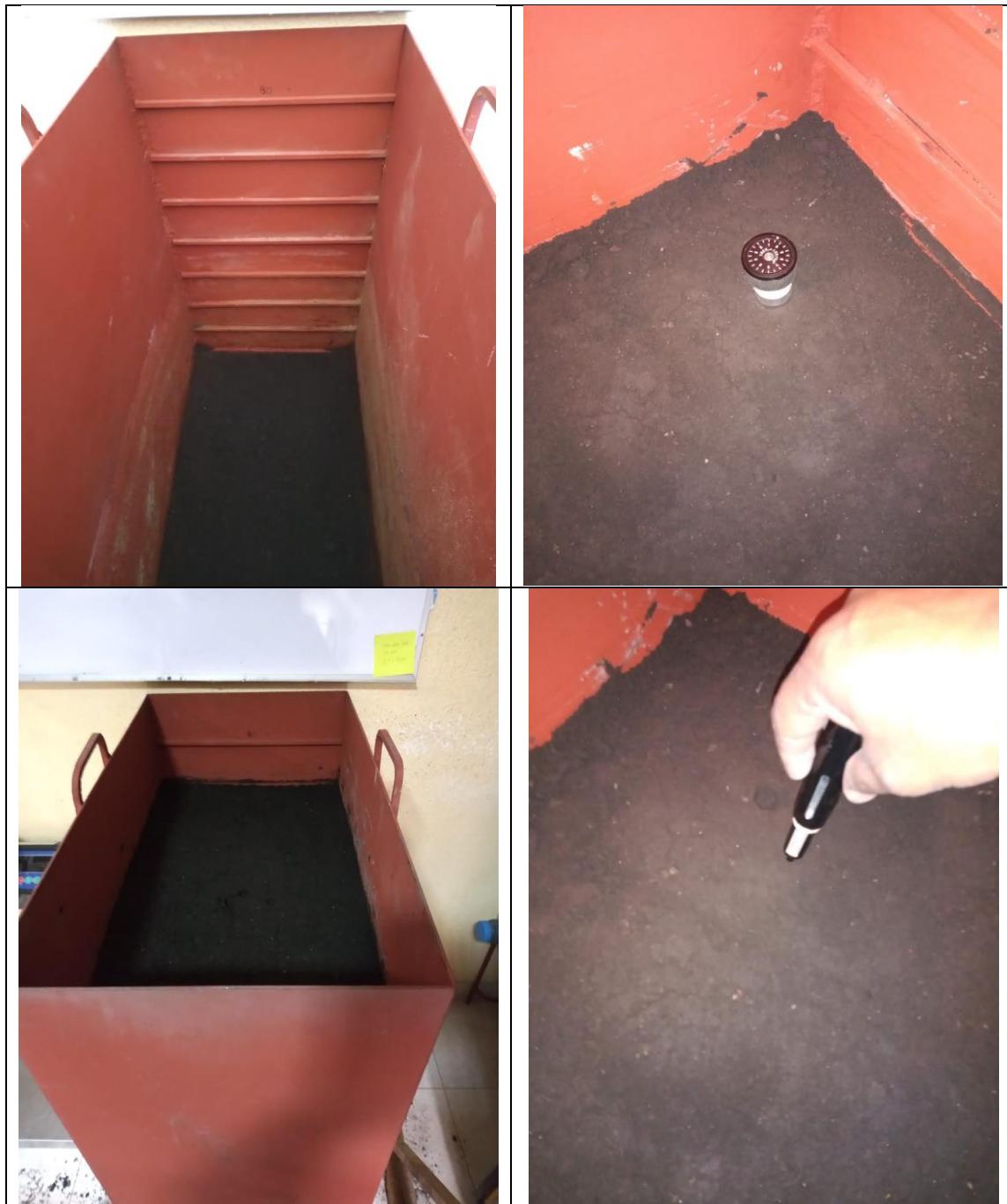


Figura 42. Proceso de llenado de contenedor 10X17 y pruebas mecánicas ejecutadas.

Tabla 7. Resultados de pruebas índice.

Sondeo	No. De muestra	Profundidad [m]		w [%]	Ss	Límites de consistencia				Granulometría			S.U.C.S.	Hidrómetro	
		De	A			LL [%]	LP [%]	IP [%]	CL [%]	G [%]	A [%]	F [%]		Símbolo	Limos [%]
W10x17	8	0.00	0.10	119	2.23	123	65	68	8.7	0	10	90	MH	-	-
	7	0.10	0.20	118	2.13	123	53	70	8.9	0	10	90	MH	-	-
	6	0.20	0.30	113	2.18	121	58	63	8.8	0	11	89	MH	-	-
	5	0.30	0.40	114	2.19	121	60	61	8.8	0	15	85	MH	78	17
	4	0.40	0.50	116	2.23	119	70	49	8.7	0	15	85	MH	-	-
	3	0.50	0.60	114	2.21	131	64	67	8.8	0	13	87	MH	-	-
	2	0.60	0.70	128	2.30	124	56	68	8.7	0	12	88	MH	73	18
	1	0.70	0.80	124	2.26	161	60	101	15.3	0	9	91	MH	-	-
W18x35	8	0.00	0.10	92	2.34	94	62	32	16.8	0	9	91	MH	-	-
	7	0.10	0.20	88	2.29	97	62	35	17.3	0	9	91	MH	-	-
	6	0.20	0.30	93	2.36	99	63	36	16.2	0	9	91	MH	65	26
	5	0.30	0.40	92	2.26	110	56	54	14.2	0	9	91	MH	-	-
	4	0.40	0.50	92	2.41	149	47	102	14.2	0	10	90	MH	-	-
	3	0.50	0.60	82	2.41	123	63	61	17.2	0	9	91	MH	-	-
	2	0.60	0.70	91	2.29	110	62	49	16.5	0	9	91	MH	-	-
	1	0.70	0.80	89	2.39	123	62	61	14.8	0	9	91	MH	69	22
W24x55	9	0.00	0.10	31	2.48	-	-	-	-	0	5	95	-	70	25
	8	0.10	0.20	35	2.53	-	-	-	-	0	5	95	-	-	-
	7	0.20	0.30	29	2.49	-	-	-	-	0	5	95	-	-	-
	6	0.30	0.40	77	2.31	116	67	49	8.8	0	6	94	MH	-	-
	5	0.40	0.50	88	2.23	97	63	35	6.0	0	10	90	MH	-	-
	4	0.50	0.60	88	2.35	91	67	25	9.5	0	10	90	MH	-	-
	3	0.60	0.70	105	2.42	82	31	52	14.7	0	10	90	MH	74	16
	2	0.70	0.80	103	2.27	81	59	22	5.0	0	11	89	MH	-	-
	1	0.80	0.90	116	2.16	79	42	37	5.0	0	10	90	CH	-	-

w (%) Contenido de agua

Ss (--) Densidad de Sólidos

LL (%) Límite líquido

LP (%) Límite plástico

IP (%) Índice de plasticidad

CL (%) Contracción lineal

G (%) Porcentaje de Gravas

A (%) Porcentaje de Arenas

%F Porcentaje de Finos

S.U.C.S. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

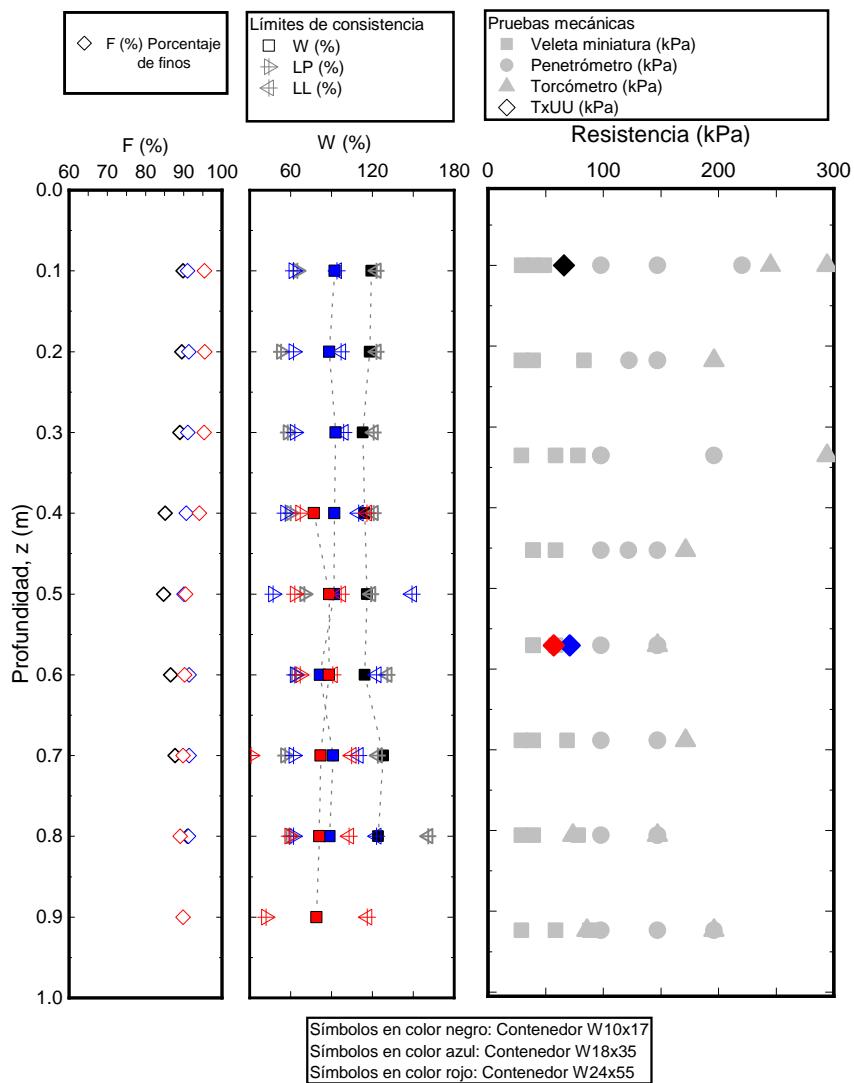


Figura 43. Perfil estratigráfico del contenedor 10X17.

De igual modo, se realizaron pruebas de tipo mecánicas orientadas a determinar los parámetros de resistencia y de compresibilidad de los suelos, se incluyeron pruebas de Penetrómetro, pruebas de Vela miniatura y Torcómetro a cada capa de los contenedores, una prueba de consolidación unidimensional y una prueba de Triaxial No consolidada No drenada a cada contenedor. Los resultados de resistencia al esfuerzo cortante variaron de 57 kPa a 70 kPa, y de 176 kPa a 196 kPa en esfuerzos de pre-consolidación, el siguiente grafico presenta los resultados de todas las pruebas mecánicas como se presentan en la **Tabla 8** y la **Tabla 9** y la **Figura 44** y la **Figura 45**.

Tabla 8. Resultados de pruebas de Consolidaciones Unidimensionales.

Contenedor	Presión aplicada (kPa)	OCR	Esfuerzo de pre-consolidación	
			M. Brasileño (Budhu, 2015)	Casagrande (Budhu, 2015)
			(kPa)	(kPa)
10X17	12.25	19	137	196
	24.51			
	49.03			
	98.06			
	196.13			
	392.26			
18X35	12.25	21	147	186
	24.51			
	49.03			
	98.06			
	196.13			
	392.26			
24X55	12.25	16	127	177
	24.51			
	49.03			
	98.06			
	196.13			
	392.26			
	784.53			

Tabla 9. Resultados de pruebas Triaxiales No consolidadas No drenadas.

ID	σ_c	σ_{df}	E_{50} (kPa)	S_u (kPa)
	25	157	6355	
W10x17	49	167	6551	66
	98	177	7522	
	25	167	6708	
W18x35	49	177	7228	71
	98	196	8444	
	25	108	4835	
W24x55	49	137	5462	57
	98	147	6825	

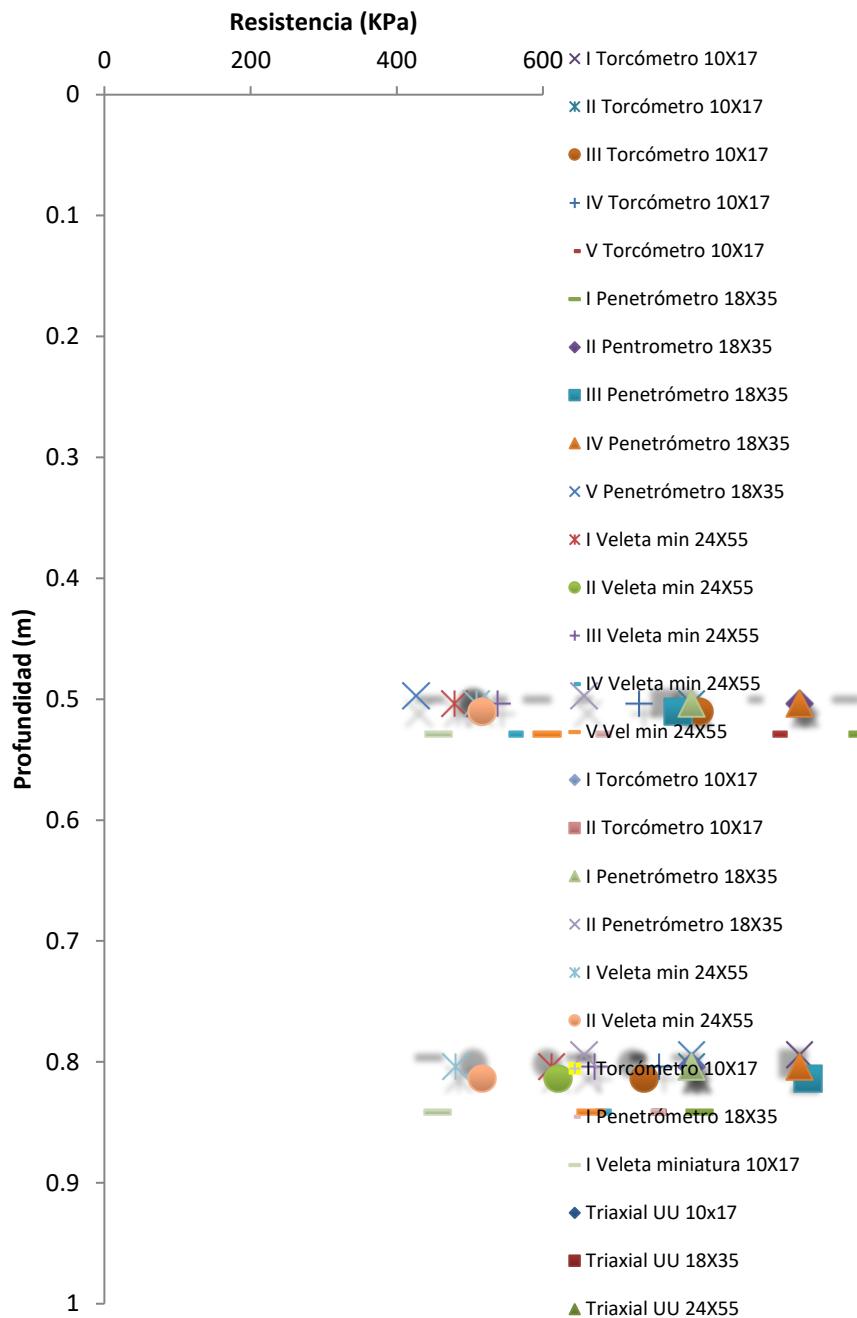


Figura 44. Resultados de pruebas mecánicas.

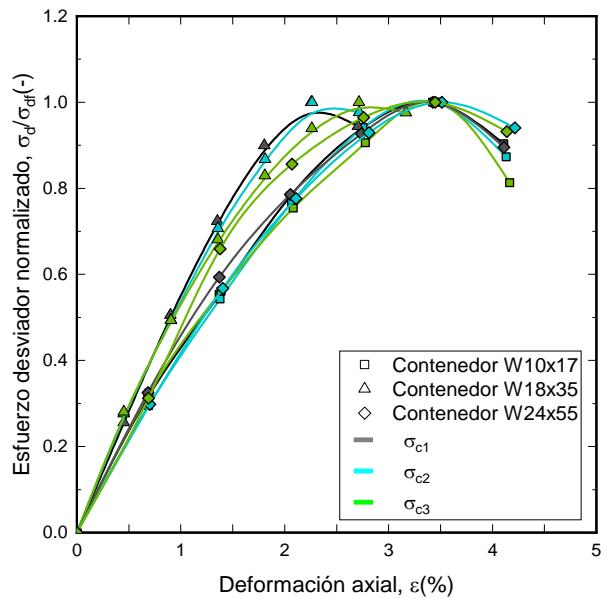


Figura 45. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas TxUU.

4.5. Hincado de pilotes.

Una vez finalizado el llenado de contenedores se prosiguió a hincar los pilotes, en total se hincaron 15 pilotes, 5 pilotes por contenedor, un grupo de 4 pilotes y 1 individual como se presenta en la **Figura 46**, las características de los contenedores varían únicamente en las dimensiones.

Para el hincado se utilizó una masa golpeadora con un peso de 3.82 kg, con golpes a una altura aproximada de 0.15 a 0.6 m, con un registro de número de golpes a cada 0.05 m de profundidad, hasta llegar a la profundidad deseada, los pilotes más grandes tuvieron de 36 a 102 golpes por cada 0.05 m con una altura de caída de 0.30 a 0.55 m, los medianos de 7 a 46 golpes con una altura de caída de 0.25 a 0.38 m, y los pequeños de 4 a 7 golpes con una altura de caída de 0.09 a 0.36 m

Para el hincado de los pilotes se construyó una guía de acero, la cual brinda ayuda para ubicar de forma correcta donde se hincará como se muestra en la **Figura 47**. Para iniciar el hincado se verificó que la masa golpeadora se encuentre centrada, finalmente se colocan placas guía de acero para asegurar que el pilote sea introducido de forma totalmente vertical y uniforme como se muestra en la **Figura 48**, una vez atendidas estas consideraciones se procede a iniciar el hincado. Los registros de hincado se muestran en la **Figura 49**.

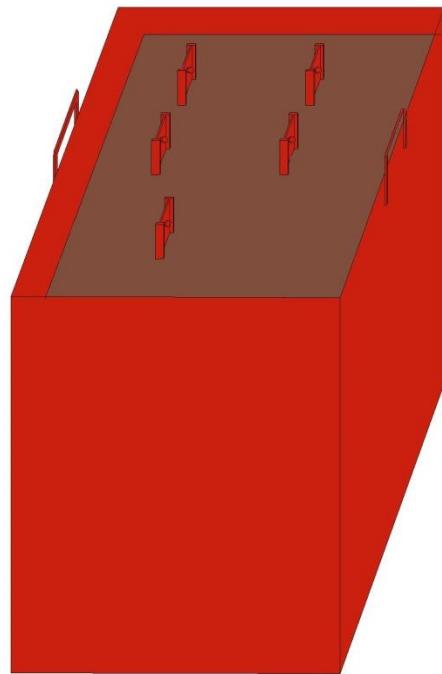


Figura 46. Acomodo de pilotes por contenedor.



Figura 47. Placa guía para hincado de pilotes.

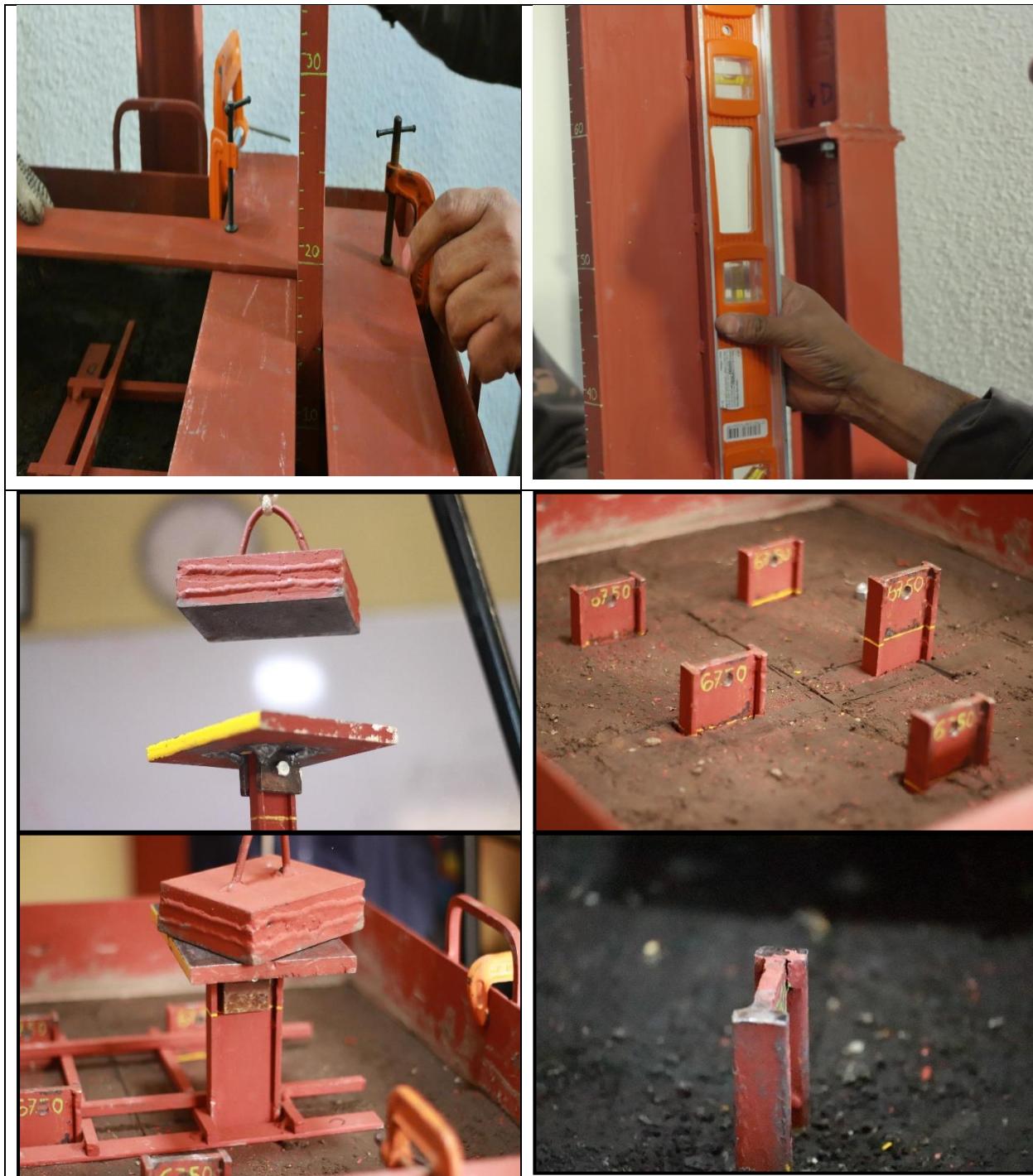


Figura 48. Acomodo, verificación de verticalidad e hincado de los pilotes.

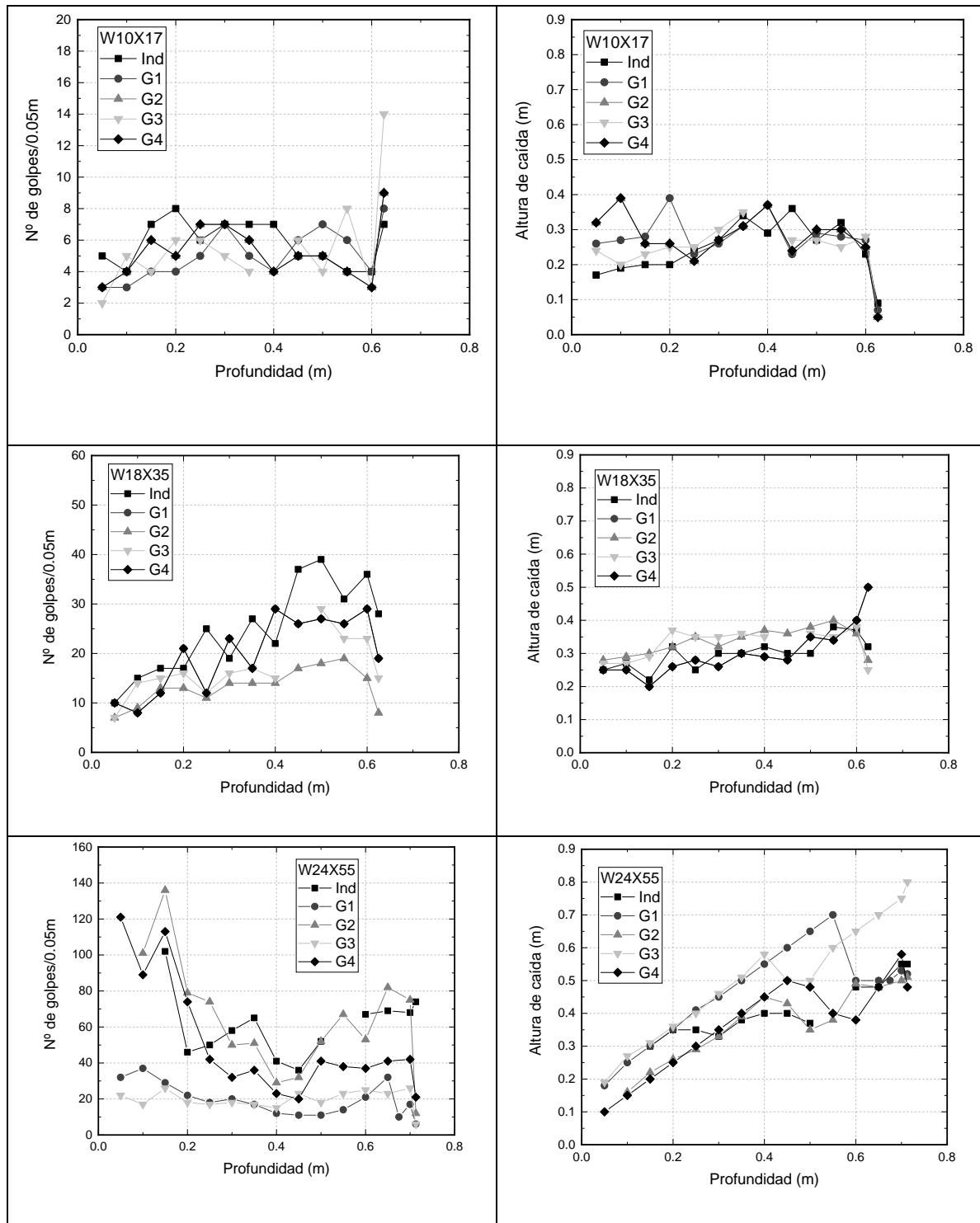


Figura 49. Número de golpes y altura de caída en el hincado.

5. EJECUCIÓN DE PRUEBAS DE CARGA.

Se realizaron pruebas de carga a compresión y extracción a grupos de 4 pilotes y a pilotes individuales. Una vez hincados los pilotes hubo un tiempo de espera de 14 días por contendor. Pasados los 14 días se ejecutaron las pruebas de compresión axial estática en los 3 contenedores. Una vez terminadas las pruebas y pasados 30 días de la instalación de los pilotes se volvieron a ejecutar pruebas de compresión axial a los 3 contenedores, para posteriormente proceder a ejecutar las pruebas de tensión axial estática (espera de 14 días adicionales). El programa de pruebas se presenta en la Tabla 10.

Las pruebas de compresión y extracción axial estática se ejecutaron con base a la norma ASTM D1143 y ASTM D3689, respectivamente.

Para la ejecución de las pruebas se inició con el acomodo del contenedor sobre las extremidades del marco, una vez acomodado y centrado se colocaron dos micrómetros en cada prueba, y se comenzó la prueba como se muestra en la **Figura 50**, se hizo tocar el gato con la placa base y se tomó lectura inicial, las lecturas tomadas fueron una lectura al instante de aplicar la carga deseada y una segunda lectura tres minutos después de aplicar la carga; una vez que el suelo falla se prosiguió a la descarga y se tomó lecturas de decremento hasta descargar la prueba por completo y de igual forma se tomaron lectura al instante de descargar y tres minutos después.



Figura 50. Prueba de compresión y tensión axial.

Tabla 10. Pruebas de carga ejecutadas.

ID del pilote	Pilotes	Tipo de prueba	
		Compresión	Tensión
W24x55	Grupo	x	x
	Individual	x	x
W18x35	Grupo	x	x
	Individual	x	x
W10x17	Grupo	x	x
	Individual	x	x

5.1. Contenedor 24X55.

La prueba al grupo de pilotes se ejecutó con incrementos de 392 N y tuvo una carga máxima de 7990 N con un desplazamiento de 10.64 mm, ver **Figura 51**. Durante la descarga se mantuvo el pilote con un desplazamiento permanente de 8.77 mm. La prueba de pilote individual se realizó con incrementos de 196 N y tuvo una carga máxima de 1838 N con un desplazamiento de 5.92 mm. Para la prueba de compresión axial a los 30 días para grupo de pilotes continuaron los mismos incrementos que fueron de 392 N para prueba en grupo de pilotes y obtuvo una carga máxima de 8565 N con un desplazamiento de 6.9 mm ver **Figura 52**. Con relación a la prueba de compresión axial a los 30 días para el grupo de pilotes se obtuvo una carga máxima de 8565 N con un desplazamiento acumulado de 15.67 mm, ver **Figura 53**. Si comparamos las dos etapas, se observa un comportamiento de endurecimiento del geo-material teniendo una rama elástica más pronunciada y una zona más marcada al pasar a la rama inelástica para el ensayo después de 30 días de haberse instalado el pilote. Se observó que la prueba de grupo de pilotes a los 30 días resistió más carga y con menor desplazamiento en comparación con la prueba de grupo a los 14 días, ver **Figura 53**.

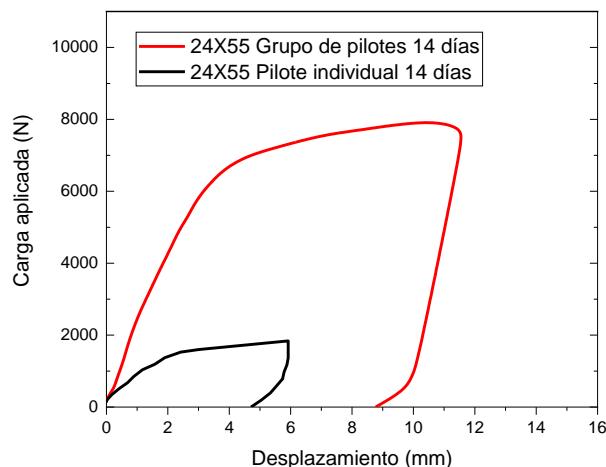


Figura 51. Curvas carga-desplazamiento de las pruebas de compresión para el grupo de cuatro pilotes y para el pilote individual, W24X55.

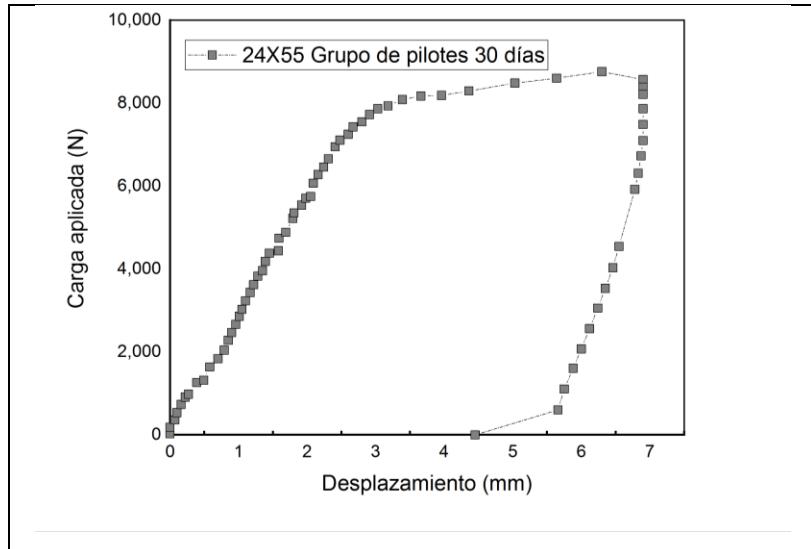


Figura 52. Curva de carga y desplazamiento de la prueba de carga axial a compresión para el contenedor W24X55 a los 30 días.

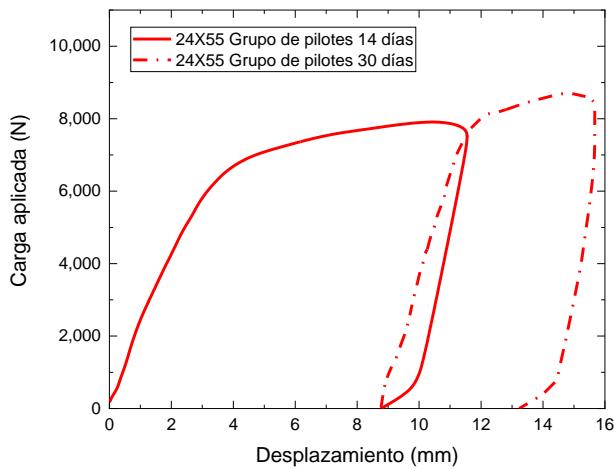


Figura 53. Comparación de las curvas de carga y desplazamiento de las pruebas de carga axial a compresión en grupo de pilotes.

Una vez finalizadas las pruebas de carga axial se continuó con las pruebas de extracción axial, incluidas para pilote individual de la cual se realizaron tensiones de 50 N y se obtuvo una carga máxima de tensión de 843 N con un desplazamiento de 14.54 mm. En la prueba de grupo de pilotes

con tensiones de 98 N se registró una carga máxima de tensión de 3538 N con un desplazamiento de 26.09 mm, ver **Figura 54**.

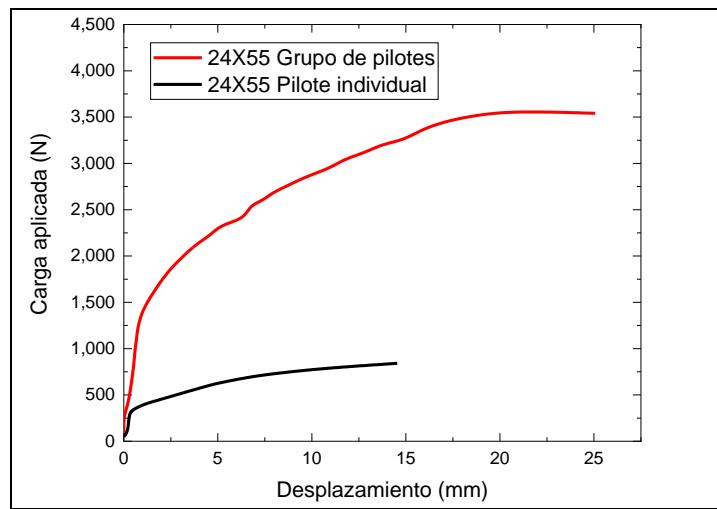


Figura 54. Curvas de carga y desplazamiento de las pruebas de carga extracción axial, W24X55.

5.2. Contenedor 18X35.

Para el contenedor 18X35 los resultados de compresión axial a 14 días fueron descartados, debido a que en dichas pruebas hubo dificultades en la ejecución de la misma, principalmente debido a la aplicación de la carga.

Para las pruebas a los 30 días de carga axial a compresión para pilote individual se tomaron incrementos de 98 N y se tuvo una carga máxima de 1393 N con un desplazamiento de 2.75 mm y 294 N. La prueba de grupo de pilotes tuvo una carga máxima de 5489 N con un desplazamiento de 7.51 mm ver **Figura 55**.

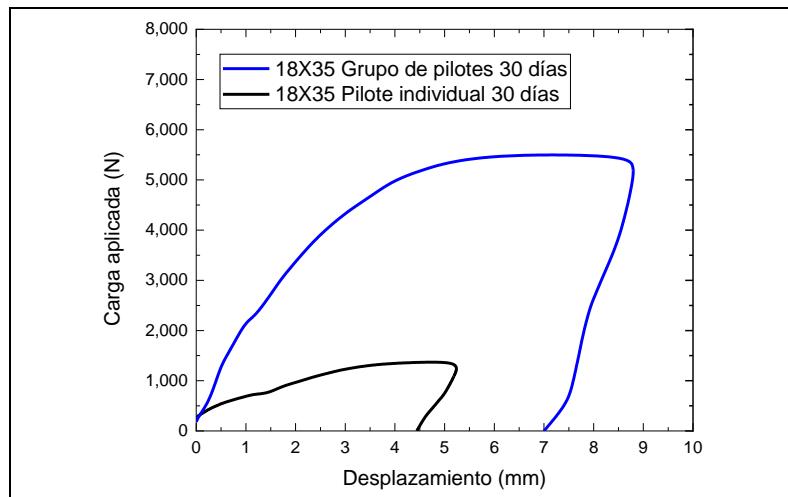


Figura 55. Curvas de carga y desplazamiento de las prueba de carga axial a compresión para el contenedor W18X35 a los 30 días.

Para las pruebas de extracción axial en el pilote individual, se realizaron incrementos de 50 N con una carga máxima de tensión de 706 N con un desplazamiento de 14.14 mm. En la prueba para el grupo de pilotes se realizaron incrementos de 98 N y se registró una carga máxima de tensión de 3028 N con un desplazamiento de 14.42 mm, ver **Figura 56**.

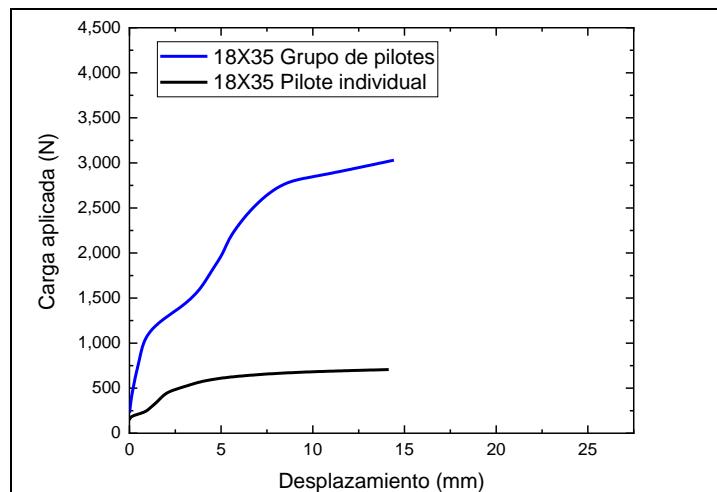


Figura 56. Curvas de carga y desplazamiento de las pruebas de carga extracción axial, W18X35.

5.3. Contenedor 10X17.

Para pruebas de carga de compresión axial a los 14 días en contenedor 10X17 los incrementos se tomaron de 98 N para pilotes individuales, pero una vez analizada la gráfica del pilote individual lo más recomendable sería dar incrementos más pequeños para poder observar una curva más representativa, de modo que se omite la prueba de pilote individual. En la prueba de grupo de pilotes se ejecutaron con incrementos de 98 N una carga máxima de 585 N con un desplazamiento de 1.42 mm, ver **Figura 57**. En la prueba de grupo de pilotes se tomaron incrementos de 98 N de la cual se tuvo una carga máxima de 978 N con un desplazamiento de 5.96 mm, ver **Figura 57**.

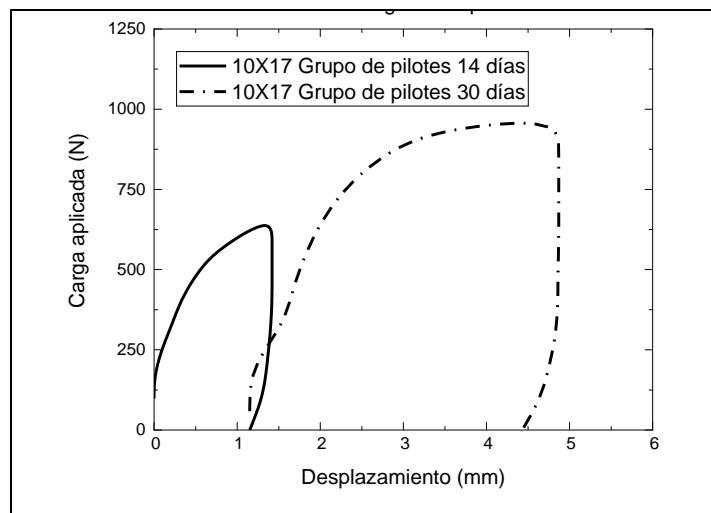


Figura 57. Curva de carga y desplazamiento de las pruebas de carga axial a compresión para el contenedor W10X17 a los 14 y 30 días.

6. RESULTADOS.

Una vez realizadas las pruebas se presentan los resultados de cada prueba en las siguientes tablas. Comparando el comportamiento del pilote individual con un pilote de grupo suponiendo que la carga transmitida en cada pilote es una cuarta parte de la carga total, se graficó la **Figura 58**. El comportamiento del pilote de grupo y el pilote individual tienen un comportamiento similar, aunque el pilote de grupo presenta un mayor desplazamiento y una carga máxima ligeramente mayor que la del pilote individual. En la rama elástica tanto en la carga como en la descarga, el pilote de grupo presenta un mayor desplazamiento que el pilote individual. La separación entre pilotes es de 3 veces el peralte, d , del pilote.

Tabla 11. Resumen de resultados de pruebas de carga axial a compresión.

Contenedor	Prueba de compresión pilote individual (14 días)		Prueba de compresión grupo de pilotes (14 días)		Prueba de compresión pilote individual (30 días)		Prueba de compresión grupo de pilotes (30 días)	
	Carga (N)	Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Desplazamiento (mm)
24X55	1838	5.92	7990	10.64	-	-	8565	6.9
18X35	-	-	-	-	1393	2.75	4762	8.74
10X17	156	2.54	585	1.42	243	8.32	978	5.96

Tabla 12. Resumen de resultados de pruebas de carga axial a tensión.

Contenedor	Prueba de extracción pilote individual		Prueba de extracción de grupo de pilotes	
	Carga (N)	Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Desplazamiento (mm)
24X55	843	14.54	3538	26.09
18X35	706	14.14	3028	14.42
10X17	291	4.66	613	4.78

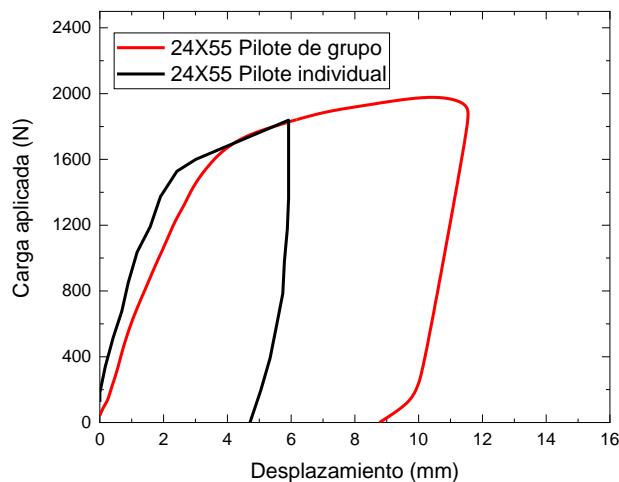


Figura 58. Comparación de las curvas de carga y desplazamiento de las pruebas de carga axial a compresión en pilote individual y grupo de pilotes dividido entre 4.

Similar a los pilotes W24x55, se comparó el comportamiento del pilote individual con un pilote de grupo suponiendo que la carga transmitida en cada pilote es una cuarta parte de la carga total, se graficó la **Figura 59**. El comportamiento del pilote de grupo y el pilote individual tienen un

comportamiento similar. En la rama elástica tanto en la carga como en la descarga, el pilote de grupo presenta un mayor desplazamiento que el pilote individual.

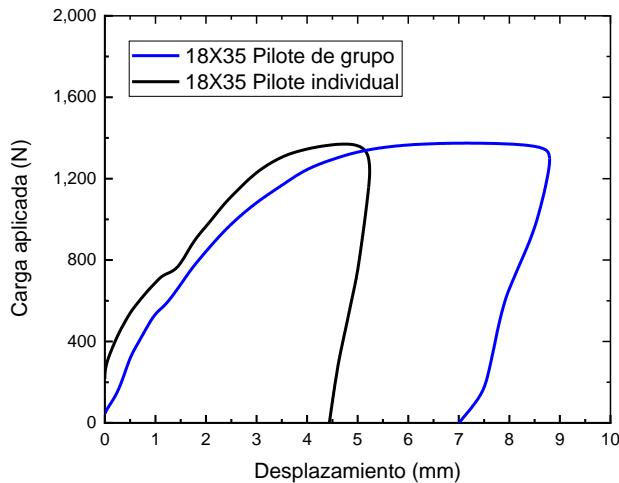


Figura 59. Comparación de las curvas de un pilote de grupo y el pilote individual, W18X35.

Para poder evaluar las diferencias en cuando a las cargas registradas en cada grupo de pilotes, es importante conocer la relación que guardan las áreas de las secciones trasversales de los pilotes prototipos proyectadas como un rectángulo d^*bf . Los pilotes W10x17 y W18x35 presentan áreas menores en un porcentaje de 75% y 38% con relación a los pilotes W24x55. Puesto que la sección transversal del pilote o una sección proyectada es la que nos aporta la resistencia por fuste del pilote, al reducir el tamaño de la sección del pilote, este disminuye su capacidad de carga. Sin embargo, de los resultados obtenidos, se sugiere que la capacidad de carga no es lineal, con relación a las dimensiones de la sección transversal del perfil IR como se puede ver en la **Figura 60**.

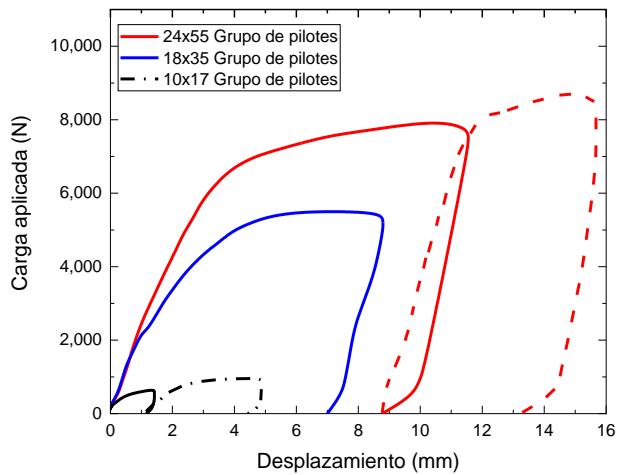


Figura 60. Comparación de las curvas carga-desplazamiento de las pruebas de compresión a los distintos grupos de pilotes.

Similar a las pruebas de compresión, se comparó el comportamiento del pilote individual con un pilote de grupo suponiendo que la carga de tensión transmitida en cada pilote es una cuarta parte de la carga total. Para ello, se graficaron los resultados de los pilotes W24x55 y W18x35 en la **Figura 61** y **Figura 62**, respectivamente. En estas gráficas se puede observar que el comportamiento del pilote de grupo y el pilote individual tienen un comportamiento similar, tanto en carga como en desplazamiento, siendo más semejantes las curvas, que para el caso de la carga a compresión. También podemos notar que las cargas máximas obtenidas a tensión son del orden del 44% y 55% para los grupos de pilotes y de 46% y 50%, para los pilotes individuales W24x55 y W18x35, respectivamente.

Si ahora comparamos la respuesta a tensión de los pilotes W24X55 y W18X35 para el grupo de pilotes, se puede observar que el comportamiento en término de curvas carga-desplazamiento son similares, siendo que la carga máxima en los pilotes de grupo W24X55 es mayor por 510 N y soportó un desplazamiento mayor del orden de 11 mm (**Figura 63**). Los pilotes individuales tienen el mismo comportamiento, la diferencia radica en que ambos pilotes W24X55 y W18X35 mostraron desplazamientos máximos similares (**Figura 64**).

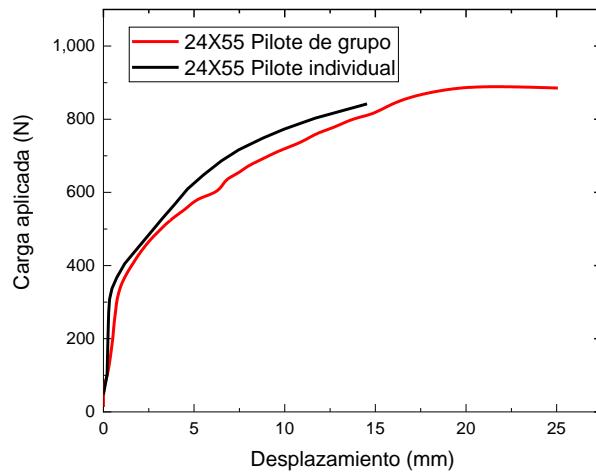


Figura 61. Comparación de las curvas a tensión de un pilote de grupo y el pilote individual, W24X55.

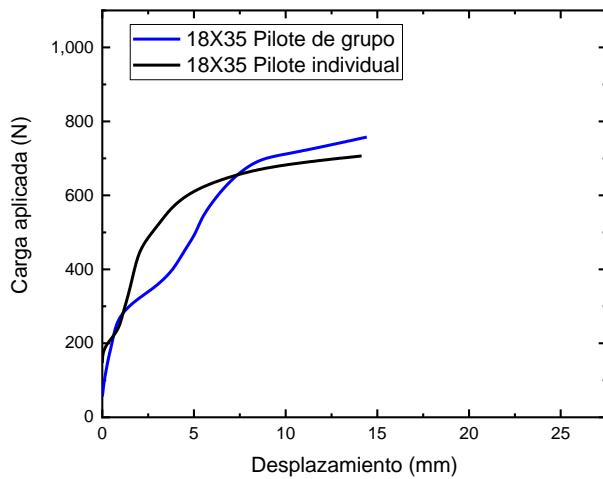


Figura 62. Comparación de las curvas a tensión de un pilote de grupo y el pilote individual, W18X35.

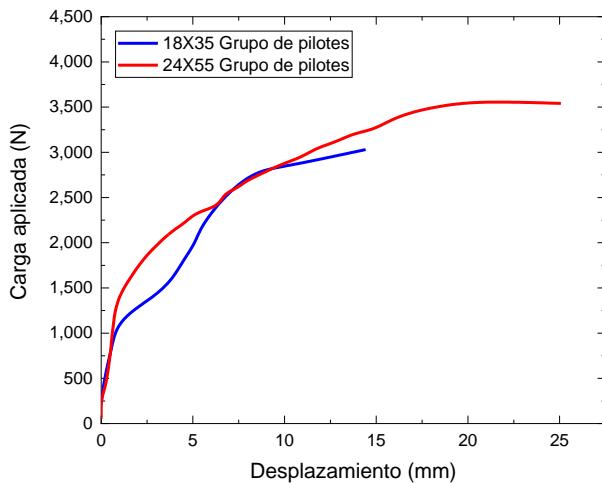


Figura 63. Comparación de curvas carga y desplazamiento de las pruebas de carga extracción axial para los grupos de pilotes W24X55 y W18X35.

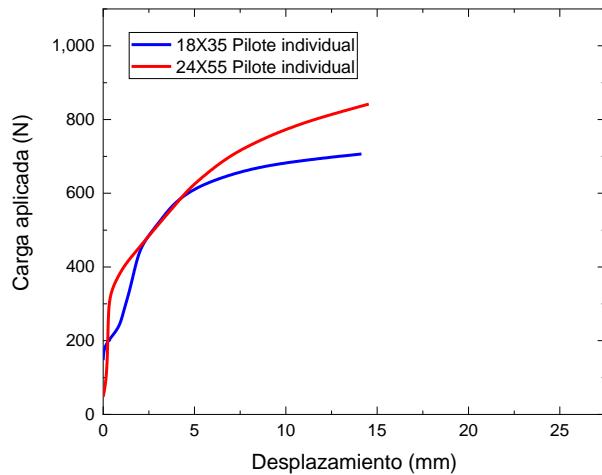


Figura 64. Comparación de curvas carga y desplazamiento de las pruebas de carga extracción axial para pilotes individuales W24X55 y W18X35.

Una vez terminadas las pruebas de tensión se trajeron los pilotes, observándose un comportamiento similar en los tres contenedores. Todos los pilotes presentaron una adherencia considerable de material en ambas caras del pilote (ver **Figura 65**). Durante la extracción se observó agrietamiento en el contorno del área de los pilotes. Además, en la mayoría de los casos se formó una especie de contorno de falla formado por los patines de los pilotes y el suelo, confirmando que la falla no se presenta en el perímetro del perfil IR, sino a través de un área “rectangular” formada entre el ancho, bf , de los patines y el peralte d . Adicional, se escanearon los pilotes para visualizar

los pilotes desde diferentes ángulos sin tener que manipularlos, y evitar en lo posible que el suelo adherido perdiera humedad y causar desprendimientos debido a la manipulación del pilote extraído. La **Figura 66** muestra imágenes obtenidos con el escáner 3D de algunos de los pilotes extraídos incluyendo los tres tipos de pilotes. En estos se observa suelo adherido al pilote a lo largo del pilote, principalmente en la parte baja, sin embargo, en muchos de los pilotes también se observó material cerca de la cabeza del pilote como se muestra en la **Figura 65****Figura 65**.

Finalmente, si evaluamos la eficiencia del grupo de pilotes, como se realiza comúnmente en la práctica, con la siguiente expresión:

$$\eta = Q_g / n Q_s \quad (1)$$

Donde, η es la eficiencia del grupo de pilotes; Q_g es la capacidad de carga axial del grupo de pilotes, n es el número de pilotes y Q_s es la capacidad de carga axial del pilote individual. Asumiendo que la máxima carga de los pilotes se obtiene cuando se dan los máximos desplazamientos en los pilotes individuales, se calcularon eficiencias a compresión entre 100% y 97% y en tensión de 97% y 107% para los W24X55 y W18X35, respectivamente.



Figura 65. Fotografías de suelo adherido al pilote al extraerlo después de la prueba de carga a tensión.

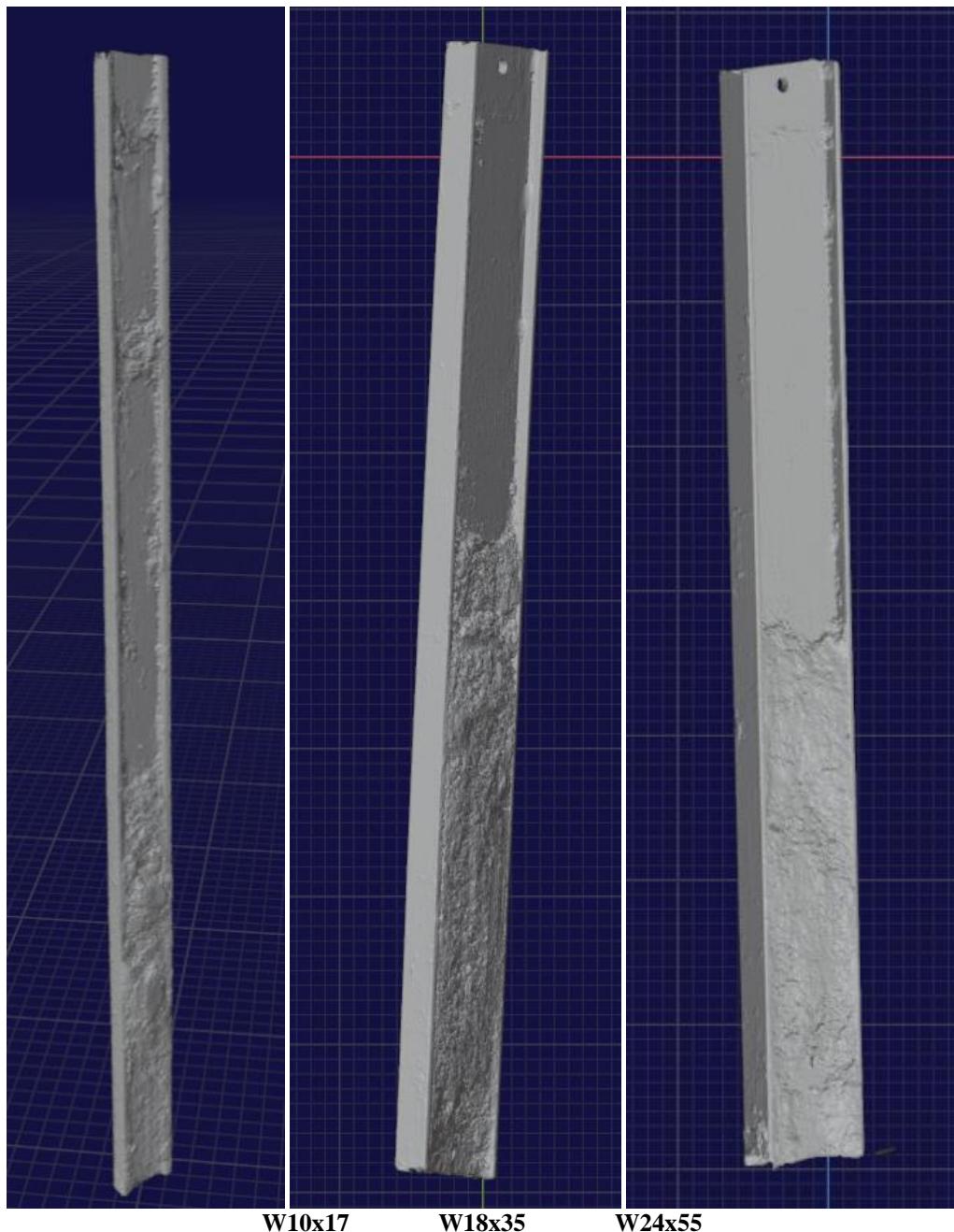


Figura 66. Fotografías de suelo adherido al pilote al extraerlo después de la prueba de carga a tensión.

7. CONCLUSIONES.

A partir de las pruebas de carga a compresión axial y pruebas a tensión axial en pilotes de acero tipo IR, tanto para grupos de cuatro pilotes e individuales realizados en el laboratorio, se puede concluir lo siguiente:

De la comparación de los pilotes de grupo e individuales en término de cargas últimas, se observó que la eficiencia de grupo es cercana al 100% para una separación entre pilotes de 3 veces el peralte, d , del pilote IR. Sin embargo, respecto a los desplazamientos obtenidos en los grupos de pilotes, se obtuvieron desplazamientos mayores que los medidos en las pruebas ejecutadas a los pilotes individuales, dando como resultado un impacto en los asentamientos obtenidos en pilotes de grupo con cargas cercanas a las de la falla. Se corroboró el aumento de capacidad de carga con el aumento del peralte de la sección transversal del pilote IR, este incremento no es lineal con relación al ancho/largo de la sección transversal. Los pilotes W24X55 y W18X35 tanto de grupo individuales soportaron cargas considerablemente mayores que los pilotes W10X17. Las cargas soportadas por los pilotes a tensión fueron de entre 44% y 55% de las cargas soportadas por los pilotes a compresión.

Los modelos a escala permitieron evaluar el comportamiento de los pilotes IR en grupo e individuales mediante un número importante de pruebas (6 pruebas a compresión y 6 pruebas a tensión) a un bajo costo, siendo una alternativa atractiva con relación a pruebas a escala real. No dejando de lado, que existen importantes limitaciones en los modelos a escala con relación a los efectos escala que se producen y en la media de lo posible se debe preferir la realización de pruebas a escala real.

Dentro de las investigaciones futuras, se puede evaluar el efecto de grupo en distancias menores de 3 veces el ancho, d . También se podrían realizar pruebas de carga axial en pilotes con tiempos más prolongados después de hincados los pilotes, aquí se evaluó el comportamiento con máximo 30 días después de hincado el pilote, se puede evaluar tiempos de hasta 6 meses o más.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bilal J. Noman, Safaa H. Abd-Awn, and Hassan O. Abbas. "Effect of Pile Spacing on Group Efficiency in Gypseous Soil", Civil Engineering Journal Vol. 5, No. 2, February 2019.
2. Choi, Yoon Seok, Jintae Lee, Monica Prezzi, and Rodrigo Salgado. "Response of pile groups driven in sand subjected to combined loads." Geotechnical Engineering 35, no. 4(2017): 1587-1604.doi: 10.1007/s10706-017-0194-z.
3. Comodromos, Emilios M., Christos T. Anagnostopoulos, and Michael K. Georgiadis. "Numerical assessment of axial pile group response base on load test." Computers and Geotechnics 30, no. 6 (2003): 505-515.doi: 10.1016/s0266-352x (03)00017-x.
4. Cruz E. "Efecto del envejecimiento en la capacidad de carga a extracción de modelos de pilote en arcilla marina", Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, septiembre 2003.
5. Gogoi, Nihar, Sanandam Bordoloi, and Binu Sharma. "A Model Study of Micropile Group Efficiency under Axial Loading Condition." International Journal of Civil Engineering Research. ISSN: 2278-3652, 2014.
6. Iai S. (1989). "Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field," Soils and Foundations, JSSMFE, 29(1), 105-118
7. Ibarra E. "Transferencia de carga axial por fricción de pilas coladas In Situ al subsuelo granular", Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería, UNAM, octubre 2013
8. Kana D., Boyce L. y Blaney G.W. "Development of a scale model for the dynamic interaction of a pile in clay", Journal of Energy Resources Technology, ASME, Vol 18 N° 3, pp 254-261.
9. Kline, S. (1965). "Similitude and Approximation Theory", McGraw-Hill, New York.
10. Langhaar, H. (1951). Dimensional Analysis and Theory of Models, John Wiley and Sons, New York.
11. Lee, Su-Hyung, and Choong-Ki Chung. "An experimental study of the interaction of vertically loaded pile groups in sand" Canadian Geotechnical Journal 42, no. 5 (2005): 1485-1493.doi: 10.1139/t05-068.
12. Luna O.J. "Diseño, construcción y puesta en operación de modelos de pilotes de fricción bajo cargas axiales estáticas y cíclicas", Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, septiembre 2002.
13. Meymand P. (1998). "Shaking Table Scale Model Tests of Nonlinear Soil-Pile-Superstructure Interaction In Soft Clay", Thesis for the degree of Doctor, University of California, Berkeley.
14. Moncarz, P. and Krawinkler, H. (1981). "Theory and Application of Experimental Model Analysis in Earthquake Engineering," Rpt. No. 50, John Blume Earthquake Eng. Ctr., Stanford Univ.
15. Rocha, M. (1957). "The Possibility of Solving Soil Mechanics Problems by Use of Models," Proc. 4th Intl. Conf. Soil Mech. Fdn. Eng., London, Vol. 1, 183-188.
16. Rocha Tehrani, Faraz S., Rodrigo Salgado, and Monica Prezzi. "Analysis of axial loading of pile groups in multilayered elastic soil." International Journal of Geomechanics 16, no.2 (2015): 04015063.doi: 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000540.
17. Roscoe, K. (1968). "Soils and Model Tests," *J. of Strain Analysis*, 3(1), 57-64

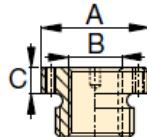
18. Tuan. "A Simplified Formular For Analysis Group Efficiency of Piles in Granular Soil". International Journal Scientific & Engineering Research, 7(7), 2016.
19. Zhang, Qian-quing, Shi-min Zhang, Fa-yun Liang, Qian Zhang, and Fei Xu. "Some observations of the influence factors on the response of pile groups." KSCE Journal of Civil Engineering 19, no. 6 (2015): 1667-1674.doi: 10.1007/s12205-014-1550-7.
20. Muni Budhu. (2015). Chapter 7 soil settlement. Soild Mechanics Fundamental (205-207). United Kingdom: WILEY Black.
21. ASTM D1143-Standard Test Methods for Deep Foundation Elements Under Static Axial Compressive Load
22. ASTM D3689- Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Tensile Load

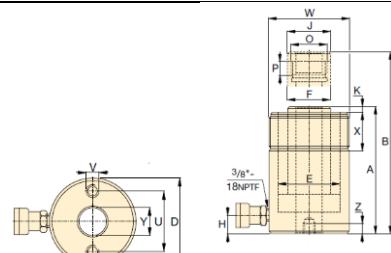
ANEXOS

Anexo A. Especificaciones de los equipos de medición y aplicación de carga

Cilindro de émbolo hueco, de simple acción

Marca: Enerpac. Serie: RCH, Capacidad: 30 Ton, Carrera: .31-6.13 Pulgadas. Diámetro de orificio central: .68-3.11 Pulgadas. Presión de operación máxima: 10,000 PSI.

Silletas huecas roscadas opcionales							
Tipo de silleta	No. De modelo del cilindro	No. De modelo de la silleta	Dimensiones de la silleta (pulg.)				
			A	B	C		
Silleta roscada	RCH-302	HP-3015	2.49	1 1/4-7	0.38		

Número de modelo	Peso	Área del hueco central Y (pulg)	Longitud de la rosca del collar X (pulg)	Rosca del collar W (pulg)	Longitud de la rosca del émbolo P (pulg)	Rosca interna del émbolo O (pulg)	
RCH-302	24	1.31	1.66	4 1/2" - 12	0.88	1 13/16" - 16 UN	

Extensión de la silleta desde el émbolo K (pulg)	Diám. De la silleta J (pulg)	Base a conexión de entrada de avance H (pulg)	Diám interno del émbolo F (pulg)	Diám interno del cilindro E (pulg)	Diám externo D (pulg)	Altura extendido B (pulg)	Altura del collar A (pulg)
0.38	2.5	0.85	2.5	3.5	4.5	9.53	7.03

Capacidad nominal del conjunto (toneladas)	Número de modelo del cilindro	Carrera (pulg)	Altura, retraído (pulg)	
30	RCH-302	2.5	7.03	

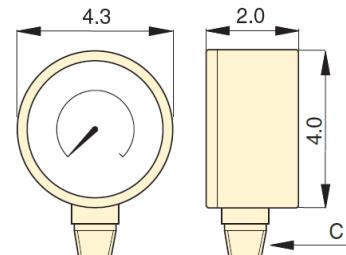
Conjunto de bombas.

Marca: Enerpac. Serie: SC, Capacidad: 5-100 Ton, Carrera: 1.50-14.25 Pulgadas. Presión máxima de servicio: 10,000 PSI.

Bomba seleccionada	Número de modelo	Manguera	Manómetro	Adaptador	
Manual	SCH-202H	HC-7206	GF-813P	GA-3	

Manómetro de presión.

Marca: Enerpac. Serie: GF, Intervalo de presión: 0- 15,000 PSI, Diámetro de la esfera: 4 pulgadas, Exactitud: % de la escala completa: $\pm 1\%$.



Para medir la presión de entrada a los cilindros, gatos o sistemas de alta presión. También sirven para todas las aplicaciones de pruebas.

Los manómetros de la serie GP son secos.

Calibración y tipo de manómetro					Unidades por división	Número de modelo*	Rosca C	Adaptador para el manómetro		
psi	bar	psi	libras	toneladas				131	Requerido	GA-1
-	-	0-10,000	-	0-23.5/36/65	100 psi, .5/.5/1 Ton.	GF-813P	1/2 NPTF	•	•	GA-3

Celda de carga

Marca: CALT, Modelo: DYLY-103, Capacidad: 5000 Kg.

Parámetro	Unidad	Las especificaciones técnicas
Sensibilidad	MV/V	$2,0 \pm 0,05$
No lineal	$\leq \% F \cdot S$	$\pm 0,03$
Histéresis	$\leq \% F \cdot S$	$\pm 0,03$
Repetibilidad	$\leq \% F \cdot S$	$\pm 0,03$
Creep	$\leq \% F \cdot S/3\text{min}$	$\pm 0,05$
Cero de salida	$\leq \% F \cdot S$	± 1
Coeficiente de temperatura	$\leq \% F \cdot S/10^\circ\text{C}$	$\pm 0,03$
Coeficiente de temperatura de la sensibilidad	$\leq \% F \cdot S/10^\circ\text{C}$	$\pm 0,04$
Rango de temperatura de funcionamiento	°C	$-20^\circ\text{C} \sim + 80^\circ\text{C}$
Resistencia de entrada	W	$350 \pm 20\text{W}$
Resistencia de salida	3	$350 \pm 5\text{W}$
Sobrecarga segura	$\leq \% F \cdot S$	$150\% F \cdot S$
Resistencia de aislamiento	MW	$\geq 5000\text{MW (500VDC)}$
Voltaje de excitación	V	10V-15V